

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA



**CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E ALTERABILIDADE
DOS COMPARTIMENTOS ENTABLAMENTO E COLUNATA
DE DERRAMES BASÁLTICOS DA PORÇÃO SETENTRIONAL
DA BACIA DO PARANÁ.**

RONALDO LIMA GOMES

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Rodrigues

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017380

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 17 / 05 / 01

Ass.: *Guilherme*

Tese apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutor em Engenharia – Área: Geotecnia".

São Carlos
2001

Class.	T050.6650
Cuti.	2483
Tombo	0103/01

st 1177432

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

G633c Gomes, Ronaldo Lima
Características tecnológicas e alterabilidade dos
compartimentos entablamento e colunata de derrames
basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná /
Ronaldo Lima Gomes. -- São Carlos, 2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área : Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Rodrigues.

1. Agregados. 2. Caracterização tecnológica.
3. Alterabilidade. I. Título.

Dedico esta obra a minha
esposa Larissa e ao meu
filho Pedro.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. José Eduardo Rodrigues pela orientação e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Dr. Antenor Braga Paraguassu, Dr. Lázaro Valentim Zuquette e Dr. Osni José Pejon pelos conselhos prestados.

Ao Dr. Ely Borges Frazão pelas importantes sugestões durante as diversas fases deste trabalho.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsa de estudo durante o programa de doutorado.

Aos responsáveis pelas pedreiras visitadas durante os trabalhos de campo.

Ao Eng. Herivelto M. dos Santos pela ajuda em assuntos relacionados a informática em todo desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Geól. Adilson do L. Leite, Geól. Marcos Mussø Laespiga e o Prof. Dr. Eduardo Collares pelas valiosas sugestões.

A todos os colegas do Departamento de Geotecnia da EESC-USP pelos bons momentos vividos nos últimos 6 anos.

Aos funcionários dos laboratórios do Departamento de Geotecnia, em especial ao Sr. Oscar dos Santos Neto e Sr. Antônio Garcia pela ajuda durante os trabalhos de campo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FOTOGRAFIAS.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS ESTUDADOS.....	4
CAPÍTULO 3 – MÉTODO EMPREGADO.....	68
CAPÍTULO 4 – A COMPARTIMENTAÇÃO ENTABLAMENTO-COLUNATA NA ÁREA EM ESTUDO.....	97
CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS ESTUDADOS.....	111
CAPÍTULO 6 – ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DOS MATÉRIAS ESTUDADOS.....	141
CAPÍTULO 7 – QUALIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS.....	185
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES.....	201
CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	206
ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
ANEXO II – ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE	
ANEXO III - QUALIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS	

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa do Trabalho.....	2
1.3 Objetivos do Trabalho.....	3

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

2.1 Introdução.....	4
2.2 A Bacia do Paraná e as Rochas Vulcânicas Básicas.....	4
2.2.1 <i>O Vulcanismo fissural da Bacia do Paraná</i>	7
2.2.1.1 <i>Aspectos petrológicos</i>	7
2.2.1.2 <i>Alteração Hidrotermal das Rochas Básicas da Bacia do Paraná</i>	8
2.2.1.3 <i>Litologia</i>	10
2.2.1.4 <i>Estruturas</i>	13
2.2.1.5 <i>A Compartimentação Entablamento-Colunata</i>	16
2.3 A Compartimentação Geológico-Geotécnica dos Derrames Basálticos.....	23
2.4 Caracterização Geológica de Materiais Rochosos para Construção.....	30
2.4.1 <i>Introdução</i>	30
2.4.2 <i>Ensaio Laboratoriais em Materiais Rochosos para Caracterização Tecnológica</i>	33
2.5 Aspectos Tecnológicos de Rochas Básicas.....	35
2.5.1 <i>Introdução</i>	35
2.5.2 <i>Terminologia</i>	37
2.5.3 <i>Fatores que influenciam a alteração e a alterabilidade de rochas basálticas</i>	38
2.5.3.1 <i>Fatores Intrínsecos</i>	40
2.5.3.1.1 <i>Composição mineralógica</i>	40
2.5.3.1.2 <i>Descontinuidades da rocha</i>	42
2.5.3.1.3 <i>Presença de argilominerais expansivos</i>	43
2.5.3.2 <i>Fatores Extrínsecos</i>	46
2.5.4 <i>Propriedades das Rochas Variáveis com a Alteração</i>	48
2.5.5 <i>Índices Quantificadores da Alteração</i>	50
2.5.5.1 <i>Índices físicos</i>	51
2.5.5.2 <i>Índices Geoquímicos</i>	53

2.5.5.3 Índices Petrográficos:.....	55
2.5.5.4 Índices Geomecânicos:.....	58
2.5.6 Quantificação da Alterabilidade de Rochas.....	59

CAPÍTULO 3 – MÉTODO EMPREGADO

3.1 Introdução.....	68
3.2 Materiais Estudados.....	69
3.3 Amostragem.....	71
3.4 Ensaios e Análises Adotados.....	72
3.5 Descrição dos Ensaios Realizados.....	77
3.5.1 Ensaios Petrográficos.....	77
3.5.2 Determinação de Índices Físicos.....	77
3.5.3 Ensaio de Compressão Uniaxial.....	78
3.5.4 Ensaio de Resistência ao Esmagamento.....	79
3.5.4.1 Aparelho.....	79
3.5.4.2 Corpo de prova.....	80
3.5.4.3 Procedimento.....	80
3.5.4.4 Avaliação.....	81
3.5.5 Ensaio de Resistência ao Abrasão Los Angeles.....	81
3.5.6 Ensaio de Sanidade com a Imersão de Fragmentos de Rocha em Etileno- glicol.....	83
3.5.7 Determinação da Adsorção de Azul de Metileno em Fragmentos de Rocha.....	83
3.5.8 Determinação do pH de Abrasão com Medida de Condutividade.....	85
3.5.8.1 Procedimento.....	86
3.5.8.2 Medida da Condutividade.....	88
3.5.9 Análise Química por Difratomia de Raios-X.....	89
3.5.10 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura com Uso de Microsonda Eletrônica.....	89
3.5.11 Ensaio de Alterabilidade Natural.....	90
3.5.12 Ensaio de Alterabilidade Acelerada – Umedecimento e secagem.....	91
3.5.13 Ensaio de Alterabilidade Acelerada – Lixiviação Contínua.....	94

CAPÍTULO 4 – A COMPARTIMENTAÇÃO ENTABLAMENTO-COLONATA NA ÁREA EM ESTUDO

4.1 Introdução.....	97
4.2 Reconhecimento dos Derrames.....	98

CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS ESTUDADOS

5.1 Características Petrográficas.....	111
5.2 Difractometria de Raios-X.....	122
5.3 Índices Físicos.....	124
5.4 Índices de Resistência.....	126
5.5 Imersão em Etileno-glicol.....	128
5.6 Adsorção de Azul de Metileno.....	131
5.7 pH de Abrasão.....	136
5.8 Condutividade de Abrasão.....	138

CAPÍTULO 6 – ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DOS MATERIAIS ESTUDADOS

6.1 Ensaio de Alteração Natural.....	141
6.1.1 Avaliação das Condições Ambientais no Processo de Alteração Natural.....	141
6.1.2 Análise da Perda de Massa.....	143
6.1.3 Índices de Alterabilidade.....	145
6.1.4 Análise pela Difractometria de Raios – X.....	152
6.1.5 Análise pela Adsorção de Azul de Metileno.....	153
6.2 Ensaio de Alteração Acelerada.....	155
6.2.1 Análise da Perda de Massa.....	156
6.2.2 Índices de Alterabilidade.....	160
6.2.3 Índice de Parker.....	166
6.2.4 Análise pela Difractometria de Raios – X.....	180
6.2.5 Análise pela Adsorção de Azul de Metileno.....	181
	182
6.3 Velocidades de Alteração e de Alterabilidade.....	182

CAPÍTULO 7 – QUALIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

7.1 Qualificação dos Materiais.....	185
7.2 Método Prático para Avaliação da Qualidade.....	190
7.3 Sistematização do Procedimento de Avaliação de Qualidade.....	192
7.3.1 <i>Sistemática de Avaliação</i>	192
7.3.1.1 <i>Análise Qualitativa</i>	193
7.3.1.2 <i>Análise Quantitativa</i>	195

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES

8.1 Quanto a Aplicação do Conceito Entablamento-Colunata.....	201
8.2 Quanto aos Ensaios de Caracterização Tecnológica.....	202
8.3 Quanto aos Ensaios de Alteração e Alterabilidade.....	203
8.4 Quanto a Qualificação dos Materiais.....	204
8.5 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	205

CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	206
------------------------------------------------	------------

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Localização da Bacia do Paraná: 1 - Embasamento cristalino; 2 – Sedimentos pré-vulcânicos; 3 - Formação Serra Geral; 4 – Sedimentos pós-vulcânicos; 5 - Estrutura tipo sinclinal; 6 - Estrutura tipo arco; 7 - Flexura; 8 – Alinhamentos tectônicos (adaptado de ZALAN et al; 1990).....	6
FIGURA 2	- Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Paraná (ZALAN et al; 1990)..	7
FIGURA 3	- Esquema e Fotomicrografia das zonas de alteração hidrotermal desenvolvida em torno das fissuras (Gonçalves, 1987).....	10
FIGURA 4	- Perfil típico de um derrame basáltico (adaptado de Bagolini, 1964).....	11
FIGURA 5	- Formação de brecha basáltica arenosa (adaptada de Bagolini, 1964 e Guidicini & Oliveira Campos, 1968).....	12
FIGURA 6	- Fases de formação do derrame secundário: 1) aparecimento de desnível superficial e ruptura por tração; 2) início da superposição; 3) formação do derrame secundário; 4) colapso e absorção do material por parte do derrame principal (adaptado de Guidicini, 1970).....	14
FIGURA 7	- Seção esquemática de uma estrutura circular (ARAÚJO, 1974).....	15
FIGURA 8	- Espiráculo: material injetado ao longo dos planos de fraqueza. 1) contato entre derrame intermediário e superior. 2) juntas colunares na base do derrame. 3) junta horizontal deformada pelo espiráculo. 4) alteração do basalto denso para vesicular em volta ao espiráculo e dos blocos envolvidos por ele (adaptada de Moller & Cabrera, 1976).....	15
FIGURA 9	- Estruturas tipo “Pillow lava” (Marques Filho et al; 1981).....	15
FIGURA 10	- Os três compartimentos de um derrame basáltico (Spry, 1962).....	17
FIGURA 11	- Derrame de lava recém extravasado originando, dependendo das condições climáticas, três distintas histórias de resfriamento ou consolidação: derrames Tipo I, Tipo II e Tipo III (adaptada de Souza Jr. 1992).....	19
FIGURA 12	- Perfil esquemático de derrame submetido a três diferentes situações paleo-ambientais.....	20
FIGURA 13	- Evolução de solidificação de derrame basáltico. As etapas C e D representam as condições para a formação da compartimentação entablamento-colunata.....	21
FIGURA 14	- Perfil de Intemperismo de derrames basáltico para porção setentrional da Bacia do Paraná (adaptado de Gonçalves, 1987).....	24
FIGURA 15	- Perfil de intemperismo de derrames Basálticos na Turquia (Tugrul & Gurpinar, 1997).....	25
FIGURA 16	- Variação da porosidade com o grau de alteração (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).....	25

FIGURA 17	- Variação do coeficiente de permeabilidade de diferentes tipos de basaltos com o grau de alteração (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).....	26
FIGURA 18	- Comparação esquemática das distribuições da permeabilidade em profundidade, entre maciços basálticos e os intrusivos (Oliveira et al; 1976).....	27
FIGURA 19	- Variação da resistência à compressão uniaxial em basaltos com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).....	28
FIGURA 20	- Variação da Resistência a tração com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).....	28
FIGURA 21	- Variação do Módulo de Elasticidade com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).	29
FIGURA 22	- Série de estabilidade química dos minerais nas condições superficiais (GOLDICH, 1938).....	41
FIGURA 23	- Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas (Ladeira & Minette, 1984a)	59
FIGURA 24	- Variação da alteração no tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração (Ladeira & Minette, 1984a).....	61
FIGURA 25	- Espectros de análises de raios-x, para cada nível de alteração, com os respectivos valores do Índice SAI (Houston & Smith, 1997).....	64
FIGURA 26	- Amostras estudadas classificadas segundo o método proposto por Arnold (1993).....	67
FIGURA 27	- Linha de durabilidade para rochas básicas (doleritos) da África do Sul para uso rodoviário (Weinert, 1984).....	67
FIGURA 28	- Fluxograma do procedimento metodológico, da amostragem e dos ensaios realizados nesta pesquisa.....	73
FIGURA 29	- Fluxograma dos ensaios de alteração natural e acelerada para avaliação da alterabilidade.....	76
FIGURA 30	- Aparelho utilizado para a determinação da resistência ao esmagamento modificada do material rochoso.....	80
FIGURA 31	- Mecanismo de hidratação dos feldspatos (Jenny's, 1950 apud Malomo, 1980).....	85
FIGURA 32	- Medida do pH de abrasão.....	87
FIGURA 33	- Gráfico do pH medido x concentração da solução.....	87

FIGURA 34	- Gráfico da condutividade medida x concentração da solução.....	88
FIGURA 35	- Aparelho "Soxhlet".....	95
FIGURA 36	- Perfil esquemático da representatividade dos compartimentos em derrames basálticos na área estudada.....	99
FIGURA 37	- Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de São carlos-SP.....	100
FIGURA 38	- Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de Araraquara-SP.	102
FIGURA 39	- Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de Ribeirão Preto-SP.	104
FIGURA 40	- Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos nos municípios de Jau-SP e São Manuel-SP.....	106
FIGURA 41	- Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de São carlos-SP.....	107
FIGURA 42	- Variação de tamanho dos cristais de plagioclásio e clinopiroxênio nas amostras estudadas.....	112
FIGURA 43	- Somatório das quantidades de argilominerais, vidro vulcânico e óxidos e hidróxidos de ferro das amostras estudadas.....	112
FIGURA 44	- Diagramas de análise química semi-quantitativa (M.E.V. com analisador) de pontos com ocorrência de sulfetos na amostra PAV.....	118
FIGURA 45	- Variação dos valores dos índices petrográficos K1 e K2 nas amostras estudadas.....	120
FIGURA 46	- Variação do valor de Rsm das amostras estudadas.....	121
FIGURA 47	- Relação entre os picos de intensidade do plagioclásio e do piroxênio. N= número de vezes que o pico de intensidade do plagioclásio é maior que o do piroxênio.....	122
FIGURA 48	- Valores do índice SAI das amostras estudadas.....	123
FIGURA 49	- Valores médios de massa específica seca aparente e de massa específica saturada aparente das amostras estudadas.....	124
FIGURA 50	- Valores médios de porosidade aparente e de absorção d'água das amostras estudadas.....	124
FIGURA 51	- Gráfico dos valores de resistência à compressão uniaxial das amostras estudadas.....	127
FIGURA 52	- Gráfico dos valores de resistência ao abrasão Los Angeles das amostras estudadas.....	127

FIGURA 53	- Gráfico dos valores de resistência ao esmagamento modificado das amostras estudadas.....	127
FIGURA 54	- Variação das perdas por imersão em etileno glicol.....	128
FIGURA 55	- Perdas por imersão em etileno glicol versus índices petrográficos K1 e K2.....	129
FIGURA 56	- Valores de adsorção de azul de metileno das amostras estudadas.....	131
FIGURA 57	- Valores de capacidade de troca catiônica das amostras estudadas.....	132
FIGURA 58	- Valores de capacidade de superfície específica das amostras estudadas.....	133
FIGURA 59	- Gráfico da relação entre SE-calculada e SE medida pelo ensaio de adsorção de azul de metileno.....	135
FIGURA 60	- Gráfico da relação entre SE-calculada e o Valor de adsorção de azul de metileno (MBA).....	135
FIGURA 61	- Valores de pH de abrasão das amostras estudadas.....	136
FIGURA 62	- Valores de condutividade das amostras estudadas.....	139
FIGURA 63	- Gráfico da precipitação pluviométrica e da evaporação durante os meses de desenvolvimento do ensaio de alteração natural.....	142
FIGURA 64	- Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração natural.....	144
FIGURA 65	- Valores de perda de massa para o ciclo 360 das amostras estudadas.....	145
FIGURA 66	- Evolução da resistência ao esmagamento modificado com os ciclos do ensaio de alteração natural.....	147
FIGURA 67	- Evolução do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração natural.....	148
FIGURA 68	- Valores do Índice $K\Delta t$ para o ciclo 360 das amostras estudadas.....	149
FIGURA 69	- Evolução do Índice de alterabilidade R_f com os ciclos do ensaio de alteração natural.	151
FIGURA 70	- Valores do Índice R_f para o ciclo 360 das amostras estudadas.	151
FIGURA 71	- Variação no valor do índice SAI com a ciclagem natural.....	153
FIGURA 72	- Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem natural.	154

FIGURA 73	- Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.	158
FIGURA 74	- Valores de perda de massa no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.....	158
FIGURA 75	- Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua.....	159
FIGURA 76	- Valores de perda de massa para o ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.....	159
FIGURA 77	- Evolução do índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.	160
FIGURA 78	- Valores do índice $K\Delta t$ no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.	161
FIGURA 79	- Evolução do índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por Lixiviação contínua.....	162
FIGURA 80	- Valores do índice $K\Delta t$ no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua. ...	162
FIGURA 81	- Evolução do índice de alterabilidade R_f com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem:	163
FIGURA 82	- Valores do índice R_f no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.	163
FIGURA 83	- Evolução do índice de alterabilidade R_f com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por Lixiviação contínua.....	164
FIGURA 84	- Valores do índice R_f no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.....	165
FIGURA 85	- Valores de pH de diferentes ciclos do ensaio por umedecimento e secagem.....	166
FIGURA 86	- Valores de condutividade de diferentes ciclos do ensaio por umedecimento e secagem.....	167
FIGURA 87	- Valores de pH de diferentes ciclos do ensaio por lixiviação contínua....	168
FIGURA 88	- Valores de condutividade de diferentes ciclos do ensaio por lixiviação contínua.....	169
FIGURA 89	- Evolução do índice de Parker com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.....	175
FIGURA 90	- Evolução do índice de Parker com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por Lixiviação contínua.....	175

FIGURA 91	- Evolução do índice de Parker modificado com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.....	177
FIGURA 92	- Evolução do índice de Parker modificado com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua.....	178
FIGURA 93	- Valores do Índice de Parker no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.....	178
FIGURA 94	- Valores do Índice de Parker modificado no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.....	179
FIGURA 95	- Valores do Índice de Parker no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.....	179
FIGURA 96	- Valores do Índice de Parker modificado no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.....	179
FIGURA 97	- Valores do Índice SAI das amostras estudadas.....	180
FIGURA 98	- Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem acelerada pelo umedecimento e secagem.....	181
FIGURA 99	- Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem acelerada pela lixiviação contínua.....	182
FIGURA 100	- Fluxograma de avaliação quantitativa e qualitativa.....	193
FIGURA 101	- Formulário para escolha do tipo de análise adotada.....	193
FIGURA 102	- Formulários “Características do Maciço Rochoso” e “Características Físicas e Mineralógicas”.....	194
FIGURA 103	- Formulário “Relatório Qualitativo”.....	195
FIGURA 104	- Formulário “Índices Físicos”.....	196
FIGURA 105	- Formulário “Resistência Mecânica”.....	197
FIGURA 106	- Formulário “Sanidade e Adsorção”.....	197
FIGURA 107	- Formulário “Índices Petrográficos”.....	197
FIGURA 108	- Formulário “Alterabilidade”.....	198
FIGURA 109	- Formulário “Relatório”.....	198
FIGURA 110	- Formulário “Relatório”.....	199
FIGURA 111	- Formulário “Uso do Material”.....	200
FIGURA 112	- Formulário “Ensaio Recomendados e Especificações: Agregados para Concreto Hidráulico”.....	200

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Verhoef & Van De Wall; 1998).	34
TABELA 2	- Processos de degradação de materiais rochosos no tempo “geológico” e de “Engenharia”(adaptado de Fookes et al; 1991).....	35
TABELA 3	- Resumo de casos históricos de deterioração de materiais rochosos utilizados em construção civil (adaptado de Fookes et al; 1991).....	36
TABELA 4	- Relação entre as velocidades das ondas sísmicas e qualidade do maciço.....	53
TABELA 5	- Índices de alterabilidade (adaptada de Marrano, 1997).....	62
TABELA 6	- Grau de Alteração do basalto e sua relação com o Índice de Alteração da Esmectita (Houston & Smith, 1997).....	63
TABELA 7	- Proposta de estimativa da qualidade do material rochoso através dos valores de RDIS (Fookes et al; 1988).....	65
TABELA 8	- Valores de M e de T para o cálculo do Rsm (adaptado de Cole & Sandy, 1980).....	66
TABELA 9	- Pedreiras visitadas durante a etapa de campo.....	70
TABELA 10	- Amostras estudadas.....	71
TABELA 11	- Tipos de materiais e respectivas quantidades utilizadas para os ensaios de caracterização tecnológica e de alterabilidade.....	72
TABELA 12	- Graduações e massas da amostra usadas no ensaio de abrasão Los Angeles.....	82
TABELA 13	- Diferentes quantidades de rocha pulverizada e suas respectivas concentrações na solução preparada para a medida do pH de abrasão...	87
TABELA 14	- Características petrográficas das amostras estudadas.....	113
TABELA 15	- Características petrográficas quantificadas por análises modais (%).	119
TABELA 16	- Valores de Rsm para as amostra estudadas.....	121
TABELA 17	- Valores para o cálculo do índice SAI.....	123
TABELA 18	- Valores dos índices físicos das amostras estudadas.....	125
TABELA 19	- Valores de resistência à compressão uniaxial, resistência ao abrasão Los Angeles e resistência ao esmagamento modificado das amostras estudadas.....	126

TABELA 20	- Resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno.....	131
TABELA 21	- Cálculo da superfície específica teórica das amostras estudadas.....	135
TABELA 22	- Valores de pH de abrasão das amostras estudadas.....	136
TABELA 23	- Valores de condutividade das amostras estudadas.....	139
TABELA 24	- Porcentagem de perda de massa com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.....	144
TABELA 25	- Valores de resistência ao esmagamento modificado com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.....	146
TABELA 26	- Valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ (Farjallat, 1972) com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.....	148
TABELA 27	- Valores do índice de alterabilidade R_f (Yoshida, 1972) com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.....	150
TABELA 28	- Valores para o cálculo do índice SAI.....	152
TABELA 29	- Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno nos ciclos 120, 240 e 360 do ensaio de alteração natural.....	153
TABELA 30	- Resultados do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.....	156
TABELA 31	- Resultados do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua com o uso do extrator "Soxhlet".....	157
TABELA 32	- Valores de pH medidos com a evolução da ciclagem por umedecimento e secagem.....	166
TABELA 33	- Valores de condutividade medidos com a evolução da ciclagem por umedecimento e secagem.....	167
TABELA 34	- Valores de pH medidos com a evolução da ciclagem por lixiviação contínua.....	168
TABELA 35	- Valores de condutividade medidos com a evolução da ciclagem por lixiviação contínua.....	169
TABELA 36	- Valores de concentração de K^+ nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.....	170
TABELA 37	- Valores de concentração de Ca^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.....	170
TABELA 38	- Valores de concentração de Na^+ nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.....	171
TABELA 39	- Valores de concentração de Mg^{++} nos ciclos do ensaio de alteração	

	por umedecimento e secagem.....	171
TABELA 40	- Valores de concentração de K^+ nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	171
TABELA 41	- Valores de concentração de Ca^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	172
TABELA 42	- Valores de concentração de Na^+ nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	172
TABELA 43	- Valores de concentração de Mg^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	172
TABELA 44	- Valores do Índice de Parker nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.....	173
TABELA 45	- Valores do Índice de Parker nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	173
TABELA 46	- Porcentagem dos elementos K, Na, Ca e Mg nas amostras.....	176
TABELA 47	- Valores do Índice de Parker modificado nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.....	177
TABELA 48	- Valores do Índice de Parker modificado nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.....	177
TABELA 49	- Relações, em porcentagem, entre os valores de perda de massa, do índice $K\Delta t$, do índice R_f e do índice de Parker, entre os ensaios de alteração nos ciclos 60 e 100.....	183
TABELA 50	- Média dos valores positivos das relações “umedecimento e secagem / natural” e “soxhlet / Umedecimento e secagem”.....	184
TABELA 51	- Ensaios recomendados e especificações para agregados, segundo a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.....	185
TABELA 52	- Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Verhoef & Van De Wall, 1998 e IPT, 1980).....	186
TABELA 53	- Respetivos pesos dos resultados associados a classificação da qualidade das amostras estudadas.....	188
TABELA 54	- Valores do índice de correlação R^2 e respectivas equações de correlação entre os resultados de ensaios tecnológicos com o índice de alterabilidade $K\Delta t$	190
TABELA 55	- Valores utilizados para o cálculo do índice $K\Delta t_{calc}$	191

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTO 1	- Talude da Pedreira St. Antônio (Araraquara-SP) apresentando os compartimentos Entablamento (parte superior) e Colunata Inferior (parte inferior).....	17
FOTO 2	- Fotomicrografia de lâmina delgada de rocha basáltica do entablamento.	17
FOTO 3	- Fotomicrografia de lâmina delgada de rocha basáltica do colunata inferior.	17
FOTO 4	- Detalhe de bloco de rocha proveniente do compartimento entablamento. Notar o elevado grau de fraturamento.....	18
FOTO 5	- Talude da Pedreira INDERP (Ribeirão Preto-SP) apresentando faixas alternadas de entablamento e colunata.....	22
FOTO 6	- Aparelho utilizado para a determinação da resistência ao esmagamento modificada do material rochoso.....	81
FOTO 7	- Disposição das amostras para o ensaio de alteração natural.....	91
FOTO 8	- Ensaio de umedecimento e secagem.....	92
FOTO 9	- Detalhe dos recipientes contendo a amostra no momento da secagem...	93
FOTO 10	- Aparelho ‘Soxhlet’.....	95
FOTO 11	- Termos informais utilizados para descrever os compartimentos colunata e entablamento e o basalto vesículo-amigdaloidal; a) basalto colunar, b) basalto granular, c) basalto “olho de sapo”.....	99
FOTO 12	- Diaclasamento colunar (Pedreira da Rod. Washington Luiz, S. Carlos-SP).....	101
FOTO 13	- Aspecto do intenso fraturamento do compartimento entablamento (Pedreira da Prefeitura, S. Carlos-SP).....	101
FOTO 14	- Compartimentos colunata inferior e entablamento (Pedreira Santo Antônio, Araraquara – SP).....	102
FOTO 15	- Compartimento entablamento, ao fundo, e colunata, a direita (Pedreira Ouro Fino , Araraquara– SP).....	103
FOTO 16	- Detalhe do desmonte do compartimento entablamento (Pedreira Leão e Leão , Araraquara– SP).....	103
FOTO 17	- Vista parcial da Pedreira INDERP (Ribeirão Preto – SP). Notar a continuidade do contato entre os compartimentos entablamento e colunata.....	104

FOTO 18	- Alternância de compartimentos entablamento e colunata (Pedreira INDERP, Ribeirão Preto – SP).....	105
FOTO 19	- Afloramento de basalto vesículo amigdaloidal (Pedreira SAID, Ribeirão Preto – SP).	105
FOTO 20	- Compartimento entablamento (Pedreira SAID, Ribeirão Preto – SP)...	105
FOTO 21	- Compartimento colunata (Pedreira Bica de Pedra, Jaú – SP).....	106
FOTO 22	- Vista parcial da Pedreira Pedralite (São Manuel-SP). Notar o espesso manto de intemperismo resultante da decomposição do compartimento colunata.....	107
FOTO 23	- Aspecto “granular” dos basaltos do entablamento, quando desmontados. (Pedreira Siqueira, Assis – SP).....	108
FOTO 24	- Vista parcial da Pedreira Ws (Assis-SP). Notar o grande espaçamento entre as colunas.	108
FOTO 25	- Fotomicrografia da amostra ANT, proveniente do compartimento entablamento. Notar a grande quantidade de matriz vítrea dada pela tonalidade escura. Nicois cruzados.....	115
FOTO 26	- Fotomicrografia da amostra SAN. As manchas acastanhadas atestam a presença de grande quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro. Nicois cruzados.....	115
FOTO 27	- Fotomicrografia da amostra SAN mostrando, de forma simplificada, as fases de alteração hidrotermal do vidro vulcânico. (A: vidro vulcânico hidratado; B: Assembléias mineralógicas de alteração compostas por argilominerais (esmectitas tipo nontronita e saponitas e micas tipo celadonitas); C: Zona de precipitações de zeólitas). Nicois cruzados.	116
FOTO 28	- Fotomicrografia da amostra ANT. Notar, em coloração verde acastanhada, a presença de argilominerais (esmectita/nontronita) decorrentes da alteração do vidro vulcânico. Nicois cruzados.....	116
FOTO 29	- Fotomicrografia de zona de alteração hidrotermal desenvolvida em uma microfissura. Nas bordas da microfissura predominam argilominerais do tipo celadonita/saponita enquanto que sua parte central constitui-se de precipitações de sílica (calcedônia e/ou opala). Amostra SIQ. Nicois cruzados.....	117
FOTO 30	- Fotomicrografia de fenocristal de plagioclásio, presente na amostra SIQ, apresentando microfraturas preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro. Nicois cruzados.....	117
FOTO 31	- Fotomicrografia de vesícula presente na amostra do basalto vesículo amigdaloidal. Nicois cruzados.....	117
FOTO 32	- Imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura	

	apresentando, em tonalidades mais claras, a ocorrência de sulfeto de ferro na amostra PAV. As setas indicam os pontos onde foram realizadas as análises químicas por microsonda eletrônica.....	118
FOTO 33	- Imagem gerada pelo microscópio eletrônico de varredura apresentando o aparecimento de cristais de sulfato de cálcio na superfície da amostra PAV, no ciclo 70 do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.....	174

RESUMO

GOMES, R.L. (2001). Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da Bacia do Paraná. São Carlos, (Tese de Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

Este trabalho apresenta os resultados da caracterização tecnológica e da avaliação da alterabilidade realizada em amostras provenientes dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos localizados na porção setentrional da Bacia do Paraná, mais precisamente, em afloramentos associados a frentes de lavra de algumas pedreiras do Estado de São Paulo. Além de ensaios tradicionais de caracterização tecnológica, foram realizados ensaios alternativos como a adsorção de azul de metileno e o pH e a condutividade de abrasão. Ensaios de alteração, tanto natural quanto acelerada, foram realizados e comparados quantitativamente. No que se refere aos ensaios de alteração acelerada, os líquidos de imersão foram monitorados em relação a concentração de íons de alguns elementos alcalinos e alcalinos terrosos. A análise conjunta destas informações foi útil para a qualificação dos materiais e quantificação de suas alterabilidades, proporcionando a análise comparativa entre os compartimentos entablamento e colunata no que tange ao seu uso como agregados em construção civil.

Palavras-Chave: Agregados, Caracterização tecnológica, Alterabilidade, Basaltos, Materiais de Construção.

ABSTRACT

GOMES, R.L. (2001). Technological characterization and alterability assessment of the entablature and colonnade compartments in basaltic rocks from the northern region of Paraná Basin, Brazil. São Carlos, (Tese de Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

This work presents the technological characterization and alterability assessment of samples from the entablature-colonnade compartmentation of the basaltic rocks localized in the northern region of the Paraná Basin, Brazil. Besides traditional technological characterization tests, it was performed alternative tests (methylene blue adsorption, abrasive pH and abrasive conductivity). Some natural and artificial alterability tests were also performed for a quantitative comparison. The immersion fluids from the artificial alteration tests were monitored in respect to alkaline and earth alkaline chemicals concentration. These information were used for material qualification and assessment of alterability, supplying a comparative analysis between the entablature and colonnade compartments in respect to its use as aggregates for civil construction.

Keywords: Aggregates, technological characterization, alterability, basalts, Construction material.

Capítulo 1:

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nas últimas quatro décadas as rochas básicas da Bacia do Paraná foram bastante estudadas com o objetivo de avaliar o seu uso como material de construção civil, principalmente quando da implantação de obras de grande porte, tais como usinas hidrelétricas, rodovias e ferrovias nas regiões sul e sudeste do Brasil. Estes estudos forneceram, principalmente, informações a respeito das suas características geotécnicas e tecnológicas, bem como das modificações em suas propriedades mecânicas ao longo do tempo.

Em alguns casos de utilização de rochas básicas como material de construção, notou-se que algumas delas sofriam degradação durante os processos de estocagem, de preparação, de transporte e muitas vezes até após a execução da obra. Estas modificações nas características do material rochoso são atribuídas a fatores intrínsecos relacionados à natureza da rocha (composição mineralógica, estado microfissural e características de textura, estrutura, granulação e grau de cimentação) e a fatores extrínsecos, referentes ao meio ambiente no qual a alteração se processa que reflete, em última análise, tanto as condições climáticas gerais quanto o meio específico onde ela se encontra. A alterabilidade, que depende da aptidão para uma maior ou menor modificação de suas propriedades ao longo do tempo é a principal responsável pelos problemas ligados ao uso de basaltos como material de construção. Do ponto de vista da engenharia civil estas variações refletem-se, principalmente, na diminuição da resistência mecânica da rocha.

Frazão e Caruso (1983) citam que dentre os minerais secundários dos basaltos, os argilominerais talvez sejam os que mais contribuam para a alteração. Os constituintes vítreos, comuns nos basaltos, podem, por decomposição e recristalização originar argilominerais expansivos do grupo das esmectitas. Um outro relevante fator intrínseco que

influencia na alteração e alterabilidade das rochas é a presença de descontinuidades. A permeabilidade decorrente dessas estruturas favorece o contato da água com os argilominerais expansivos localizados tanto nos poros quanto nas fissuras da rocha. Como consequência, ocorre o aumento de volume dos argilominerais pela absorção d'água associado ao desenvolvimento de pressão de expansão. Este fenômeno pode levar a rocha à desagregação.

1.2 Justificativa do Trabalho

Apesar da grande quantidade de informações sobre o uso de materiais provenientes de rochas básicas em construção civil, alguns temas a respeito destas rochas ainda são pouco explorados e consequentemente pouco divulgados. Um destes temas refere-se ao uso da compartimentação entablamento-colunata como modelo de gênese e compartimentação geológica geotécnica de derrames basálticos, o qual foi aplicado primeiramente em derrames da Bacia do Paraná por Souza Jr. (1992). Segundo este autor, com exceção das porções periféricas de natureza amigdaloidal, determinados derrames basálticos apresentam compartimentação estrutural dividida em dois sistemas distintos de diaclasamento primário, denominados de colunata e entablamento.

De forma geral, ao núcleo de derrames basálticos deve corresponder uma rocha de textura grosseira e com um maior espaçamento entre as fraturas, devido à menor velocidade de resfriamento da lava no interior do derrame. Por outro lado, as zonas periféricas, consequentemente, por apresentarem resfriamento mais rápido, caracterizam-se pelo diaclasamento mais expressivo e pela textura fina a vítrea dos seus minerais constituintes. O fato curioso é, que no entablamento, localizado no interior do derrame, verifica-se o inverso, pois ele apresenta características de grau de fraturamento e textura mineral compatíveis com maior velocidade de resfriamento da lava. No modelo de gênese, concebido por Long & Wood (1986), considera-se que os derrames foram cobertos por água de superfície logo após o seu extravasamento. Esta água percolaria pela crosta superficial já consolidada do derrame penetrando até o seu interior, o que promoveria o rápido resfriamento e, consequentemente, o alto grau de fraturamento.

A grande maioria das publicações científicas produzida nas últimas décadas que trata da caracterização tecnológica e da alterabilidade de materiais rochosos provenientes de derrames basálticos, não aborda nem utiliza o conceito da compartimentação entablamento-

colunata. Este fato faz suscitar algumas interrogações a respeito destes materiais, tais como: - A grande quantidade de matéria vítrea do compartimento entablado comprometerá a utilização deste material em construção civil? – Quais os respectivos comportamentos perante ensaios de alteração e conseqüentemente às suas alterabilidades? Porém, a facilidade de identificação dos compartimentos em campo, faz com que este conceito seja utilizado, de forma inconsciente, pelos profissionais ligados à exploração de basaltos. O basalto compacto é conhecido informalmente como “colunar” enquanto que o entablado, mais fraturado, é denominado de “granulado” ou “granular”. Já os basaltos vesiculares são chamados de “olho de sapo”.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho objetiva a caracterização tecnológica e a quantificação da alterabilidade destes compartimentos, visando gerar informações quantitativas que possam ser utilizadas para diversas finalidades do ramo da extração de agregados. Para tanto, o método de estudo aplicado neste trabalho foi direcionado para a realização das seguintes metas:

- Adoção do conceito entablamento-colunata como modelo de gênese e compartimentação geológico-geotécnica dos derrames basálticos estudados e, conseqüentemente, a avaliação do potencial de uso deste conceito por profissionais ligados à exploração de basaltos;
- Avaliação e comparação das características tecnológicas e de alterabilidade dos materiais rochosos dos diferentes compartimentos entablamento-colunata. Pesquisas anteriores revelaram, baseadas em aspectos texturais, estruturais e mineralógicos, que agregados provenientes do compartimento entablamento podem apresentar problemas quando utilizados.
- Proposta de sistemática de avaliação da qualidade tecnológica de materiais rochosos a partir da indicação de índices físicos mecânicos ou químicos. Esta proposta deve levar em consideração a facilidade de obtenção dos dados sem prejuízo da avaliação.

Capítulo 2:

CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

2.1 Introdução

Este capítulo tem o objetivo de sintetizar o conhecimento referente as rochas básicas, no que diz respeito, principalmente, ao seu contexto geológico, geotécnico e tecnológico. Para tanto, aborda temas como a sinopse de evolução da Bacia do Paraná, as características litológicas de derrames basálticos, o uso da compartimentação entablamento-colunata como modelo de gênese e compartimentação geológico-geotécnica de derrames basálticos, as características geológico-geotécnicas de rochas e maciços basálticos, as características tecnológicas, a alterabilidade e o uso dos materiais rochosos basálticos como agregados em construção civil.

2.2 A Bacia do Paraná e as Rochas Vulcânicas Básicas

A Bacia do Paraná, situada no centro leste da América do Sul, abrange uma área de aproximadamente 1.600.000 km², distribuída pelos territórios do Brasil (1.000.000 km² abrangendo os Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiânia, representada pelo Grupo Paraná (Fm. Ponta Grossa).

O Eo-Carbonífero representa um dos períodos de maior instabilidade na evolução da Bacia do Paraná, originando a discordância regional correspondente ao maior hiato deposicional da bacia. Esta instabilidade foi desencadeada pela epirogênese positiva e pela presença de pacotes de gelo. Apenas no Carbonífero superior é reiniciada a deposição, sob marcante influência do clima glacial. Depositaram-se assim, os sedimentos do Grupo Itararé, na parte sul da Bacia e a Formação Aquidauana na parte norte. Com o degelo iniciou-se a deposição do Grupo Guatá, através da Formação Rio Bonito, cujos arenitos, siltitos e folhelhos associados a níveis de carvão, caracterizam deposição em ambiente deltáico. Ainda durante o Permiano foram depositados, em ambiente de mar restrito, folhelhos, arenitos, margas e

calcários, constituindo a Formação Irati.

As Formações Teresina e Rio do Rastro constituem a parte superior da seqüência Permo-Carbonífera, representada por argilitos, calcários oolíticos, arenitos, siltitos e folhelhos, indicativos do avanço de sistemas deltáicos a partir da borda ocidental da bacia. A deposição desta seqüência foi interrompida por outro importante evento tectônico, ligado à aglutinação do paleo continente de Gondwana e propiciou o afeiçoamento da superfície erosional que serviu de substrato para deposição da seqüência Mesozóica.

A sedimentação Mesozóica iniciou-se pela seqüência Neo-Triássica que abrange as Formações Pirambóia e Rosário do Sul, constituídas por arenitos finos a médios, localmente conglomeráticos, exibindo estratificação cruzada acanalada e planar e depositados em ambientes flúvio-eólicos associados a lagos rasos. Esta seqüência é sotoposta pela Jurássica/Eo-Cretácea, caracterizada por extensos campos de dunas da Formação Botucatu e pelo maior episódio de extravasamento intracontinental de lavas basálticas da Formação Serra Geral. Essas duas unidades integram o Grupo São Bento, cujo remate coincide com os estádios iniciais de abertura oceânica e deriva continental.

A última seqüência da Bacia do Paraná corresponde ao Grupo Bauru, depositado apenas na parte norte da bacia. Este grupo é constituído por depósitos continentais areníticos, conglomeráticos, siltíticos, argilíticos e carbonáticos associados a ambientes deltáicos e fluviais entrelaçados sob clima árido.

Segundo Gonçalves (1987), no final da deposição dos sedimentos eólicos da Formação Botucatu, no Eo-Mesozóico, ocorreu uma sobrelevação da Bacia do Paraná, associada à abertura de geoclases sub-retilíneas e a instalação de intenso vulcanismo básico de grande porte e ácido (secundário). Esse grandioso vulcanismo seria o reflexo do estágio de reativação da Bacia do Paraná (Reativação Wealdeniana), amplamente citada nos mais diversos estudos, dentre eles em Almeida (1986).

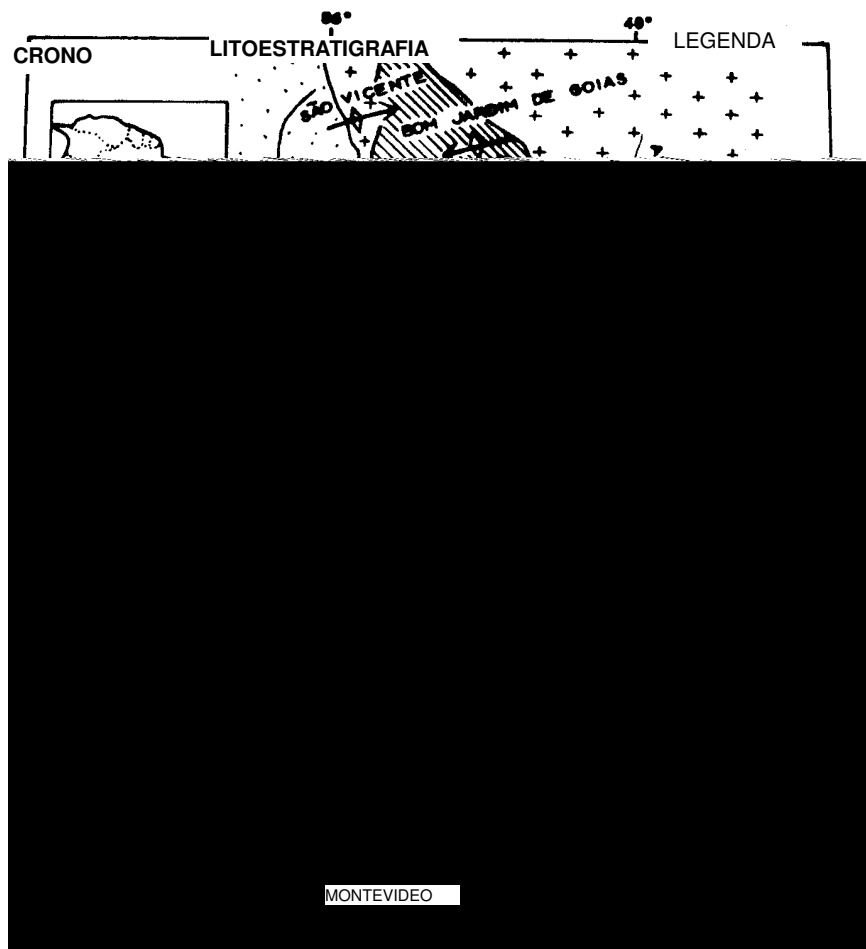


FIGURA 1 - Localização da Bacia do Paraná: 1 - Embasamento cristalino; 2 - Sedimentos pré-vulcânicos; 3 - Formação Serra Geral; 4 - Sedimentos pós-vulcânicos; 5 - Estrutura tipo sinclinal; 6 - Estrutura tipo arco; 7 - Flexura; 8 - Alinhamentos tectônicos (adaptado de Zalan et al; 1990)

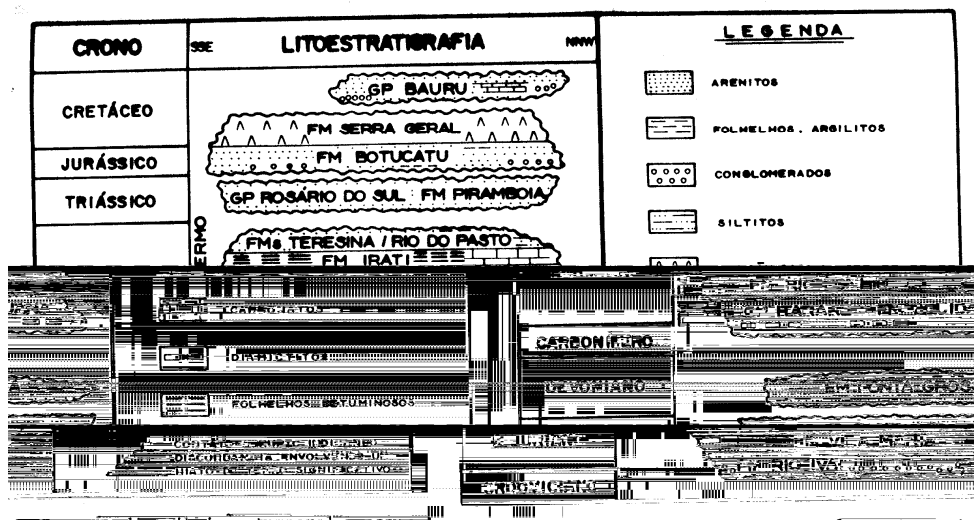


FIGURA 2 - Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Paraná (Zalan et al; 1990)

2.2.1 O Vulcanismo fissural da Bacia do Paraná

O vulcanismo responsável pelo extravasamento, calmo e intermitente, de enormes volumes de lavas é de caráter fissural. O magma proveniente de grandes profundidades da crosta terrestre atinge a superfície através de extensas geoclases. Após a extrusão as lavas escoam pela superfície do terreno, percorrendo distâncias de várias dezenas de quilômetros, formando espessos corpos tabulares. A superposição destes volumosos derrames origina extraordinárias espessuras. Na porção central da Bacia do Paraná verifica-se uma maior espessura para os derrames de lava, da ordem de 1730m (Peat et al; 1988).

2.2.1.1 Aspectos petrológicos

O magmatismo básico da Bacia do Paraná constitui uma unidade litoestratigráfica, a Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, que representa um lapso de tempo e espaço geológico bem definido (Gonçalves, 1987). Associados aos derrames são encontradas intrusões menores, na forma de sills e diques, cortando ou intercalando-se às estruturas sedimentares de formações geológicas mais antigas e subjacentes da bacia, ou mesmo preenchendo fraturas relacionadas à própria atividade magmática fissural.

Estes sills, segundo Melfi (1967), possuem idades que variam de 120 a 130 milhões de anos, indicando mesma idade e composições similares àquelas das rochas extrusivas da Formação Serra Geral.

A composição petrográfica das rochas da Formação Serra Geral varia desde basaltos toleíticos até riolitos, com termos riodacitos intermediários, distribuindo-se essas variedades petrográficas em proporções distintas conforme a região da Bacia do Paraná (Melfi, 1967).

De modo geral, a Bacia do Paraná pode ser esquematicamente dividida em três porções principais (Bellieni et al; 1984a,b,c; Comin-Chiaramont et al; 1983.):

- Bacia do Paraná Meridional (B.P.M) - localiza-se na região sul do lineamento do Rio

Uruguai. São basaltos toleíticos com baixo teor de TiO_2 (< 1,4%).

- Bacia do Paraná Central (B.P.C) - região compreendida entre os lineamentos do Rio Uruguai e Piqueri. São basaltos toleíticos com teores transicionais de TiO_2
- Bacia do Paraná Setentrional (B.P.S) – corresponde a região norte do lineamento do Rio Piqueri. São basaltos toleíticos com altos teores de TiO_2 (3 - 4%).

Nota-se ampla predominância das rochas vulcânicas ricas em TiO_2 (> 70%), que ocorrem sobretudo na porção norte da Bacia do Paraná, área na qual se engloba o presente trabalho.

Segundo Bartorelli (1997), a textura dos basaltos varia de ofítica a texturas tipicamente efusivas. Ocorrem grandes variações de cristalinidade das bordas para o centro dos derrames, sendo a textura das bordas geralmente hipocristalina a vítrea. É muito comum nos basaltos da Bacia do Paraná o fenômeno da devitrificação da massa amorfa, que se altera em minerais secundários (Bagolini, 1964).

2.2.1.2 Alteração hidrotermal das rochas básicas da Bacia do Paraná

Freqüentemente, as rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná apresentam associações mineralógicas de preenchimento de vesículas e de outras descontinuidades primárias, além de argilominerais detectados em rochas aparentemente sãs, que tem levado vários autores a registrar tais ocorrências como sendo de natureza secundária.

Estas paragêneses mineralógicas secundárias devem representar episódios de alteração pré-meteórica ou hidrotermal que, apesar de não provocar significativas transformações geoquímicas e/ou texturais da rocha, desencadeia grandes transformações mineralógicas em minerais parentais, os quais geram produtos de recristalizações. Os componentes principais desta paragênese secundária são os argilominerais. A ação de águas meteóricas, em ambiente supérgeno, provoca um intemperismo sobre rochas básicas onde esmectitas podem perfeitamente se cristalizar ao lado de caolinitas e óxi-hidróxidos de ferro.

Gonçalves (1987), a partir de observações e análises de alterações hidrotermais que afetaram a assembléia mineralógica de rochas básicas da porção norte da Bacia do Paraná, mostra que os resultados obtidos estão essencialmente relacionados a paragêneses mineralógicas localizadas nos minerais primários alterados (olivina e massa vítrea) e na colmatagem de vazios. As estruturas cristalinas e composições químicas destes minerais de

vazios. As estruturas cristalinas e composições químicas destes minerais de alteração, dependem de sua localização. Rocha escura “fresca” e cristalização (Figura 3).

Halo de alteração cinza →

rocha “fresca” – As olivinas, já alteradas da fase anterior, são substituídas por neoformações de celadonita/saponita-nontronita. O vidro vulcânico se apresenta parcialmente hidratado e/ou alterado através do processo de palagonização que leva a neogênese e transformações do vidro basáltico desde géis a recristalizações de argilominerais e silicatos (zeólitas).

halo de alteração cinza – As olivinas, já alteradas da fase anterior, são substituídas por neoformações de celadonita/saponita-nontronita. O vidro mostra áreas de recristalizações e vazios ou figuras de dissoluções, parcial ou totalmente seladas com depósitos de argilominerais.

sistemas de vazios – A colmatagem dos vazios possui seqüência mineralógica e apresenta, pelo menos, duas paragêneses maiores, a partir da rocha para o centro do vazio: um duplo depósito de assembléia celadonita/saponita + zeólita e um depósito central constituído de precipitações de sílica (calcedônia e opala) e de hidróxido de cálcio, que selam a fratura.

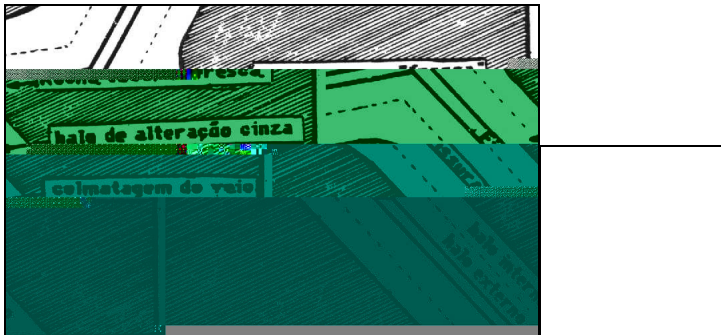


FIGURA 3 – Esquema e Fotomicrografia das zonas de alteração hidrotermal desenvolvida em torno das fissuras (Gonçalves, 1987).

Desta forma, distinguem-se as zonas de alteração na própria rocha e nas seqüências mineralógicas do depósito de colmatagem do vazio.

Do ponto de vista da geologia de engenharia, o conhecimento das paragêneses mineralógicas de alteração das rochas é de importância fundamental pois, a diversidade de comportamento

dos materiais rochosos, provenientes de rochas basálticas, quando utilizados em construção civil é atribuída ao maior ou menor teor de argilominerais expansivos, à presença de outros minerais secundários e ao seu estado microfissural.

2.2.1.3 Litologia

Segundo Souza Jr (1996) o resfriamento das lavas processa-se da periferia para o interior do derrame, após cessar o fluxo, podendo ainda ocorrer movimentações posteriores, antes da solidificação completar-se. A natureza simétrica do resfriamento confere à maioria dos derrames, um peculiar zoneamento estrutural quanto ao diaclasamento e também quanto a litologia. Desta forma, subdivide-se o derrame basáltico em três zonas que se sucedem na seguinte ordem:

- Basalto vesículo-amigdaloidal (topo)
- Basalto compacto
- Basalto vesículo-amigdaloidal (base)

Ocorrem também, associados a estas zonas, arenitos interderrames e brechas basálticas arenosas e carbonáticas (Figura 4).

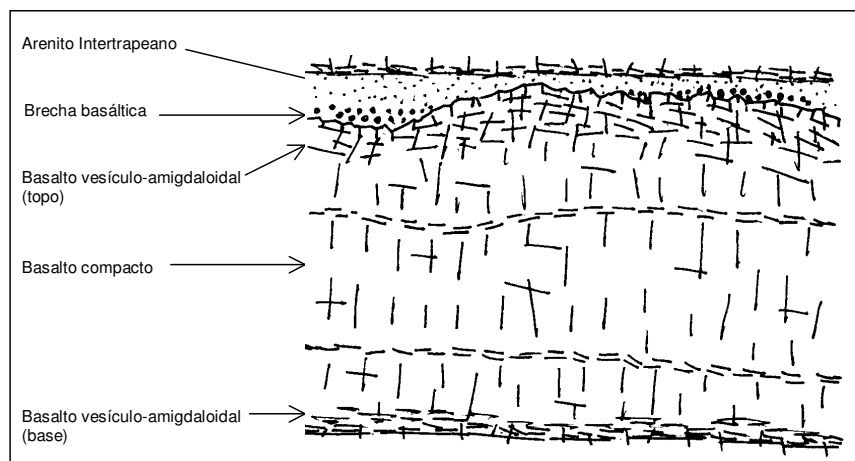


FIGURA 4 - Perfil típico de um derrame basáltico (adaptado de Bagolini, 1964).

O basalto compacto localiza-se na porção central do derrame e resulta do resfriamento mais lento da lava. Esta litologia é também denominada de basalto denso. Sua cor varia do cinza-escuro a preto. Seus principais constituintes mineralógicos são: feldspato plagioclásio, piroxênios (augita), magnetita e quantidades variáveis de matéria vítrea. A olivina raramente está presente. Quanto ao grau de cristalinidade, os basaltos compactos

está presente. Quanto ao grau de cristalinidade, os basaltos compactos variam de holo a hipocristalinos.

O basalto vesículo-amigdaloidal caracteriza o topo e a base dos derrames. A sua origem está relacionada a uma consolidação prematura da lava, sem o escape total dos gases voláteis presentes no líquido magmático. Seus limites com o basalto compacto são gradacionais. A sua mineralogia é semelhante à do basalto compacto, embora, com maior incidência de matéria vítrea. As cavidades ou amígdalas formadas possuem dimensões milimétricas a decimétricas, podendo estar vazias ou preenchidas por minerais secundários.

Vários autores descrevem a brecha basáltica como constituída por blocos centimétricos de basalto vesicular aglutinados por basaltos compactos (Leinz et al; 1966; Camargo, 1970; Brito, 1971; Sobreiro Neto et al, 1982; Araújo, 1982; e Souza Jr, 1986). A sua origem, segundo Wernick (1977), está associada a pelo menos duas possibilidades:

- A parte central líquida de um derrame em resfriamento envolve partes da crosta rígida do topo, que sofreu ruptura (“brecha de derrame”).
- Fragmentos soltos de basalto vesicular de topo são envolvidos pelas lavas do derrame sobrejacente, durante sua corrida (“brecha de contato”).

Outro tipo de brecha basáltica, descrita em Souza Jr (1986), caracteriza-se principalmente pela presença de fragmentos angulosos de basalto vesículo-amigdaloidal ou compacto, envolvidos por matriz de natureza geralmente carbonática. Esta brecha pode estar associada a faixas de fragmentos de basalto maciço, caoticamente distribuídos, praticamente sem matriz, assemelhando-se a piroclastos (Sobreiro Neto et al; 1982).

Ainda é encontrado na literatura o termo brecha basáltica arenosa que, segundo Souza Jr (1986), forma-se a partir da associação interderrame de sedimentos arenosos, siltosos e argilosos com basalto vesículo-amigdaloidal. Para autores como Bagolini (1964) e Guidicini & Oliveira Campos (1968), o provável processo de formação de uma brecha basáltica arenosa apresenta as seguintes fases (Figura 5):

- 0) Formação de uma crosta escoriácea acidentada no topo do derrame.
- 0) A sedimentação eólica que nivela a superfície e penetra nas fendas e cavidades.

- 0) Eventos sucessivos (adensamento provocado pelo derrame seguinte e associado a efeitos térmicos e hidr 1) is; aparecimento de c 2)) silicoso de natur 3)) tépérica), conferirão ao conjunto maior ou menor resistência.

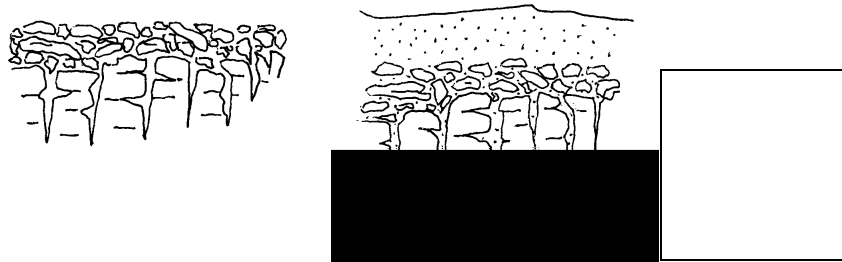


FIGURA 5 - Formação de brecha basáltica arenosa (adaptada de Bagolini, 1964 e Guidicini & Oliveira Campos, 1968).

Arenito interderrame ou intertrapeano são intercalações sedimentares entre derrames basálticos, de coloração avermelhada e estratificação cruzada, que segundo Leinz (1949) apontam para uma sedimentação eólica concomitante ao extravasamento dos derrames. A granulometria e composição são as mesmas do arenito da Formação Botucatu, constituído por areia fina, silte e argila.

2.2.1.4 Estruturas

Para este trabalho adotou-se que o termo estrutura refere-se apenas às descontinuidades e aos complexos lito-estruturais que interrompem bruscamente a continuidade lateral das feições geológicas normalmente presentes nos derrames da Formação Serra Geral. As principais estruturas são:

- *Derrames secundários* - Segundo Guidicini (1970), os derrames secundários teriam sido formados pelo extravasamento de pequenas “línguas” de lava sobre a crosta superficial, já consolidada, do derrame principal. Estas lavas, projetadas sobre o derrame principal após solidificadas, possuem todas as características estruturais de um derrame principal, com exceção da continuidade lateral (Figura 6). Descrições mais detalhadas destas estruturas são encontradas em Moler & Cabrera (1976) e Themag (1982).

- *Estruturas circulares* - Araújo (1982) cita em seu trabalho que estas estruturas são remanescentes de crateras que foram preenchidas por brechas piroclásticas e por derrames basálticos de pequena espessura, 3m em média, como resultado da atividade de lagos de lavas que nelas se estabeleceram (Figura 7).

- *Espiráculos* - Espécie de “intrusão” arenosa que ocorre quando o derrame, ao se escoar sobre sedimentos não consolidados e saturados, devido a altas temperaturas no plano de contato, pode gerar grandes pressões de vapor d’água. Consequentemente o sedimento adquire características de extrema mobilidade, penetrando, então, sob pressão, ao longo de juntas preexistentes ou mesmo provocando um fraturamento irregular na base do derrame, o qual é imediatamente preenchido pela areia (Souza Jr, 1986). Esta intrusão arenosa, à semelhança de um magma que ascende em diques, pode inclusive originar apófises, terminando, por vezes, em sills (Figura 8).

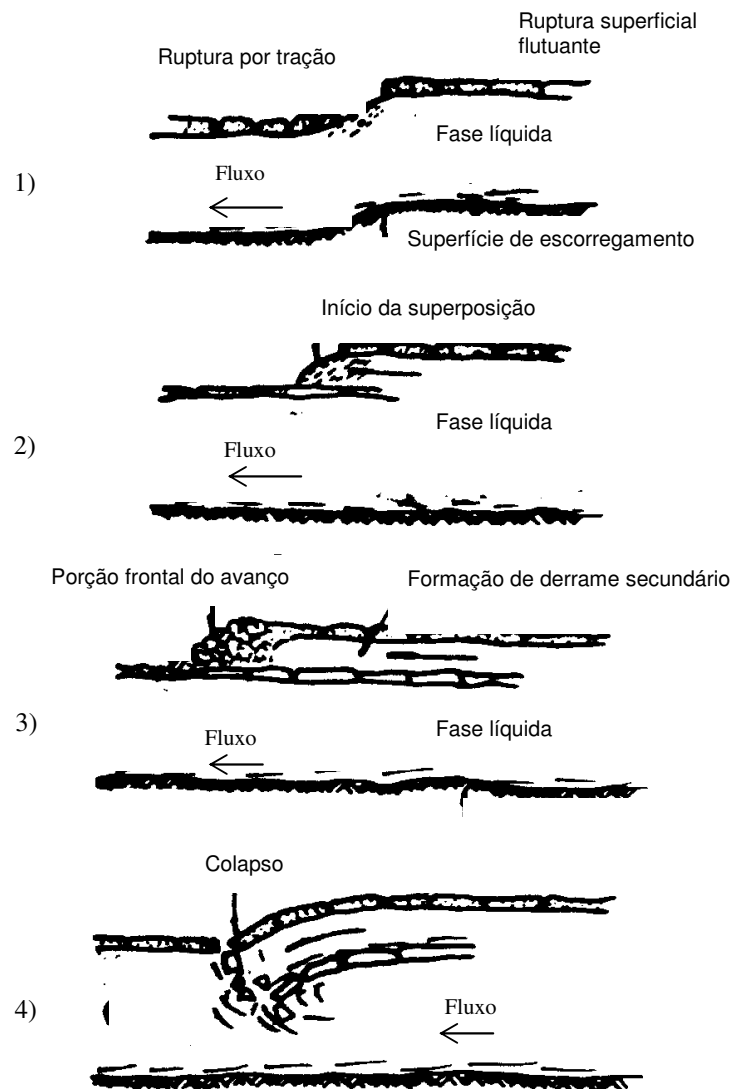


FIGURA 6 - Fases de formação do derrame secundário: 1) aparecimento de desnível superficial e ruptura por tração; 2) início da superposição; 3) formação do derrame secundário; 4) colapso e absorção do material por parte do derrame principal (adaptado de Guidicini, 1970)

- *Pillow lava* - As “pillow lavas” ou “lavas almofada” são estruturas típicas de derrames marinhos, porém, podem ser encontradas em derrames continentais. Se formam quando as lavas de um derrame penetram em lagos originados por rios represados ou acumulações de água em depressões (Figura 9). Marques Filho et al; (1981), Palazzo Neto et al; (1982) e Ferreira (1985) são alguns autores que identificaram feições deste tipo nos basaltos da Formação Serra Geral.

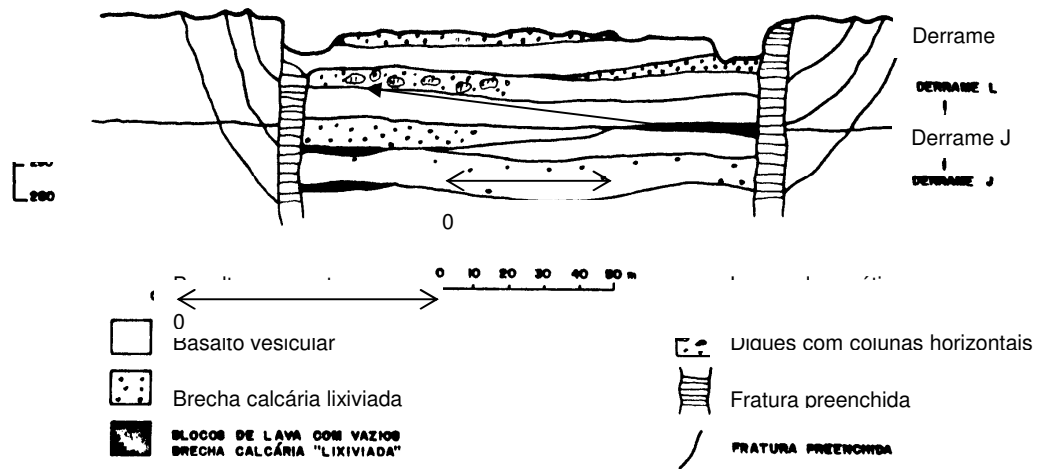


FIGURA 7 - Seção esquemática de uma estrutura circular (Araújo, 1974).

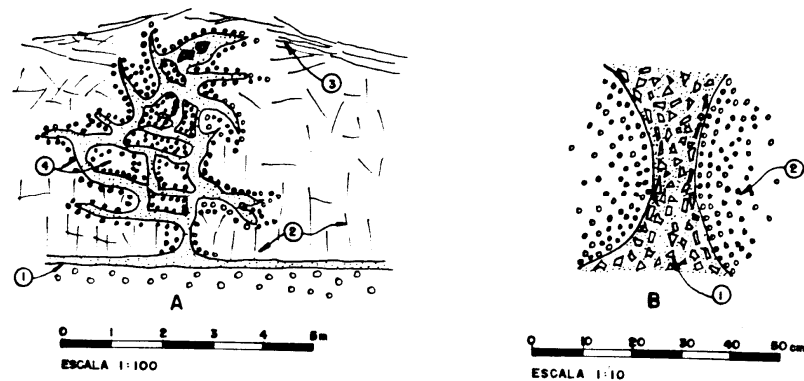


FIGURA 8 - Espiráculo: material injetado ao longo dos planos de fraqueza. 1) contato entre derrame intermediário e superior. 2) juntas colunares na base do derrame. 3) junta horizontal deformada pelo espiráculo. 4) alteração do basalto denso para vesicular em volta ao espiráculo e dos blocos envolvidos por ele (adaptada de Moller & Cabrera, 1976).

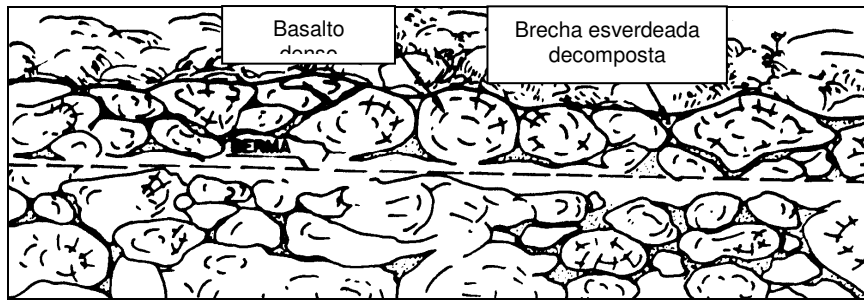


FIGURA 9 - Estruturas tipo "Pillow lava" (Marques Filho et al; 1981).

2.2.1.5 A Compartimentação Entablamento-Colunata

Apesar da existência de grande volume de dados disponível em artigos técnicos, teses e relatórios, referentes à caracterização e utilização de rochas basálticas como material de construção (agregados para concretos, filtros, enrocamentos, etc.) como também referentes à caracterização e classificação de maciços basálticos solicitados em cortes de escavação, em fundações e em escavações subterrâneas, verificam-se algumas interessantes lacunas no estudo destas rochas que correspondem a áreas com novas perspectivas de atuação ou até mesmo áreas carentes de investigação. Neste contexto, insere-se um tipo específico de rocha basáltica caracterizada por feições lito-estruturais denominadas primeiramente por Souza Jr. (1992) de entablamento-colunata, para os derrames da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná . Estes maciços, destacam-se por ostentarem características inequívocas dos corpos extrusivos, aspecto este de grande importância, tendo em vista a dificuldade de se diferenciar os basaltos da Formação Serra Geral, dos corpos básicos intrusivos a eles associados (sills e diques).

Segundo este mesmo autor, excetuando-se as porções periféricas de natureza amigdaloidal, determinados derrames de lava apresentam compartimentação estrutural nitidamente dividida em dois sistemas distintos de diaclasamento primário denominados de colunata e entablamento. Os primeiros trabalhos científicos que estabeleceram as características básicas e a nomenclatura referentes aos compartimentos em questão foram publicados por Tomkeieff (1940) e Spry (1962). Este último autor propõe o zoneamento mostrado na Figura 10.

Ao núcleo de derrames basálticos deve, normalmente, corresponder uma rocha de textura mais grosseira e com diáclases mais espaçadas devido à menor velocidade de resfriamento da lava no interior do derrame. Desta maneira, as zonas periféricas superiores e inferiores, conseqüentemente, por apresentarem resfriamento mais rápido, caracterizam-se pelo diaclasamento mais expressivo e textura fina a vítrea dos seus minerais constituintes. No entanto, no entablamento localizado geralmente no interior do derrame, verifica-se o inverso, pois ele apresenta características de grau de fraturamento e textura mineral compatíveis com maior velocidade de resfriamento da lava (Fotos 1,2,3 e 4).

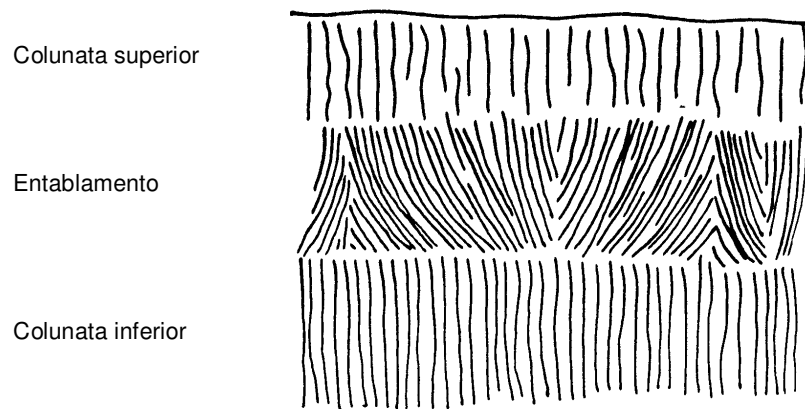


FIGURA 10 - Os três compartimentos de um derrame basáltico (Spry, 1962).

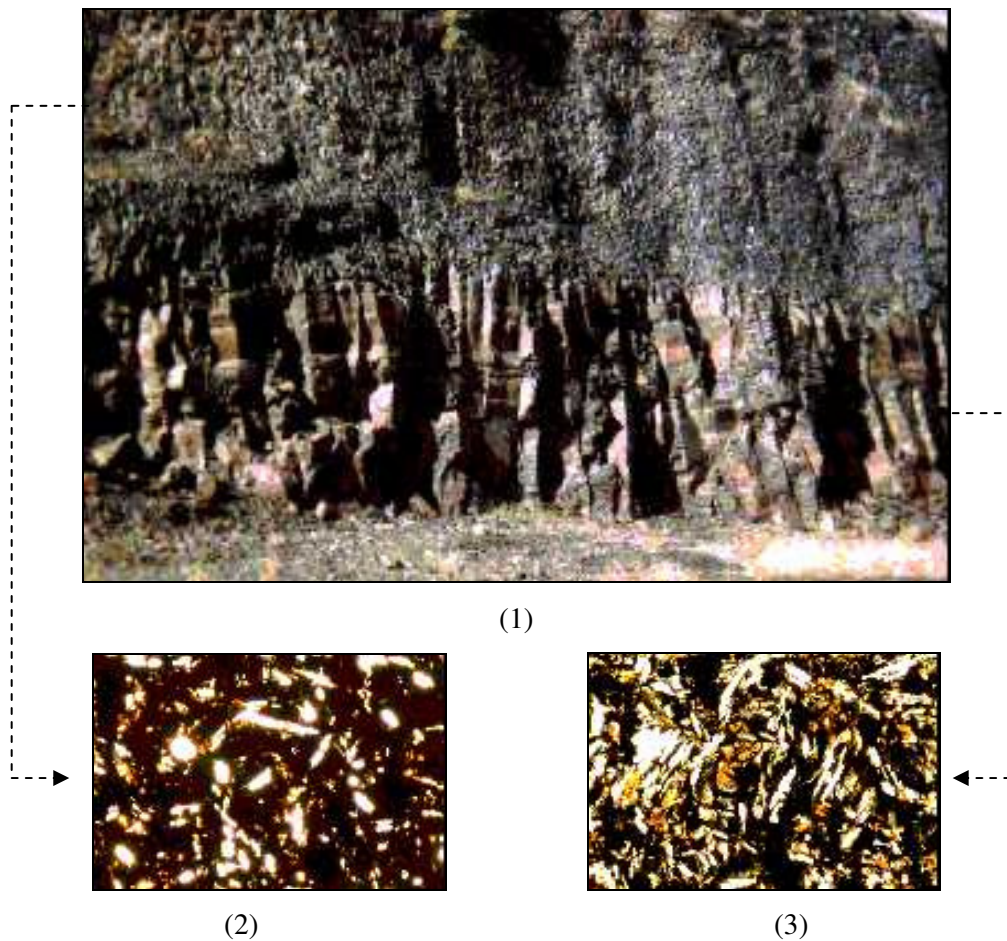


Foto 1 – Talude da Pedreira St. Antônio (Araraquara-SP) apresentando os compartimentos Entablamento (parte superior) e Colunata Inferior (parte inferior).
 Foto 2 – Fotomicrografia de lâmina delgada de rocha basáltica do entablamento.
 Foto 3 – Fotomicrografia de lâmina delgada de rocha basáltica do colunata inferior.



Foto 4 – Detalhe de bloco de rocha proveniente do compartimento entablamento. Notar o elevado grau de fraturamento.

No modelo de gênese concebido para explicar os derrames do Grupo Rio Columbia – EUA (Long & Wood, 1986), considera-se a ação de determinados fatores paleo-ambientais que implicaram na aceleração do processo de resfriamento. O modelo genético adotado para o caso em questão, considerou que os derrames foram cobertos por água de superfície logo após o seu extravasamento. Estes autores advogam que as possíveis situações paleo-climáticas, às quais submeteram-se os derrames de lava para formação da compartimentação entablamento-colunata, envolvem os seguintes fatores:

- ambiente subtropical com chuvas torrenciais;
- presença de considerável escoamento d'água e desenvolvimento de rasos e extensos lagos naturais;
- derrame invadindo rapidamente vales fluviais e lagos;
- rompimento do sistema de drenagem local e represamentos, inundação ou estabelecimento de extenso lago sobre o topo do derrame em fase inicial de consolidação;
- migração descendente de água por meio de fissuras do horizonte já solidificado;
- fase de rápido resfriamento, desenvolvida sempre de maneira descendente.

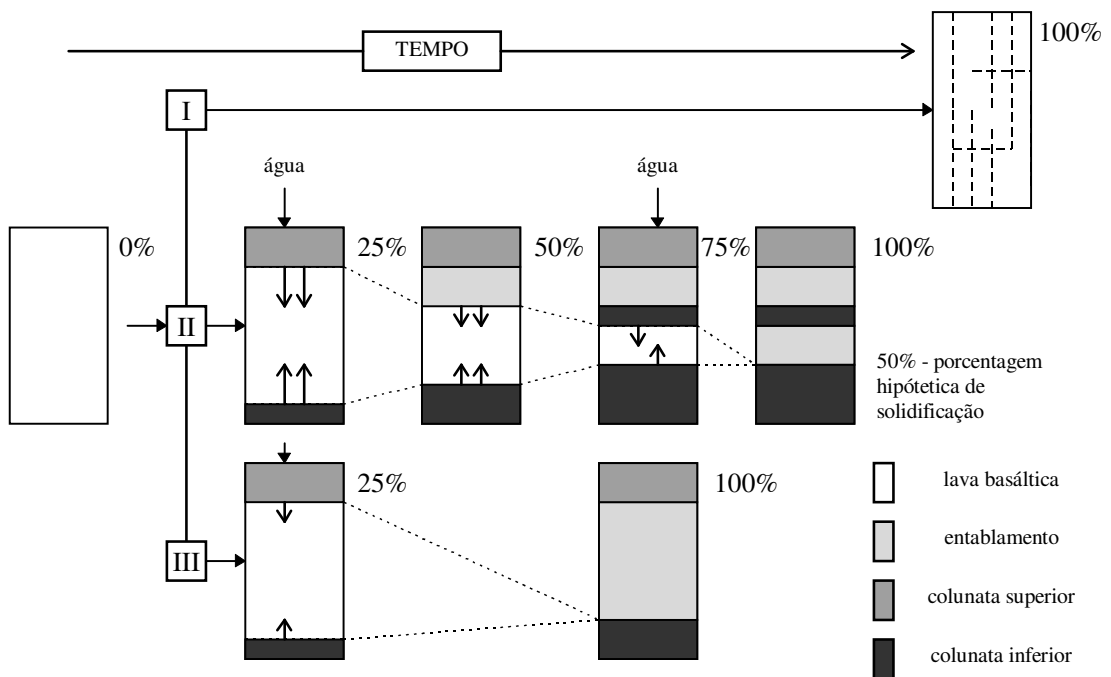
Estas situações colaboram para definição de três condições descritas a seguir e ilustradas na Figura 11 (Long & Wood, 1986):

- Derrames Tipo I - Possuem espessuras que variam de 10 a 30m e posicionados em paleo-declives, não romperam possíveis sistemas de drenagem e, conseqüentemente, não foram inundados ou ainda, seu extravasamento coincidiu com condições superficiais de clima seco. Desta forma, são constituídos por colunata altamente irregular e o entablamento não está presente.

- Derrames Tipo II - A repetição de entablamentos e colunatas está associada a múltiplos eventos de inundação alternados por períodos de seca. Estes tipos de derrames apresentam espessuras da ordem de 45 a 75m. A quantidade de matriz vítrea nos entablamentos (35 a 65%) é bem maior comparativamente à colunata (15 a 25%).

- Derrames Tipo III - Nesta situação, a etapa inicial de consolidação pode assemelhar-se à etapa correspondente ao Tipo II. Porém, em alguns casos, a colunata superior não está presente, indicando que a penetração de água, no topo do derrame, ocorreu imediatamente após o processo de extravasamento da lava. Estes derrames apresentam espessuras que variam de 30 a 80m.

A Figura 12 exemplifica um único derrame submetido as três condições paleo-ambientais descritas acima.



e tipo III (adaptada de Souza Jr. 1992)

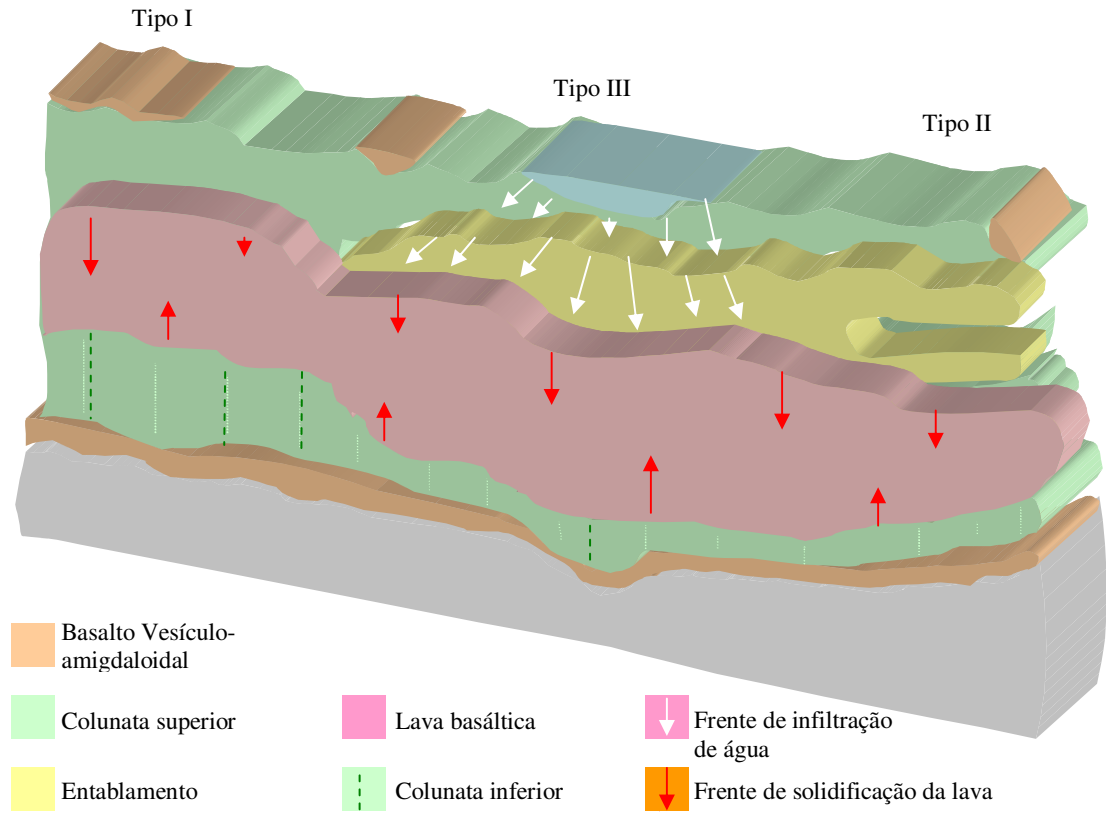


FIGURA 12 - Perfil esquemático de derrame submetido a três diferentes situações paleo-ambientais.

tabulares que superpostos originam extraordinárias espessuras. Alguns meses, anos ou até décadas são necessários para sua completa solidificação (Figura 13). É neste intervalo que a ação paleo-ambiental torna-se fundamental para a formação da compartimentação entablamento-colunata.



FIGURA 13 – Evolução de solidificação de derrame basáltico. As etapas C e D representam as condições para a formação da compartimentação entablamento-colunata.

Como visto anteriormente, a gênese do entablamento no interior do derrame está associada a presença de uma frente de infiltração descendente, originada não só por chuvas torrenciais como também devido à formação de extensos e rasos lagos sobre a superfície já solidificada do derrame. A partir de comparações e observações feitas em vulcões contemporâneos Long & Wood (1986) calculam que para a formação do entablamento é necessária uma taxa pluviométrica anual maior que 2500mm. Variações paleo-climáticas marcadas muitas vezes pela alternância entre eventos de inundação e de períodos secos,

durante o resfriamento do derrame, são responsáveis pela formação de alternadas camadas de entablamento e colunata, caracterizando derrames Tipo II.



Foto 5 – Talude da Pedreira INDERP (Ribeirão Preto-SP) apresentando faixas alternadas de entablamento e colunata.

Quanto à petrologia, revela-se uma pronunciada correlação entre características texturais e estruturais. Tanto o compartimento entablado quanto o colunata apresentam paragênese mineralógica típica de rochas básicas, constituídas por feldspato plagioclásio, piroxênios (augita), magnetita e quantidades variáveis de matéria vítrea. A quantidade de matéria vítrea e a textura mineral são as principais diferenças entre os dois compartimentos. O entablamento apresenta em geral 60% de matéria vítrea, enquanto que o colunata esta quantidade gira em torno de 20%. Outra característica mineralógica diferenciada entre os dois compartimentos é a morfologia dos cristais de magnetita. O entablamento apresenta morfologia dendrítica para este mineral. Já o colunata apresenta cristais bem formados devido ao resfriamento mais lento.

2.3 A Compartimentação Geológico-Geotécnica de Derrames Basálticos

As rochas básicas da Bacia do Paraná, tanto os basaltos quanto os diabásios, possuem características mineralógicas bastante parecidas. Diferenciam-se, principalmente, devido à sua textura e estruturas. Desta maneira, uma simples descrição geológica de um maciço basáltico não permite o estabelecimento de um zoneamento que apresente de maneira clara os seus condicionantes geológico-geotécnicos. Deve-se enfatizar as informações de natureza geológico-geotécnica tais como o grau de alteração, o grau de fraturamento, a permeabilidade, a deformabilidade e parâmetros de resistência. Estes três últimos, são grandemente influenciados pela maior ou menor heterogeneidade lito-estrutural do maciço.

São dois os tipos de alteração que afetam as rochas: a deutérica e a meteórica ou intempérica. O primeiro tipo ocorre em ambientes endógenos decorrentes principalmente de fenômenos magmáticos, enquanto que o segundo ocorre na dependência de fenômenos climáticos, em ambiente exógeno. Do ponto de vista da geologia de engenharia, os dois tipos de alteração são importantes pois favorecem, na maioria dos casos, a diminuição da resistência mecânica, o aumento da deformabilidade e modificações das propriedades de permeabilidade e porosidade das rochas. Neste item, abordaremos apenas a alteração intempérica e sua atuação na modificação de propriedades geotécnicas no perfil de alteração, visto que já foi abordada no item 2.2.1.2 a alteração hidrotermal em rochas basálticas.

A Figura 14 apresenta o perfil de intemperismo dos basaltos da região setentrional da Bacia do Paraná proposto por Gonçalves (1987) o qual foi adaptado para o presente trabalho e enriquecido com informações de subsuperfície e de características geotécnicas.

Tugrul & Gurpınar (1997) propõem, para derrames basálticos da Turquia, um sistema de classificação de perfis de alteração que se baseia em critérios de cor do maciço rochoso, de relação solo/rocha, da presença de matações, da presença de descontinuidades e de variação de resistência do material rochoso (Figura 15). Os resultados dos ensaios de laboratório, abrangendo amostras desde a rocha fresca até o solo de alteração, estão exemplificados nas Figuras 16,17,19,20 e 21.

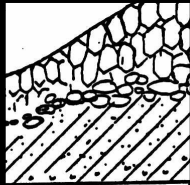
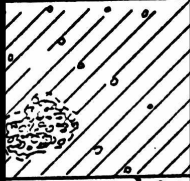






Profundidade		Morfologia	Grau	Estruturas	Características
Solo	0,10 – 2m		I	Horizontes pedológicos. Latosolo roxo e Terra roxa estruturada	I – Horizonte de solo orgânico. É composto por areia, silte e argila em diferentes proporções. Contém quantidade apreciável de matéria orgânica decomposta.
	0,10 – 5m		II	Latosolo Roxo com acumulações glebulares	II - Horizonte Laterítico. A curva granulométrica deste horizonte é bastante variável dependendo da posição no relevo. Não apresenta estruturas típicas da rocha de origem. Contém quartzo, caulinita e óxi-hidróxidos de ferro e alumínio. As cores predominantes são as de tons avermelhados e amarelados.
	0,10 – 20m			Nível concrecionado avermelhado com "ilhas" de couraças amarelas	
Rocha e solo	0,20 – 20m		III	Argilas mosqueadas preenchendo fissuras irregulares secundárias	III – Horizonte de solo saprolítico. Presença de estrutura reliquiar da rocha (aprox. 10% de blocos de rocha).
	1 – 30m		IV	Zona de transição e de intensa alteração.	IV – Saprolito. Zona de transição entre o solo e o maciço rochoso. Composto de blocos de rocha (10 a 90%) em vários estádios de alteração.
Rocha Alterada	5 – 30m		V	Diáclases originais sub-paralelas visíveis. Ocorrência de vazios estruturais com disposição poliédrica.	V - Rocha Muito Alterada. Caracteriza o topo do maciço rochoso, sendo a rocha composta por minerais em adiantado estágio de alteração, sem brilho e com resistência reduzida.
	5 – 50m		VI	Fraturamento prismático secundário. Pequenos blocos empilhados mantêm a estrutura original.	VI - Rocha Alterada. A rocha apresenta minerais descoloridos devido ao início da alteração, sendo estes mais pronunciados ao longo de juntas e fraturas.
Rocha Sã	> 10m		VII	Disjunção colunar prismática vertical sub-vertical. Rocha Mãe.	VII – Rocha Sã. É composto por rocha predominantemente sã. Podendo no entanto haver indícios de início de alteração ao longo de juntas e fraturas.

FIGURA 14 – Perfil de Intemperismo de derrames basáltico para porção setentrional da Bacia do Paraná (adaptado de Gonçalves, 1987).

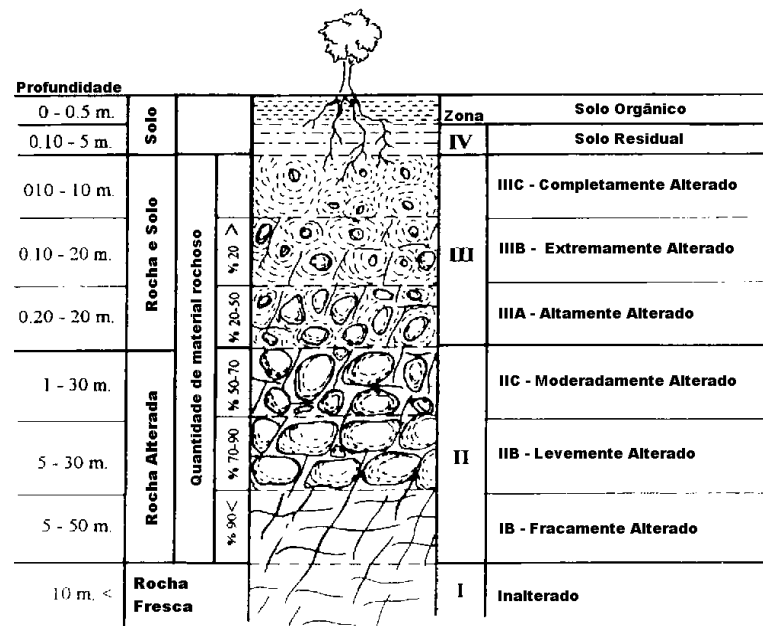


FIGURA 15 – Perfil de intemperismo de derrames basálticos na Turquia (Tugrul & Gurpinar, 1997).

Os autores citados anteriormente, estudaram três tipos de basaltos, a saber: - basaltos com fenocristais de plagioclásio, - basaltos de textura fina e basaltos com fenocristais de piroxênio.

A variação da porosidade para os três tipos de basaltos e em todos os graus de alteração é mostrada na Figura 16.

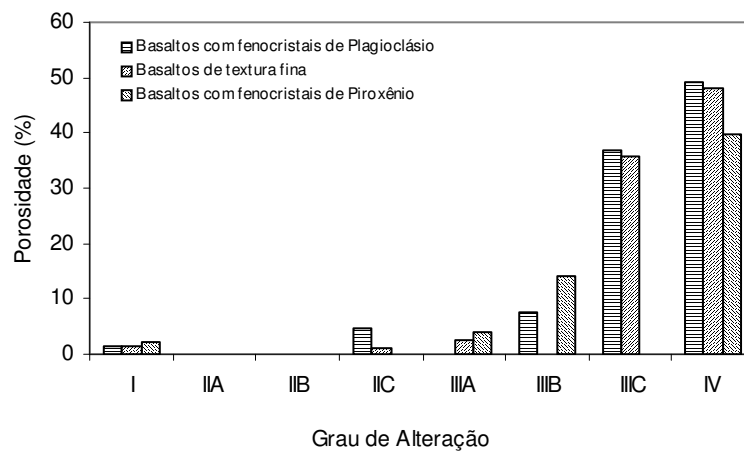


FIGURA 16 – Variação da porosidade com o grau de alteração (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).

A porosidade dos basaltos que apresentam fenocristais de piroxênios permanece praticamente inalterada nos graus de intemperismo I, IIA, IIB, IIC e IIIA. Para os basaltos com fenocristais de plagioclásio predominantes em sua textura, ocorre o aumento pronunciado da porosidade a partir do grau IIIB. Já a porosidade para basaltos de textura fina, acentua-se a partir do grau IIC.

A permeabilidade cresce com o aumento do grau de alteração. Fato este mostrado na Figura 17 para os três tipos de basaltos estudados.

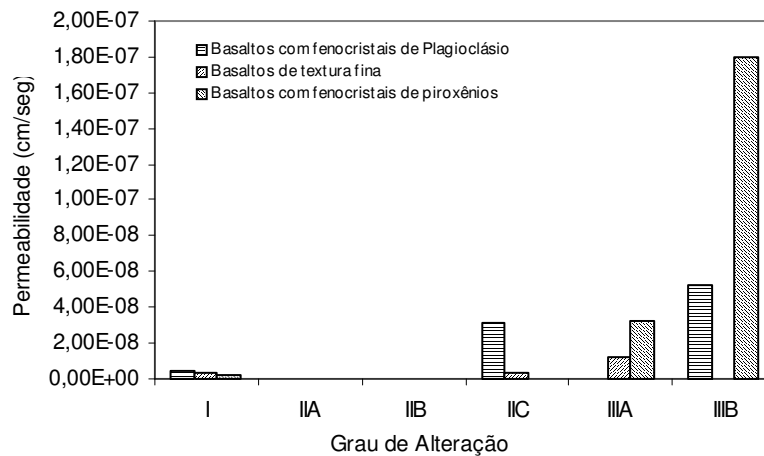


FIGURA 17 – Variação do coeficiente de permeabilidade de diferentes tipos de basaltos com o grau de alteração (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).

Souza Jr (1986) comenta em seu trabalho que comparando-se os basaltos com os demais maciços cristalinos, quanto a variação da permeabilidade com a profundidade, o comportamento dos maciços basálticos diferirá muito daquele esperado para o maciço cristalino. Para o maciço basáltico a distribuição da permeabilidade, fortemente anisotrópica e descontínua, resulta da existência de juntas horizontais de grande extensão e ou contatos entre derrames (Figura 18).

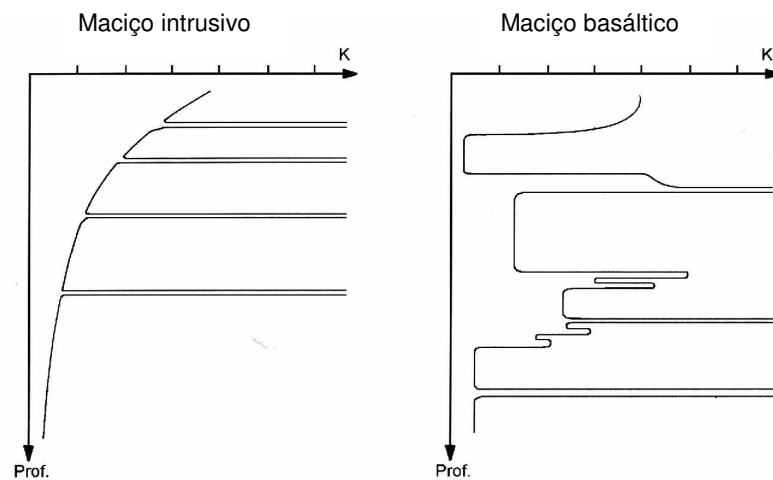


FIGURA 18. Comparação esquemática das distribuições da permeabilidade em profundidade, entre maciços basálticos e os intrusivos (adaptado de Souza Jr, 1986).

Segundo Ruiz (1963), o diaclasamento da rocha não determina necessariamente a permeabilidade baixa ou alta dos maciços rochosos. Considera-se como de maior importância a presença ou ausência de materiais de preenchimento das diáclases. Desta forma, alguns maciços rochosos extremamente fraturados são praticamente impermeáveis, devido a ausência de materiais de preenchimento nas suas fraturas, estas se comportam, hidrológicamente, como se estivessem seladas.

Souza Jr (1986) salienta ainda que, o aspecto mais significativo dos maciços basálticos, quanto à permeabilidade, é que na direção horizontal a permeabilidade apresenta-se, via de regra, extremamente mais elevada que na vertical.

No que se refere a resistência à compressão uniaxial, verifica-se que ela decresce bruscamente com o grau de intemperismo, desde a rocha fresca (I) até a completamente alterada (IIIC). Os basaltos de granulação mais fina, entretanto, perdem levemente sua resistência até o grau IIC. A redução da resistência à compressão uniaxial nos basaltos é controlada, de maneira clara, pelo grau de intemperismo (Figura 19).

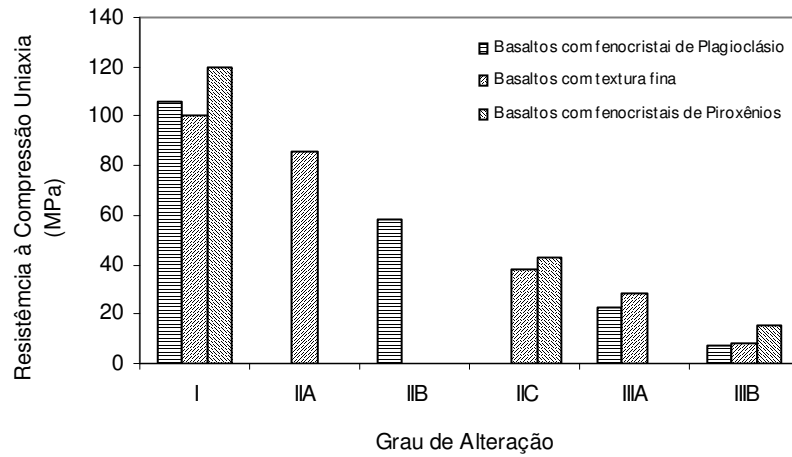


FIGURA 19 – Variação da resistência à compressão uniaxial em basaltos com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).

Com relação à tensão de tração, seu comportamento é similar ao da resistência à compressão uniaxial, ocorrendo o gradual decréscimo com o aumento do grau de intemperismo (Figura 20).

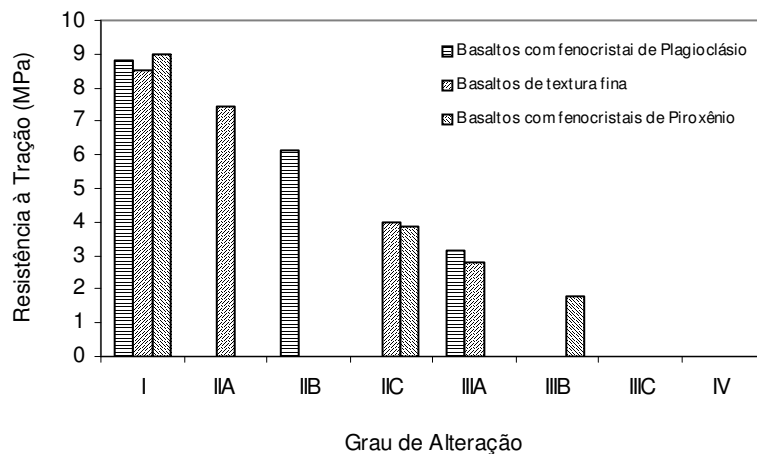


FIGURA 20 – Variação da Resistência a tração com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).

A relação entre o valor do módulo de elasticidade com o grau de intemperismo é mostrada na Figura 21. Como é de se esperar, o valor do módulo decresce com o aumento do grau de intemperismo.

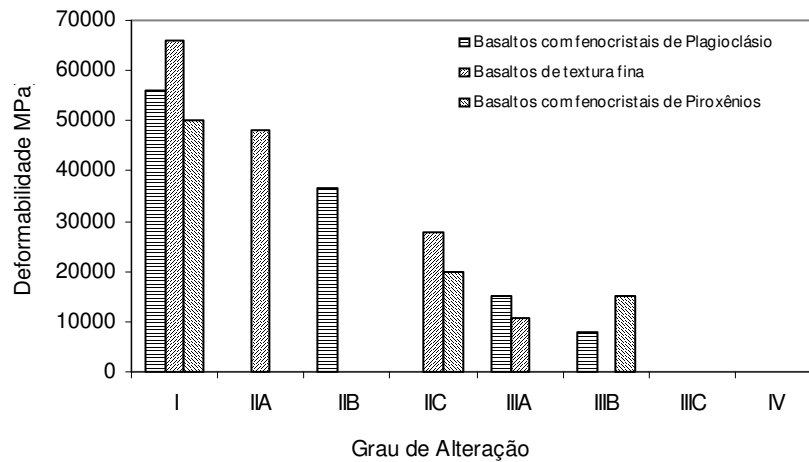


FIGURA 21 – Variação do Módulo de Elasticidade com o grau de intemperismo (adaptado de Tugrul & Gurpinar, 1997).

Os ensaios para determinação da deformabilidade dos maciços basálticos restringem-se praticamente as feições lito-estruturais mais deformáveis, quais sejam: brechas basálticas e basaltos vesiculares e ou amigdaloidais, com graus variáveis de alteração e fraturamento (Souza Jr, 1986). O módulo de deformabilidade destes materiais pode variar de 1.000 a 186.000 kg/cm², valores estes que correspondem à brecha basáltica argilosa e ao basalto vesicular são com poucas fraturas.

Rocha (1973), apresenta uma proposta de procedimento para determinação da deformabilidade de maciços rochosos, em que é claramente demonstrada a importância de se compartimentar o maciço em unidades geológico-geotécnicas. Este procedimento foi adotado por este autor no maciço basáltico da obra de São Simão e consiste das seguintes etapas:

1. zoneamento do maciço, a partir de informações geológicas e dos valores ou índices de deformabilidade obtidos por meio de ensaios dilatométricos.
2. determinação da deformabilidade de cada zona, mediante o ensaio de volume representativos (“macaco plano” e “placas deformáveis”).
3. estabelecimento de correlação entre os ensaios das duas etapas anteriores.
4. uso da correlação obtida para estimar a deformabilidade em grandes volumes, daquelas zonas em que apenas o dilatômetro tenha sido empregado.

2.4 Caracterização Geológica de Materiais Rochosos para Construção

2.4.1 Introdução

Segundo Frazão & Paraguassu (1998), os materiais rochosos na forma granular são denominados de agregados. Estes materiais devem possuir dimensões e propriedades adequadas para o seu uso em construção civil e são classificados da seguinte maneira:

- Quanto à origem - são denominados naturais aqueles que são extraídos da natureza na forma de fragmentos como areia e pedregulho. Os artificiais são os materiais que passam por processos de fragmentação, como pedra e areia britada.
- Quanto à densidade - têm-se agregados leves (pedra pomes, vermiculita, argila expandida, etc.), agregados pesados (barita, magnetita, limonita, etc.) e agregados normais (areia, pedregulhos e pedra britada).
- Quanto ao tamanho dos fragmentos - Agregado graúdo (diâmetro mínimo superior a 4,8mm) e agregado miúdo (diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8mm).

As características físicas e químicas dos fragmentos possuem estreita relação com a origem geológica e conseqüentemente mineralógica da rocha que os originou. Estas características (textura, mineralogia e parâmetros físicos) podem ser observadas e descritas por métodos e termos geológico-geotécnicos tradicionais, objetivando a avaliação do potencial destes materiais rochosos para o uso como materiais de construção.

Algumas características, quando do uso de agregados principalmente em misturas de concreto de cimento Portland e ligantes betuminosos, devem ser levadas em consideração, tais como as apresentadas a seguir:

- Tamanho da Partícula – A distribuição granulométrica pode ser determinada por métodos convencionais de peneiramento. Agregados para concreto devem possuir uma adequada distribuição granulométrica, para obter maior compacidade, resultando em menor índice de vazios, permitindo maior economia de cimento e ganho de resistência. Para o concreto asfáltico, as frações granulométricas utilizadas dependerão do tipo de pavimento a ser realizado.

- Forma das Partículas - Arredondada, irregular, angular, alongada, etc. Para o concreto hidráulico a forma das partículas deve ser a mais equidimensional possível, para garantir a facilidade no manuseio e operação, aumentar a compacidade e promover maior resistência do concreto. Para o concreto asfáltico a forma das partículas deve ser, também, a mais equidimensional possível, neste caso, para diminuir o consumo de betume e também, melhorar a resistência mecânica.

- Textura da Superfície – Grau de rugosidade da superfície da partícula. Nos dois tipos de concreto a rugosidade afeta a aderência ao agregado.

- Porosidade – Porcentagem do volume total do agregado ocupada pelos poros. De forma geral, a porosidade é inversamente proporcional à qualidade do agregado. A porosidade afeta as características de resistência e elasticidade contribuindo também, no comportamento da permeabilidade, absorção d'água e durabilidade do agregado. Rochas com valores de porosidade iguais ou menores que 2%, em geral produzem bons agregados. Acima deste valor devem ser tomadas algumas precauções quanto ao seu uso.

- Estrutura dos Poros – Refere-se ao tamanho, forma e volume dos poros, a qual pode ser permeável (poros interconectados e conectados à superfície da partícula) ou impermeável (poros isolados). Uma porosidade “permeável” não é desejada nos agregados para muitas aplicações. Quanto maior a porosidade, maior a absorção de água e de soluções salinas pelo agregado podendo, conseqüentemente, reduzir a sua durabilidade. Em concreto betuminoso, a porosidade aumenta a absorção do betume e conseqüentemente aumenta o custo do pavimento.

- Densidade - A densidade é um bom indicador da alterabilidade do agregado. Baixos valores indicam má qualidade do agregado, devido ao aumento da porosidade, alteração e, muitas vezes, à presença de argilominerais.

- Variação Volumétrica – Deve-se, muitas vezes, a variações cíclicas de umidade. Os agregados devem possuir pequena ou nenhuma variação volumétrica quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem. Expansão e contração produzem forças de tração que podem fissurar o concreto.

- Condutividade Térmica – Habilidade do agregado em conduzir calor. Agregados com baixa condutividade térmica são desejáveis para prevenção do congelamento do pavimento.

No tocante às principais características do maciço rochoso que também devem ser consideradas para o assunto em questão pode-se citar:

- Grau de fraturamento – Ocasionalmente fraturado, Pouco fraturado, Moderadamente fraturado, Muito fraturado, Extremamente fraturado. Maciços rochosos com fraturamento considerável tendem a produzir agregados de qualidade duvidosa, pois as fraturas são caminhos naturais para a percolação da água que promove a alteração das rochas. Com a permeabilidade aumentada, a água pode atingir os argilominerais expansivos localizados tanto nos poros quanto nas fissuras da rocha. Como consequência, a expansão dos argilominerais pode provocar tensões de tração, manifestadas pelo aumento de volume desses argilominerais com a absorção d'água, fenômeno este que pode levar a rocha à desagregação.

- Resistência – Rocha coerente, medianamente coerente, pouco coerente e incoerente. Para uso em concreto hidráulico o agregado deve possuir adequada resistência mecânica para suportar as solicitações físico-mecânicas durante a preparação do concreto, como também aquelas advindas dos esforços estruturais. Já para o uso em misturas betuminosas o agregado deve ter boa resistência à compressão para resistir ao peso dos veículos. De forma geral, agregados provenientes de rochas pouco coerentes e incoerentes possuem baixo desempenho nas diversas formas de uso.

Com relação às principais propriedades químicas dos agregados na manufatura de concretos hidráulicos e betuminosos temos:

- Reação Álcali-Sílica - Os álcalis do cimento, em presença de água, podem reagir com agregados que contenham certos minerais de sílica, formando um gel no entorno da partícula do agregado. Este gel umedecido causa expansão do agregado e consequentemente a do concreto.

- Reação Álcali-Carbonato - Esta reação é similar à da álcali-sílica, entretanto nenhum gel visível é formado. Rochas susceptíveis à reação álcali-carbonato são os calcários dolomíticos.

- Presença de Minerais Metálicos - Alguns componentes metálicos, tal como o óxido de zinco, podem afetar seriamente o concreto. Algumas piritas ao se oxidarem podem causar problemas relacionados à expansão mineral.

- Presença de Sulfetos - Pirita, Marcassita e Pirofilita são minerais acessórios freqüentes em rochas utilizadas como agregados. Se há oxigênio livre no ambiente, provavelmente haverá a oxidação destes minerais o que acarretará, por sua vez, a perda de resistência do concreto. A oxidação produz sulfatos solúveis que reagem com a matriz do cimento causando aumento de volume podendo, inclusive, provocar o aparecimento de fissuras.

- Presença de Sulfatos - Quando presentes em quantidades suficientes, ou quando em ambientes saturados e úmidos, sulfatos podem reagir com componentes do cimento, resultando em uma expansão excessiva que pode levar o concreto à fadiga.

- Presença de Zeólitas - Natrolita e a Heulandita, duas zeólitas ricas em sódio, podem trocar o sódio pelo cálcio da pasta de cimento promovendo, conseqüentemente, o aumento da quantidade de álcalis. A Laumontita e a Leonhardita mudam de volume durante processos de umedecimento e secagem.

- Presença de Periclásio - O Periclásio (óxido de magnésio) quando hidratado, em uma massa de cimento, causa aumento de volume.

2.4.2 Ensaios Laboratoriais em Materiais Rochosos para Caracterização Tecnológica

Segundo Verhoef & Van De Wall (1998), o “Estado da Arte” da pesquisa em agregados não é muito sofisticado, mas existem debates sobre pontos específicos como por exemplo quais as propriedades a serem medidas e qual sua variabilidade ao longo do tempo.

Com o passar dos anos, uma variedade de ensaios foi desenvolvida objetivando avaliar quais as propriedades dos materiais rochosos que são relevantes para o bom funcionamento de uma estrutura de engenharia que os utiliza. Na maioria das vezes, estes testes, especialmente aqueles que deveriam avaliar a durabilidade, foram desenvolvidos na tentativa de simular, com a melhor exatidão possível, as condições que ocorrem na realidade. Ficou provado que não é fácil representar em laboratório estas reais condições. Uma das razões encontradas em Verhoef & Van De Wall (1998) é a que se refere à grande variabilidade das propriedades geotécnicas dos materiais rochosos. Esta variação ocorre em todas as escalas e se constitui na principal diferença entre estes materiais e outros materiais de engenharia, como por exemplo o aço. A variabilidade de propriedades é inerente aos materiais naturais, já que os manufaturados seguem rígidos controles de produção. Desta forma, os resultados obtidos, muitas vezes, correspondem a uma aproximação do valor real da propriedade estudada.

Casos históricos, pesquisa acadêmica ou simplesmente experiência prática fornecem dados para termos uma idéia dos limites de valores para os resultados de ensaios aplicados em rochas e agregados (Tabela 1).

TABELA 1 – Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Verhoef & Van De Wall; 1998).

Ensaio (índice)	Excelente	Bom	Razoável	Ruim
Massa Específica seca (g/cm^3)	> 2,9	2,6 – 2,9	2,3 – 2,6	< 2,3
Absorção d'água (%)	< 0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,0	> 6,0
Porosidade (%)	<2	2 - 3	3 - 4	>4
Sanidade Mg,NaSO_4 (%)	< 2	2 - 12	12 - 30	> 30
Congelamento e degelo (%)	< 0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 2,0	> 2,0
Adsorção de azul de metileno (g/100g)	< 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 1,0	> 1,0
Resistência a compressão simples (MPa)	> 200	100 - 200	50 - 100	< 50
Resistência a carga pontual (MPa)	> 8,0	4,0 – 8,0	1,5 – 4,0	< 1,5
Resistência ao esmagamento (%)	< 20	20 - 25	25 - 30	>30
Resistência ao impacto treton (%)	<20	20 - 25	25 - 30	>30
Resistência ao abrasão los angeles (%)	<40	40 - 45	45 - 50	>50

Os valores apresentados na Tabela 1, devem ser entendidos apenas como indicadores da qualidade do material, pois um simples ensaio não é suficiente para indicar a sua adequabilidade. É desejável associar resultados que determinem as propriedades físicas, químicas e de durabilidade mecânica.

2.5 Aspectos Tecnológicos de Rochas Básicas

2.5.1 Introdução

Autores como Frazão (1993) e Souza Jr (1992) citam que os problemas ligados ao uso de basaltos como material para construção, se relacionam à grande variação de comportamento geotécnico e tecnológico, causados principalmente pela alterabilidade destas rochas. Sabe-se hoje, que a alteração de rochas ocorre, muitas vezes, não mais em intervalos de tempo geológico (milhões de anos), mas, em um intervalo de tempo muito menor, que pode variar de dezenas de anos a poucos dias (“tempo de engenharia”) (Tabela 2). Do ponto de vista da engenharia civil, estas variações refletem-se, principalmente, e na maioria dos casos, na diminuição da resistência mecânica da rocha. Sendo assim, segundo Frazão (1983) a alterabilidade das rochas foi e continuará sendo um dos importantes problemas que a engenharia enfrenta nas obras civis.

TABELA – Processos de degradação de materiais rochosos no tempo “geológico” e de “Engenharia”(adaptado de Fookes et al; 1991).

Tempo	Processo	Localização	Processo de degradação	Efeito no material
"Geológico"	Geológico	In situ	- Intemperismo - Alteração hidrotermal - Alteração deutérica	Alteração mineralógica, mudança de volume, forma, textura, etc.
	"Engenharia"	Produção	Na lavra	- Seleção - Desmonte - Britagem - Peneiramento - Lavagem
		Pilha de estoque	- Intemperismo	Produção de finos, mudança nas propriedades físico-mecânicas.
Construção		Local da obra	- Transporte - Mistura - Compactação - Intemperismo	Abrasão, produção de finos, variação de umidade.
		Depende do tipo de uso	- Intemperismo - Abrasão - Impacto - carregamento	Intemperismo químico mínimo. O efeito no material depende do seu uso.

A Tabela 3 resume alguns casos históricos em que ocorre a degradação do material rochoso quando utilizado em construção civil. Nota-se, que a causa principal da degradação

está fortemente associada à presença de minerais secundários e/ou a influência do intemperismo no local da obra.

TABELA – Resumo de casos históricos de deterioração de materiais rochosos utilizados em construção civil (adaptado de Fookes et al; 1991).

Estrutura de Engenharia	Material usado	Qualidade do material rochoso	Idade de uso quando deteriorado	Local	Causa	Referência
Pavimento	Basalto	Alterado	< 5 anos	EUA	Alta porcentagem de minerais secundários	Scott (1955)
Pavimento	Basalto	Alterado	3 meses	EUA	Presença de minerais secundários e produção de finos	Minor (1960)
Pavimento	Basalto	–	–	EUA	Alta porcentagem de minerais secundários	Day (1962)
Pavimento	Rocha básica	Alterado	18 meses	Ilhas Maurício	Presença de minerais secundários	Hosking & Tubey (1969)
Enrocamento	Basalto	São	Alguns meses	Brasil	Presença de argilominerais expansivos	Farjallat (1969)
Enrocamento	Vários	Levemente alterada	Variável	EUA	Intemperismo físico	Smith et al. (1970)
Pavimento	Basalto	Alterado	6 meses	Austrália	Conteúdo de minerais secundários > 20%	Bethune (1971)
Enrocamento	Basalto	São e alterado	Alguns meses	Brasil	Presença de argilominerais expansivos	Farjallat (1972a)
Enrocamento	Basalto	São	–	EUA	Presença de argilominerais expansivos	Higgs (1976)
Pavimento	Dolerito	Alterado	–	África do Sul	Presença de minerais secundários	Weinert (1964, 1968)
Pavimento	Dolerito	Alterado	< 1 ano	Inglaterra	Degradação Física	Cawsay & Massey (1984)
Pavimento	Basalto	Alterado	< 5 anos	Etiópia	Degradação Física	Mellon (1985)
Enrocamento e agregados	Basalto	São	–	Brasil	Presença de microfissuras	Serra Jr et al. (1990)
Enrocamento e agregados	Basalto	São	–	Brasil	Presença de microfissuras e argilominerais expansivos.	Ferreira et al. (1990)
Enrocamento e agregados	Basalto	São	–	Brasil	Presença de microfissuras e argilominerais expansivos	Marrano (1997)

2.5.2 Terminologia

São encontrados na literatura diversos termos utilizados para designar as modificações pelas quais passa uma rocha sob a ação de agentes atmosféricos (Farjallat, 1972).

Os termos mais correntes como alteração, decomposição, degradação, desintegração, desagregação, intemperização, meteorização, pulverização, climatização, tem sido usados com significados freqüentemente variáveis e imprecisos.

Ainda segundo Farjallat (1972), o termo alteração tem sido usado tanto para modificações deutéricas e hidrotermais (alteração primária), relacionadas aos últimos estádios de consolidação de magmas por exemplo, como para transformações mineralógicas e químicas devido a agentes atmosféricos (alteração secundária ou intempérica) e ainda para modificações físico-químicas de uma rocha devido a causas variadas. Nestes casos, o fator tempo é aferido na escala de tempo geológico, em virtude da extrema lentidão com que estas transformações ocorrem (Marrano, 1997).

Autores como Yoshida (1972), Ladeira & Minette (1984a) e Fookes et al. (1988) possuem a mesma linha de raciocínio para definição da alteração. Consideram esta como a modificação das propriedades físicas, químicas, geomecânicas e dinâmicas, causadas por agentes externos, que podem ser: atmosféricos, forças tectônicas, forças dinâmicas ou quaisquer outras que atenuem as forças intermoleculares dos constituintes mineralógicos. Fookes et al. (1988) e Frazão (1983) reforçam ainda que estas mudanças, do ponto de vista da engenharia, devem ocorrer na escala de tempo de sua aplicação em obras civis.

Os termos intemperização, climatização e meteorização possuem o mesmo significado e estão relacionados as modificações físico-químicas das rochas devido a agentes externos (atmosféricos). Quando ocorre o predomínio de modificações químicas e mineralógicas na rocha o termo específico e a decomposição. A desintegração seria o termo específico utilizado para modificações físicas onde ocorrem, em particular, a quebra de pedaços.

Frazão (1983) cita que o termo degradação tem sido utilizado principalmente por geomorfólogos e pedólogos, significando modificações do relevo por ações erosivas e modificações da natureza dos solos por ações climáticas, respectivamente.

Em geologia de engenharia o termo degradação é geralmente usado para designar queda na qualidade dos materiais, devido a processos físicos e químicos, acompanhada da redução de resistência mecânica (West et al;1970).

Arenitização, pulverização e desagregação indicam transformações dos blocos ou fragmentos rochosos em areia e material pulverulento, devido a agentes atmosféricos (Farjallat, 1972).

Deve-se levar em consideração também, a propensão das rochas a se alterarem, ou seja o conceito de alteração potencial da rocha ou alterabilidade. Hamrol (1962) enuncia o termo alterabilidade da seguinte maneira: “Uma rocha é dita mais alterável, ou com maior alterabilidade que outra rocha, se tendo sido ambas submetidas aos mesmos agentes de intemperismo durante o mesmo tempo, o grau de alteração é mais avançado na primeira”.

Fookes et al. (1988) e Aires-Barros (1971) citam que o termo alterabilidade é utilizado para designar a susceptibilidade da rocha a alteração, ou seja, maior ou menor aptidão para modificação das suas propriedades ao longo do tempo.

2.5.3 Fatores que influenciam a alteração e a alterabilidade de rochas basálticas

Segundo Pedro (1968), a alteração intempérica ou supérgena pode ser definida como o conjunto de fenômenos que provocam a friabilidade do substrato rochoso levando à evolução de solos e coberturas de alteração superficiais. Essa evolução sendo comandada pela ação de agentes atmosféricos sobre rochas maciças, coerentes e praticamente anidras da superfície terrestre. A alteração pode ser de origem física, neste caso conserva a individualidade química e mineralógica da rocha no curso de sua desagregação ou de origem química, acarretando modificações das características iniciais da rocha, refletidas sobretudo nas transformações e neogênese mineralógicas.

As rochas da superfície terrestre são submetidas a transformações que dependem de fatores intrínsecos e extrínsecos (Aires-Barros, 1971).

Os fatores intrínsecos relacionam-se com a natureza da rocha, que é estabelecida pelas seguintes características:

- composição mineralógica e, conseqüentemente, química;
- estado microfissural (relativo a quantidade, arranjo e dimensões das fissuras) que influencia diretamente a porosidade e permeabilidade da rocha;
- características de textura, estrutura, granulação e grau de cimentação.

Os fatores extrínsecos se referem ao meio ambiente no qual a alteração se processa sendo função tanto das condições climáticas gerais quanto do meio específico onde encontra-se a rocha.

Este mesmo autor apresenta a correlação entre os fatores intrínsecos (i) e extrínsecos (e) com a alteração (m), através da seguinte expressão:

$$m = f(i, e)$$

Os fatores intrínsecos (i) são representados pela natureza mineralógica (n) e pela superfície exposta a alteração (s). Desta forma, têm-se:

$$i = f(n, s)$$

Os fatores extrínsecos, representados por (T) temperatura, (pH) potencial hidrogeniônico, (Eh) potencial de oxiredução, (b) forças bióticas e (h) quantidade de água disponível, são expressos por:

$$e = f(T, pH, Eh, b, h)$$

A esses fatores, o autor acrescenta o tempo (t), ficando a expressão do seguinte modo:

$$m = f(n, s, T, pH, Eh, b, h, t)$$

Sendo assim, a alterabilidade (a) será a taxa de variação do grau de alteração (Δm) em um dado intervalo de tempo (Δt).

$$a = (\Delta m) / (\Delta t)$$

2.5.3.1 Fatores intrínsecos

Como visto anteriormente, os fatores intrínsecos relacionam-se com a natureza da rocha, que é estabelecida, principalmente, pelas seguintes características: Composição mineralógica, descontinuidades da rocha e presença de argilominerais expansivos.

2.5.3.1.1 Composição mineralógica

A alterabilidade depende da estabilidade química dos minerais constituintes da rocha. Do ponto de vista geoquímico, esse conceito foi primeiramente proposto por Goldich (1938) a partir do estudo da estabilidade química, nas condições de superfície, de rochas com diferentes composições mineralógicas. Este estudo permitiu o estabelecimento de séries de alterabilidade mineral.

As séries de Goldich dispõe os minerais em ordem crescente de estabilidade, separados em duas seqüências denominadas de série contínua (formada por minerais félsicos e/ou sílico-aluminosos) e série descontínua (formada por minerais ferro-magnesianos) (Figura 22). Estas séries muito se assemelham as séries de Bowen (1956), que sugerem uma ordenação de cristalização dos minerais no líquido magmático. Os minerais a se formarem primeiro no magma, em maiores condições de pressão e temperatura, são menos estáveis nas condições superficiais. Os últimos a se cristalizarem, em menores condições de pressão e temperatura, são mais estáveis quando submetidos a condições vigentes na superfície terrestre. Dessa forma, quanto maior a diferença de ambiente geoquímico entre as condições de formação dos minerais com as condições que prevalecem na superfície terrestre, maior será a alterabilidade da rocha.

Para exemplificar o citado acima tomamos o exemplo das rochas basálticas e graníticas. As rochas basálticas, em geral, se alteram mais facilmente que as rochas graníticas nas condições de clima tropical úmido. Essa maior alterabilidade dos basaltos se

dá porque os seus minerais essenciais (plagioclásios cálcicos e piroxênios) são menos estáveis quimicamente que os minerais essenciais das rochas graníticas (quartzo, feldspato potássico e biotita), para as mesmas condições físico-químicas ambientais (Frazão, 1983).

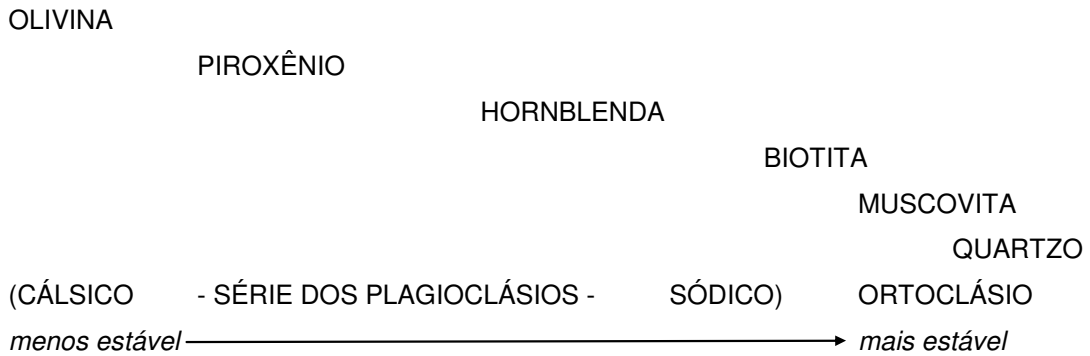


FIGURA 22 - Série de estabilidade química dos minerais nas condições superficiais (Goldich, 1938).

Melfi & Levi (1971) e Levi & Melfi (1972) apresentam em seus trabalhos resultados obtidos com a investigação dos aspectos geoquímicos e mineralógicos da alteração de rochas ígneas básicas, sujeitas a condições de clima tropical. As rochas básicas estudadas apresentam as seguintes composições: plagioclásio cálcico (anortita) e piroxênios (augita e pigeonita) como minerais essenciais e olivina, apatita, quartzo e opacos como acessórios e, no caso dos basaltos, 20% de matéria vítrea.

Estes mesmos autores explicam os passos das transformações mineralógicas, sofridas pelas rochas básicas estudadas, quando submetidas a condições de alteração. A olivina é o primeiro mineral a se cristalizar na câmara magmática e o primeiro a se alterar em condições ambientais. A sua alteração origina argilominerais do grupo das esmectitas. Os plagioclásios alteram-se em seguida a olivina. Quando em condições de boa drenagem transformam-se em gibsita, caso contrário sob condições de má drenagem, transformam-se em argilominerais do grupo da caulinita.

Frazão (1983) acrescenta em seu trabalho que dentre os minerais secundários dos basaltos, os argilominerais talvez sejam os que mais contribuem com a alteração. Este autor menciona ainda que os constituintes vítreos, comuns nos basaltos, podem, por decomposição e recristalização, originar argilominerais expansivos do grupo das esmectitas.

2.5.3.1.2 Descontinuidades da rocha

Outro fator intrínseco que tem influência na alteração e alterabilidade das rochas é a presença de descontinuidades. Farran & Thénnoz (1965) demonstram a estreita relação entre a presença de descontinuidades com o estado de alteração da rocha. Estes autores classificam as descontinuidades em:

- a) Microfissuras - caracterizadas por uma pequena espessura ($\leq 1\mu$) e por dimensões longitudinais da ordem de grandeza dos cristais. Constituem a microfissuração da rocha, principalmente localizadas nas clivagens. É a seu nível que se situam as grandes superfícies de contato entre a rocha e o fluido.
- b) Fraturas - Estas são em bem menor número que as microfissuras e possuem dimensões consideravelmente mais importantes, além de se apresentarem distribuídas em direções preferenciais. Compreendem as microfraturas ($e \leq 0,1\text{mm}$), em geral não observáveis a olho nú, e as macro fraturas ($e \geq 0,1\text{mm}$), representadas por fraturas abertas ou falhas.

Farjallat (1972) cita em seu trabalho que todas as descontinuidades participam do processo de alteração. As macrofraturas abertas drenam as águas até o interior do maciço, que, a partir disto, podem banhar e atacar grandes superfícies internas de minerais ao longo das microfissuras. Já as microfraturas participam das duas funções completando a rede de irrigação ramificada. Sendo assim, a partir do geral torna-se possível a impregnação da matriz.

Farran & Thénnoz (1965), estudando várias amostras de granito, obtiveram diferentes valores de permeabilidade ao ar e de microfissuração que unidas a valores de alterabilidade, observados em campo, permitiram o estabelecimento de duas grandes classes de rochas:

- Rochas muito compactas - onde a circulação de água é impossível, ou seja, rochas com permeabilidade ao ar ao redor ou menor que 1mdy .
- Rochas menos compactas com circulação de água possível - possuem valores de permeabilidade maior que 1mdy sendo que a alterabilidade cresce com o aumento da superfície específica interna.

Outra consequência da microfissuração é que com a permeabilidade criada a água pode atingir os argilominerais expansivos localizados tanto nos poros quanto nas fissuras da rocha. Como consequência a expansão dos argilominerais pode provocar tensões de tração manifestadas pelo aumento de volume desses argilominerais com a absorção d'água. Este fenômeno pode levar a rocha a desagregação.

2.5.3.1.3 Presença de argilominerais expansivos

A alterabilidade de rochas utilizadas como material de construção, especialmente as rochas basálticas, tem sido relacionadas ao seu conteúdo em argilominerais (Scott (1955), Day (1962), Collet, Warnick & Hoffman (1962), Weinert (1964), Smith (1970), Schneider & Pires da Rocha (1968), Struillou (1969), Farjallat (1970 e 1971), West et al; (1970), Farjallat (1972), Hayase et al.(1972), Frazão & Goulart (1976), De Alba & Sesana (1978), Rimoldi (1982), Frazão & Caruso (1983), Roisenberg et al (1984)).

Os argilominerais são silicatos hidratados com estrutura cristalina em camadas (filossilicatos), constituídos por folhas contínuas de tetraedros de SiO_4 , ordenados de forma hexagonal, condensados com folhas octaédricas de hidróxidos de metais di e trivalentes; os argilominerais são essencialmente constituídos por partículas (cristais) de pequenas dimensões, geralmente abaixo de 2 microns (Santos, 1989).

Frazão & Goulart (1976) estudam os principais grupos de argilominerais e a propriedade de apresentarem aumento de volume por absorção d'água. Estes autores verificam que a expansibilidade varia de grupo para grupo, sendo normalmente elevada para o grupo das esmectitas e praticamente nula para os demais grupos. Este comportamento deve-se a estrutura atômica destes minerais. As principais características destes argilominerais são citadas a seguir:

- Grupo da caulinita: minerais do tipo 1:1, ou seja, cada placa é formada pela combinação de uma lamela tetraédrica com uma octaédrica, com espaçamento basal de cerca de 7Å . A expansão nestes argilominerais é praticamente nula, embora possa ocorrer moléculas de água entre as placas originando a caulinita hidratada (halloisita). Os argilominerais do grupo das caolinitas estão associados a ambientes de alta pluviosidade, com pH

ligeiramente ácido, de boa drenagem e pobre em cátions livres, características marcantes de clima tropical.

- 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 o Mg^{2+} ou Fe^{2+} , caracterizando este grupo como de estrutura 2:1:1. Seu espaçamento basal é de 14Å . Sua ocorrência associa-se a rochas metamórficas de baixo a médio grau, sendo rara nos solos.
- Grupo da illita: Possui sua unidade básica formada pela justaposição de uma lamela octaédrica com duas tetraédricas, tipo 2:1. As suas placas são ligadas por íons de K^+ , que se encaixam entre elas, originando uma ligação forte que não permite a entrada de moléculas de água. A sua origem está associada, principalmente, a fixação de íons potássio em argilominerais preexistentes como a caulinita e a montmorilonita. Seu espaçamento basal é de 10Å .
- Grupo da esmectita: Os minerais do grupo da esmectita são compostos por três camadas: tetraédrica, octaédrica e tetraédrica. Deste modo, parte dos íons de silício das camadas de tetraedro são substituídos por íons de alumínio (Al^{2+}), e de modo constante uma parte dos íons de alumínio das camadas de octaédros são substituídos por íons de magnésio (Mg^{2+}) e por ferro (Fe^{3+}). Desta forma a união das folhas compostas entre si fica frouxa e o retículo não é mais neutro eletricamente. Como resultado, podem ser admitidas, nos interstícios entre camadas, quantidades variáveis de moléculas de água e de íons trocáveis.

Segundo Brekke (1965) a expansão dos argilominerais relaciona-se a condicionantes internos e externos à rocha. Como fatores internos o autor cita:

- tipo e teor de argilominerais presentes nas rochas;
- capacidade de troca catiônica (CTC);
- concentração de íons disponíveis na fração argila, com reflexos na troca catiônica;

- dimensão das partículas: a diminuição no tamanho das partículas conduz ao aumento da superfície específica, ampliando o poder de absorção e, por consequência, a expansibilidade;
- conteúdo inicial de água: algumas montmorilonitas só se expandem consideravelmente quando o teor em água for superior aquele que determina seu limite de plasticidade;
- densidade seca: expressa o grau de compactação; as argilas muito compactas apresentam maiores valores de expansão e de pressão de expansão.

Como fatores externos, têm-se:

- possibilidade ao acesso de água ao argilomineral (grau de fissuração);
- possibilidade de expansão do material argiloso confinado;
- natureza e concentração dos íons dissolvidos na água que, por vezes, podem reduzir a expansão.

Ruiz (1963) advoga que o mecanismo de desagregação de basaltos seria o da ruptura da rocha por tração, devido as pressões internas exercidas pelo conteúdo em argilominerais expansivos ao entrarem em contato com a água. O processo de umedecimento e secagem, a qual se submete a rocha, provoca a repetição sucessiva destas tensões de tração, enfraquecendo as ligações entre os outros constituintes minerais causando ruptura, ou a abertura das microfraturas já existentes.

Frazão et al. (1976) verificam que, em rochas sedimentares argilosas com presença de argilas expansivas, os valores de contração são maiores que os valores de expansão. A contração esta acompanhada de uma diminuição da umidade natural e do grau de saturação. Verificam estes autores que o processo de desagregação é evidenciado na ressaturação após a primeira secagem.

Alguns autores fornecem valores numéricos limites de porcentagem de minerais secundários tolerados em rochas a serem utilizadas como agregados.

Para finalidades rodoviárias, tratando de rochas basálticas, Scott (1955) admite os seguintes valores em minerais secundários:

- < 20% - pequeno efeito
- 20 a 35% - algumas falhas na utilização
- >35% - insucesso

Day (1962), com relação aos teores de minerais secundários, classificam os basaltos em:

- 0 a 15% - boa qualidade
- 15 - 25% - transição
- > 25% - qualidade inferior

De acordo com Schneider & Pires da Rocha (1968):

- < 5% de minerais secundários - rochas adequadas
- 5 a 10% secundários não expansivos - rochas adequadas
- 5 a 10% secundários expansivos - recomenda-se ensaios de durabilidade
- > 10% secundários - recomenda-se ensaios de durabilidade

2.5.3.2 Fatores Extrínsecos

Como visto no início deste capítulo os fatores extrínsecos se referem ao meio ambiente no qual a alteração se processa, sendo função tanto das condições climáticas gerais quanto das características específicas do meio físico. Dentre os principais fatores extrínsecos que afetam a alterabilidade das rochas podemos citar: Fatores climáticos (temperatura e precipitação), Fatores bióticos (cobertura vegetal), Fatores geomorfológicos (formas de relevo), etc.

Para este trabalho, abordaremos apenas as tentativas de quantificação da influência dos fatores climáticos sobre o tipo de intemperismo atuante nas rochas. Esta correlação tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores como Fookes et al. (1971), Carrol (1970) e Weinert (1964, 1968, 1970, 1984). Este último autor, estudando a durabilidade de rochas ígneas básicas (doleritos) para serem utilizadas como material de construção em rodovias na

África do Sul, definiu o índice climático (N). Este índice, se baseia na relação entre a taxa de evaporação do mês mais quente do ano (E_j), na África do sul o mês de Janeiro, com o valor da precipitação anual total (P_a). Desta forma, têm-se a expressão:

$$N = 12 E_j / P_a$$

De acordo com Marrano (1997), a pluviosidade que incide em determinada área é de fundamental importância para lixiviação dos produtos do intemperismo. Desta forma, nos locais onde a precipitação é maior que a evaporação, ocorre a disponibilidade de água para promover as reações químicas, regidas mecanismo da hidrólise, resultando na remoção dos elementos solúveis. Por outro lado, nos locais onde prevalece a evaporação sobre a precipitação, os elementos solúveis não podem ser lixiviados dos minerais, o que torna o intemperismo químico bastante lento ou inexistente.

O Índice (N) de Weinert (1964, 1968, 1970, 1984), indica a disponibilidade de água para os processos intempéricos e, de certa forma, permite distinguir qual o tipo de intemperismo atuante sobre a rocha, se físico ($N > 5$) ou químico ($N < 5$).

De forma mais detalhada o autor apresenta a seguinte classificação:

- ($2 < N < 5$) – a montmorilonita provavelmente é o produto final da decomposição.
- ($N < 2$) – a montmorilonita perde a estabilidade e se decompõe em caulinita.
- ($N < 1$) – a caulinita também é instável e se decompõe em gibsita.

2.5.4 Propriedades das rochas variáveis com a alteração

De maneira geral, em uma rocha cristalina todos os tipos de resistência física ou mecânica devem diminuir com o avanço do grau de alteração. É possível, entretanto, ocorrer um aumento de resistência em estados mais avançados de alteração. Isto ocorre, por exemplo, em estádios avançados de laterização onde a alteração de minerais

ferromagnesianos pode liberar óxidos e hidróxidos de ferro que cimentem os outros constituintes minerais, aumentando a resistência físico-mecânicas da rocha (Farjallat,1971). A importância da alteração e da alterabilidade dos materiais rochosos em construção civil residiria principalmente em quatro efeitos (Farjallat, 1972):

1. Diminuição de resistência com ou sem a produção de finos - a diminuição da resistência mecânica das rochas é uma das propriedades mais significativas para a engenharia civil. Em quaisquer casos, a diminuição da resistência com a alteração ou descoesão constitui sempre um inconveniente.
2. Variação nas características mecânicas de deformação e deformabilidade - o comportamento geomecânico das rochas, na forma de maciço ou de materiais ou rocha em blocos está bastante relacionado ao seu estado de alteração. Shoua & Mase (1966) relatam que a deformabilidade de uma rocha é devida de uma forma, a deformabilidade do sistema constituído pelos seus grãos cristalinos e, de outra forma, a do sistema constituído pelas ligações entre estes grãos. Cada um destes sistemas contribuindo para o comportamento deformacional global da rocha.
3. Variação na porosidade e permeabilidade - a porosidade e a permeabilidade da rocha são propriedades variáveis com a alteração, podendo aumentar ou diminuir. Conseqüentemente, a variação destas propriedades é especialmente importante em obras onde a estanqueidade é fundamental, ou seja, barragens, túneis, fundações.
4. Diminuição nas características de aderência ou adesividade, tanto a ligantes hidráulicos como betuminosos - as características de aderência e adesividade a ligantes relacionam-se ao estado de alteração do agregado. A resistência da estrutura, naturalmente, relaciona-se, com a eficiência desta ligação.

A massa específica aparente de uma rocha e a massa específica dos grãos diminuem à medida que a alteração aumenta. Por outro lado, a progressão da alteração provoca o aumento da porosidade, seja devido a lixiviação dos elementos dissolvidos, ou ainda pelo aumento da fissuração. Como conseqüência a absorção d'água também aumenta (Marrano, 1997). Desta forma, as propriedades mecânicas sofrem efeito desfavorável, traduzido pela queda das características de resistência com o avanço da intensidade da alteração.

Vários autores correlacionam as variações das propriedades das rochas e seus respectivos graus de alteração, dentre eles citamos, a seguir, os mais significativos.

Iliev (1966) estudou a variação das propriedades de rochas monzoníticas com a meteorização. As propriedades foram classificadas, de acordo com a ordem de grandeza de variação, em: fortemente variáveis, moderadamente, e fracamente variáveis. As propriedades classificadas como fortemente variáveis foram o volume de poros, a velocidade ultra-sônica, o módulo de elasticidade, o módulo de deformação e a tensão máxima de ruptura. A densidade aparente e o coeficiente de Poisson foram classificados como propriedades moderadamente variáveis. Já o peso específico dos grãos foi considerado uma propriedade fracamente variável.

Miranda (1984), estudando rochas graníticas e gabros do maciço de Sintra em Portugal, utilizou a relação molecular $2\text{Fe}_2\text{O}_3/2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$, obtidas em ensaios no extrator Soxhlet, para avaliar o grau de oxidação do ferro associando-a aos valores de massa específica das rochas. O autor verificou que, independentemente do tipo litológico, a evolução da alteração se processou em dois estádios:

1. Na fase inicial do processo de alteração ocorreu o aumento brusco da relação molecular, indicativa da oxidação do ferro, acompanhada de ligeira diminuição da massa específica;
2. No estágio final, houve a diminuição drástica da massa específica sem que houvesse variação significativa da relação molecular, devido a fixação do Fe^{3+} sob a forma de compostos do tipo óxidos/hidróxidos.

Fourmaintraux & Tourenq (1970) relacionam os valores teóricos do módulo de deformação estático (E) e da velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_p) com valores medidos. A diferença entre os valores calculados e medidos foi atribuída ao estado de alteração e grau de fissuração das rochas.

Em relação as rochas basálticas, com base no trabalho de Frazão & Caruso (1983), conclui-se que:

- Os basaltos mais alteráveis, são aqueles que apresentam maiores teores em argilominerais expansivos e grau de microfissuração mais elevado.
- Os basaltos de coloração escura apresentam em geral menor alterabilidade relativamente àqueles de coloração clara e/ou com pigmentações verdes.

2.5.5 Índices quantificadores da alteração

Segundo Farjallat (1971), é um problema difícil comparar quantitativamente os estados de alteração das rochas, ou graus de alteração. Entretanto, os métodos qualitativos conduzem a avaliações subjetivas, que tornam pouco precisos os estudos comparativos de alteração em materiais rochosos similares. Dessa forma, segundo Marrano (1997), tem sido desenvolvidos estudos quantitativos para estimativa do grau de alteração.

A quantificação da alteração baseia-se em parâmetros numéricos que relacionam valores de uma determinada propriedade de uma mesma rocha, obtidos de uma mesma amostra que supostamente admitidas como tendo diferentes estados ou graus de alteração no momento de sua análise (Marrano, 1997).

Yoshida (1972) relaciona as causas que constituem-se em obstáculos no estudo da alterabilidade e alteração, sendo elas:

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

Os índices quantificadores da alteração tem sido propostos com base nas propriedades: físicas, químicas e mecânicas das rochas.

2.5.5.1 Índices físicos:

Hamrol (1962) advoga que um certo volume de rocha é dito mais alterado que um outro volume da mesma rocha, se os valores das características mecânicas do primeiro são mais baixas. O primeiro volume da rocha possuiria um grau de alteração maior que o segundo. Sendo assim, algumas variações nas propriedades da rocha funcionam como indicadores ou índices do seu estado de alteração.

O índice ultra-sônico (K) foi proposto por Iliev (1966), como sendo:

$$K = V_o - V_w / V_o$$

onde (K) é o índice ultra-sônico ou coeficiente de intemperismo, (V_o) é a velocidade ultra-sônica na rocha sã e (V_w) é a velocidade ultra-sônica na rocha alterada.

Ladeira & Minette (1984b), em pesquisa realizada em amostras de rochas dioríticas, definiram os seguintes índices físicos de alteração:

- Índice de massa específica aparente

$$I\rho = \rho_o - \rho_w / \rho_o \qquad 0 < I\rho < 1$$

Sendo (ρ_o) a massa específica aparente da rocha considerada geotécnicamente mais sã no local da amostragem e (ρ_w) a massa específica aparente da rocha alterada.

- Índice de absorção

$$IA = A_w - A_o / A_w \qquad 0 < IA < 1$$

Onde: (A_w) é a absorção da rocha em um certo estado de alteração e (A_o) a absorção da rocha considerada geotécnicamente sã, ou aquela menos alterada no local da coleta.

- Índice de porosidade aparente

$$I\eta a = \eta_{\omega} - \eta_o / \eta_{\omega} \qquad 0 < I\eta a < 1$$

Sendo: (η_{ω}) a porosidade da rocha em um certo estado de alteração e (η_o) a porosidade da rocha considerada geotecnicamente sã, ou aquela menos alterada no local da coleta.

- Índice de perda de peso

$$IwL = m_o - m_1 / m_o \qquad 0 < IwL < 1$$

Onde: (m_o) é o peso da massa de rocha seca, no seu estado original, menos alterado e antes de qualquer ensaio, e (m_1) o peso da massa de rocha após um ou mais ciclos de qualquer ensaio de alteração.

Saito (1981) apresentou resultados de velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais, peso específico, porosidade efetiva, resistência a compressão simples e dureza de Schmidt para rochas ígneas em diversos estágios de alteração.

Teoricamente, a velocidade com que as ondas sísmicas se propagam através do material rochoso, dependem exclusivamente das suas propriedades elásticas e de sua densidade. Na prática uma rede de fraturas ou microfaturas impõe mudanças na velocidade de propagação destas ondas. A relação entre as velocidades (V_p) velocidade das ondas longitudinais e (V_s) velocidade das ondas transversais, servem como índice para o grau de fissuramento e alteração destes materiais rochosos (Tabela 4).

TABELA 4 - Relação entre as velocidades das ondas sísmicas e qualidade do maciço

V_s/V_p	Qualidade do Maciço
< 0,6	Não fraturado
0,6 a 0,7	Fraturado
>0,7	Muito fraturado

Uma rocha cristalina de composição bem definida tem, teoricamente, propriedades elásticas perto da média das propriedades elásticas de seus componentes mineralógicos. Tourenq & Fourmaintraux (1974) propuseram um índice de qualidade IQ, que está relacionado com o grau de fissuramento e alteração da rocha e que é definido como a razão entre as velocidades das ondas longitudinais (V_p) medidas e calculadas de uma rocha.

$$IQ = Vp_{medida} / Vp_{calculada} \times 100$$

Estes autores estabeleceram que a porosidade provocada pelas fissuras (Nf) faz com que o índice de qualidade decresça aproximadamente 16 vezes mais rápido que a porosidade natural.

$$IQ = 100 - 1.6 \cdot (Np)\%$$

2.5.5.2 Índices Geoquímicos:

Durante o processo de alteração, principalmente em regiões de clima tropical, as rochas são submetidas a condições de altas temperaturas e alta pluviosidade, que favorecem o intenso intemperismo desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalinos terrosos e sílica e imobilização do ferro e do alumínio.

Os índices químicos de alteração levam em conta a diferença de mobilidade, dos elementos citados acima, com o processo de alteração.

O *fator de lixiviação* (Jenny, 1941 apud Marrano, 1997) foi um dos primeiros índices químicos definidos.

$$F = [(K_2O + Na_2O) / SiO_2] / [(K_2O + Na_2O) / SiO_2]$$

Onde, o numerador apresenta o horizonte alterado e o denominador o material de origem.

REICHE (1950), definiu o *Índice potencial de intemperismo* (W.P.I.) e o *Índice do produto do intemperismo* (P.I.), representado pela equações abaixo:

$$W.P.I. = 100 \text{ moles } (K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O) / \text{ moles } (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + FeO + CuO + MgO + NaO + K_2O)$$

Quanto menor o valor de W.P.I., maior o grau de alteração.

$$P.I. = 100 (SiO_2) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + FeO)$$

Um baixo valor de (P.I.), está associado a um decréscimo de SiO₂, que apresenta um avanço no grau de alteração da rocha.

Short (1961) apud Marrano (1997), propôs o *Índice de intemperismo (W.P.)*, a partir de modificações do (W.P.I.), como visto abaixo:

$$W.P. = (W.P.I.) \text{ do horizonte intemperizado} / (W.P.I.) \text{ da rocha original}$$

Este índice varia de 0 a 1 e fornece as seguintes classes de alteração:

- 0,00 a 0,20 - rocha intensamente alterada
- 0,20 a 0,40 - rocha fortemente alterada
- 0,40 a 0,60 - rocha moderadamente alterada
- 0,60 a 0,80 - rocha suavemente alterada
- 0,80 a 1,00 - rocha levemente alterada

Parker (1970), apresenta em seu trabalho o *Índice de proporções de metais alcalinos e alcalinos terrosos* presentes na rocha:

$$I = (Na)_a / (Na - O)_b + (Mg)_a / (Mg - O)_b + (K)_a / (K - O)_b + (Ca)_a / (Ca - O)_b \times 100$$

(X)_a indica a proporção atômica do elemento X, definida como a porcentagem atômica dividida pelo peso atômico. (X - O)_b é a resistência da ligação do elemento X com o oxigênio. Por meio do índice I pode-se medir o grau de alteração alcançado em relação a rocha original.

Bierkeland (1974) apud Marrano (1997), propôs o *Índice de relação molar entre óxidos*, comparando as relações molares encontradas na rocha sã e na rocha alterada. São calculadas as seguintes relações:

- sílica: alumina SiO_2 / Al_2O_3
- sílica: óxido de ferro SiO_2 / Fe_2O_3

- sílica: sexquióxidos $SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3$
- bases: alumina $(K_2O + Na_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3$

Miura (1975) apud Marrano (1997), apresenta um Índice com a seguinte expressão:

$$DACHEF = ((FeO + MnO + CaO + MgO + Na_2 K_2O) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O)) \text{ rocha alterada} / ((FeO + MnO + CaO + MgO + Na_2 K_2O) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O)) \text{ rocha sã}$$

2.5.5.3 Índices Petrográficos:

As técnicas para determinação destes índices baseiam-se na observação, com uso do microscópio petrográfico, da fábrica da rocha, dos seus constituintes mineralógicos primários e secundários, modos de ocorrência e microfissuras.

Lumb (1962) propôs o Índice denominado Grau de decomposição (X_d), definido por:

$$X_d = (N_q - N_{qo}) / (1 - N_{qo}) \quad 0 < X_d < 1 \text{ onde,}$$

N_{qo} = relação entre o peso do quartzo e o peso do quartzo mais o feldspato da rocha sã.

N_q = é relação entre o peso do quartzo e o peso do quartzo mais o feldspato da amostra.

Aires-Barros (1969) apud Marrano (1997), define o índice micropetrográfico de alteração, como sendo:

$$K_p = (\% \text{ minerais sãos}) / (\% \text{ minerais alterados} + \% \text{ min. secundários} + \% \text{ vazios})$$

Quanto maior for o valor de K_p , maior será o grau de alteração.

O índice de alteração denominado por densidade das microfissuras foi proposto por Onodera (1974) e é definido pela expressão:

$$\rho_{cr} = 100 \times \text{comprimento total da largura de microfissuras} / \text{comprimento da linha de medida}$$

Irfan & Derman (1978) apresentam o Índice micropetrográfico e o Índice de microfraturas, definidos por:

a) *Índice micropetrográfico*

$$I_p = \% \text{ constituintes inalterados} / \% \text{ constituintes alterados}$$

Através desta expressão observa-se que, quanto maior o I_p , menor o grau de alteração da rocha.

b) *Índice de microfratura*

$$I_{ft} = N^\circ / 10mm \quad \text{sendo,}$$

N° = número de microfraturas considerando uma linha transversal da fatia.

O índice total de microfraturas (I_{ft}) pode, se necessário, ser dividido em: índice de microfraturas alteradas e índices de microfraturas sãs. O valor do I_{ft} aumenta com o processo de intemperismo.

Aires Barros (1991), propõe o índice petrográfico (K) para o estudo da alterabilidade de rochas graníticas, como sendo:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{j=1}^m A_j}$$

Onde: S_i = porcentagem de minerais sãos.

A_j = porcentagem de minerais alterados, conteúdo de esmectita, microfissuras e outras feições potencialmente alteráveis.

Frazão & Paraguassu (1994), utilizam o índice petrográfico K1, para avaliação da alterabilidade de basaltos utilizados como fundação e material de construção na obra da UHE de Três Irmãos, calculado abaixo como:

$$K1 = \frac{S1}{S2 + S4 + S5}$$

Frasca & Frazão (1998) propõe uma variação do índice (K1), de Frazão & Paraguassu (1994), apresentando o índice (K2), como sendo:

$$K2 = \frac{S1}{S2 + S3 + (S4 \times 2) + (S5 \times 2) + S6}$$

Desta forma:

S1 = Augita, labradorita e opacos são.

S2 = Augita e labradorita alterados.

S3 = Amígdalas preenchidas por esmectita.

S4 = Esmectitas interligadas.

S5 = Microfissuras preenchidas por esmectitas.

S6 = Outros tipos de microfissuras.

S7 = Presença de vidro vulcânico.

S8 = Minerais secundários + óxi-hidróxidos de ferro.

2.5.5.4 Índices Geomecânicos:

Irfan & Derman (1978) apresentam em seu trabalho valores da resistência a compressão simples, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para um granito em cinco estágios diferentes de alteração. Esses valores comportam-se de forma decrescente com o processo de alteração.

Ladeira & Minette (1984b) apresentam alguns índices geomecânicos de alteração capazes de quantificar a alteração natural e laboratorial de qualquer rocha.

Índice de elasticidade (I_E): o módulo de elasticidade das rochas diminui com o seu grau de alteração natural. O índice (IE) é dado por:

$$I_E = E_0 - E_w / E_0$$

sendo, E_0 o módulo de elasticidade da rocha sã, e E_w o módulo de elasticidade da rocha alterada.

Este índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração e o valor 1, indica uma rocha completamente alterada.

Índice de resistência (I_R): a resistência de uma rocha diminui com o seu grau de alteração natural. O índice (I_R) que se propõe é dado por:

$$I_R = R_0 - R_w / R_0$$

sendo, R_0 a resistência à compressão simples da rocha sã, e R_w a resistência à compressão simples da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração e o valor 1, indica uma rocha completamente alterada.

Índice de cisalhamento (I_S): a resistência ao cisalhamento de uma rocha diminui com o seu grau de alteração. O índice (I_S) que se propõe é dado por:

$$I_S = S_0 - S_w / S_0$$

sendo, S_0 a resistência ao cisalhamento da rocha sã, e S_w a resistência ao cisalhamento da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração e o valor 1, indica uma rocha completamente alterada.

2.5.6 Quantificação da alterabilidade de rochas

A quantificação da alteração, como vimos no item anterior, tem sido apresentada por diversos autores, porém, a quantificação da alterabilidade ainda é muito pouco estudada.

Segundo Ladeira & Minette (1984a), para diferentes tipos de rochas submetidas aos mesmos agentes intempéricos, cada tipo de rocha deverá ter sua curva característica de alteração em função do tempo (para uma determinada propriedade física, química, geomecânica ou dinâmica), como mostra a Figura 23. Nesta figura estão representadas três curvas ideais de alterabilidade para três tipos distintos de rochas.

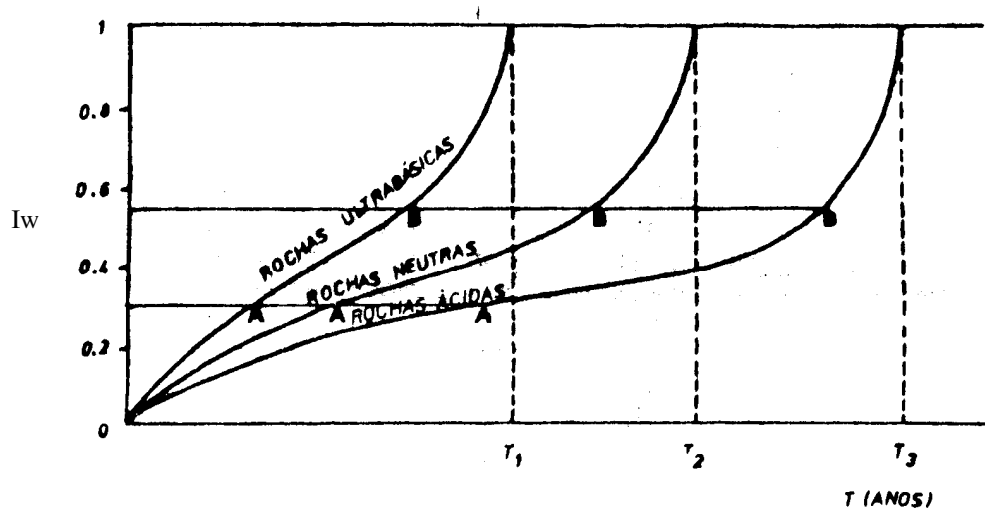


FIGURA 23 - Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas (Ladeira & Minette, 1984a)

Depreende-se, ainda, da Figura 23, que o tempo total (T1) de alteração para uma rocha ultrabásica é muito menor que o tempo de alteração (T3) para uma rocha ácida.

Estas curvas hipotéticas representam a evolução da alteração no tempo, de rochas sãs, até se transformarem em saprolitos ou mesmo solos. O tempo pode ser dezenas, centenas ou milhares de anos, um tempo que nem sempre interessa para qualquer tipo de obra (Ladeira & Minette, 1984a).

A velocidade de alteração das rochas relaciona-se com as características intrínsecas da própria rocha e com agentes do intemperismo atuantes. Sendo assim, a velocidade de alteração de qualquer rocha depende (Ladeira & Minette, 1984a):

1. do estado inicial de alteração da rocha;

2. do estado de tensão remanescente da rocha e a possibilidade de liberação destas tensões, quando a rocha fica exposta a um novo ambiente, e
3. da ação dos agentes externos.

A Figura 24 apresenta a curva característica de alteração para uma rocha ácida. Se o estado inicial de alteração natural da rocha for A,B ou C, segundo Ladeira & Minette (1983a), é evidente que a velocidade máxima de alteração natural será obtida quando a rocha passa do estado C para o C' e a velocidade mínima será obtida quando a rocha passa do estado A para o A'. Deste modo, define-se velocidade de alteração natural (V_{nw}) como sendo:

$$V_{nw} = \Delta I_w / \Delta t$$

Desta forma ΔI_w é a variação de um índice de alteração e Δt é a diferença de tempo.

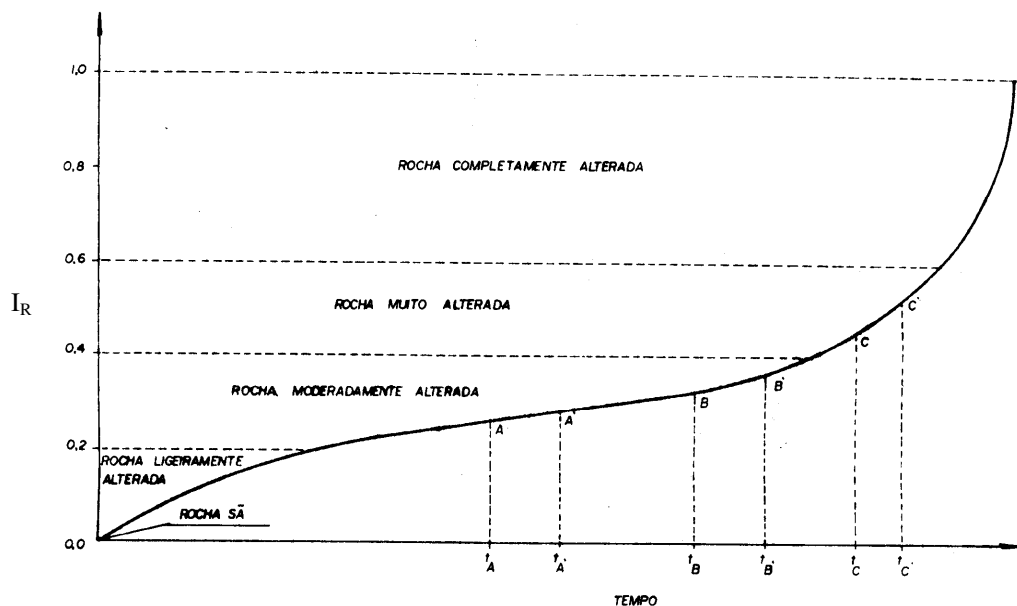


FIGURA 24 - Variação da alteração no tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração (Ladeira & Minette, 1984a).

O tempo mínimo de exposição da rocha aos agentes intempéricos, em clima tropical é de seis meses, devendo colocar-se fragmentos de rochas com diferentes estados de

alteração. O índice de alteração indicador destes estados pode ser obtido a partir das propriedades físicas, químicas, geomecânicas e dinâmicas.

Farjallat (1971) propôs que a relação conveniente entre porcentagem de material desagregado no ensaio de alteração com a porcentagem de perdas por abrasão define um índice de alterabilidade Yoshida (1972), de maneira similar ao critério de Farjallat (1971) define a alterabilidade por um índice de resistência. A Tabela 5 exemplifica estes índices de alterabilidade.

TABELA 5 - Índices de alterabilidade (adaptada de Marrano, 1997).

Índice	Coefficiente de alterabilidade ($K\Delta t$) (Farjallat, 1971)	Coefficiente de alterabilidade (R_f) (Yoshida, 1972)
Critério	relação entre as somas das perdas (em porcentagem do material desagregado) devido à alteração e a queda de resistência mecânica, entre dois ensaios de alteração, natural ou experimental.	relação entre o material retido devido à alteração e sua resistência mecânica. Considerando-se dois ensaios de alteração natural e experimental.
Ensaios utilizados	lixiviação contínua em extrator Soxhlet e abrasão Los Angeles	água-estufa, etileno-glicol, lixiviação contínua em extrator Soxhlet, imersão em sulfato de sódio, alterabilidade natural e impacto treton.
Expressão	$1 - ((200-F)/(200-I))$ I - soma das perdas por alteração e por abrasão, da amostra "in natura". F - ídem para amostra após o ensaio de alteração.	$1 - (100 - P_2) R_2 / 100 R_1$ $P_2 =$ perdas por alteração $R_1 =$ resistência mecânica inicial do material retido $R_2 =$ resistência mecânica final do material retido
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 resistência a 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 índice	do entre 0 e 1. Quanto menor for o valor, menos alterável será a rocha.	entre 0 e R Quanto menor for o valor, mais alterável será a rocha.

Houston & Smith (1997) propuseram o Índice de Alteração da Esmectita (SAI – “*Smectite Alteration index*”) para avaliação da qualidade de agregados provenientes de derrames basálticos na Austrália. Este índice, se baseia nos resultados de análises de difratometria de raios-x, onde são correlacionados os picos de intensidade (cps) da Esmectita (15Å) e do Plagioclásio (3,2Å), após removido o nível de “background” do ensaio. Desta forma, têm-se:

$$SAI = \text{pico de intensidade da Esmectita (cps)} / \text{pico de intensidade do Plagioclásio (cps)}$$

Altos valores deste índice, que varia de 0 a 1, indicam alto grau de alteração do material rochoso. Já os baixos valores, indicam baixo grau de alteração. O zero representa a rocha fresca (Tabela 6).

TABELA 6 – Grau de Alteração do basalto e sua relação com o Índice de Alteração da Esmectita (Houston & Smith, 1997).

Índice de Alteração da Esmectita (SAI)	Grau de Alteração
0,00	Rocha Fresca
0,01 – 0,25	Levemente Alterada
0,26 – 0,50	Moderadamente Alterada
0,51 – 0,75	Fortemente Alterada
> 0,75	Completamente Alterada

Os espectros das análises de raios-x, para cada nível de alteração, com os respectivos valores do Índice SAI, podem ser vistos na Figura 24.

Fookes et al. (1988), sugerem o uso de indicadores de durabilidade estáticos e dinâmicos para avaliação da qualidade do material rochoso. O indicador dinâmico deverá ser utilizado apenas em situações em que o material rochoso é solicitado em condições de carregamento dinâmico, não sendo o caso do presente trabalho. Já o indicador de durabilidade estático (RDI_S), requer valores de quatro ensaios tecnológicos, expressados na seguinte fórmula:

$$RDI_S = (I_{S(50)*} - 0,1 (SST + 5WA)) / (SG_{ssd})$$

Desta maneira, têm-se:

$I_{S(50)*}$ = média da resistência a carga pontual seca e saturada (ISRM, 1985);

SGT = massa da amostra (G) / (volume da amostra (V) x massa específica saturada (G_{ssd}))

WA = Absorção de água

SG_{ssd} = massa específica saturada

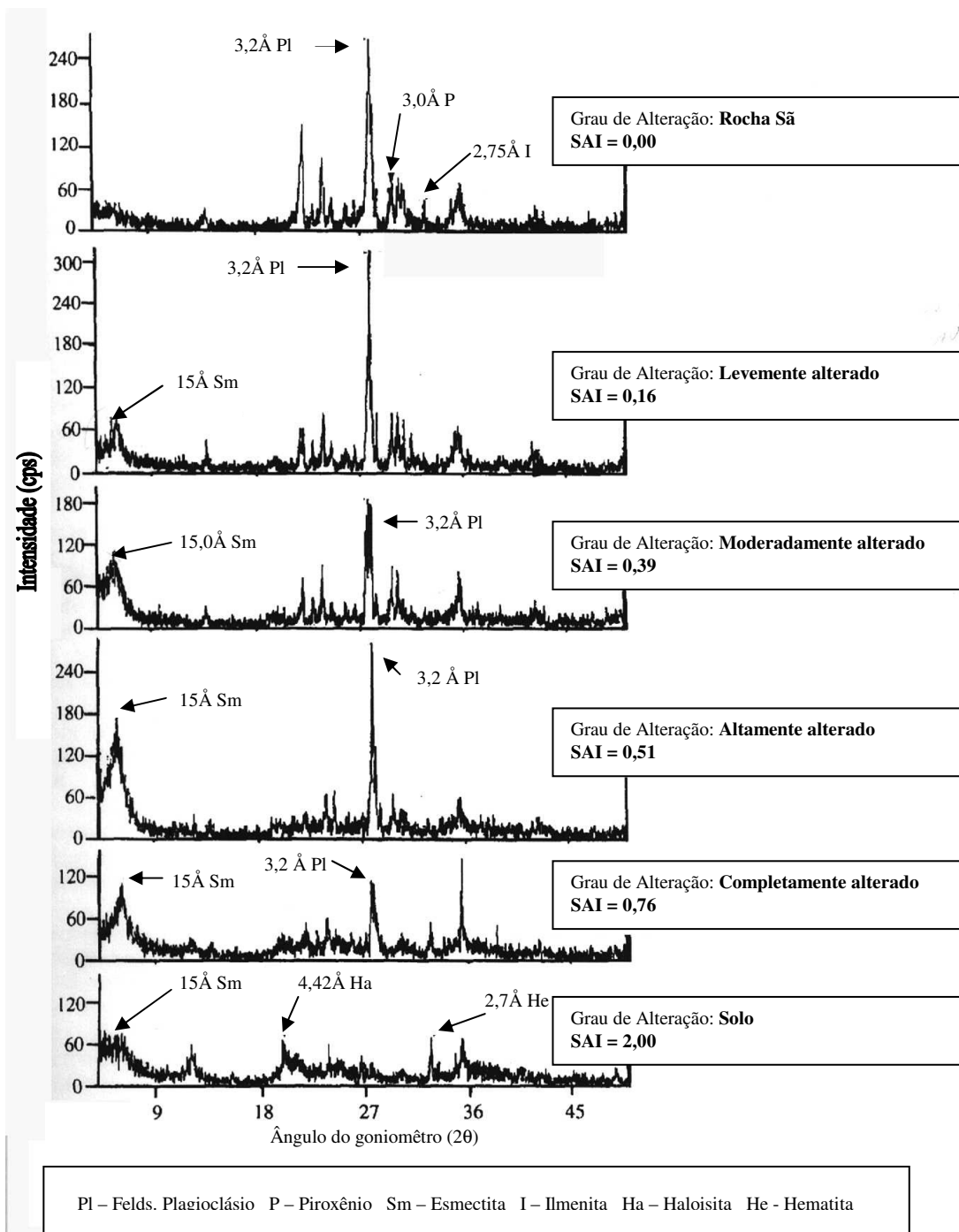


FIGURA - Espectros de análises de raios-x, para cada nível de alteração, com os respectivos valores do Índice SAI (Houston & Smith, 1997).

A previsão da qualidade do material rochoso baseado no indicador estático da rocha é apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 – Proposta de estimativa da qualidade do material rochoso através dos valores de RDI_s (Fookes et al; 1988).

RDI_s	Potencial de durabilidade
> 2,5	Excelente
2,5 a 1	Bom
- 1 a - 3	Razoável
< -3	Rum

A avaliação da durabilidade do material rochoso através do IRD (Índice de Durabilidade da Rocha) é sugerido por Rodrigues & Jeremias (1990). A expansibilidade, a porosidade e a resistência à compressão simples são utilizadas para avaliação da qualidade.

$$IRD = (R/Rt)/(n + 2a)$$

Onde,

IRD = Índice de Durabilidade da Rocha

R = Resistência à compressão Simples (MPa)

$R_t = 1$ MPa

n = Porosidade (%)

a = mantissa dos valores do ensaio de expansibilidade

De acordo com os autores, os valores de IRD menores que 2 indicam baixa durabilidade, enquanto que valores superiores a 10 associa-se a boa qualidade dos materiais.

Cole & Sandy (1980) propõe um índice para avaliação da durabilidade de basaltos que se baseia nas características mineralógicas e texturais da rocha (Tabela 8), denominado de “Secondary mineral rating” R_{sm} , representado por:

$$R_{sm} = [\sum (P * M)] T$$

Têm-se, que:

R_{sm} = Taxa de mineral secundário

P = Porcentagem de minerais secundários

M = Valor referente ao mineral secundário (ver Tabela 8)

T = valor referente a textura (ver Tabela 8)

TABELA 8 – Valores de M e de T para o cálculo do R_{sm} (adaptado de Cole & Sandy, 1980).

Valor do mineral	M	Mineral
	2,0	Calcita, muscovita e sericita
	3,0	Cloritas, vermiculita, zeólitas, ilita, flogopita e biotita
	5,0	Clorita expansiva
	8,0	Presença de clorita, vermiculita e esmectitas
	10,0	Esmectita (montmorilonita)
Valor da textura	T	Textura (ocorrência de minerais secundários)
	0,3	Na alteração parcial dos fenocristais e no preenchimento incompleto de vesículas
	0,4	Em fenocristais completamente alterados
	0,5	Com distribuição homogênea na matriz
	0,6	No preenchimento total de vesículas
	0,7	Com distribuição irregular na matriz e com o preenchimento de microfatura isoladas
	1,0	Preenchendo microfaturas irregulares
	2,0	Preenchendo microfaturas interconectadas

O autores sugerem que para valores de R_{sm} acima de 140, o material rochoso apresenta-se inadequado para uso em construção civil.

No Brasil, Arnold (1993) propõe um método alternativo para especificação de agregados para emprego em pavimentos sujeitos a baixo volume de tráfego, que se baseia na determinação da queda de resistência causada pela imersão em água, avaliada através do ensaio de compressão puntiforme. O autor advoga que, se a razão entre a resistência de corpos de prova imersos e secos ao ar for maior que 0,7, indica que o agregado apresenta esqueleto mineral resistente às solicitações internas geradas pela expansão de argilominerais em seu interior (Figura 26). O método proposto, segundo o autor, tem se mostrado de rápida execução, de boa reprodutibilidade e representativo das condições a que o agregados estará submetido no interior da camada do pavimento.

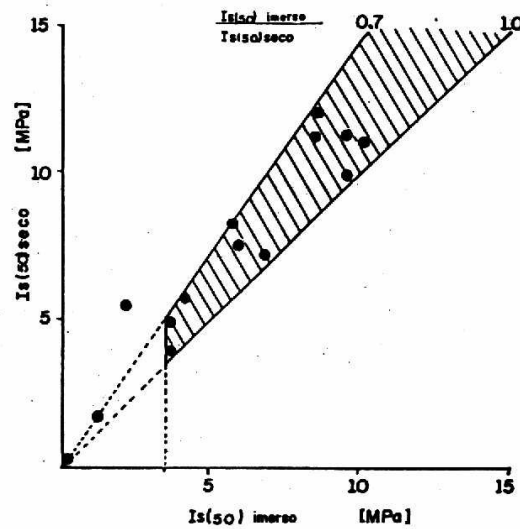


FIGURA 26 – Amostras estudadas classificadas segundo o método proposto por Arnold (1993).

Weinert (1964, 1968, 1970, 1984) propõe uma relação entre o seu Índice climático “N” com o conteúdo de minerais secundários presente em rochas básicas (doleritos) da África do Sul, visando prever a durabilidade destes materiais, para serem utilizadas em obras rodoviárias. Segundo este autor, estas rochas, mesmo as mais alteradas, se constituem na única fonte de material de construção para rodovias em boa parte do País. Desta forma, dividiu o território sul-africano em zonas climáticas e correlacionou, para cada zona, o conteúdo máximo admissível de minerais secundários presente nas rochas (Figura 27).

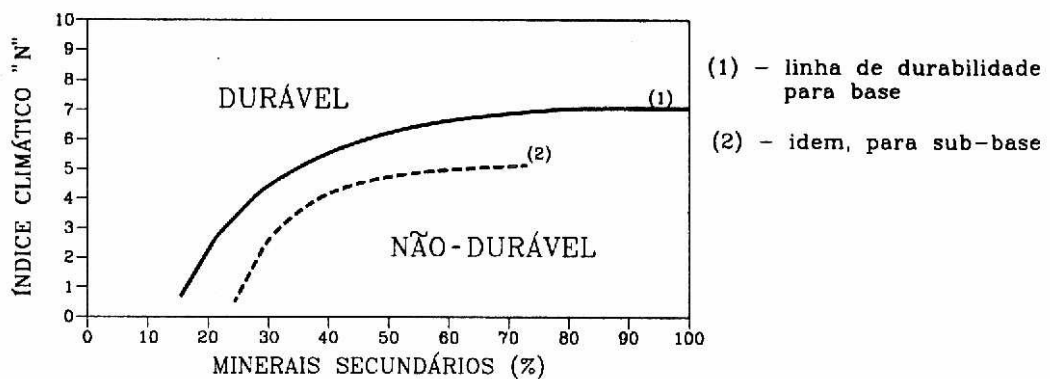


FIGURA 27 – Linha de durabilidade para rochas básicas (doleritos) da África do Sul para uso rodoviário (Weinert, 1984).

Capítulo 3:

MÉTODO EMPREGADO

3.1 Introdução

O método empregado neste trabalho fundamenta-se nos seguintes tópicos:

- Definição dos pontos de amostragem e de estudo em função da abrangência da faixa de derrames basálticos no Estado de São Paulo;
- Adoção do conceito entablamento-colunata como modelo de gênese e compartimentação geológico-geotécnica dos derrames basálticos estudados e, conseqüentemente, a avaliação do potencial de uso deste conceito por profissionais ligados à exploração de basaltos;
- Avaliação e comparação das características tecnológicas e de alterabilidade dos materiais rochosos dos diferentes compartimentos entablamento-colunata. Pesquisas anteriores revelaram, baseadas em aspectos texturais, estruturais e mineralógicos, que agregados provenientes do compartimento entablamento podem apresentar problemas quando utilizados.
- Proposta de sistemática de avaliação da qualidade tecnológica de materiais rochosos a partir da indicação de índices físicos mecânicos ou químicos. Esta proposta deve levar em consideração a facilidade de obtenção dos dados sem prejuízo da avaliação.

Os itens seguintes apresentam o desenvolvimento dos trabalhos relacionados aos tópicos descritos acima.

3.2 Materiais Estudados

Inicialmente o método aplicado objetivou o reconhecimento dos diferentes tipos de derrames basálticos segundo a compartimentação entablamento-colunata. Para tanto, foram efetuados mapeamentos geológico-geotécnicos detalhados de afloramentos e de frentes de lavra em pedreiras nos municípios paulistas de Ribeirão Preto, São Carlos, Araraquara, Rio Claro, Jaú, São Manuel e Assis. Estas áreas foram pré selecionadas de duas formas:

- De acordo com a quantidade de requerimentos, autorizações, licenciamentos e concessões de lavra e de pesquisa referentes às substâncias basalto e diabásio para o Estado de São Paulo. Estes dados foram levantados a partir do Banco de Dados do DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral e englobam os anos compreendidos entre 1971 e 1997;
- A partir da escolha de municípios distribuídos de maneira a abranger toda a faixa de derrames basálticos no Estado de São Paulo, e que se destacassem como polo produtor de agregados.

Analisando a distribuição dos municípios e a quantidade de documentação, foi possível diferenciar três pólos de maior atividade no que diz respeito à exploração e à exploração de rochas básicas (basaltos e diabásios) no Estado de São Paulo.

O primeiro e maior pólo tem como centro o município de Ribeirão Preto e engloba outros vizinhos como Serrana, Cravinhos, Brodosqui, Jardinópolis e São Simão. O segundo abrange a região compreendida entre Campinas e Araçatuba à qual fazem parte os municípios de Piracicaba, São Carlos, Leme, Araraquara, Rio Claro, Americana, Nova Odessa, dentre outros. A região sudoeste do Estado abriga o terceiro pólo, representado pelo município de Assis.

No Estado de São Paulo, o município de Ribeirão Preto apresenta o maior número de áreas requeridas para basalto e diabásio.

Como este trabalho objetiva, especificamente, o estudo de feições típicas de derrames basálticos, as ocorrências localizadas em substrato de diabásio foram excluídas, com exceção da pedreira Paviobras (Rio Claro-SP).

Este inventário forneceu o roteiro para as primeiras campanhas de campo. As pedreiras cadastradas e visitadas são apresentadas na Tabela 9.

TABELA 9 – Pedreiras cadastradas e visitadas.

PEDREIRA	LITOLOGIA	LOCALIDADE
Pedreira da Prefeitura de São Carlos	Basalto	São Carlos-SP
Pedreira da Rod. Washington Luís	Basalto	São Carlos-SP
Pedreira Paviobras	Diabásio	Rio Claro-SP
Pedreira Leão & Leão	Basalto	Araraquara-SP
Pedreira Multipedras	Basalto	Araraquara-SP
Pedreira Ouro-Fino	Basalto	Araraquara-SP
Pedreira Santo Antônio	Basalto	Araraquara-SP
Pedreira Monopedras	Basalto	Araraquara-SP
Pedreira Said	Basalto	Rib. Preto-SP
Pedreira Inderp	Basalto	Rib. Preto-SP
Pedreira Leão & Leão	Basalto	Rib. Preto-SP
Pedreira Bica de Pedra	Basalto	Jaú-SP
Pedreira Pedralite	Basalto	São Manuel-SP
Pedreira Siqueira	Basalto	Assis-SP
Pedreira WS	Basalto	Assis-SP

Os trabalhos de campo permitiram definir os principais tipos de derrames e diferenciá-los de acordo com o conceito entablamento-colunata, classificando-os também, segundo o modelo de Long & Wood (1986), em derrames Tipo I, Tipo II e Tipo III. Esta classificação detalhada pode ser encontrada em Gomes & Rodrigues (1999).

Com relação à caracterização geológico-geotécnica dos maciços rochosos, foram avaliados fundamentalmente o estado de alteração da rocha e as descontinuidades. Os afloramentos estudados, por se tratarem geralmente de frentes de lavra, apresentam a rocha em estado são a praticamente são.

O estudo das descontinuidades primárias nos diferentes compartimentos entablamento-colunata, mostra-se de fundamental importância. Pois, o grau de fraturamento do maciço destaca-se como um dos mais importantes atributos para a diferenciação lito-estrutural.

O entablamento, formado a partir do resfriamento rápido a quase imediato da lava basáltica, atribui a rocha textura fina e alta densidade de descontinuidades primárias. De forma geral, o grau de fraturamento (ABGE, 1983) no compartimento entablado do maciço

pode ser classificado como extremamente fraturado (> 20 fraturas/m). Já o compartimento colunata, em sua maioria, apresenta-se ocasionalmente fraturado (< 1 fratura/m) a pouco fraturado (1 a 5 fraturas/m).

3.3 Amostragem

Após a definição dos perfis lito-estruturais a serem estudados iniciou-se a fase de amostragem. Cada amostra estudada, refere-se a um compartimento entablamento ou colunata de perfis de derrame e, em um único caso, a de basalto vesicular.

Com o objetivo de comparar as características tecnológicas do compartimento colunata de derrames basálticos com as características de rochas básicas intrusivas, uma amostra foi coletada na pedreira de diabásio (Paviobras) em Rio Claro-SP.

A Tabela 10 apresenta a identificação, o compartimento amostrado e a procedência das amostras.

TABELA 10 – Amostras estudadas.

Amostra	Compartimento	Local
<i>SCE</i>	entablamento	Pedreira da Prefeitura - São Carlos/SP
<i>SCC</i>	colunata	Pedreira da Rod. Washington Luís - São Carlos/SP
<i>PAV</i>	colunata/diabásio	Pedreira Paviobras – Rio Claro/SP
<i>SAN</i>	colunata	Pedreira Santo Antônio – Araraquara/SP
<i>ANT</i>	entablamento	Pedreira Santo Antônio – Araraquara/SP
<i>SAD</i>	entablamento	Pedreira Said – Ribeirão Preto/SP
<i>VES</i>	basalto vesicular	Pedreira Said – Ribeirão Preto/SP
<i>IND</i>	colunata	Pedreira Inderp – Ribeirão Preto/SP
<i>BP</i>	colunata	Pedreira Bica de Pedra – Jaú/SP
<i>SM</i>	colunata	Pedreira Pedralite – São Manuel/SP
<i>SIQ</i>	entablamento	Pedreira Siqueira – Assis/SP
<i>WS</i>	colunata	Pedreira Ws – Assis/SP

De forma geral, as amostras são constituídas de material britado na própria pedreira. No caso do basalto vesicular, coletou-se blocos que posteriormente foram britados em laboratório. Para ensaios que requerem corpos de prova cilíndricos, como o de compressão uniaxial, foram coletados blocos de rocha representativos do ponto amostrado.

Nas amostras *SAD*, *ANT* e *SCE*, provenientes do compartimento entablamento, não foi possível a retirada de corpos de prova cilíndricos devido ao alto grau de fraturamento do maciço. Os valores de resistência a compressão uniaxial destas amostras, foram calculados a partir do ensaio de compressão puntiforme.

As faixas granulométricas escolhidas, além de corresponderem ao material de britagem das pedreiras estudadas, associam-se, também, às faixas granulométricas requeridas pelas normas dos ensaios tecnológicos (Tabela 11).

Antes da definição das quantidades requeridas para cada ensaio realizado, o material britado foi quarteado e submetido à apreciação visual, com objetivo de eliminar e/ou afeição as arestas presentes nos fragmentos. Este procedimento, minimiza ou anula a influência de heterogeneidade e de fatores morfológicos nos resultados dos ensaios.

TABELA 11 - Tipos de materiais e respectivas quantidades utilizadas para os ensaios de caracterização tecnológica e de alterabilidade.

Material (nome comercial)	Granulometria (NBR 7225)	Quantidade coletada	Ensaios
Brita 4	76 - 50mm	10 kg	determinação de índices físicos
Brita 3	50 - 25mm	7 kg	apreciação petrográfica
Brita 2	25 - 12,7mm	10 kg	sanidade em etileno-glicol.
Brita 1	12,7 - 1,8mm	96 kg	alteração natural, alteração acelerada (umedecimento e secagem), abrasão Los Angeles, esmagamento, ensaio de alteração com o extrator "Soxhlet".

3.4 Ensaio e Análises Adotados

Inicialmente foram executados ensaios rotineiros de caracterização tecnológica com objetivo de reconhecimento e pré qualificação dos materiais, tais como: determinação de índices físicos (NBR 6458), determinação da resistência à compressão uniaxial (IPT M-50), determinação da resistência ao esmagamento (IPT M-53), determinação da resistência à abrasão Los Angeles (NBR 6465) e o ensaio de sanidade (imersão em etileno-glicol – MRL – 04 LCEC)). Associados a estes consagrados ensaios tecnológicos, foram realizados outros alternativos como o de adsorção de azul de metileno e de pH e condutividade de abrasão (Figura 28). Paralelamente a estes ensaios, a difratometria de Raios-X foi utilizada para a detecção e quantificação, principalmente, dos minerais deletérios. As técnicas de observação

por microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), forneceram, também, informações a respeito da mineralogia, petrografia e microestruturas das amostras.

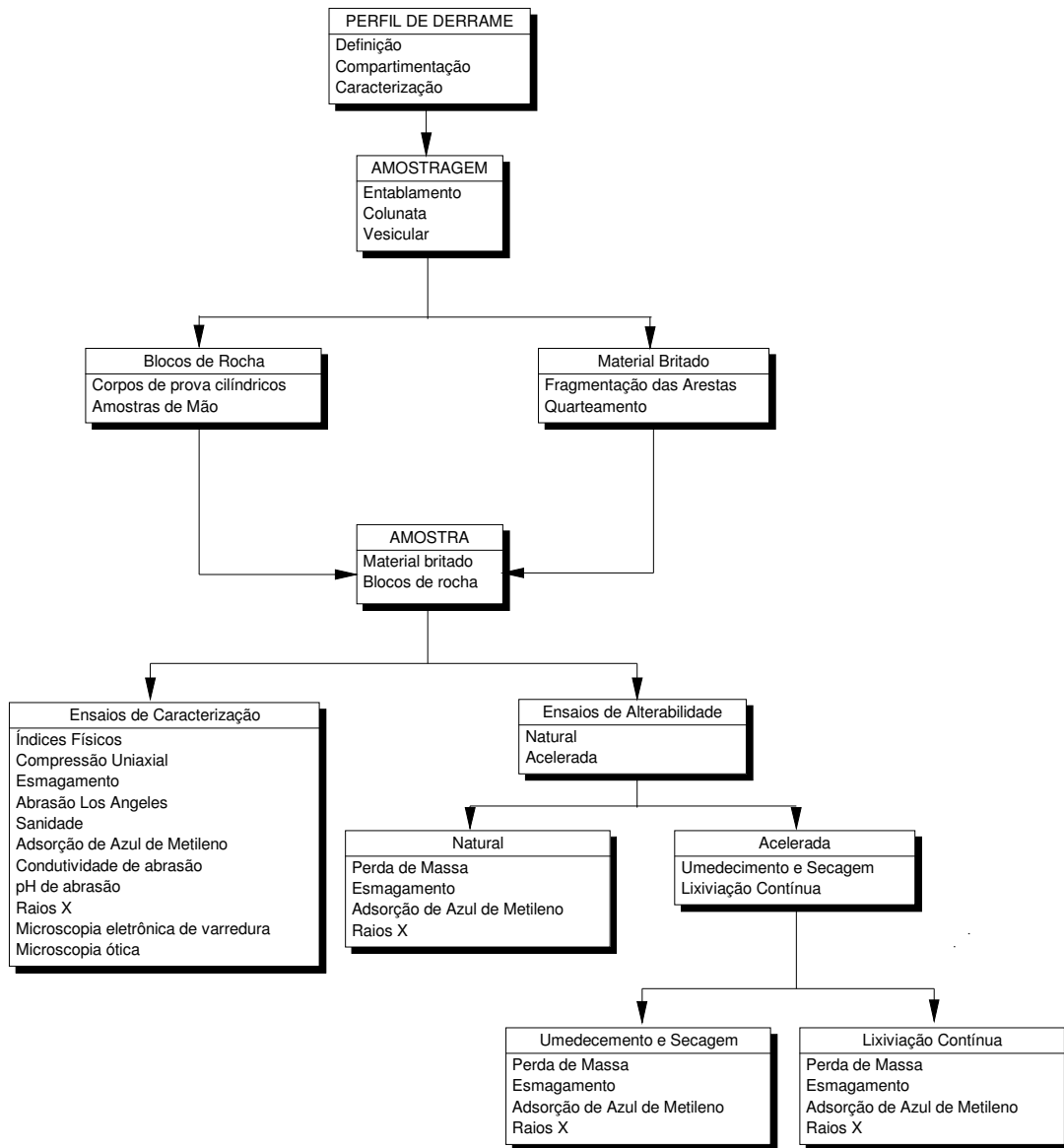


FIGURA 28 – Fluxograma do procedimento metodológico.

Para avaliação da alterabilidade, optou-se pela utilização de ensaios de alteração natural (NBR 12696) e acelerada (NBR 12697). No ensaio de alteração natural, as amostras foram dispostas em área ao ar livre durante o período de 360 dias. As informações de caráter climático consideradas neste ensaio, foram obtidas por uma estação meteorológica existente no local onde foram dispostas as amostras.

Para o ensaio de alteração acelerada, dois métodos de ciclagem foram utilizados: o umedecimento e secagem (NBR 12697) e a lixiviação contínua com o uso do extrator "Soxhlet". Nos dois métodos foram feitas medidas da concentração de íons de Na^+ , Mg^{++} , K^+ e Ca^{++} na solução de saturação, no decorrer da ciclagem.

Para a quantificação da variação da resistência mecânica das amostras após determinados números de ciclos dos ensaios de alteração, optou-se pela realização do ensaio de esmagamento modificado, ou seja, utilizou-se um êmbolo de 3 polegadas e carga aplicada de 10 toneladas ao invés de 7 polegadas com carga de 40 toneladas do ensaio de esmagamento tradicional. Esta modificação possibilitou a rápida execução do ensaio sem prejuízo dos resultados obtidos.

A faixa granulométrica utilizada nos ensaios de alteração, foi a passante na peneira de malha #12,7mm e retida na #6,35mm. Optou-se por esta fração devido aos seguintes fatores: - Trata-se de uma fração granulométrica bastante utilizada comercialmente; - A literatura especializada atesta que a alterabilidade do material rochoso aumenta com a diminuição de sua granulometria. Desta maneira, ressalta-se que a análise da influência da granulometria na alterabilidade de materiais rochosos não é objetivo deste trabalho e por este motivo adotou-se apenas uma fração granulométrica para estudo.

Os procedimentos e comentários dos ensaios de alteração são detalhados a seguir e ilustrados na Figura 29.

- Preparação de amostra de material britado na fração #12,7mm - #6,35mm, em quantidade suficiente para os ensaios de alteração natural e acelerada.
- O ensaio de alteração natural constou de 12 partes da amostra e cada uma destas foi submetida a análise após 30 ciclos.
- Para o ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem, optou-se por três partes da amostra nas quais foram executadas análises após 20, 70 e 100 ciclos.
- Para o ensaio de lixiviação contínua, foram utilizadas, também, três partes da amostra, que correspondem aos ciclos 30, 60 e 100.

- Para cada intervalo de ciclos, definido nos ensaios de alteração, a parte da amostra correspondente foi tomada para execução de ensaios de análise granulométrica. Este ensaio visa a obtenção do percentual de perdas por desagregação, por meio da quantidade de material passante na malha #6,35mm.
- O material ciclado retido na peneira de malha #6,35mm, após a análise granulométrica, é levado para execução do ensaio de esmagamento, onde é novamente analisado granulometricamente para avaliação das perdas provocadas pelo esmagamento, através da quantidade retida na peneira #1,4mm.
- Como produto da cominuição dos fragmentos no ensaio de esmagamento, os finos passantes na peneira de malha #0,063mm são utilizados nos ensaios de adsorção de azul de metileno e de difratometria de Raios-X.

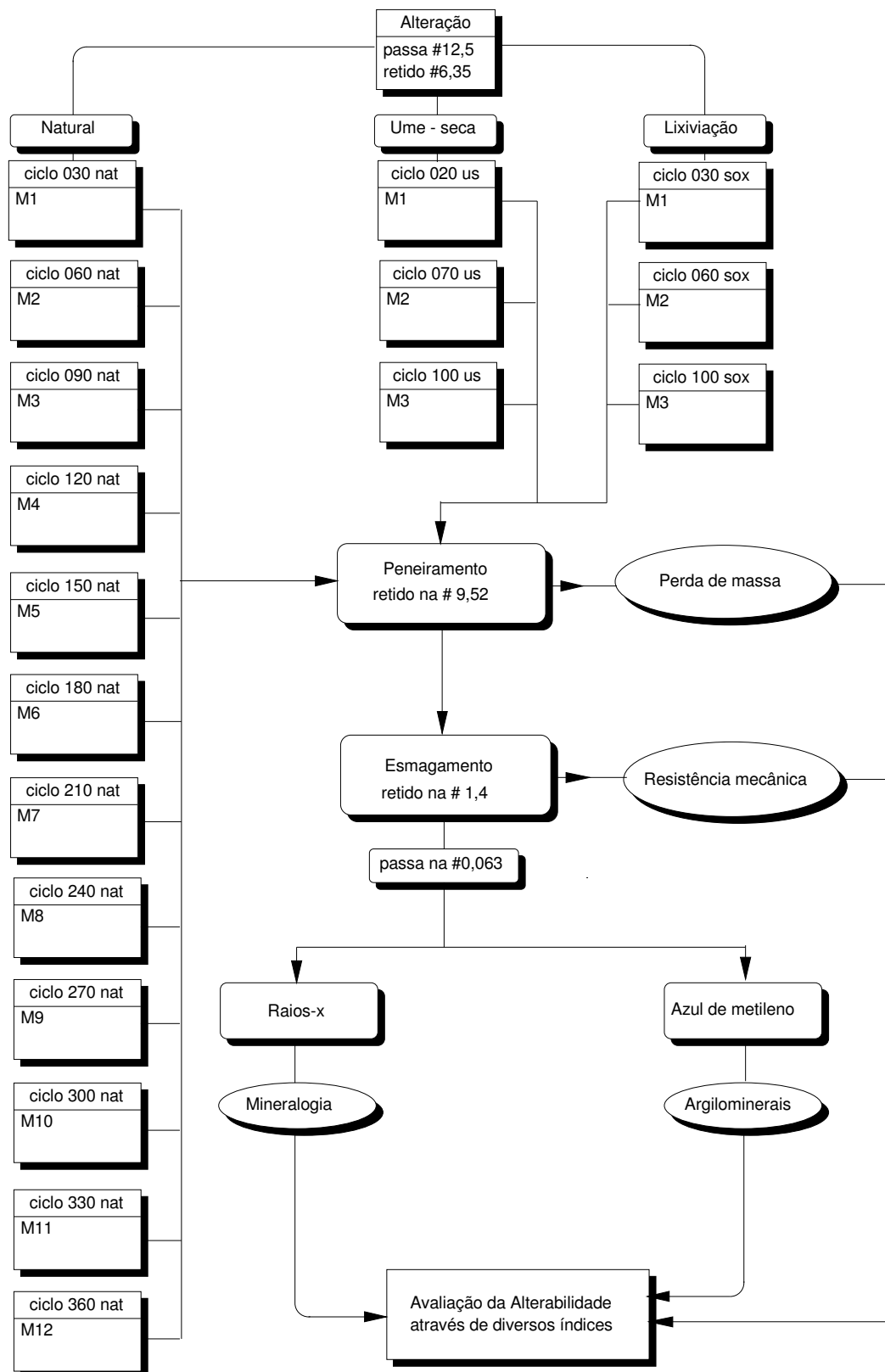


FIGURA 29 – Fluxograma dos ensaios de alteração natural e acelerada para avaliação da alterabilidade.

3.5 Descrição dos Ensaios Realizados

A maioria dos ensaios e determinações foi realizado nos laboratórios do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, à exceção do ensaio de Abrasão Los Angeles, executado no Departamento de Transportes da EESC/USP e da disposição das amostras do ensaio de alteração natural, que foi realizado no CRHEA/USP de Itirapina-SP.

Os procedimentos utilizados na realização dos ensaios foram os constantes em normas nacionais e internacionais, além de outros métodos ou critérios desenvolvidos no presente trabalho, que serão descritos a seguir.

3.5.1 Ensaio petrográficos

Visa o estudo petrográfico/mineralógico de rochas e agregados, através da análise de lâminas delgadas, utilizando-se o microscópio ótico de luz transmitida. O ensaio petrográfico é feito seguindo-se as orientações da norma técnica NBR 7255 da ABNT.

Foram executadas, neste trabalho, 12 análises petrográficas de lâminas delgadas confeccionadas a partir de blocos de rocha coletados nos locais de amostragem.

3.5.2 Determinação da massa específica aparente seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água.

Os índices físicos foram determinados a partir de cinco fragmentos de rocha de diâmetro variando de 2 a 3 polegadas e peso inferior a 150g, coletados em cada ponto de amostragem. Os valores das determinações correspondem a média aritmética dos valores encontrados para cada fragmento. Estes ensaios são normalizados segundo a NBR 6458 da ABNT.

✓ Síntese do ensaio

Este ensaio objetiva a determinação da massa específica aparente seca, massa específica aparente saturada, porosidade aparente e absorção d'água, que correspondem a:

- a) A *massa específica aparente seca* é a relação entre o peso seco do fragmento da rocha e seu volume total.
- b) A *massa específica aparente saturada* é a relação entre o peso quando saturado do fragmento da rocha e seu volume total.
- c) A *porosidade* aparente é a relação entre o volume de vazios acessíveis à água em 48 horas de submersão em água destilada e o volume externo total, expresso em porcentagem.
- d) A *absorção d'água* é a relação entre o peso da água absorvida em 48 horas de imersão em água e o peso seco, expresso em porcentagem.

A amostra constitui-se de 5 blocos ou 5 pedaços de testemunhos de rocha, com dimensões entre 2 e 3 polegadas e pesando no mínimo 150g. Estes, devem ser previamente lavados e secados em estufa a temperaturas que variam de 100 – 110°C por 24 Horas, resfriados em ambiente seco e pesados (Peso A). Em seguida, devem permanecer imersos em água destilada por mais 24 horas. Feito isto, os corpos de prova saturados devem ser pesados ao ar (Peso B) e submersos (Peso C).

Desta forma, têm-se:

- Massa específica aparente seca (g/cm³): $A / (B - C)$
- Massa específica aparente saturada (g/cm³): $B / (B - C)$
- Porosidade aparente (%): $[(B - A) / (B - C)] * 100$
- Absorção d'água (%): $[(B - A) / A] * 100$

3.5.3 Ensaio de Compressão Uniaxial

Este ensaio foi executado de acordo com os procedimentos do Método IPT M-50 a partir de corpos de prova cilíndricos (relação base/altura de aproximadamente 1:2,5) extraídos, em laboratório, de blocos de rocha coletados nas diversas pedreiras estudadas. Os corpos de prova foram rompidos no estado seco e com velocidade de carregamento de 60KN/min por uma prensa hidráulica com capacidade para 300t.

3.5.4 Ensaio de Resistência ao Esmagamento Modificado

O ensaio de resistência ao esmagamento foi adotado neste trabalho na tentativa de quantificar a queda de resistência do material rochoso quando submetido a ensaios de alteração, tanto natural quanto acelerada.

A opção por um ensaio modificado ao invés do tradicional, surgiu da necessidade de se medir a resistência ao esmagamento de inúmeras amostras de maneira rápida e acessível. Um outro motivo é o de sugerir um ensaio de caráter expedito que possa ser executado no próprio local de disposição do material rochoso.

Não se pretende aqui propor um novo ensaio e sim, adotar um procedimento alternativo previsto no método tradicional IPT M-53.

3.5.4.1 Aparelho

A Figura 30 e a Foto 6 apresentam o aparato utilizado para medida de resistência ao esmagamento.

- a) Pórtico de reação confeccionado com barras metálicas “tipo I” de bitola $3 \times 2^{1/4} \times 1/4$ polegadas, nas seguintes dimensões: Altura: 70 cm e Largura: 30 cm.
- b) Embolo de aço, rígido para manter seu formato sob condições rudes de uso, com diâmetro de 64,82mm e altura de 167,00mm.
- c) Cilindro de metal, rígido, com diâmetro interno de 69mm, diâmetro externo de 86,62mm com $3^{1/2}$ polegadas de altura.
- d) Uma chapa de aço cortada em forma de disco, nas seguintes dimensões: 86,70mm de diâmetro e 8,23mm de altura.
- e) Uma bomba e um macaco hidráulico com capacidade de carga de no mínimo 15 toneladas.
- f) Manômetro com ponteiro de arrasto com capacidade máxima de 350 kgf/cm^2

3.5.4.2 Corpo de Prova

O corpo de prova será constituído pelo material que passa na peneira #12,7mm e é retido pela #6,35mm, seco em estufa a 100-110°C, proveniente dos ensaios de alteração natural e acelerada. O cilindro de ensaio deverá ser enchido até a altura de 3 polegadas, recebendo pequenas pancadas (número de golpes não especificado) de um bastão metálico para a compactação dos fragmentos. O peso líquido do agregado deverá ser determinado (Peso A).

3.5.4.3 Procedimento

O cilindro de ensaio é colocado sobre a bolacha de metal presa ao macaco hidráulico. A superfície da amostra é nivelada com a base do disco de compressão, que penetrará no cilindro, comprimindo o agregado durante o teste. Desta forma o corpo de prova receberá, então, a carga de 10 toneladas. Uma vez descarregado, o corpo de prova será peneirado na peneira nº.14 (#1,4mm). A fração que ficar retida será pesada (Peso B), tendo-se o cuidado com a perda de finos. Testes duplos deverão ser realizados.

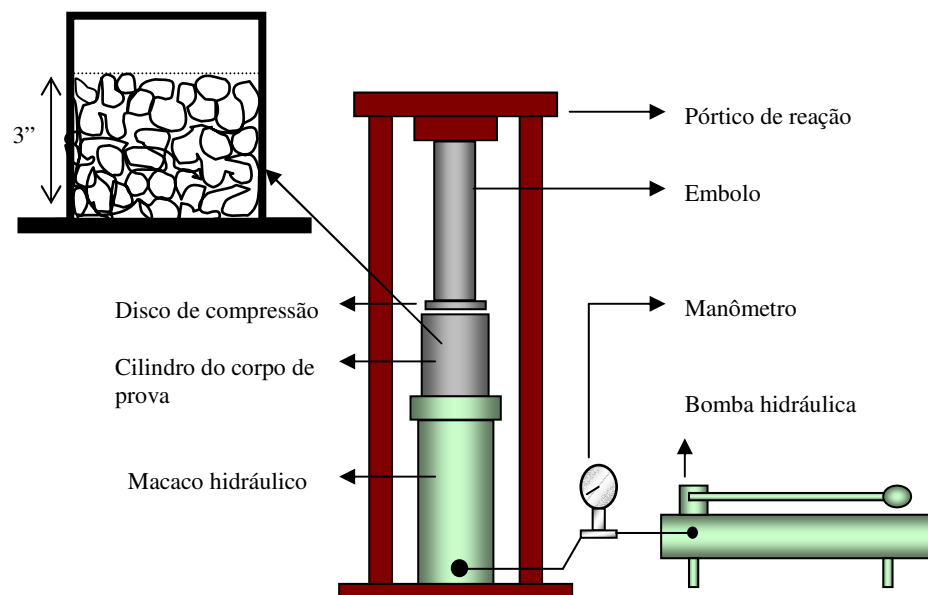


FIGURA 30 – Aparelho utilizado para a determinação da resistência ao esmagamento modificada do material rochoso.



FOTO 6 – Aparelho utilizado para a determinação da resistência ao esmagamento modificada do material rochoso.

3.5.4.4 Avaliação

Será calculada a relação entre os pesos, expressos em porcentagem, da seguinte maneira:

$$\text{Perda por esmagamento} = [(Peso A - Peso B) / Peso A] * 100$$

A média do resultado de dois testes será tomada como o valor do teste de esmagamento.

3.5.5 Ensaio de Resistência ao abrasão Los Angeles

A rocha neste ensaio é submetida tanto ao desgaste superficial quanto a impactos. Desta forma, simula as solicitações que o agregado sofre em determinados tipos de obras civis. O ensaio deve ser efetuado, preferencialmente, com o agregado de mesma granulometria ou próxima daquela a ser utilizada na obra. Adota-se para a execução deste, a norma NBR 6465 da ABNT.

Neste trabalho as amostras foram ensaiadas utilizando-se a graduação B (2500 ± 50 g de material que passa na #19,1mm e retido na #12,7mm, mais 2500 ± 50 g passando na #12,7mm e retido na #9,52) e foram colocadas 11 esferas de aço (Tabela 12). A granulometria escolhida é em parte a mesma dos ensaios de alteração.

✓ *Síntese do ensaio*

Neste ensaio, uma amostra com granulometria e massa pré fixada, é introduzida em um tambor de aço, juntamente com esferas também de aço. O tambor girará a uma velocidade de $33^{1/4}$ rpm por 15 ou 30 minutos, dependendo da graduação da amostra. O resultado será expresso em porcentagem de material menor que a malha de abertura # 1,68mm, tal como na fórmula a seguir:

$$A = [(\text{Peso inicial da amostra} - \text{Peso final da amostra}) / (\text{Peso inicial da amostra})] * 100$$

TABELA 12 – Graduações e massas da amostra usadas no ensaio de abrasão Los Angeles.

		GRADUAÇÃO						
Passa	Retido	A	B	C	D	E	F	G
76,2	63,5					2500±50		
63,5	50,8					2500±50		
50,8	38,1					5000±100	5000±100	
38,1	25,4	1250±25					5000±100	5000±100
25,4	19,1	1250±25						5000±100
19,1	12,7	1250±25	2500±50					
12,7	9,52	1250±25	2500±50					
9,52	6,35			2500±50				
6,35	4,76			2500±50				
4,76	2,38				5000±100			
	N. esferas	12	11	8	6	12	12	12

3.5.6 Ensaio de Sanidade com a imersão de fragmentos de rocha em etileno-glicol

O etileno-glicol é um dos materiais que reage com argilominerais expansivos, principalmente do grupo das esmectitas, formando um complexo organo-argiloso que apresenta volume maior que o próprio argilomineral. Por isso, pode-se verificar a resistência à desagregação de agregados submetendo-os ao etileno-glicol, desde que a quantidade de montmorilonita, distribuição e capacidade de absorção do glicol é tal que causem tais desagregações. Se no ensaio ocorrem desagregações, pode-se esperar que o mesmo ocorra em amostras da mesma rocha, quando exposta, por longo tempo, ao umedecimento e secagem e congelamento e degelo.

✓ Síntese do Ensaio:

Este ensaio consistiu em colocar 10 fragmentos, situados na faixa granulométrica de #25,4mm a #19,1mm, em recipientes de vidro dotados de tampas estanques, nos quais as amostras ficaram imersas em etileno-glicol. O ensaio teve duração máxima de 21 dias com 7 períodos de imersão de três dias cada, com avaliações quantitativas intermediárias a cada final de ciclo. Com o término do ensaio, a amostra foi rigorosamente lavada na peneira #19,1mm para a remoção do reagente da superfície das partículas e para contagem do número final de fragmentos retidos na peneira. Para este ensaio foram seguidos os procedimentos do MRL-04 do LCEC.

3.5.7 Determinação da adsorção de Azul de metileno em Fragmentos de Rocha

Este ensaio é usado para quantificar a presença de argilominerais, principalmente do grupo das esmectitas nos agregados rochosos, refletindo, também, a sanidade do agregado.

O azul de metileno consiste em um corante orgânico ($C_{16} H_{18} N_3 S Cl \cdot 3 H_2O$) que, em solução aquosa, dissocia-se em ânions cloretos e cátions azul de metileno. Estes últimos substituem os cátions Na^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} adsorvidos pelos argilominerais, provocando um processo de adsorção irreversível, caracterizando a capacidade de troca catiônica (CTC). A superfície específica (SE) dos argilominerais presentes é determinada a partir da quantidade de cátions de azul de metileno necessários para recobrir, com uma camada monomolecular, as superfícies externa e interna (superfície específica) de determinado argilomineral.

Verhoef & Van de Wall (1998) definem o índice MBA (Methylene Blue Adsorption) como sendo a massa de azul de metileno necessária para recobrir, com uma camada monomolecular, as partículas contidas em 100g de fragmentos pulverizados de agregados. Em função da quantidade e dependendo do tipo de argilomineral presente nessa massa de rocha, a adsorção do azul de metileno será variável.

A amostra constou de material pulverizado proveniente da cominuição dos agregados no ensaio de esmagamento modificado.

A concentração da solução de azul de metileno foi de 3g de azul de metileno por litro de água destilada conforme sugerido por Verhoef & Van de Wall (1998).

O ensaio baseia-se na determinação do pico de máxima adsorção do corante azul de metileno para 2g de material rochoso pulverizado, por meio da adição, por titulação, de quantidades de 1 a 5cm³ da solução de azul de metileno, acrescentada à suspensão aquosa (2g de material + 30ml de água destilada). O máximo de adsorção ocorre quando há saturação do corante na solução aquosa, indicada pelo aparecimento de uma “auréola” azulada em torno do núcleo da gota da suspensão, quando gotejada em papel filtro. A partir do volume da solução de azul de metileno consumido na saturação da suspensão aquosa (material rochoso pulverizado + água) calcula-se os valores de CTC, SE e MBA.

O valor da Adsorção de azul de metileno (MBA) é normalmente expresso em g/100g, ou seja, é a quantidade em gramas de azul de metileno adsorvido por 100g de material rochoso pulverizado. A seguir, apresentam-se as expressões de cálculo do MBA, da CTC e da SE.

- $MBA = \{(Xg/Yml) * p \text{ ml MB}\} / (Ag / 100g)$ [g/100g]
- $CTC = (100 * n * p \text{ ml MB}) / Ag$ [meq/100g]
- $SE = \{(Yg * p \text{ ml MB}) / 10\} / Ag$ [m²/g]

Onde: X = massa da molécula de azul de metileno seca;

Y = concentração da solução de azul de metileno;

p = volume da solução de azul de metileno gasto no ensaio;

A = massa de material rochoso pulverizado (com a correção do teor de umidade);

n = normalidade da solução de azul de metileno (0,0094 meq/l para a concentração de 3g/l).

3.5.8 Determinação do pH de abrasão com medida da condutividade

O pH de abrasão foi utilizado por Malomo (1980) ao estudar o perfil de intemperismo de rochas graníticas da região sudoeste da Nigéria. Baseia-se no valor do pH medido de uma solução composta de água destilada e de feldspatos pulverizados provenientes da rocha.

De forma generalizada, tratando-se de soluções aquosas, as concentrações de íons H^+ e OH^- exprimem a acidez, a alcalinidade ou mesmo a neutralidade do composto. Uma solução neutra apresentará concentrações de íons H^+ e OH^- iguais; uma solução ácida apresentará $H^+ > OH^-$; e uma solução básica apresentará $H^+ < OH^-$. Portanto, se $pH < 7$, a concentração de íons H^+ é maior e a solução é ácida; se $pH = 7$, a concentração de íons H^+ e OH^- é igual a solução é neutra; e se $pH > 7$, predominam os íons OH^- e a solução é básica.

Segundo Malomo (1980), durante o intemperismo, os feldspatos são submetidos a hidratação tendo como consequência a liberação de íons, em geral, de elementos alcalinos e alcalinos terrosos (Figura 31). Estes íons combinam-se com os íons OH^- livres na solução. Desta forma, quanto maior a quantidade de íons de elementos alcalinos e alcalinos terrosos liberados menor será a concentração de OH^- livres em solução e, conseqüentemente, menor será o valor do pH. O pH de abrasão é tido como o pH da solução composta pelo feldspato pulverizado mais a água destilada, em diferentes concentrações.

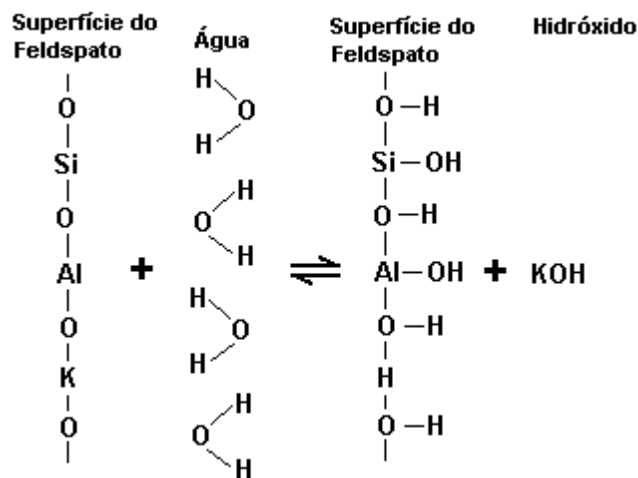


FIGURA 31 – Mecanismo de hidratação dos feldspatos (Jenny's, 1950 apud Malomo, 1980).

No procedimento proposto por Malomo (1980) os feldspatos foram retirados do material rochoso pulverizado utilizando-se uma solução de bromoformio e acetona. Desta forma, apenas o pH de abrasão dos feldspatos foi avaliado.

Grant (1969) sugere a ação, no valor do pH de abrasão, não só de íons básicos provenientes de feldspatos máis, também, relativa a presença de argilominerais. Neste conceito, os argilominerais presentes adsorvem parte dos íons básicos diminuindo a sua concentração na solução e, conseqüentemente, aumentando a concentração de íons OH^- e o valor do pH. A influência dos argilominerais, principalmente do tipo 2:1, é marcada, também, pelo presença de cargas negativas na superfície dos argilominerais que adsorvem íons de hidrogênio livres na solução aumentando, desta forma, a concentração de OH^- e, conseqüentemente, aumentando o valor do pH.

Neste trabalho, optou-se pela medida do pH de abrasão de toda rocha pulverizada incluindo, desta maneira, a influência de íons na solução proveniente de outros minerais e da presença de argilominerais.

3.5.8.1 Procedimento do Ensaio

A amostra constou de material pulverizado (<#0,063mm) resultante do ensaio de esmagamento modificado. O ensaio baseou-se na medida de pH de diferentes quantidades de amostra misturadas a 48ml de água destilada, da seguinte maneira:

- adição de 0,75g da amostra em 48ml de água destilada;
- agitar a solução por 3 minutos;
- após descanso de 1minuto, realizar a medida do pH;
- adição de mais 0,75g da amostra repetindo-se o procedimento anterior;
- adição de mais 0,5g da amostra repetindo-se o procedimento anterior;
- adição de mais 1,0g da amostra repetindo-se o procedimento anterior.

A Tabela 13 apresenta as concentrações da solução utilizada no ensaio.

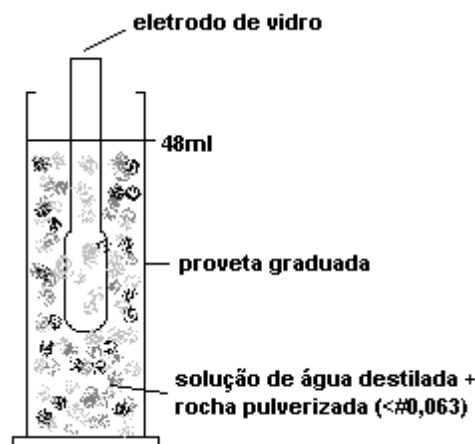


FIGURA 32 – Medida do pH de abrasão.

TABELA 13 – Diferentes quantidades de rocha pulverizada e suas respectivas concentrações na solução preparada para a medida do pH de abrasão.

Concentração	1/64	1/32	1/24	1/16
Massa adicionada	0,75g	0,75g	0,5g	1,0g
Massa total	0,75g	1,50g	2,00g	3,00g
volume	48ml	48ml	48ml	48ml

O resultado obtido é dado pelo gráfico pH de abrasão x concentração da solução. A curva gerada no gráfico é, geralmente, do tipo “log normal” e o pH de abrasão é dado pelo valor da projeção, no eixo dos valores de pH, da reta assintótica a curva “log normal” (Figura 33).

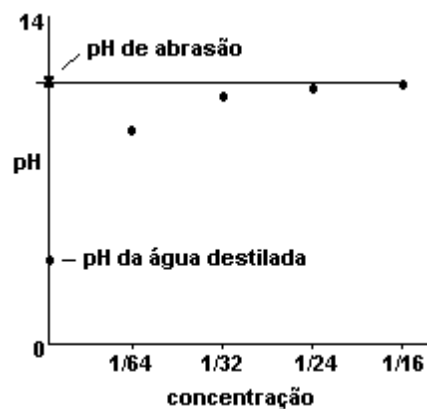


FIGURA 33 – Gráfico do pH medido x concentração da solução.

3.5.8.2 Medida da condutividade

A condutividade é a unidade quantitativa que define a capacidade de uma solução de conduzir corrente elétrica, sendo o inverso da resistência elétrica desta mesma solução a uma temperatura de 25°C.

Em condutores metálicos, a corrente elétrica é conduzida por elétrons livres, enquanto que nas soluções esta condução é feita por íons. Todos os íons presentes na solução contribuem para condução da corrente, entretanto, a fração da corrente por cada tipo de íon é variável e depende da concentração relativa destes íons e da facilidade que se movem na solução. Conclui-se, que a condutividade é uma medida dependente de todos os íons presentes na solução.

Quanto maior a condutividade maior a quantidade de íons presentes na solução. Seguindo este raciocínio, adotou-se neste trabalho a medida de condutividade para quantificação comparativa da alterabilidade de diferentes amostras estudadas, já que a lixiviação de íons da rocha aumenta com o grau de alteração.

Seguindo-se o mesmo procedimento da medida do pH de abrasão, mediu-se a concentração iônica da solução. O resultado é dado pelo gráfico gerado pela correlação concentração iônica x concentração da solução (Figura 34).

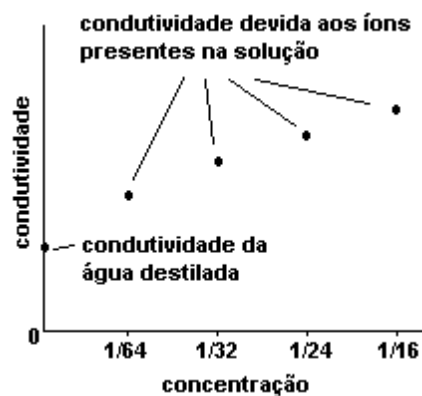


FIGURA 34 – Gráfico da condutividade medida x concentração da solução.

Esta medida mostrou-se útil na avaliação comparativa das diferentes amostras com relação a quantidade de íons dissolvidos na solução e como indicador da presença de minerais metálicos no material pulverizado. Tal indicativo é bastante relevante pois a presença destes minerais deletérios são de importância fundamental na avaliação da qualidade de materiais rochosos quando utilizados em construção civil.

3.5.9 Análise Química por Difratometria de Raios-X

As análises de difratometria de Raios X, utilizadas para a identificação, principalmente, dos argilominerais presentes na rocha, foram executadas em amostras de rocha pulverizadas pelo ensaio de esmagamento modificado. Concluída a pulverização, o material foi peneirado na malha #0,063mm e por “pipetagem” retirou-se para análise a fração próxima a 0,002mm. Após o devido preparo das lâminas, as amostras foram submetidas à análise difratométrica apenas na condição natural. As análises seguiram procedimentos internos do Instituto de Química de São Carlos-USP e do Departamento de Química da USP de Ribeirão Preto-SP.

3.5.10 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura com uso de Microsonda Eletrônica

Objetiva a análise e observação dos tipos rochosos por microscopia eletrônica. Esta técnica permite visualizar, a escala ultramicroscópica, a morfologia dos constituintes mineralógicos e as relações existentes entre eles. O microscópio eletrônico de varredura fornece uma imagem elétrica da superfície dando profundidade e aumento extraordinários de campo, a partir da captação de elétrons secundários emitidos pelo objeto focalizado. Neste trabalho utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura do Instituto de Física de São Carlos/USP.

As amostras observadas ao microscópio eletrônico de varredura foram as seguintes:

- Todas as amostras estudadas antes de serem cicladas;
- Amostras submetidas ao total de ciclos de cada ensaio de alteração.

Visando a avaliação da composição química de cada amostra antes dos ensaios de alteração, foram executadas análises químicas por microsonda eletrônica utilizando-se o aparelho de análise acoplado ao microscópio eletrônico.

As amostras para análise química constaram de pequenos fragmentos em forma de cubo de dimensões aproximadas de 0,8mm x 0,8mm x 0,8mm. O feixe eletromagnético emitido pela microsonda, no momento da análise, abrangeu toda a superfície do cubo, de forma que a análise fosse representativa dos constituintes mineralógicos presentes no material rochoso.

3.5.11 Ensaio de Alterabilidade Natural

Este método tem por finalidade verificar a resistência a alteração de rochas submetidas às condições intempéricas naturais, visando o seu possível aproveitamento como material de construção. A análise quantitativa do método permite avaliar a influência das condições climáticas sobre as características mecânicas das rochas. Adota-se, para este ensaio, a norma técnica NBR 12696 da ABNT. Para avaliação da variação do comportamento mecânico da rocha, após a ciclagem, utilizou-se o ensaio de esmagamento modificado. O ensaio de alteração natural foi executado, simultaneamente, em todas as amostras estudadas.

Para o acompanhamento da evolução da alteração, dentro de um prazo favorável a execução desta pesquisa, foi definido o intervalo de exposição natural de 360 ciclos, ou seja, por exposição pelo período de 1 ano (360 dias). A cada 30 ciclos realizou-se a medida da perda de massa, juntamente com a medida de resistência do material ciclado.

Uma área de aproximadamente 50m² localizada no campus da USP de Itirapina-SP, foi delimitada para exposição natural das amostras (Foto 7). Obedeceu-se procedimentos como a colocação de cerca de proteção contra danos nas amostras, a remoção de possíveis obstáculos que pudessem fornecer zonas de sombras e a disposição das amostras em colunas espaçadas dispostas aproximadamente na direção N-S.

Para o ensaio de alteração natural será avaliada a influência das condições ambientais no processo de alteração da rocha através da adoção do índice climático “N” (WINERT 1964). Este índice relaciona a taxa de evaporação durante o mês mais quente com

a precipitação anual total, indicando 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.

Cada amostra estudada constituiu-se de 12 partes, cada uma avaliada mecanicamente a cada 30 ciclos de um total de 360. Cada parte da amostra, que constitui-se de material que passa na peneira de malha #12,7mm e é retido na #6,35mm, foi exposta ao natural com determinado peso inicial de valor próximo a 5000g. Optou-se por esta quantidade devido a necessidade de se utilizar o material ciclado para composição de outros ensaios como, por exemplo, o de esmagamento modificado.

Com o término de cada 30 ciclos o material foi levado para laboratório para o cálculo da perda de massa. Este cálculo se baseia na relação entre a massa inicial com a massa final, definida através do material retido na peneira de malha #6,35mm após a ciclagem. Como visto, uma parte deste material será utilizada no ensaio de esmagamento modificado para o cálculo da alterabilidade.



FOTO 7 – Disposição das amostras para o ensaio de alteração natural.

3.5.12 Ensaio de Alterabilidade Acelerada – Umedecimento e Secagem

Este método objetiva a determinação da resistência a alteração de rochas, submetidas a ciclos de saturação em água a temperatura ambiente e secagem a temperaturas que variam de 80 - 100⁰C. Este método permite, também, uma previsão da queda de resistência mecânica de agregados submetidos a condições particulares de uso, principalmente variações

de temperatura e umidade. Para avaliação da variação do comportamento mecânico da rocha, após a ciclagem, será utilizado o ensaio de esmagamento modificado.

Neste trabalho optou-se pela monitoração do fluido de saturação das amostras o que promoveu uma modificação no ensaio de umedecimento e secagem tradicional (NBR 12697 da ABNT).

Para o controle de parâmetros como o pH, a condutividade e a quantidade e presença de íons solúveis, tornou-se necessário a não substituição do líquido de saturação (água destilada) das amostras durante os vários ciclos do ensaio. Para tanto, optou-se pela modificação do aparato de secagem do material, havendo a substituição da estufa elétrica por recipientes de secagem individual (Foto 8). Desta forma, cada amostra foi colocada em recipientes plásticos dotados de dreno utilizado para coleta da solução de saturação. Como forma de secagem do material, utilizou-se lâmpadas de infra vermelho de 250 watts de potência, acopladas a cada recipiente individual (Foto 9). Adotou-se recipientes plásticos levando-se em conta que outros tipos de materiais, principalmente metálicos, poderiam contaminar a solução monitorada. Houve a preocupação de que os recipientes plásticos derretessem com o calor gerado pelas lâmpadas de secagem, o que não ocorreu com o andamento do ensaio.

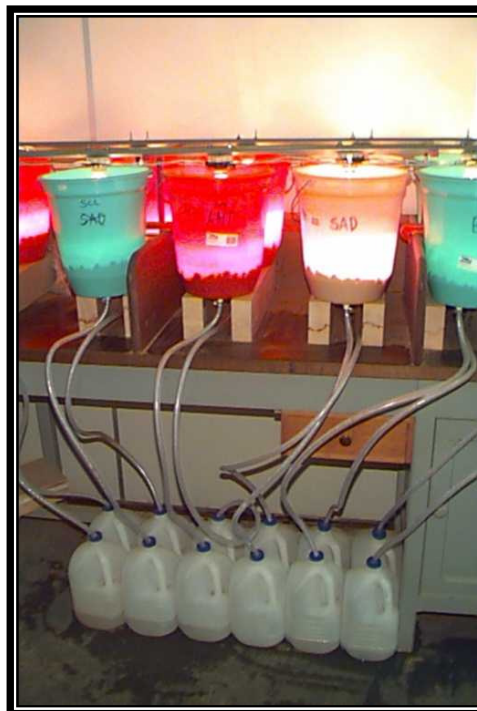


FOTO 8 – Ensaio de umedecimento e secagem



FOTO 9 – Detalhe dos recipientes contendo a amostra no momento da secagem.

Para a preparação das amostras adotou-se o mesmo procedimento descrito no ensaio de alteração natural, onde cada amostra é composta por material que passa na peneira de malha #12,7mm e é retido na #6,35mm, pesando em torno de 5000g. Estas amostras foram dispostas cada uma em seu recipiente antes do início do ensaio. Optou-se por uma quantidade máxima de 100 ciclos para este ensaio.

Os ciclos de saturação e secagem foram definidos em intervalos diários de 16 horas e 8 horas, respectivamente. A cada 10 ciclos, o fluido de saturação foi amostrado e preparado para análise de pH, de condutividade e de quantidades, em p.p.m., dos íons K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} e Na^+ . A dosagem dos elementos K^+ , Na^+ , Ca^{2+} foram determinadas utilizando-se o fotômetro de chama do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. O íon Mg^{2+} teve sua dosagem detectada por espectrofotometria de absorção atômica, no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

Com relação a medida da perda de massa e a medida da queda de resistência mecânica, o procedimento é semelhante ao do ensaio de alteração natural, sendo que os ciclos de avaliação foram 20, 70 e 100.

3.5.13 Ensaio de Alterabilidade Acelerada – Lixiviação Contínua com o uso do Extrator "Soxhlet"

Para o estudo da avaliação da alterabilidade de rochas pela lixiviação contínua será utilizado o extrator "Soxhlet". O instrumento "Soxhlet" tenta simular as condições naturais de alteração, mas em velocidade muito maior, devido à temperatura mais elevada e velocidade de percolação também maior. Este procedimento solicita as rochas por remoção iônica, principalmente, com a lixiviação de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, além de promover a hidratação de minerais secundários através da saturação por água aquecida.

A ciclagem no extrator "soxhlet" provoca a lixiviação contínua devido ao fato da água percolar pela amostra a uma temperatura que varia de 60 a 70°C, possibilitando, desta forma, o arrastamento em solução de determinados produtos de alteração. O ambiente climático no interior do extrator assemelha-se ao clima tropical úmido, marcado por altas temperaturas e altos índices pluviométricos.

Nesta pesquisa utilizou-se um aparelho "soxhlet" de grandes dimensões caracterizado, principalmente, pela capacidade de armazenagem de 12 litros de solução de lixiviação (Foto 10).

O aparelho "Soxhlet" consiste, basicamente, de um balão, de um tubo extrator, de uma unidade de condensação e de um sifão (Figura 35). A água presente no balão se evapora graças a uma unidade de aquecimento controlável. O vapor gerado é conduzido até a unidade de condensação precipitando-se sobre a amostra. Quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta para o balão, iniciando um novo ciclo.

Neste aparelho, distingui-se as seguintes regiões:

- Zona atmosférica – Zona localizada acima do sifão em que a amostra não é inundada, caracterizada pela alta temperatura ($\pm 100^{\circ}\text{C}$) devido a saída direta do vapor.
- Zona de flutuação do nível freático – Nesta zona a amostra é submetida alternadamente a ciclos de saturação e secagem.
- Zona de saturação permanente – Zona em que a amostra fica permanentemente saturada.

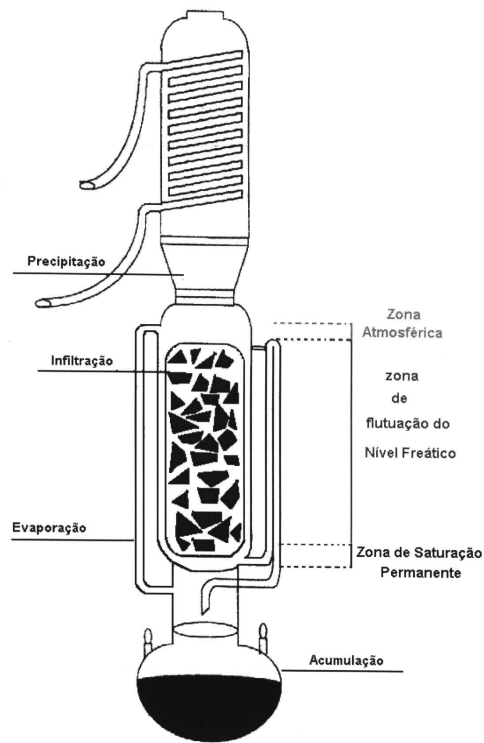


FIGURA 35 – Aparelho “Soxhlet”.

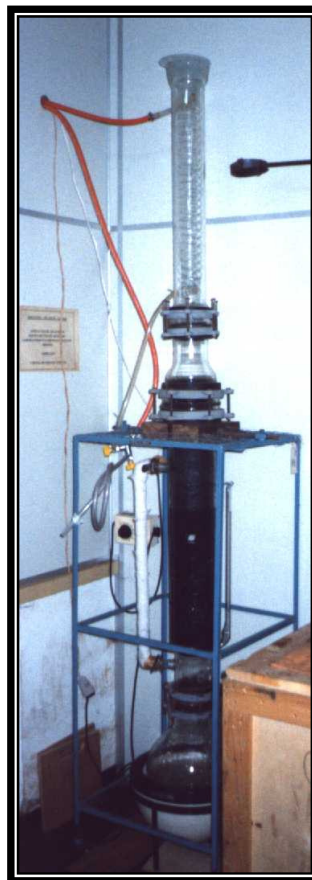


FOTO 10 – Aparelho ‘Soxhlet’.

Foram feitas ciclagem por lixiviação contínua em todas as amostras estudadas. Cada amostra constituiu-se de 3 partes, cada uma avaliada mecanicamente, respectivamente, nos ciclos 30, 60 e 100. Cada parte da amostra, que constitui-se de material que passa na peneira de malha #12,7mm e é retido na #6,35mm, foi exposta a ciclagem no extrator “Soxhlet” com determinado peso inicial, de valor próximo a 5000g.

A cada 10 ciclos de lixiviação do extrator “Soxhlet”, coletou-se amostra da solução de lixiviação no balão. Do mesmo modo que o ensaio de alteração por umedecimento e secagem, a dosagem dos elementos K^+ , Na^+ , Ca^{2+} foi determinada utilizando-se um fotômetro de chama do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. O íon Mg^{2+} teve sua dosagem detectada por espectrofotometria de absorção atômica, no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

Capítulo 4:

A COMPARTIMENTAÇÃO ENTABLAMENTO-COLONATA NA ÁREA EM ESTUDO

4.1 Introdução

Este Capítulo apresenta o reconhecimento de derrames basálticos na região que engloba os municípios paulistas de Ribeirão Preto, São Carlos, Araraquara, Jaú, São Manuel e Assis. Adota-se o conceito do zoneamento lito-estrutural entablamento-colunata, pouco utilizado até então, para a concepção do modelo de gênese e compartimentação geológico-geotécnica destes derrames. Cada compartimento apresenta características próprias no que se refere a aspectos geotécnicos e tecnológicos que influenciam na qualidade do material quando utilizado na construção civil. Portanto, a identificação destes diferentes tipos de basaltos serve como critério orientativo para sua exploração.

O conceito do zoneamento lito-estrutural entablamento-colunata não foi utilizado nas inúmeras e exaustivas descrições geológico-geotécnicas de maciços basálticos usados para fundação ou como material de construção nas grandes obras, principalmente usinas hidrelétricas, no sul e sudeste do país. Este fato faz suscitar algumas interrogações a respeito destes materiais, tais como: A grande quantidade de matéria vítrea do compartimento entablado comprometerá a utilização deste material para construção civil? Quais os respectivos comportamentos perante ensaios de alteração e conseqüentemente as suas alterabilidades?

Frazão & Caruso (1983) citam que problemas ligados ao uso de basaltos e diabásios relacionam-se à grande variação de seu comportamento geotécnico e tecnológico, causados principalmente pela alterabilidade destas rochas. Estes autores acrescentam também que dentre os minerais secundários dos basaltos, os argilominerais talvez sejam os que mais contribuem para a alteração. Os constituintes vítreos, comuns nos basaltos, podem, por decomposição e recristalização originar argilominerais expansivos do grupo das esmectitas.

Um outro fator intrínseco que influencia na alteração e alterabilidade das rochas é a presença de descontinuidades. A permeabilidade decorrente dessas estruturas favorece o contato da água com os argilominerais expansivos localizados tanto nos poros quanto nas fissuras da rocha. Como conseqüência, ocorre o aumento de volume dos argilominerais pela absorção d'água associado ao desenvolvimento de pressão de expansão. Este fenômeno pode levar a rocha à desagregação.

Do exposto no capítulo 2, pode-se avaliar que o compartimento entablado dos derrames basálticos apresenta atributos (maior porcentagem de matéria vítrea e maior grau de fraturamento) que podem influenciar na sua qualidade quando utilizado em construção civil. Porém, a facilidade no desmonte e na britagem faz com que ocorra a exploração preferencial deste compartimento. Em muitos casos, a lavra restringe-se apenas ao entablamento, sendo interrompida quando alcança o compartimento colunata.

Os diferentes perfis lito-estruturais com as devidas compartimentações entablamento-colunata, reconhecidas nos derrames estudados, são representados de forma esquemática e de fácil entendimento, como veremos a seguir.

4.2 Reconhecimento dos Derrames

Os derrames basálticos na área estudada, em geral exibem de forma bem definida os compartimentos entablamento e colunata, sendo que este último representa aproximadamente 10% a 20% do derrame, com espessuras que variam de 1,5m a 12m. Já o entablamento encontra-se geralmente na parte central e constitui cerca de 60% a 70% do derrame. De forma geral, os contatos inferior e superior do derrame apresentam basalto vesículo-amigdaloidal, com espessuras em torno de 1,5m a 2m e representam aproximadamente 5% a 10% do derrame (Figura 36).

As diferentes características lito-estruturais dos compartimentos entablamento e colunata são facilmente observadas e reconhecidas em campo. Esta facilidade, exemplifica-se no fato de que são adotados pelos mineradores alguns termos que traduzem estas diferenças, tais como: basalto granular, basalto colunar e “olho de sapo”; que tratam respectivamente do compartimento entablado, do colunata e dos basaltos vesículo-amigdaloidais (Foto 11). Informações verbais de mineradores atestam, também, que cada

compartimento apresenta características próprias no que se refere às técnicas de desmonte, à qualidade do material britado, à quantidade de finos produzidos na britagem e na própria qualidade do material quando utilizado na construção civil. Infelizmente, existem poucos trabalhos científicos que reúnem dados geológico-geotécnicos e tecnológicos, comparativos entre os compartimentos entablamento e colunata, para os basaltos da Formação Serra Geral

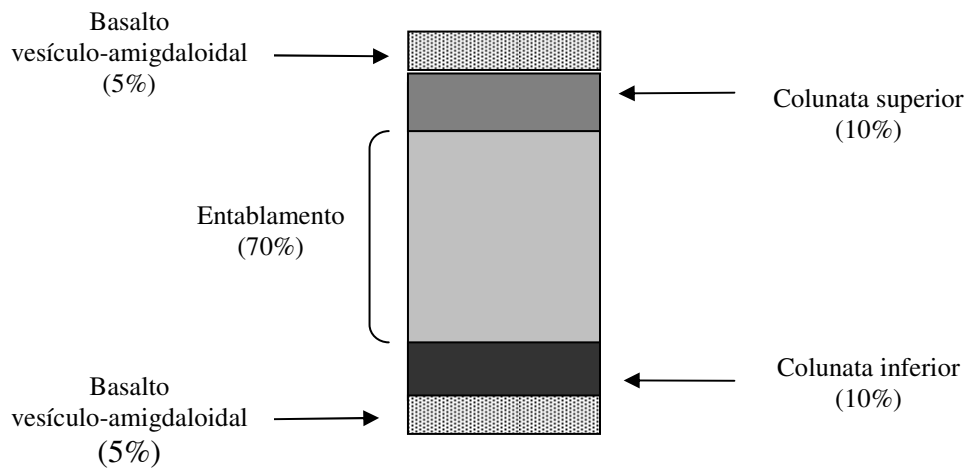


FIGURA 36 - Perfil esquemático da representatividade dos compartimentos em derrames basálticos na área estudada.

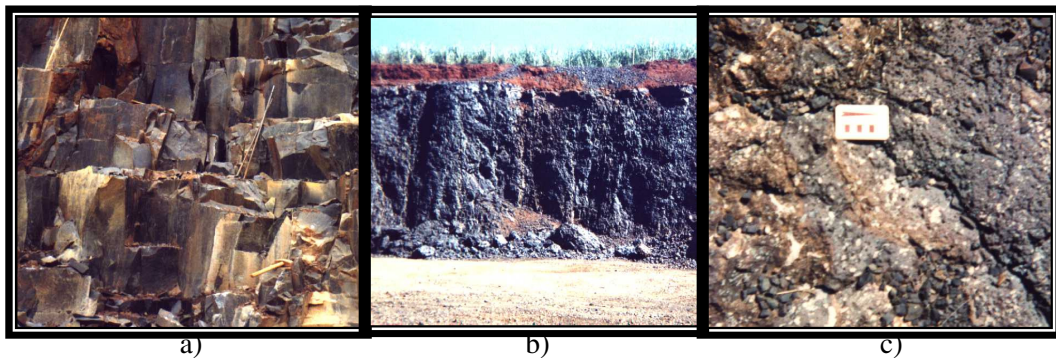


FOTO 11 – Termos informais utilizados para descrever os compartimentos colunata e entablamento e o basalto vesículo-amigdaloidal; a).basalto colunar, b) basalto granular, c) basalto “olho de sapo”.

A seguir, apresentam-se as descrições dos perfis dos derrames reconhecidos na área estudada. Os diferentes perfis, os valores das espessuras dos compartimentos, o tipo de derrame, bem como os seus contatos estão esquematizados nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41.

No município de São Carlos-SP foram investigadas as pedreiras Bandeirantes (lavra da periferia de São Carlos e lavra da Rod. Washington Luís) (Foto 12) e a antiga pedreira da prefeitura (inativa). Nestes locais foi possível distinguir a compartimentação entablamento-colunata apenas no afloramento da antiga pedreira da prefeitura (Foto 13). O entablamento apresenta espessura aproximada de 12m e repousa sobre o colunata inferior, com espessura em torno de 1,5m. Este arranjo caracteriza o derrame, neste local, como do Tipo III. O seu contato inferior é dado pela presença de uma camada de 2m de espessura de basalto vesículo-amigdaloidal. Este arranjo caracteriza o derrame, neste local, como do Tipo III. O seu contato inferior é dado pela presença de uma camada de 2m de espessura de basalto vesículo-amigdaloidal.

Um fato bastante interessante é que na Pedreira Bandeirantes, localizada a aproximadamente 1.000m da antiga pedreira da prefeitura, a rocha basáltica não mais apresenta a compartimentação entablamento-colunata e sim características de derrames Tipo I, o que nos leva a acreditar na possível variação lateral entre os compartimentos. Souza Jr (1992) explica que esta situação é devido, pelo menos, a um fator de caráter paleo-ambiental, ou seja a ocorrência de um derrame parcialmente submerso durante o processo de consolidação.

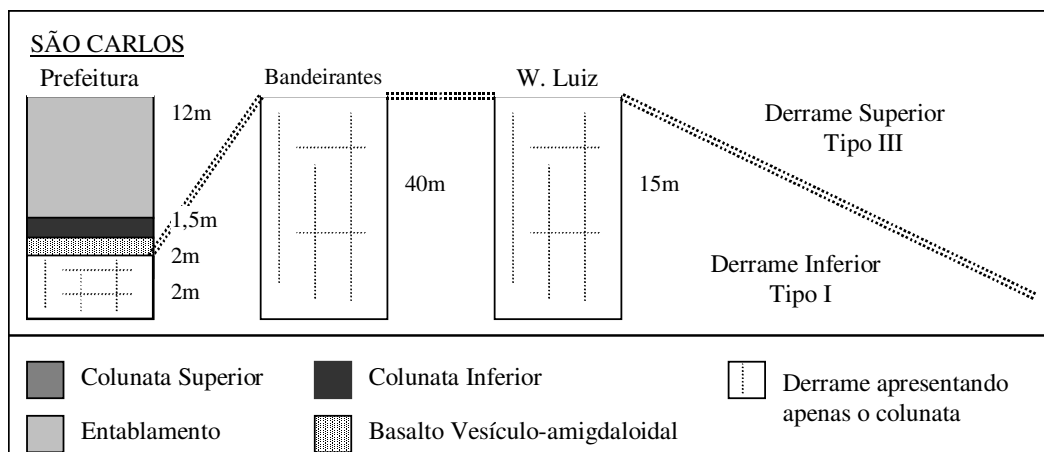


FIGURA 37 – Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de São Carlos-SP.



FOTO 12 – Diaclasamento colunar (Pedreira da Rod. Washington Luiz, S. Carlos-SP)

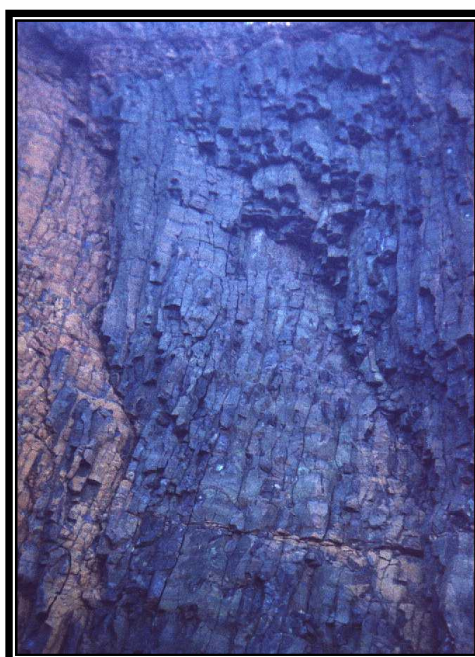


FOTO 13 – Aspecto do intenso fraturamento do compartimento entablamento (Pedreira da Prefeitura, S. Carlos-SP).

No município de Araraquara-SP as pedreiras estudadas foram as seguintes: Pedreira Santo Antônio (Foto 14), Pedreira Ouro fino, Pedreira Monopedras (inativa) e Pedreira Leão & Leão. Todas se caracterizam pelo mesmo tipo de perfil de derrame basáltico, composto

pele entablamento (10m a 20m de espessura) na parte superior, sobreposto ao compartimento colunata inferior (aproximadamente 2m de espessura), caracterizado, desta forma, por derrame Tipo III (Figura 48). Nas pedreiras Ouro Fino e Leão & Leão (Fotos 15 e 16) ocorre o basalto vesículo-amigdaloidal (aproximadamente 3m de espessura) na base do colunata inferior, que define o contato entre diferentes derrames.

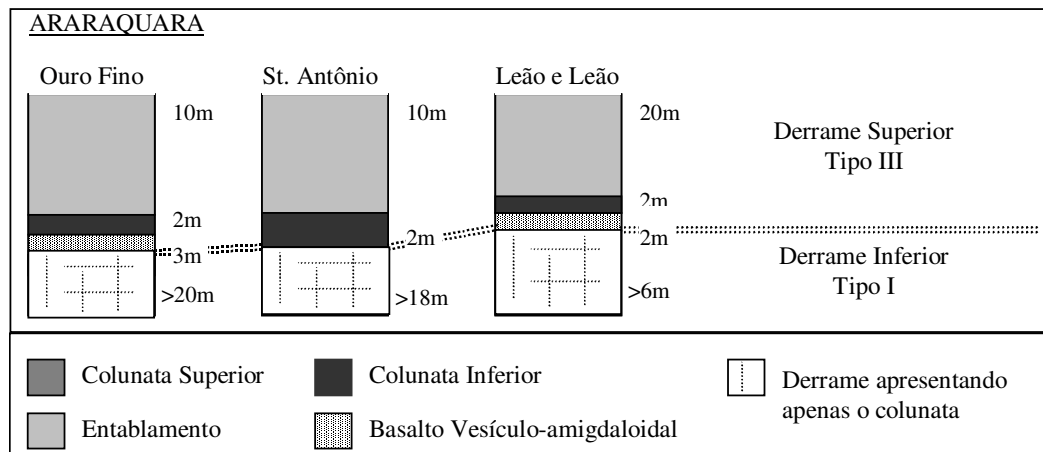


FIGURA 38 – Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de Araraquara-SP.



FOTO 14 – Compartimentos colunata inferior e entablamento (Pedreira Santo Antônio, Araraquara – SP).



FOTO 15 – Compartimento entablamento, ao fundo, e colunata, a direita (Pedreira Ouro Fino, Araraquara– SP)



FOTO 16 – Detalhe do desmonte do compartimento entablamento (Pedreira Leão e Leão, Araraquara– SP).

Na região de Ribeirão Preto-SP foram mapeadas as pedreiras SAID, INDERP e Leão & Leão. Os perfis destes derrames mostraram-se bastante parecidos com os dos município de Araraquara-SP e São Carlos-SP, caracterizando-se pela presença do compartimento

entablamento na parte superior do perfil, sobreposto ao colunata inferior (Fotos 17,18,19 e 20). O compartimento colunata superior foi mapeado nas proximidades da pedreira Leão & Leão o que auxiliou a montagem do perfil típico da região como mostrado na Figura 39.

A principal diferença entre os perfis de derrames da região de São Carlos, Araraquara e Ribeirão Preto está na espessura do compartimento entablado. O entablamento na região de Ribeirão Preto apresenta espessuras da ordem de 50m, enquanto que na região de São Carlos e Araraquara a espessura máxima encontrada gira em torno de 20m.

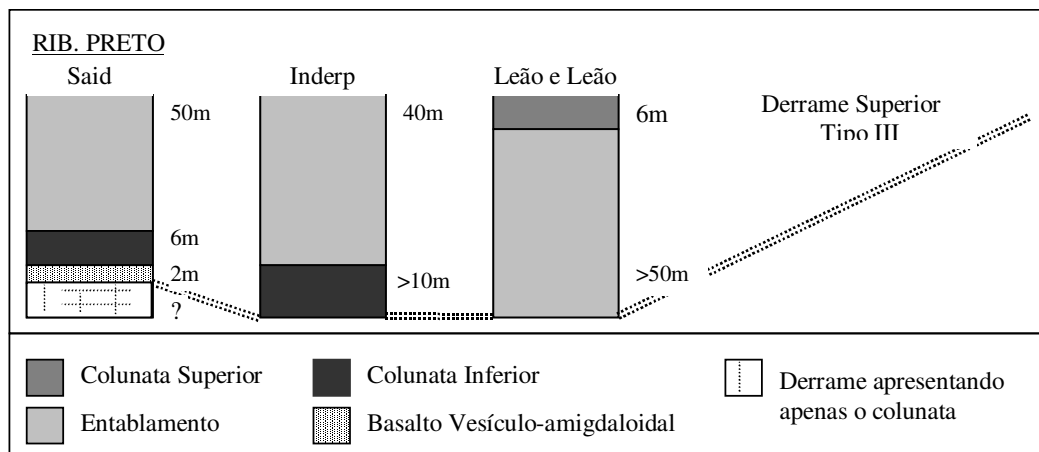


FIGURA 39 – Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de Ribeirão Preto-SP.



FOTO 17 – Vista parcial da Pedreira Inderp (Ribeirão Preto – SP). Notar a continuidade do contato entre os compartimentos entablamento e colunata.



FOTO 18 – Alternância de compartimentos entablamento e colunata (Pedreira INDERP, Ribeirão Preto – SP).



FOTO 19 – Afloramento de basalto vesículo amigdaloidal (Pedreira SAID, Ribeirão Preto – SP).



FOTO 20 – Compartimento entablamento (Pedreira SAID, Ribeirão Preto – SP).

As pedreiras Bica de Pedra e Pontepedras, localizadas respectivamente nos municípios de Jaú-SP e São Manuel-SP, caracterizam-se pela ausência da compartimentação entablamento-colunata (Figura 40). Desta forma, prevalece a ocorrência do basalto compacto colunar do Tipo I (Fotos 21 e 22).

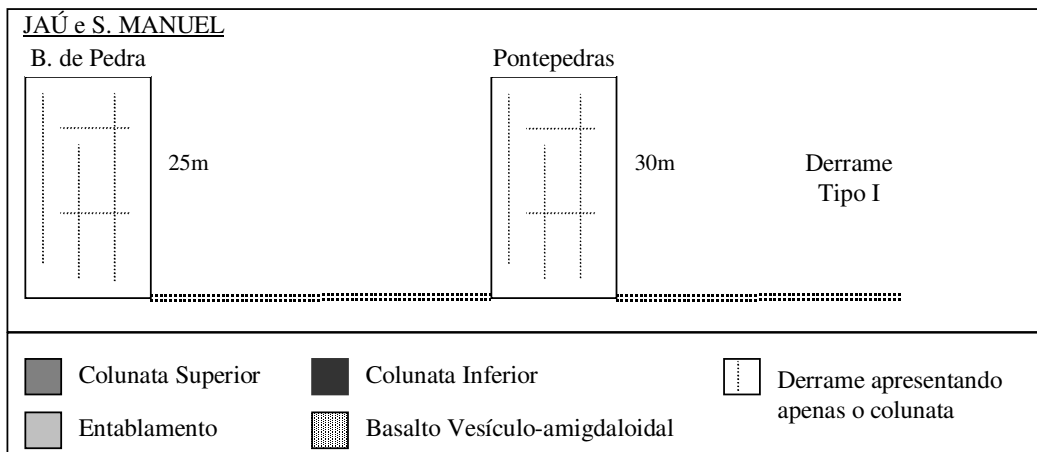


FIGURA 40 – Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos nos municípios de Jaú-SP e São Manuel-SP.



FOTO 21 – Compartimento colunata (Pedreira Bica de Pedra, Jaú – SP).



FOTO 22 – Vista parcial da Pedreira Pedralite (São Manuel-SP). Notar o espesso manto de intemperismo resultante da decomposição do compartimento colunata.

Na região de Assis-SP prevalecem os derrames basálticos Tipo I, onde a rocha é formada por colunata altamente irregular. Na pedreira WS (Foto 23) o derrame apresenta espessura de 20m. Seu limite basal é marcado pela presença de basalto vesículo-amigdaloidal com espessura de 3m. Já na pedreira Siqueira (Foto 24), localizada a 3km da pedreira WS, o derrame apresenta características típicas do Tipo III. Desta forma, ocorre na região o predomínio de derrames colunares Tipo I, porém, em alguns locais, o entablamento poderá estar presente (Figura 41).

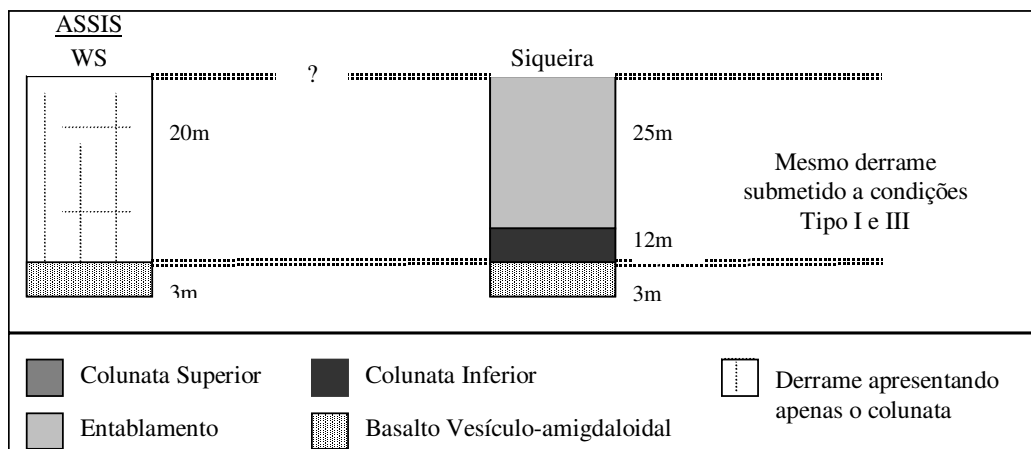


FIGURA 41 – Perfis esquemáticos da compartimentação entablamento-colunata em derrames basálticos no município de São carlos-SP.



FOTO 23 – Aspecto “granular” dos basaltos do entablamento, quando desmontados. (Pedreira Siqueira, Assis – SP).

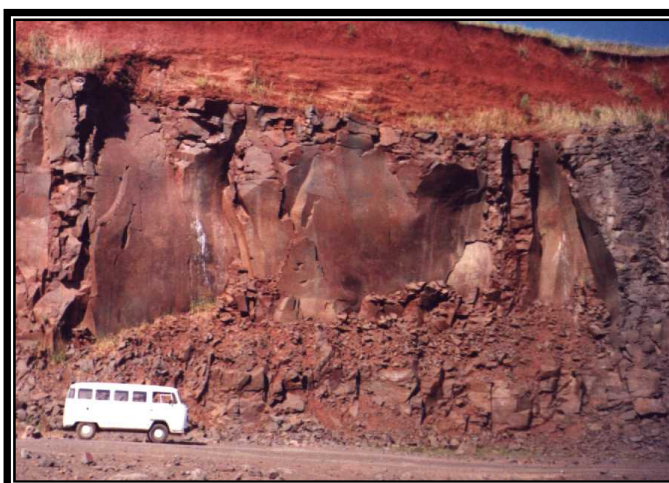


FOTO 24 – Vista parcial da Pedreira Ws (Assis-SP). Notar o grande espaçamento entre as colunas.

A partir da observação dos diferentes perfis dos derrames mapeados na área, foi possível definir dois perfis típicos que sintetizam os derrames nas diferentes regiões. Os derrames basálticos nas regiões dos municípios de Ribeirão Preto-SP, Araraquara-SP e São Carlos-SP apresentam características de derrame Tipo III, e possuem em média espessuras que variam de 20m a 60m. O compartimento colunata inferior e o superior, quando presente, representam cerca de 20% da espessura total do derrame, enquanto que o entablamento 70%. Os contatos basal e superior deste tipo de derrame são caracterizados por uma camada de

aproximadamente 2m de basalto vesículo-amigdaloidal, representando cerca de 10% do derrame. Na pedreira INDERP, em Ribeirão Preto, o derrame apresenta alternância entre camadas de entablamento e colunata caracterizando desta forma um derrame com características de Tipo II (Foto 18). Neste caso um único derrame foi submetido a diferentes condições paleo-ambientais proporcionando a formação de dois tipos de perfis: Tipo II e Tipo III.

Como visto, a presença destes tipos de derrames sugere um paleo-ambiente caracterizado por chuvas torrenciais, predomínio de escoamento superficial das águas e formação de extensos e rasos lagos naturais sobre a superfície dos derrames. O próprio derrame poderia também represar alguns sistemas de drenagem dando origem a lagos em sua superfície.

A espessura e a distribuição areal do compartimento entablado na região de Ribeirão Preto-SP, atestam que para sua formação foi necessário o aporte de águas fluviais ou lacustres durante um longo período. Long & Wood (1986) citam que um derrame basáltico de 40m de espessura, sob ação de uma frente de infiltração d'água, estaria completamente solidificado em 5 anos, enquanto que sem a ação da água cerca de 14 anos. Os autores citam ainda que o intervalo de tempo decorrido entre sucessivas inundações, no caso de um derrame de 40m, gira em torno de 1 a 2 anos. Para derrames de 20m de espessura são necessários alguns meses.

Por analogia, podemos concluir que os derrames basálticos nas regiões dos municípios de São Carlos-SP, Araraquara-SP e Ribeirão Preto-SP, foram submetidos a condições paleo-ambientais marcadas por ciclos de inundação em períodos de alguns meses ao máximo de dois anos. A pequena espessura, quando presente, do compartimento colunata superior indica que a inundação ocorreu pouco tempo após o extravasamento. A grande espessura do derrame, aproximadamente 60m em Ribeirão Preto-SP, leva a crer que para sua completa solidificação, sob a ação de águas de infiltração, foram necessários mais que cinco anos.

Para a faixa dos derrames basálticos que engloba os municípios de Jaú-SP, São Manuel-SP até Assis-SP o perfil típico é do Tipo I. Em alguns locais, muitas vezes com pouca extensão areal, o derrame possui características de Tipo III. O predomínio de derrames Tipo I, com espessuras aproximadas de 25m, sugere condições paleo-ambientais com clima

seco e também que estes derrames não romperam sistemas de drenagem. Segundo o modelo adotado, estes derrames levaram em torno de 8 anos para sua total solidificação. A presença do compartimento entablado em alguns locais, como por exemplo na pedreira Siqueira em Assis-SP, refletem variações locais no paleo-ambiente, provavelmente devido à formação de lago com pequenas dimensões na superfície solidificada do derrame.

Para a comparação entre perfis de derrames de cada região não foi adotada nenhuma referência topográfica associada a quaisquer um dos compartimentos estudados. Não se descarta a possibilidade de ocorrência de descontinuidades tectônicas e erosivas as quais podem, por sua vez, modificar as correlações estratigráficas entre derrames. Não se objetiva aqui a realização de estudos minuciosos paleo-ambientais e estratigráficos mas sim o reconhecimento e o entendimento da gênese dos derrames mapeados visando a obtenção de informações sob o ponto de vista geotécnico e tecnológico, relevantes para o uso destas rochas como agregados em construção civil.

Por fim, vale ressaltar que o compartimento entablado é o mais explotado nas pedreiras devido a sua facilidade de desmonte face ao seu alto grau de fraturamento. A lavra quando chega ao nível do topo do colunata inferior é muitas vezes interrompida. Segundo Rolim Filho (1993) o alto grau de fraturamento presente no entablamento confere a este tipo de basalto qualidades especiais no que se refere às técnicas de desmonte. Quando as descontinuidades são interceptadas por um furo de seção carregada de explosivos, os gases decorrentes da explosão, inicialmente a alta pressão, fluem através dessas fendas, o que resulta numa queda da pressão no furo tendo como consequência uma quebra na granulometria e redução no lançamento do entulho.

Capítulo 5

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS ESTUDADOS

5.1 Características Petrográficas

Do ponto de vista macroscópico, os basaltos possuem coloração que varia de cinza escuro a esverdeado, apresentam granulação fina, são meso a melanocráticos, de aspecto homogêneo, sem estruturas aparentes com exceção dos basaltos vesículo-amigdaloidais. A amostra *PAV* (diabásio), possui granulação média, coloração cinza esverdeada e aspecto homogêneo.

Ao microscópio petrográfico, tanto os basaltos quanto o diabásio, são compostos por cristais ripiformes de plagioclásio (labradorita), entre os quais estão presentes cristais prismáticos de clinopiroxênio (augita) e minerais opacos (titanita e magnetita), configurando arranjo textural subofítico ou intergranular. No caso dos basaltos, principalmente no compartimento entablamento, concentrações de vidro vulcânico e argilominerais conferem à rocha, localmente, aspecto de textura intersetal. A Tabela 14 apresenta, detalhadamente, as características petrográficas das amostras estudadas.

Observando-se os dados da Tabela 14, nota-se que ocorre diferenciação entre as amostras estudadas no que se refere ao atributo textura, mais especificamente, com relação ao tamanho dos cristais de plagioclásio e clinopiroxênios. As amostras associadas ao entablamento apresentam textura mais fina que as amostras do colunata, o que atesta o conceito de gênese da compartimentação entablamento-colunata.

Observa-se ainda, que os valores máximo e mínimo, para o tamanho dos cristais de plagioclásio e clinopiroxênios, relacionam-se, respectivamente, as amostras de diabásio e de basalto vesículo-amigdaloidal (Figura 42).

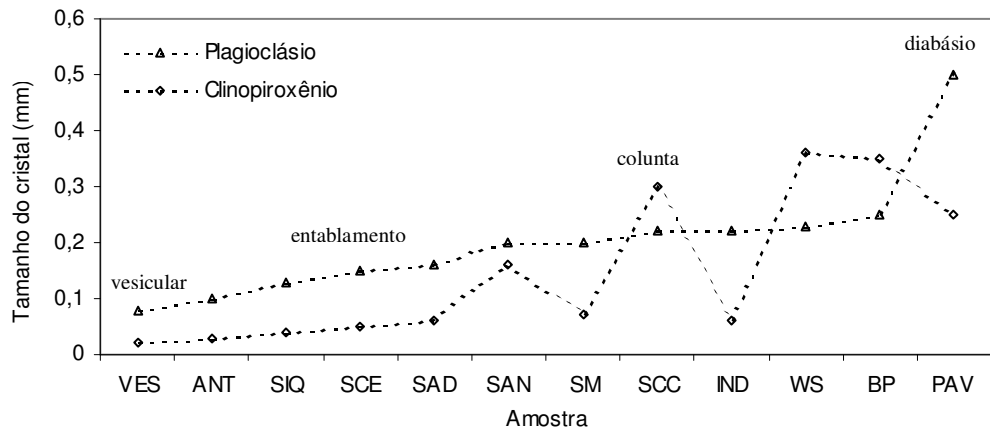


FIGURA 42 – Variação de tamanho dos cristais de plagioclásio e clinopiroxênio nas amostras estudadas.

Depreende-se da Tabela 14 que as quantidades de argilominerais, de vidro vulcânico e de óxidos e hidróxidos de ferro apresentam maiores valores nas amostras do compartimento entablamento, com exceção da amostra SAN (colunata) devido a sua maior quantidade em óxidos e hidróxidos de ferro resultante de seu estágio mais elevado de alteração (Figura 43 e Fotos 25 e 26).

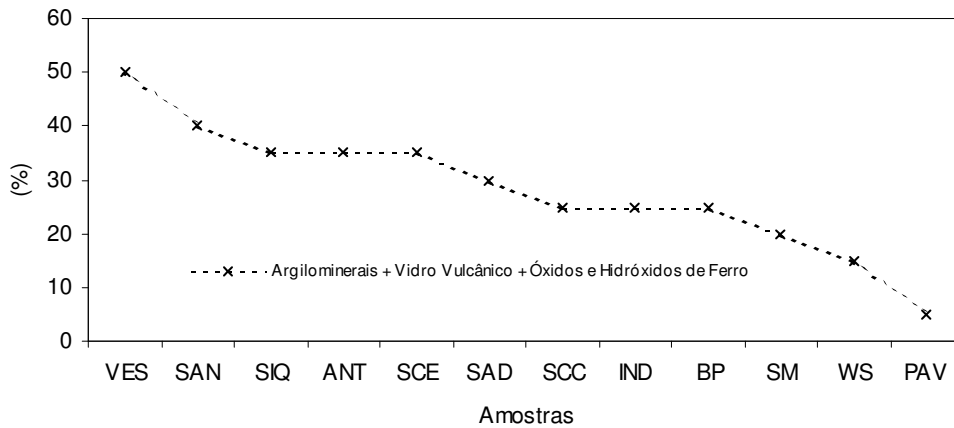


FIGURA 43 – Somatório das quantidades de argilominerais, vidro vulcânico e óxidos e hidróxidos de ferro das amostras estudadas.

TABELA 14 – Características petrográficas das amostras estudadas.

Amostra	Litologia	Textura	Mineralogia	Alt. Hidrotermal	Alt. Intempérica	Amígdalas	Argilominerais	Microfissuras
SCC	Basalto / Colunata	Subofítica. Granulação: Plagioclásio (0,40 – 0,1mm) Clinopiroxênio (0,6 – 0,05mm)	Plagioclásio (35%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (10%) Argilominerais (03%) Vidro vulcânico (22%)	Fraca. Alguma argilização, principalmente nos clinopiroxênios.	Fraca ou ausente. Não detectada a presença de óxidos e hidróxidos de ferro.	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a alteração de clinopiroxênios.	Ausente.
SCE	Basalto / Entablamento	Ofítica a subofítica. Granulação: Plagioclásio (0,15 – 0,05mm) Clinopiroxênio (0,02 – 0,04mm)	Plagioclásio (30%) Clinopiroxênio (25%) Opacos (10%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (27%) Oxi-Hidróx. de ferro (03%)	Fraca. Associada a mesóstase vítrea argilosa e a argilização de clinopiroxênios.	Fraca. Presença de óxidos e hidróxidos de ferro preenchendo microfissuras dos clinopiroxênios.	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a mesóstase vítrea argilosa e a alteração do cpx.	Microfissuras presentes nos piroxênios.
SAN	Basalto / Colunata	Ofítica a subofítica. Granulação: Plagioclásio (0,16 – 0,24mm) Clinopiroxênio (0,16mm)	Plagioclásio (30%) Clinopiroxênio (25%) Opacos (05%) Argilominerais (10%) Vidro vulcânico (20%) Oxi-Hidróx. de ferro (10%)	Média. Associada a mesóstase vítrea argilosa e a argilização de clinopiroxênios.	Média. Presença de óxi- hidróxidos de ferro envolta dos opacos e preenchendo microfissuras dos piroxênios.	Rara ocorrência de amígdalas preenchidas por argilomineral de coloração esverdeada associados a calcedônia e carbonato.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a mesóstase vítrea argilosa.	Microfissuras presentes na rocha, nos piroxênios e nos plagioclásios.
ANT	Basalto / Entablamento	Subofítica. Granulação: Plagioclásio (0,15 – 0,05mm) Clinopiroxênio (0,02 – 0,04mm)	Plagioclásio (30%) Clinopiroxênio (25%) Opacos (10%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (28%) Oxi-Hidróx. de ferro (02%)	Fraca, Alguma argilização em clinopiroxênios e plagioclásios.	Fraca	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a mesóstase vítrea argilosa e a alteração do cpx.	Ausente
IND	Basalto / Colunata	Subofítica, Granulação: Plagioclásio (0,16 – 0,3mm) Clinopiroxênio (0,04 – 0,08mm) Opacos (0,04 – 0,08mm)	Plagioclásio (35%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (10%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (20%)	Fraca, Alguma argilização em clinopiroxênios, formando zonas de alteração na rocha.	Fraca ou ausente. Não detectada a presença de óxidos e hidróxidos de ferro.	Ausente.	Argilomineral de coloração esverdeada distribuídos em zonas da rocha, decorrente da alteração dos clinopiroxênios.	Ausente.
SAD	Basalto / Entablamento	Subofítica. Granulação: Plagioclásio (0,08 – 0,24mm) Clinopiroxênio (0,04 – 0,08mm) Opacos (0,02 – 0,04mm)	Plagioclásio (35%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (05%) Argilominerais (20%) Vidro vulcânico (10%)	Fraca. Alguma argilização, principalmente nos clinopiroxênios.	Fraca ou ausente. Não detectada a presença de óxidos e hidróxidos de ferro.	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a alteração de clinopiroxênios.	Ausente.

TABELA 14 – Continuação.

Amostra	Litologia	Textura	Mineralogia	Alt. Hidrotermal	Alt. Intempérica	Amígdalas	Argilominerais	Microfissuras
VES	Basalto / Vesículo-amigdaloidal	Intersetal. Granulação: Plagioclásio (0,04 – 0,12mm) Clinopiroxênio (<0,02mm) Amígdalas (0,8 – 3,0mm)	Plagioclásio (25%) Clinopiroxênio (20%) Opacos (05%) Argilominerais + Vidro vulcânico Oxi-Hidróx. de ferro (50%)	Média. argilização em clinopiroxênios e plagioclásios.	Fraca, Rara presença de óxi-hidróxidos de ferro em volta de opacos.	Presença de amígdalas representando cerca de 25% do volume da rocha, preenchidas por argilominerais de coloração esverdeada, calcedônia e carbonatos.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada preenchendo as amígdalas e interstícios (> 0,5mm) interligados.	Presença de microfissuras intragranular (clinopiroxênio) e intergranular (Rocha).
PAV	Diabásio	Intergranular a subofítica Granulação: Plagioclásio (0,3 – 0,8mm) Clinopiroxênio (0,2 – 0,3mm)	Plagioclásio (45%) Clinopiroxênio (40%) Opacos (10%) Sulfetos (05%)	Fraca, Alguma argilização em clinopiroxênios e plagioclásios.	Fraca ou ausente. Não detectada a presença de óxidos e hidróxidos de ferro.	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a alteração de clinopiroxênios.	Microfissuras presentes na rocha, nos piroxênios e nos plagioclásios.
BP	Basalto / Colunata	Subofítica, Granulação: Plagioclásio (0,10 – 0,4mm) Clinopiroxênio (0,05 – 0,6mm)	Plagioclásio (35%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (10%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (20%)	Fraca. Alguma argilização, principalmente nos clinopiroxênios.	Fraca ou ausente.	Ausente.	Presença de argilomineral de coloração verde acastanhada (esmectita), ocupando espaços intergranulares.	Ausente.
SM	Basalto / Colunata	Subofítica, Granulação: Plagioclásio (0,35 – 0,1mm) Clinopiroxênio (0,1 – 0,05mm)	Plagioclásio (35%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (15%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (15%)	Fraca, Presença de argilização nos contatos entre o clinopiroxênio com o opaco.	Fraca. Presença de óxi-hidróxidos de ferro envolta dos opacos e preenchendo microfissuras dos piroxênios.	Ausente.	Presença de argilomineral de cor castanha nos contatos entre o cpx e opaco e preenchendo algumas fissuras no plagioclásio.	Rara nos plagioclásios e clinopiroxênios e ausente na rocha.
WS	Basalto / Colunata	Subofítica, Granulação: Plagioclásio (0,4 – 0,2mm) Clinopiroxênio (0,15 – 0,06mm)	Plagioclásio (40%) Clinopiroxênio (35%) Opacos (10%) Argilominerais (05%) Vidro vulcânico (10%)	Fraca, Presença de argilização nos contatos entre o clinopiroxênio com o opaco.	Fraca. Presença de óxi-hidróxidos de ferro envolta dos opacos e preenchendo microfissuras dos piroxênios.	Ausente.	Presença de argilomineral de cor castanha nos contatos entre o cpx e opaco e preenchendo algumas fissuras no plagioclásio.	Rara nos plagioclásios e clinopiroxênios e ausente na rocha.
SIQ	Basalto / Entablamento	intergranular Granulação: Plagioclásio (0,1 – 0,15mm) Clinopiroxênio (0,04mm)	Plagioclásio (30%) Clinopiroxênio (30%) Opacos (05%) Argilominerais (20%) Vidro vulcânico (15%)	Média. Associada a mesóstase vítrea argilosa e a argilização de clinopiroxênios.	Fraca. Presença de óxi-hidróxidos de ferro envolta dos opacos e preenchendo microfissuras dos piroxênios.	Ausente.	Presença de argilo- mineral de coloração verde acastanhada (esmectita) associado a mesóstase vítrea argilosa e a alteração de plagioclásios e clinopiroxênios.	Microfissuras presentes na rocha, nos piroxênios e nos plagioclásios.

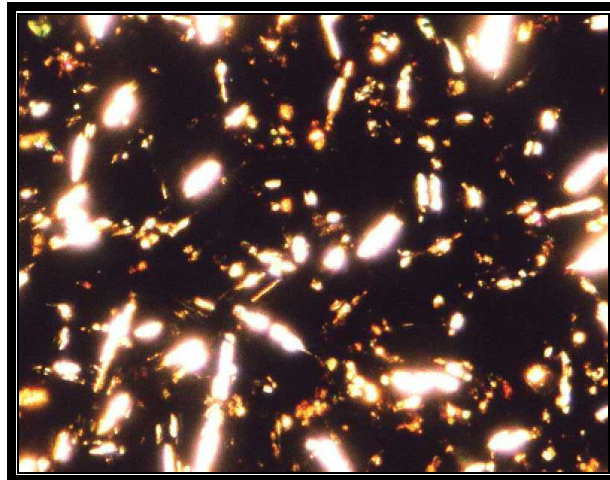


FOTO 25 – Fotomicrografia da amostra *ANT*, proveniente do compartimento entablamento. Notar a grande quantidade de matriz vítrea dada pela tonalidade escura. Nicois cruzados.

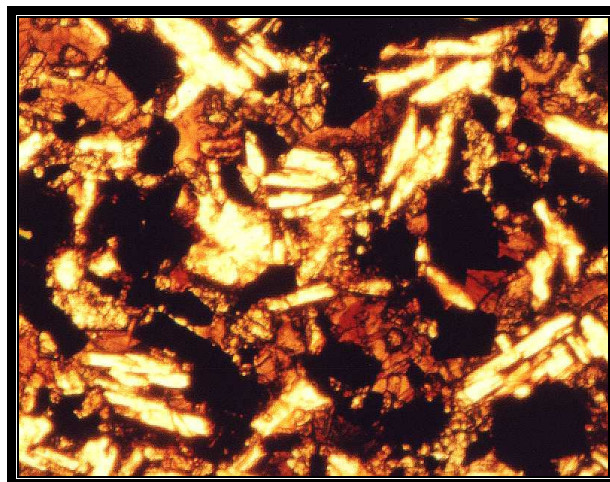


FOTO 26 – Fotomicrografia da amostra *SAN*. As manchas acastanhadas atestam a presença de grande quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro. Nicois cruzados

Tanto a alteração hidrotermal quanto a intempérica variam de média a fraca. A alteração hidrotermal é notada pela presença de argilominerais, principalmente do grupo das esmectitas, que ocorrem associados à mesóstase vítrea argilosa e ao preenchimento de microfissuras (Fotos 27,28 e 29). Já a alteração intempérica é evidenciada pela presença de óxi-hidróxidos de ferro preenchendo microfissuras da rocha e de minerais, principalmente clinopiroxênios e plagioclásios (Foto 30).

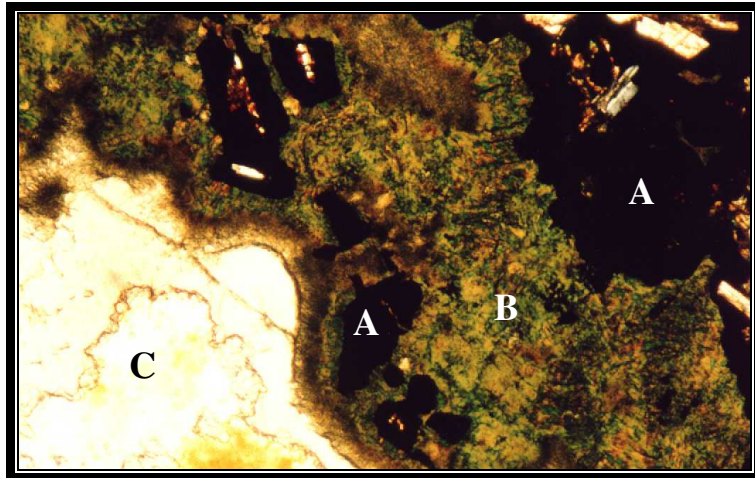


FOTO 27 – Fotomicrografia da amostra *SAN* mostrando, de forma simplificada, as fases de alteração hidrotermal do vidro vulcânico. (A: vidro vulcânico hidratado; B: Assembléias mineralógicas de alteração compostas por argilominerais (esmectitas tipo nontronita e saponitas e micas tipo celadonitas); C: Zona de precipitações de zeólitas). Nicóis cruzados.

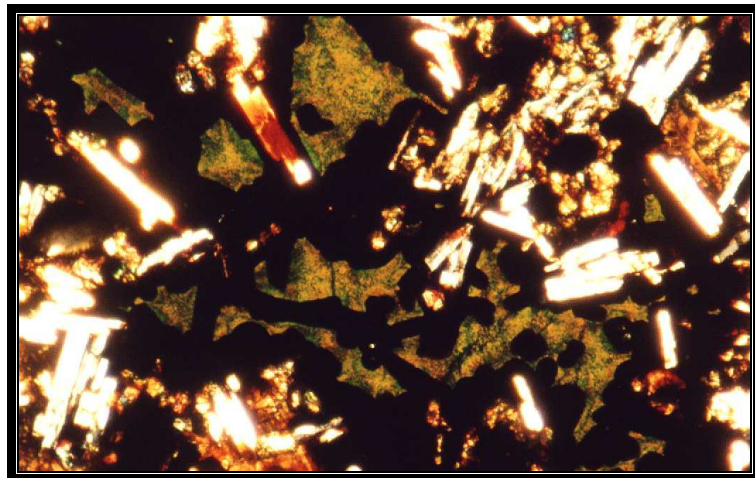


FOTO 28 – Fotomicrografia da amostra *ANT*. Notar, em coloração verde acastanhada, a presença de argilominerais (esmectita/nontronita) decorrentes da alteração do vidro vulcânico. Nicóis cruzados.

As amostras estudadas apresentaram raras ocorrências de vesículas e amígdalas, com a exceção da amostra do basalto vesicular, que possui cerca de 25% de seu volume constituído por estas estruturas. Estas amígdalas, geralmente apresentam-se preenchidas por argilominerais verdes e/ou acastanhados muitas vezes acompanhados por calcedônia, quartzo, zeólitas e carbonato.(Foto 31).

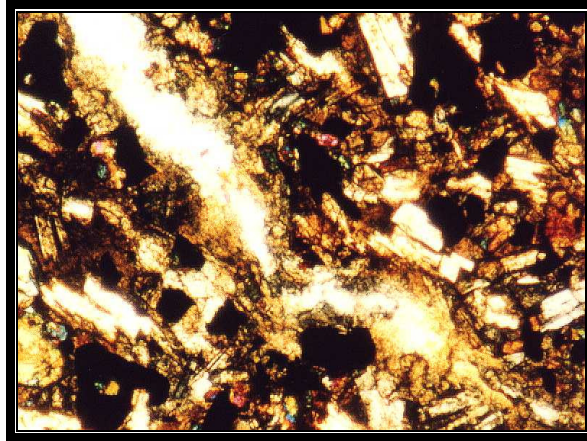


FOTO 29 – Fotomicrografia de zona de alteração hidrotermal desenvolvida em uma microfissura. Nas bordas da microfissura predominam argilominerais do tipo celadonita/saponita enquanto que sua parte central constitui-se de precipitações de sílica (calcedônia e/ou opala). Amostra *SIQ*. Nicóis cruzados.

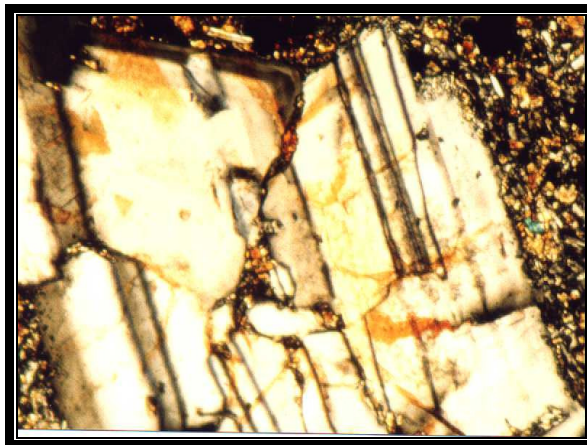


FOTO 30 – Fotomicrografia de fenocristal de plagioclásio, presente na amostra *SIQ*, apresentando microfraturas preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro. Nicóis cruzados.

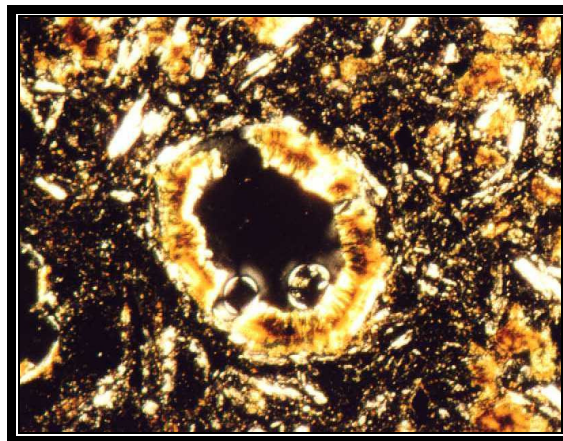


FOTO 31 – Fotomicrografia de vesícula presente na amostra do basalto vesículo amigdaloidal. Nicóis cruzados.

Na amostra PAV observou-se, tanto ao microscópio petrográfico quanto a “olho nú”, a ocorrência de pequenos pontos disseminados de minerais metálicos de coloração amarelo avermelhada (luz refletida). Estes minerais foram identificados preliminarmente como possíveis sulfetos.

Para o esclarecimento do tipo de mineral metálico presente, optou-se pela realização de análise química pontual utilizando-se de microsonda eletrônica. As análises foram realizadas em três pontos de ocorrência da amostra e em todos eles detectou-se a presença dos elementos enxofre e ferro (Figura 44 e Foto 32). As análises realizadas não forneceram os dados quantitativos das porcentagens dos elementos para a identificação do tipo de sulfeto ocorrente. Porém, adotou-se para este trabalho a provável ocorrência da pirita (FeS_2) e da pirrotita ($Fe_{1-x}S$).

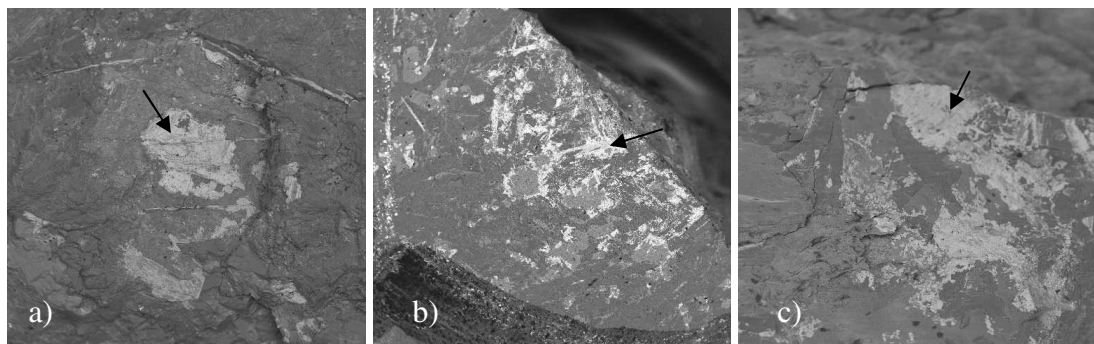


Foto 32 – Imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura apresentando, em tonalidades mais claras, a ocorrência de sulfeto de ferro na amostra PAV. As setas indicam os pontos onde foram realizadas as análises químicas por microsonda eletrônica.

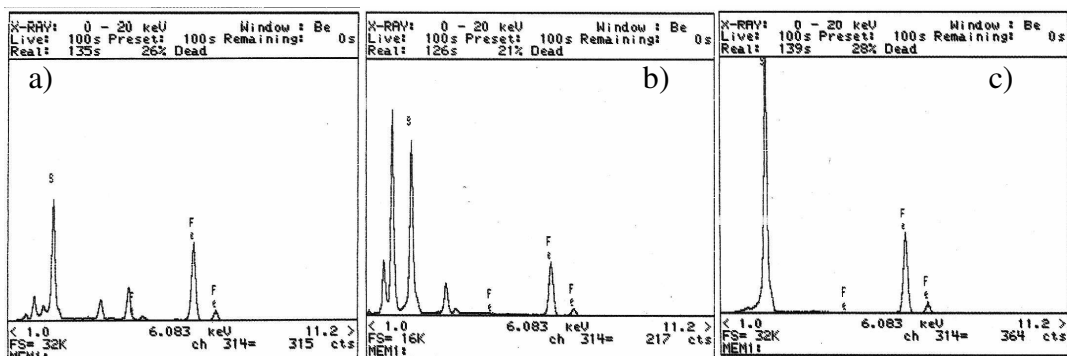


FIGURA 44 – Diagramas de análise química semi-quantitativa (M.E.V. com analisador) de pontos com ocorrência de sulfetos na amostra PAV.

A Tabela 15, mostra as principais feições petrográficas necessárias para o cálculo dos índices K1 e K2 propostos, respectivamente, por Frazão & Paraguassu (1994) e Frascá (1998). Estes índices, correlacionam os minerais essenciais são (S1) com os seus correspondentes alterados (S2), com as amígdalas preenchidas por esmectitas (S3), com esmectitas interligadas (S4), com as microfissuras preenchidas por esmectitas (S5), com outros tipos de microfissuras (S6), com a quantidade de vidro vulcânico (S7) e com a quantidade de minerais secundários, incluindo os óxidos e hidróxidos de ferro (S8), por meio das seguintes expressões:

$$K1 = S1 / (S2 + S4 + S5)$$

$$K2 = S1 / (S2 + S3 + (S4*2) + (S5*2) + S6)$$

TABELA 15 – Características petrográficas das amostras (análises modais (%)).

	SCC	SCE	SAN	ANT	IND	SAD	VES	PAV	BP	SM	SIQ	WS
S1	73	62	50	60	72	68	40	90	72	77	55	80
S2	2	3	10	5	3	2	10	5	3	3	10	5
S3	0	0	1	0	0	0	20	0	0	0	0	0
S4	1	3	2	4	5	8	0	0	1	0	5	0
S5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0
S6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
S7	22	27	20	28	19	10	25	0	20	15	15	10
S8	2	5	10	2	1	2	5	5	3	5	10	5
K1	24,3	10,3	3,8	6,7	9	6,8	4	18	18	26	3,1	16
K2	18,2	6,9	2,6	4,6	5,5	3,78	1,3	18	14	26	2	16

Nota: S1 = plagioclásio + clinopiroxênio + opaco são; S2 = plagioclásio + clinopiroxênio alterados; S3 = amígdalas com esmectitas; S4 = esmectitas interligadas; S5 = microfissuras preenchidas por esmectitas; S6 = outras microfissuras; S7 = vidro vulcânico; S8 = minerais secundários + óxidos e hidróxidos de ferro; K1 = Índice petrográfico (Frazão & Paraguassu, 1994); K2 = Frascá, 1998).

A Figura 45 mostra a variação dos valores dos índices petrográficos K1 e K2 nas amostras estudadas. Vale ressaltar que quanto maiores os valores para os dois índices, melhor a qualidade do material rochoso para ser utilizado como agregado em construção civil.

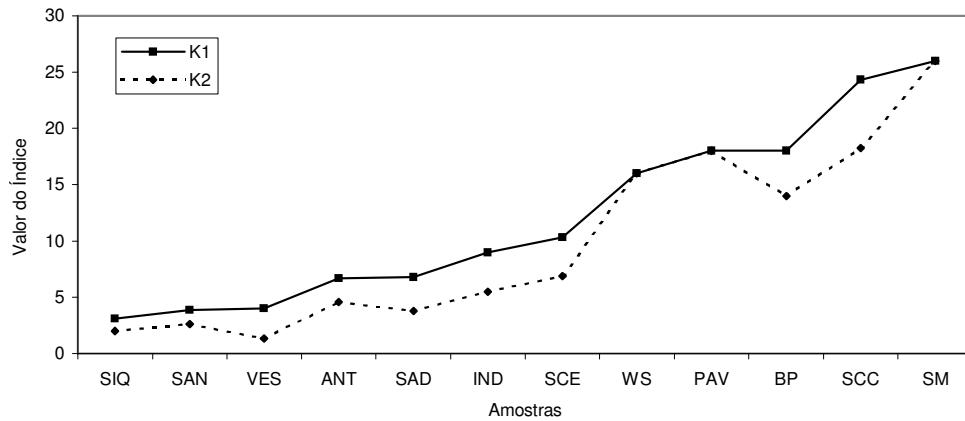


FIGURA 45 - Variação dos valores dos índices petrográficos K1 e K2 nas amostras estudadas.

Uma outra forma de análise das características petrográficas pode ser feita pela utilização do índice R_{sm} “Secondary mineral rating” proposto por Cole & Sandy (1980). Este índice se baseia nas características mineralógicas e texturais da rocha, da seguinte forma:

$$R_{sm} = [\Sigma (P \cdot M)]T$$

Onde:

R_{sm} = Taxa de mineral secundário

P = Porcentagem de minerais secundários

M = Valor referente ao mineral secundário (ver Tabela 8)

T = valor referente à textura (ver Tabela 8)

O valor referente ao mineral secundário avaliado é $M = 10$, que corresponde aos argilominerais do grupo das esmectitas. As texturas avaliadas, associadas aos argilominerais presentes, são as seguintes: ($T = 0,3$) alteração parcial dos fenocristais e preenchimento incompleto de vesículas; ($T = 0,4$) fenocristais completamente alterados; ($T = 0,5$) distribuição homogênea na matriz; ($T = 0,6$) preenchimento total de vesículas; ($T = 0,7$) distribuição irregular na matriz e com preenchimento de microfissuras isoladas; ($T = 1,0$) preenchimento de microfraturas irregulares e ($T = 2,0$) preenchimento de microfraturas interconectadas.

A Tabela 16 e a Figura 46 apresentam os valores de R_{sm} para as amostras estudadas.

TABELA 16 – Valores de R_{sm} para as amostra estudadas.

Amostra	Mineral	Textura (%)	Rsm	Amostra	Mineral	Textura (%)	Rsm
SCC	10	0,3	23	VES	10	0,3	175
		0,6				10	
		0,7				20	
		1,0				0	
		0,5				5	
SCE	10	0,3	55	PAV	10	0,3	40
		0,6				5	
		0,7				0	
		1,0				0	
		0,5				5	
SAN	10	0,3	110	BP	10	0,3	31
		0,6				3	
		0,7				0	
		1,0				1	
		0,5				3	
ANT	10	0,3	53	SM	10	0,3	34
		0,6				3	
		0,7				0	
		1,0				0	
		0,5				5	
IND	10	0,3	49	SIQ	10	0,3	145
		0,6				10	
		0,7				0	
		1,0				5	
		0,5				3	
SAD	10	0,3	72	WS	10	0,3	40
		0,6				10	
		0,7				5	
		1,0				0	
		0,5				0	

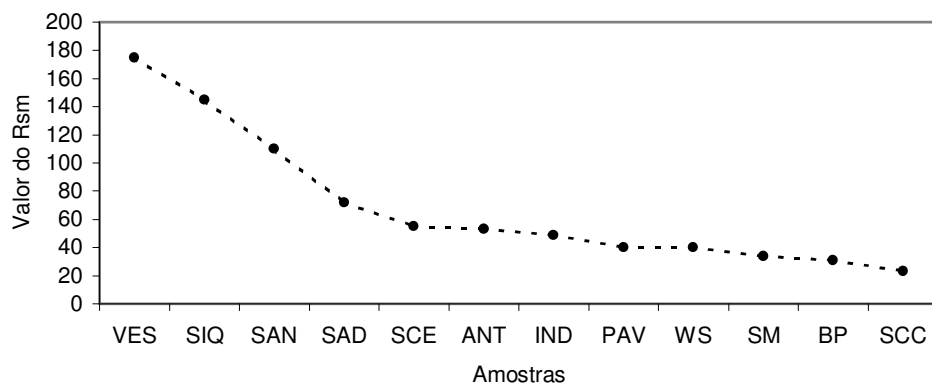


FIGURA 46 – Variação do valor de R_{sm} das amostras estudadas.

Não é pretensão deste item do trabalho avaliar a qualidade das amostras. Porém, já está explícito nas Figuras 43, 45 e 46 um certo zoneamento das amostras, refletindo, de maneira ainda primária, a qualidade duvidosa dos materiais representados pelas amostras *VES*, *SIQ* e *SAN*.

5.2 Difractometria de Raios X

A difratometria de Raios-X detectou a presença de plagioclásio, de piroxênios e de minerais metálicos do tipo magnetita/hematita e titanita, em todas as amostras. Argilominerais do grupo das esmectitas foram identificados, em diferentes quantidades, nas amostras *IND*, *VES*, *BP*, *SM* e *WS*. Nas demais amostras, os picos do difratograma, representativos destes argilominerais, não foram significativos para a sua identificação. As Figuras de 48 a 59 apresentam os difratogramas das amostras estudadas.

No que se refere a comparação entre difratogramas de amostras do entablamento com difratogramas de amostras do colunata, notou-se que a diferença entre o pico de intensidade do plagioclásio com o pico de intensidade do piroxênio é maior para as amostras provenientes do colunata. Esta comparação foi feita abatendo-se a influência dos valores de “background” do ensaio. Este fato é bem observado quando comparado os difratogramas das amostras *SCC* com a *SCE*, *IND* com a *SAD* e *SAN* com a *ANT*.

A Figura 47 apresenta o valor do índice de relação entre os picos no difratograma do plagioclásio com o piroxênio definido como “N”. Observa-se que as amostras provenientes do entablamento (*SAD*, *ANT* e *SCE*) apresentam o pico do plagioclásio, aproximadamente, duas vezes maior que o pico do piroxênio, ou seja, valor de “N” em torno de 2. Enquanto que para as amostras do colunata (*IND*, *WS*, *BP*, *SM*, *SCC* e *SAN*) esta relação varia de duas a aproximadamente cinco vezes. A amostra proveniente do basalto vesicular possui valor de “N” de 2,2. Já a amostra de diabásio (*PAV*), “N”= 4,1.

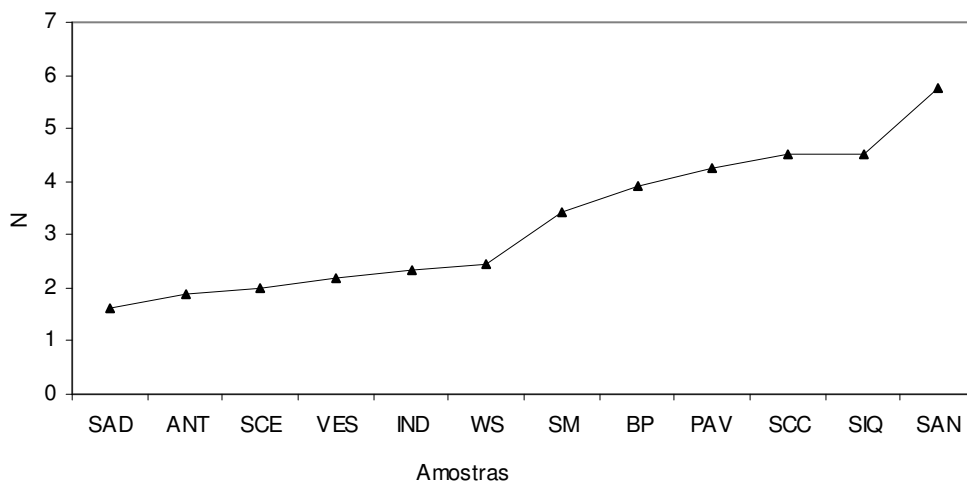


FIGURA 47 – Relação entre os picos de intensidade do plagioclásio e do piroxênio. N= número de vezes que o pico de intensidade do plagioclásio é maior que o do piroxênio.

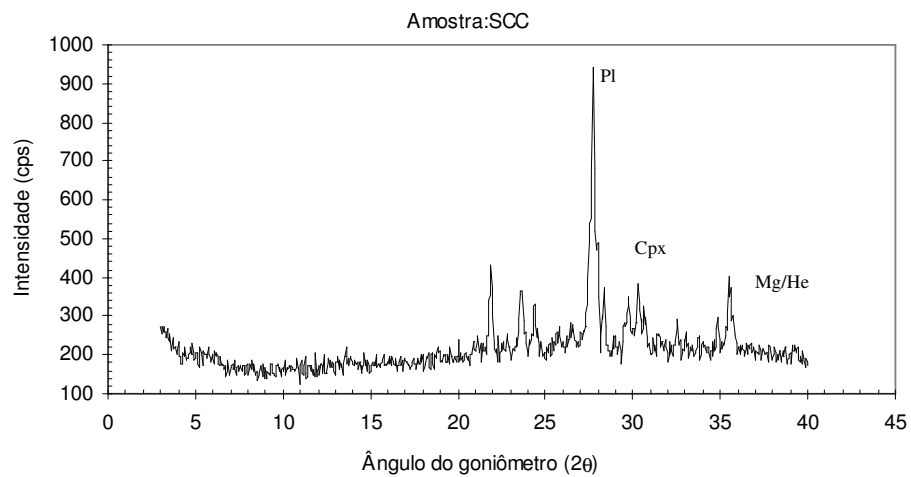


FIGURA 48 – Difratoograma da amostra SCC

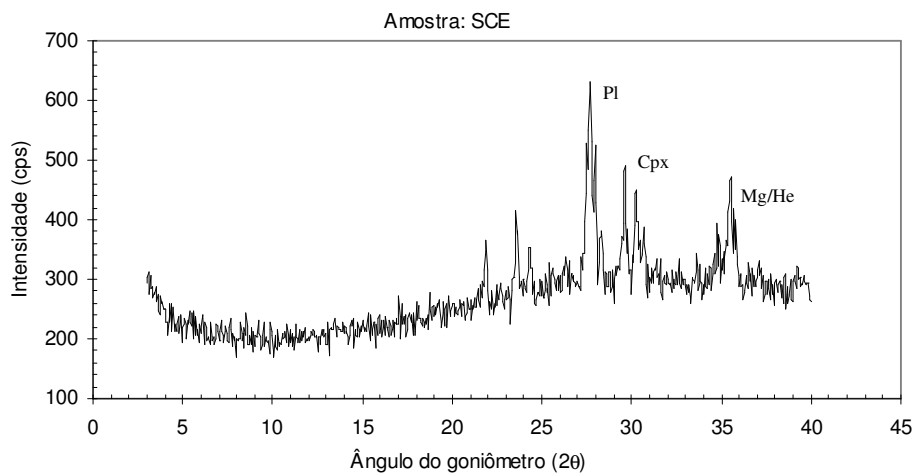


FIGURA 49 – Difratoograma da amostra SCE

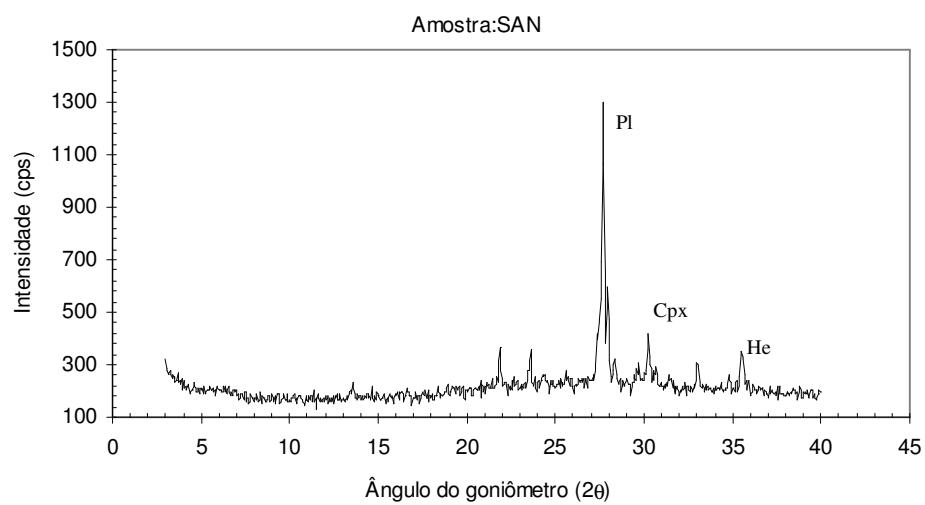


FIGURA 50 – Difratoograma da amostra SAN.

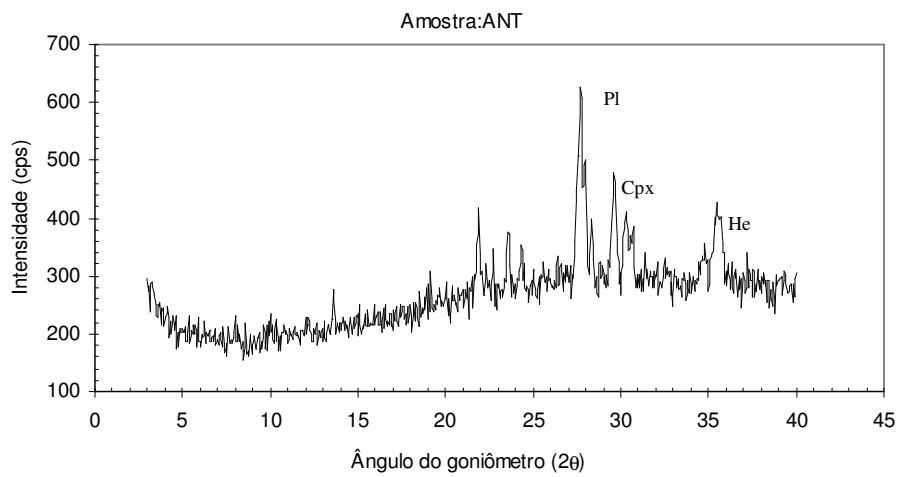


FIGURA 51 – Difratograma da amostra ANT.

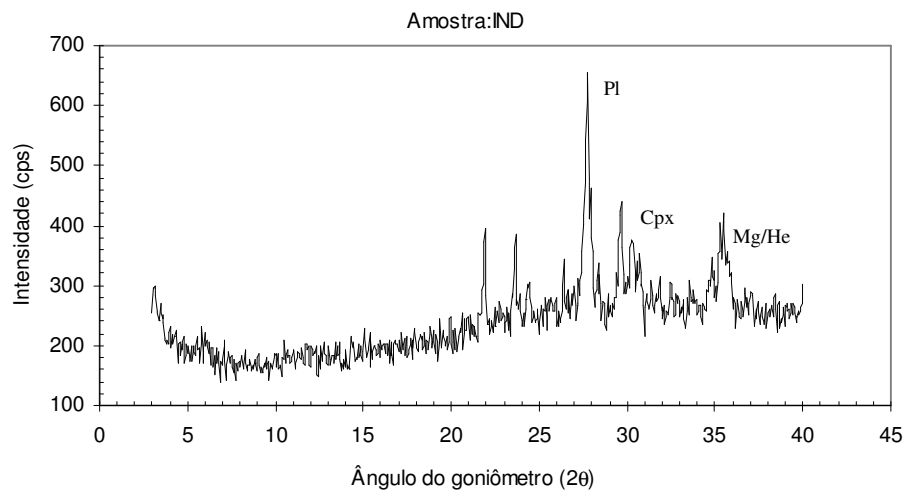


FIGURA 52 – Difratograma da amostra IND.

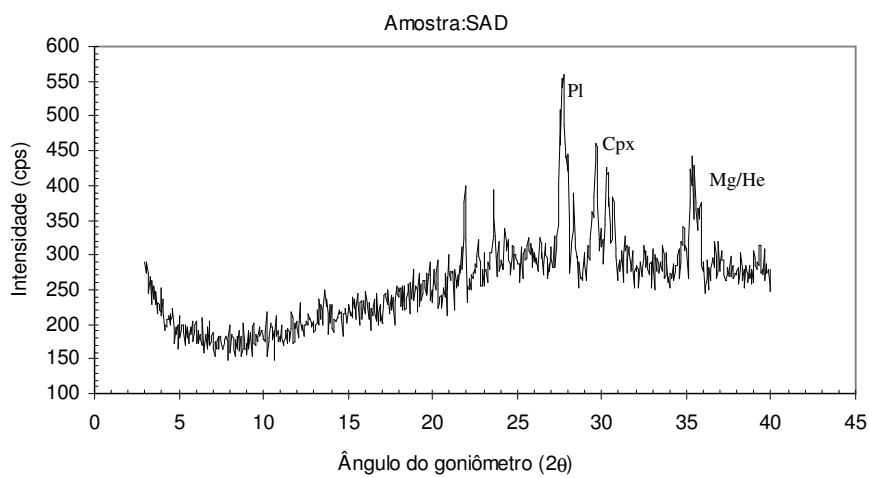


FIGURA 53 – Difratograma da amostra SAD.

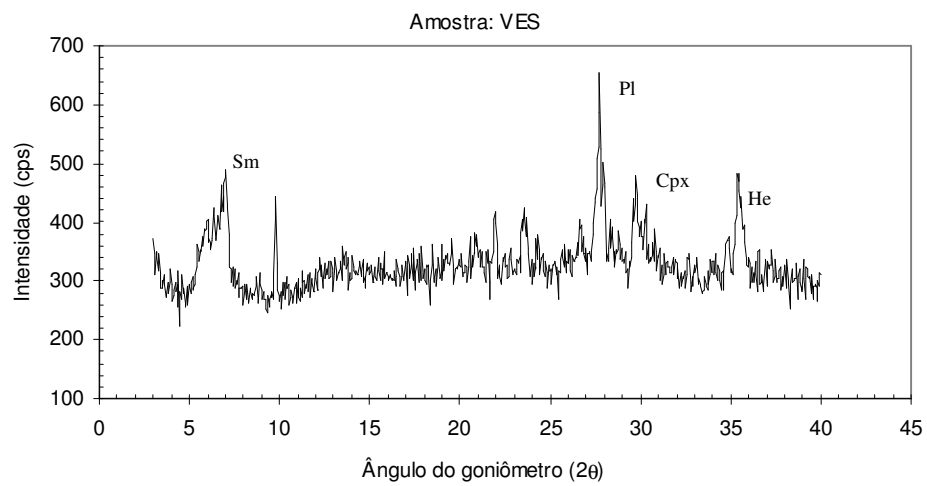


FIGURA 54 – Difratoograma da amostra VES.

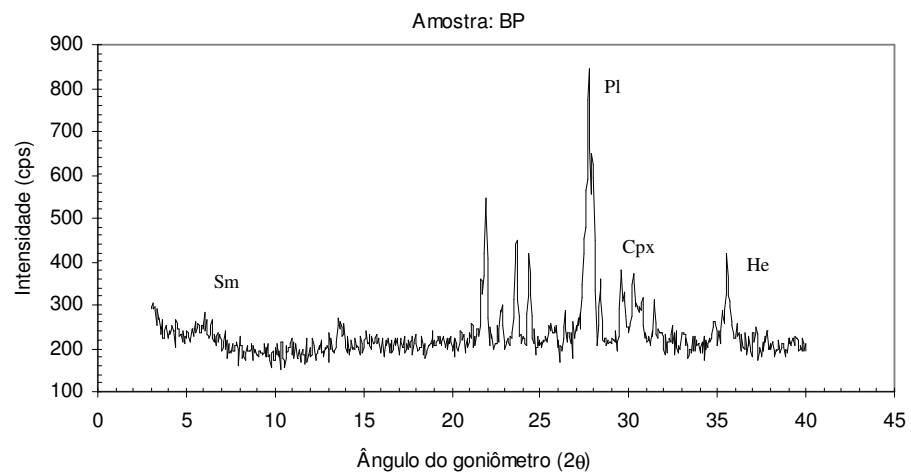


FIGURA 55 – Difratoograma da amostra BP.

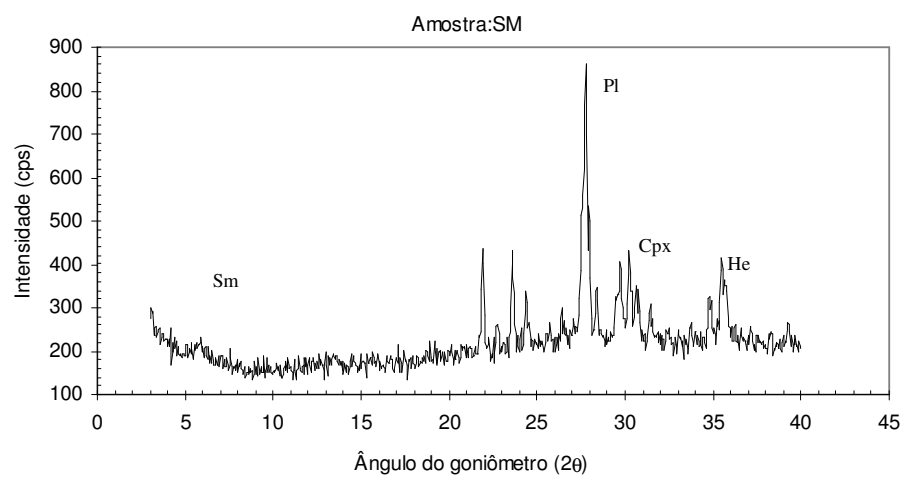


FIGURA 56 – Difratoograma da amostra SM.

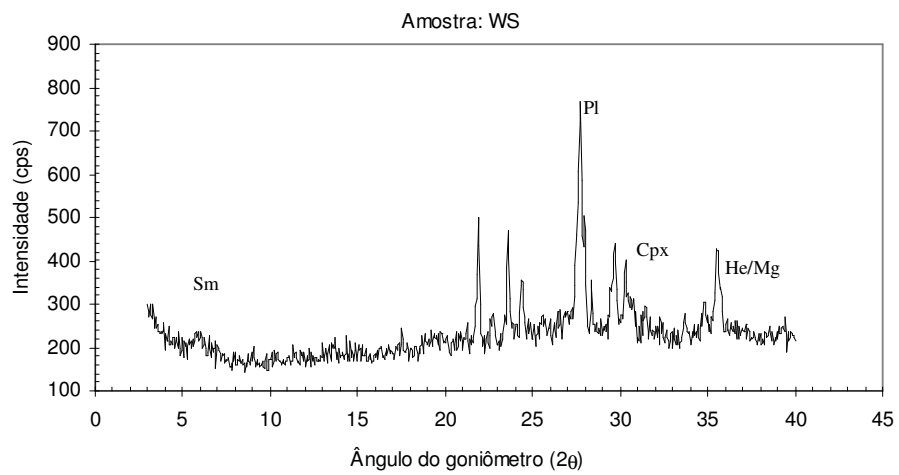


FIGURA 57 – Difratoograma da amostra WS.

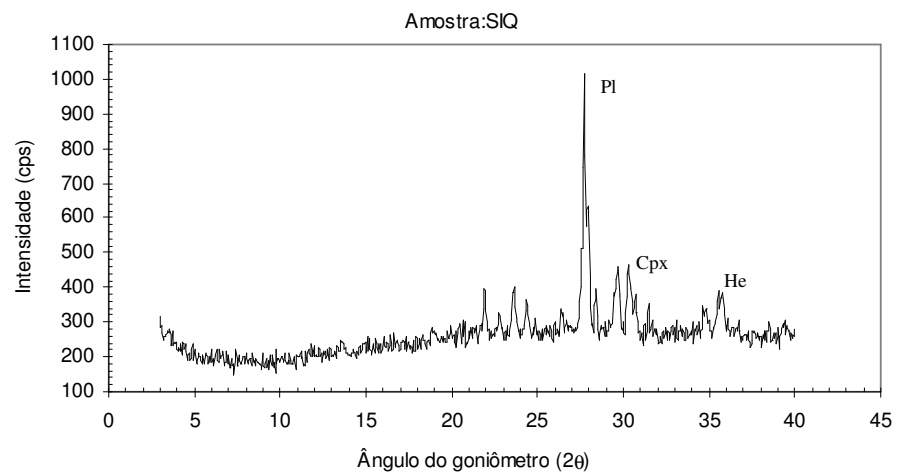


FIGURA 58 – Difratoograma da amostra SIQ.

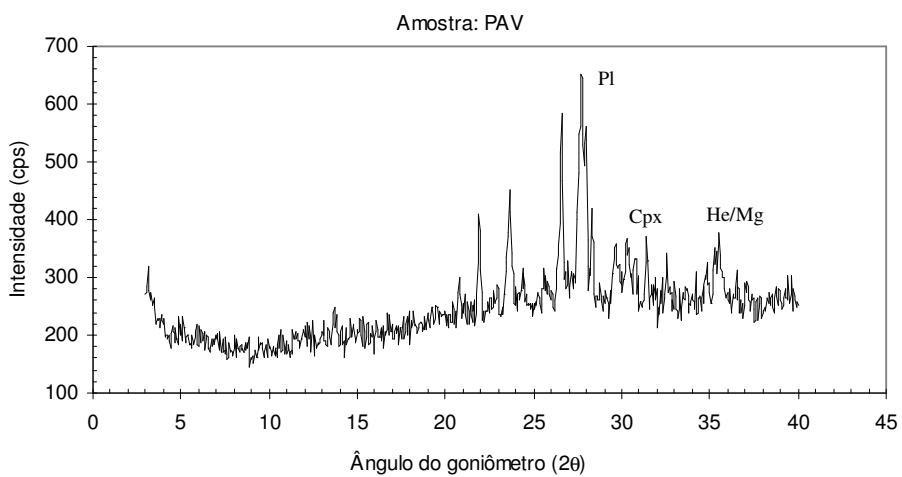


FIGURA 59 – Difratoograma da amostra PAV.

Com os resultados dos difratogramas, calculou-se, para cada amostra, o índice SAI (“*Smectite Alteration index*”), proposto por Houston & Smith (1997). Este índice, se baseia na correlação entre os picos de intensidade (cps) da Esmectita (15Å) e do Plagioclásio (3,2Å), após removido o nível de “background” do ensaio, da seguinte maneira (Tabela 17):

$$SAI = \text{pico de intensidade da Esmectita (cps)} / \text{pico de intensidade do Plagioclásio (cps)}$$

Altos valores deste índice, que varia de 0 a 1, indicam uma maior presença de argilominerais do grupo das esmectitas, detectados pelo difratograma. A Figura 60 apresenta os valores do índice SAI das amostras, organizados em ordem crescente.

TABELA 17 – Valores para o cálculo do índice SAI.

Amostra	Plagioclásio		Esmectita		SAI
	“Background”	Pico	“Background”	Pico	
SCE	286	632	238	247	0,026
SCC	241	941	202	212	0,014
SAN	241	1297	201	217	0,015
ANT	296	627	195	228	0,100
SAD	294	560	181	204	0,086
IND	284	656	199	221	0,059
VES	350	654	293	488	0,641
PAV	291	645	206	210	0,011
BP	243	842	240	282	0,070
SM	244	861	200	230	0,049
SIQ	295	1016	208	220	0,017
WS	267	770	201	238	0,074

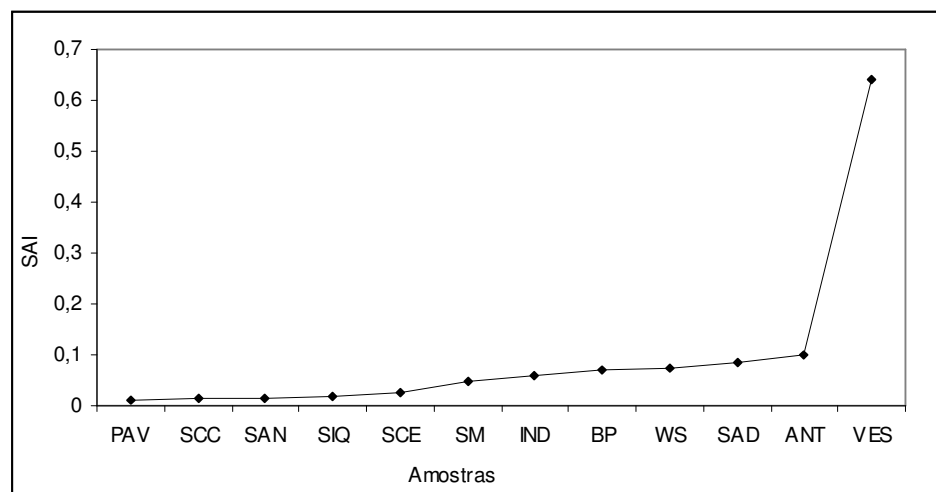


FIGURA 60 - Valores do índice SAI das amostras estudadas.

5.3 Índices Físicos

Os valores de massa específica seca aparente, de massa específica saturada aparente, de porosidade aparente e de absorção d'água das amostras estudadas, são apresentados na Tabela 18 e representados graficamente nas Figuras 61 e 62.

Do exposto na Tabela 18, os valores médios de massa específica seca aparente oscilam entre 2,948(g/cm³), valor relativo a amostra *BP* e 2,243(g/cm³), valor correspondente a amostra *VES*. Já a massa específica saturada aparente apresenta valores que variam de 2,958(g/cm³) e 2,415(g/cm³), correspondentes, respectivamente, as amostras *SIQ*, *WS* e *VES*.

A porosidade aparente oscilou entre 17,27(%) e 0,60(%) valores associados, respectivamente, às amostras *VES* e *IND*. A absorção d'água, apresenta valores entre 7,78(%) e 0,20(%) referentes, também, às amostras *VES* e *IND*.

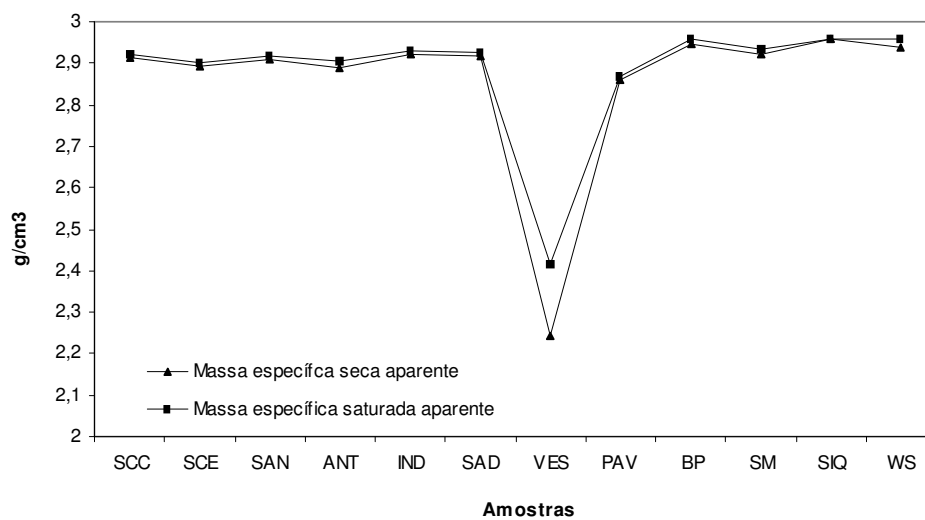


Figura 61 – Valores médios de massa específica seca aparente e de massa específica saturada aparente das amostras estudadas.

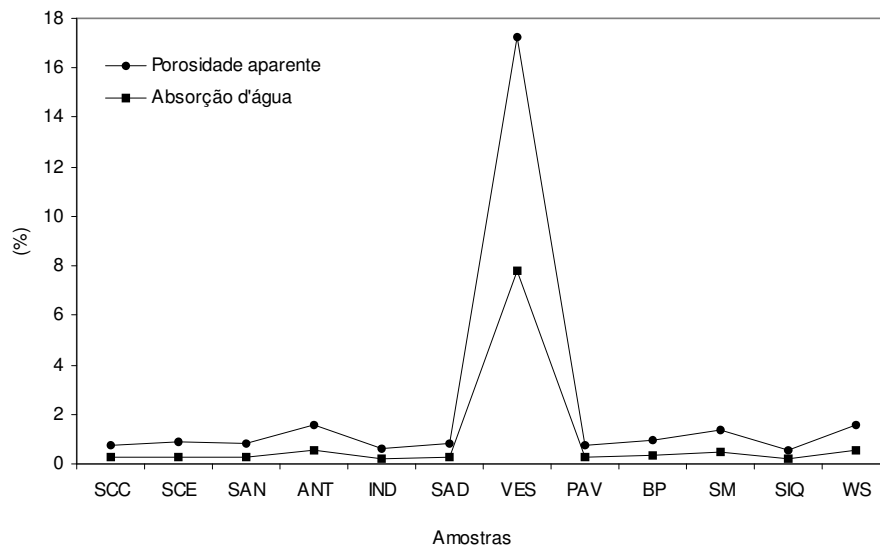


Figura 62 – Valores médios de porosidade aparente e de absorção d'água das amostras estudadas.

As Figuras 63, 64 e 65 reproduzem as curvas de regressão obtidas das correlações entre os índices físicos. Verifica-se, valores de índice de correlação “ R^2 ” próximos a 1, que indicam boa relação entre as propriedades estudadas. As regressões para as correlações entre absorção d'água x porosidade aparente e massa específica seca aparente x porosidade aparente, são do tipo linear. Neste tipo de regressão, a relação entre os valores das propriedades analisadas se mantém constante. A curva de regressão, neste caso é representada por uma reta, que não apresenta variação no seu coeficiente angular. A diferença entre as regressões das Figuras 63 e 64 é que uma é crescente e a outra é decrescente. No primeiro caso, obviamente, o aumento do valor de uma propriedade implica no aumento do valor da outra. No caso da função decrescente, o aumento do valor de uma propriedade implica, necessariamente, na diminuição do valor da outra, ou vice versa.

Já a correlação entre a massa específica seca aparente com a absorção d'água (Figura 65), obteve um melhor resultado para o índice “ R^2 ”, utilizando-se regressões do tipo potencial negativa, ou seja potencial decrescente. Neste caso, não ocorre a variação linear dos valores das propriedades estudadas e sim, variações de mesma magnitude nos valores de uma das propriedades implicam em variações de diferentes magnitudes nos valores da outra propriedade estudada.

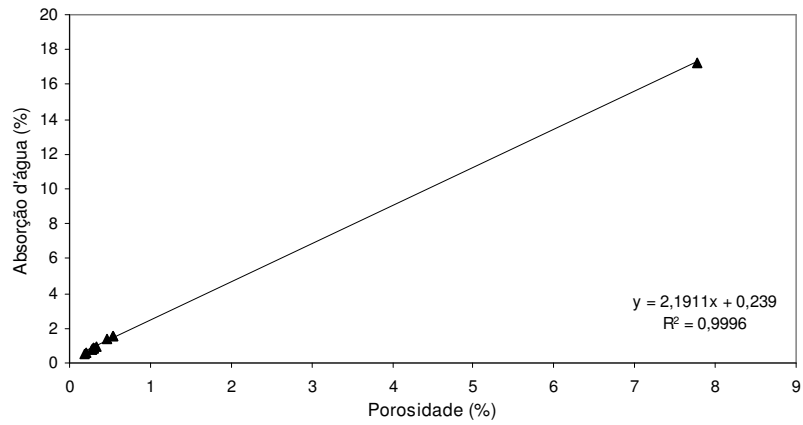


FIGURA 63 – Regressão linear crescente para correlação entre absorção d'água e porosidade.

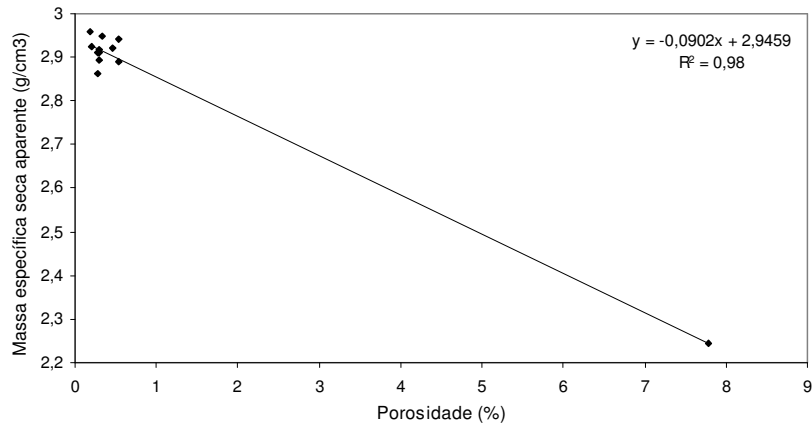


FIGURA 64 – Regressão linear decrescente para correlação entre massa específica seca aparente e porosidade aparente.

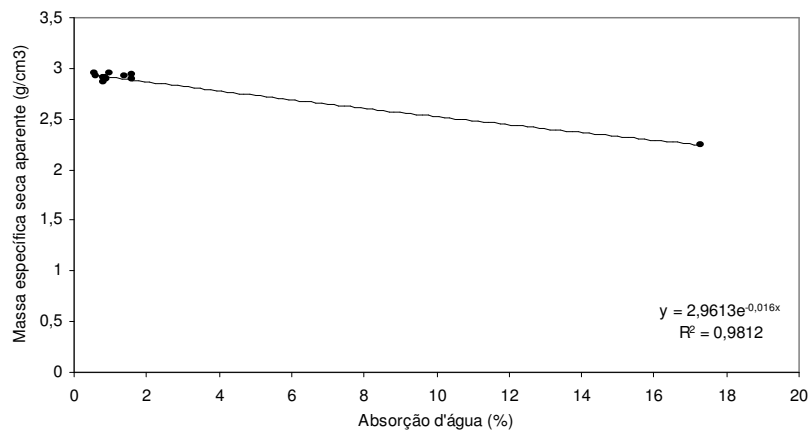


FIGURA 65 – Regressão linear exponencial decrescente para correlação entre massa específica seca aparente e absorção d'água.

TABELA 18 – Valores dos índices físicos.

Amostras	<i>SCC</i>	<i>SCE</i>	<i>SAN</i>	<i>ANT</i>	<i>IND</i>	<i>SAD</i>	<i>VES</i>	<i>PAV</i>	<i>BP</i>	<i>SM</i>	<i>SIQ</i>	<i>WS</i>	
ρ_d (g/cm ³)	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Média	2,912	2,893	2,910	2,889	2,923	2,916	2,243	2,862	2,948	2,921	2,945	2,942
	Max.	2,918	2,910	2,927	2,899	2,940	2,921	2,487	2,873	2,954	2,933	2,963	2,962
	Min.	2,898	2,876	2,893	2,877	2,911	2,909	2,003	2,853	2,944	2,911	2,923	2,910
	Desvio padrão	0,009	0,014	0,014	0,008	0,011	0,005	0,20	0,009	0,004	0,009	0,017	0,023
ρ_{sat} (g/cm ³)	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Média	2,920	2,902	2,918	2,904	2,929	2,924	2,415	2,869	2,958	2,934	2,956	2,958
	Max.	2,926	2,913	2,933	2,912	2,943	2,929	2,651	2,882	2,964	2,947	2,969	2,974
	Min.	2,911	2,890	2,907	2,897	2,917	2,921	2,195	2,861	2,953	2,924	2,943	2,930
	Desvio padrão	0,006	0,009	0,012	0,005	0,010	0,003	0,20	0,009	0,004	0,009	0,010	0,020
η (%)	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Média	0,77	0,87	0,84	1,57	0,60	0,83	17,27	0,77	0,97	1,38	1,15	1,58
	Max.	1,38	1,47	1,40	1,99	0,85	1,18	19,20	1,19	1,16	1,63	1,99	2,01
	Min.	0,47	0,27	0,63	1,23	0,22	0,58	16,26	0,49	0,79	1,09	0,59	1,24
	Desvio padrão	0,37	0,51	0,33	0,29	0,26	0,26	1,22	0,28	0,18	0,21	0,72	0,36
ω (%)	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Média	0,27	0,30	0,29	0,54	0,20	0,29	7,78	0,27	0,33	0,47	0,39	0,54
	Max.	0,48	0,51	0,48	0,69	0,29	0,40	9,59	0,42	0,40	0,56	0,68	0,69
	Min.	0,16	0,09	0,22	0,42	0,08	0,20	6,60	0,17	0,27	0,37	0,20	0,42
	Desvio padrão	0,13	0,18	0,11	0,10	0,09	0,09	1,18	0,10	0,06	0,07	0,25	0,13

5.4 Índices de Resistência

A Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, de resistência à abrasão Los Angeles e de resistência ao esmagamento modificado.

TABELA 19 – Valores de resistência à compressão uniaxial, resistência à abrasão Los Angeles e resistência ao esmagamento modificado.

Amostra	Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	Resistência ao abrasão Los Angeles (%)	Resistência ao Esmagamento modificado (%) N = 2			
			Máximo	Mínimo	Média	D. Padrão
			<i>IND</i>	175	13,87	12,68
<i>SAD</i>	290	13,32	14,63	13,98	14,31	0,46
<i>VES</i>	060	31,58	21,43	20,02	20,73	1,00
<i>SAN</i>	160	16,65	13,51	13,44	13,48	0,05
<i>ANT</i>	230	14,84	14,25	14,05	14,15	0,14
<i>SCC</i>	265	13,09	12,74	11,65	12,20	0,77
<i>SCE</i>	242	14,91	14,21	13,99	14,10	0,16
<i>PAV</i>	191	16,32	14,15	13,84	14,00	0,22
<i>BP</i>	180	15,88	13,39	13,28	13,34	0,08
<i>SM</i>	124	13,26	14,18	13,05	13,62	0,80
<i>WS</i>	155	15,76	16,19	15,55	15,87	0,45
<i>SIQ</i>	086	16,33	12,03	11,93	11,98	0,07

Os valores de resistência à compressão uniaxial, variam de 60 a 290 MPa, correspondentes, respectivamente, às amostras *VES* e *SAD* (Figura 66). Do total de amostras ensaiadas, 16,66% apresentam valores de resistência à compressão entre 50 e 100 MPa; 8,33% apresentam valores que variam de 100 até 150 MPa; 41,66% valores de 150 a 200 MPa; 16,66% valores de 200 a 250 MPa e por fim, 16,66% apresentam valores compreendidos entre 250 e 300 MPa (Figura 67).

A resistência ao abrasão Los Angeles, apresenta 91,67% dos seus resultados de valor inferior a 20% de perdas, mais especificamente, 50% de valores compreendidos entre 10 e 15% e 41,67% correspondentes a valores de resistência que variam de 15 a 20%. Os 8,33% restantes corresponde a resistências com perdas entre 30 e 35% (Figura 68). As amostras *VES* e *SCC* representam, respectivamente as maiores (31,58%) e as menores (13,09%) perdas pelo ensaio de resistência ao abrasão Los Angeles (Figura 69).

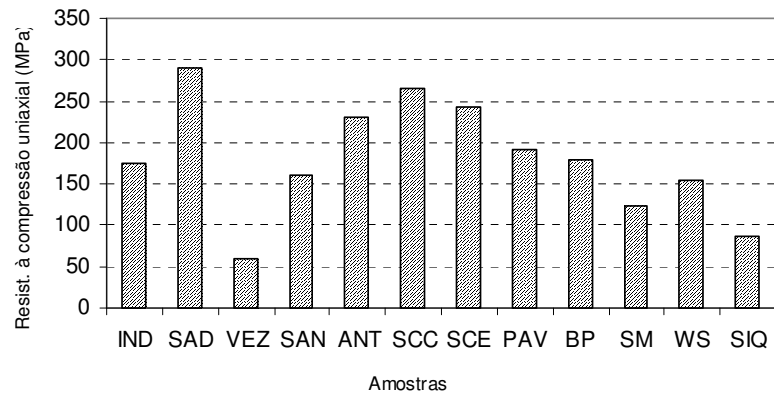


FIGURA 66 – Histograma dos valores de resistência à compressão uniaxial das amostras estudadas.

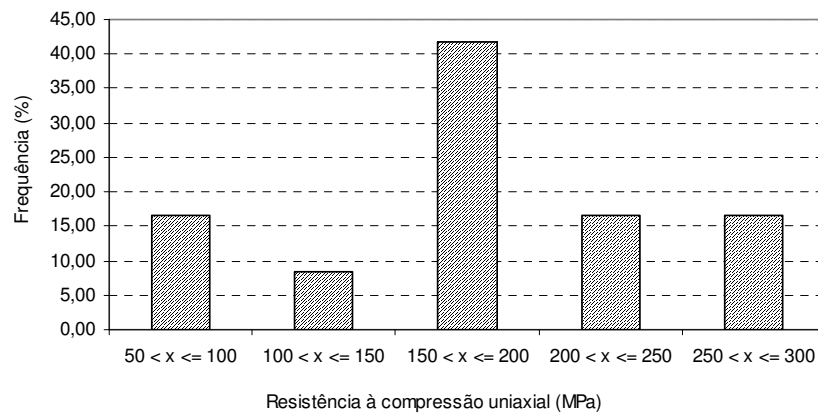


FIGURA 67 – Histograma de frequência dos valores de resistência à compressão uniaxial.

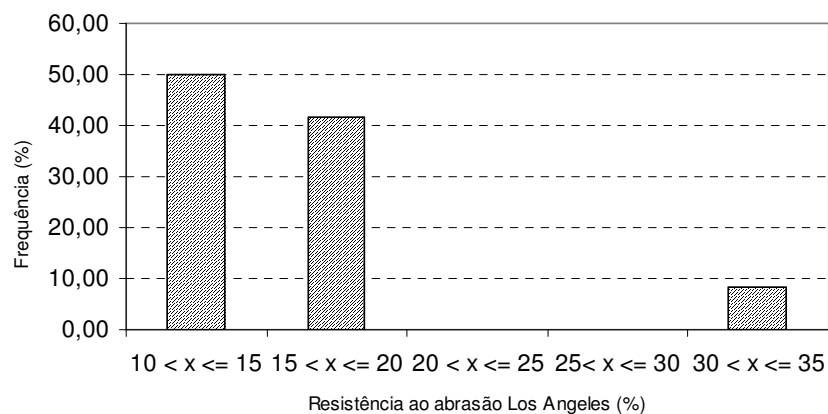


FIGURA 68 – Histograma de frequência dos valores de resistência ao abrasão Los Angeles.

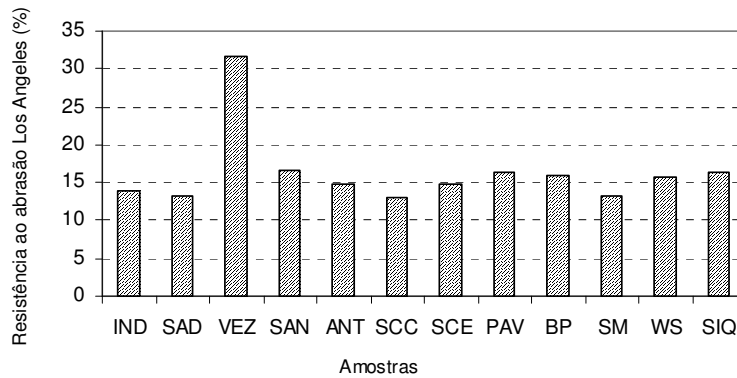


FIGURA 69 – Histograma dos valores de resistência ao abrasão Los Angeles das amostras estudadas.

O ensaio de esmagamento modificado foi realizado em amostras duplicadas. Apresentam-se na Tabela 19 seus valores máximos, mínimos, médios e de desvio padrão.

As amostras *VES* e *IND* correspondem aos valores extremos das médias dos resultados do ensaio de resistência ao esmagamento modificado, respectivamente, a 20,73% e 11,85% de perdas (Figura 70). O Histograma da Figura 71 apresenta a frequência dos resultados para este ensaio. Depreende-se, que: 16,67% dos resultados encontram-se no intervalo de resistência compreendida entre 10 e 12%; 41,67% no intervalo de resistência que varia de 12 a 14%; 33,33% corresponde a resultados entre 14 e 16% e 8,33% relativo ao intervalo de resistência compreendido entre 20 e 22% (Figura 71).

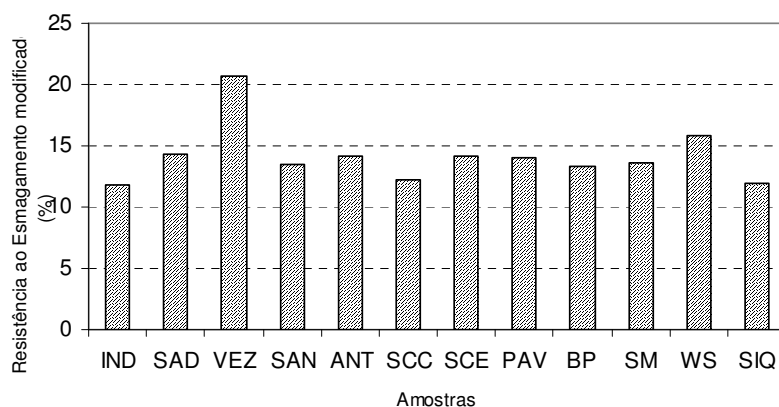


FIGURA 70 – Histograma dos valores de resistência ao esmagamento modificado das amostras estudadas.

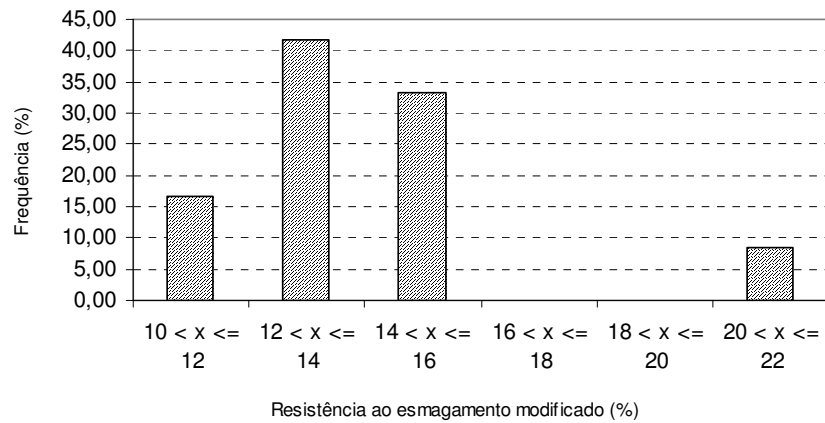


FIGURA 71 – Histograma de freqüência dos valores de resistência ao esmagamento modificado.

A Tabela 20 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis representadas por índices físicos e pelos parâmetros de resistência descritos neste item. Nesta matriz, estão representados os tipos de curvas de regressão e o valor do coeficiente de correlação “R²”. De forma geral, segundo Yoshida (1972), baixos coeficientes de correlação podem ser indicativos de pequena relação de dependência entre as propriedades avaliadas, da dimensão inadequada da população de amostras, da heterogeneidade dos materiais rochosos e decorrentes de variações nos procedimentos de ensaios. As Figuras de 72 a 83 reproduzem as diversas curvas obtidas.

TABELA 20 – Matriz de correlação entre as variáveis representadas por índices físicos e pelos parâmetros de resistência.

	η	ω	$\rho'd$	σ_c	LA	Esm
η	-	Linear crescente R² = 0,99	Linear decrescente R² = 0,98	Potencial decrescente R² = 0,54	Linear crescente R² = 0,93	Logarítmica crescente R² = 0,83
ω	Linear crescente R² = 0,99	-	Exponencial decrescente R² = 0,98	Potencial decrescente R² = 0,52	Linear crescente R² = 0,93	Logarítmica crescente R² = 0,84
$\rho'd$	Linear decrescente R² = 0,98	Exponencial decrescente R² = 0,98	-	Potencial crescente R² = 0,42	Linear decrescente R² = 0,91	Linear decrescente R² = 0,77
σ_c	Potencial decrescente R² = 0,54	Potencial decrescente R² = 0,52	Potencial crescente R² = 0,42	-	Potencial decrescente R² = 0,57	Logarítmica decrescente R² = 0,27
LA	Linear crescente R² = 0,93	Linear crescente R² = 0,93	Linear decrescente R² = 0,91	Potencial decrescente R² = 0,57	-	Linear crescente R² = 0,76
Esm	Logarítmica crescente R² = 0,83	Logarítmica crescente R² = 0,84	Linear decrescente R² = 0,77	Logarítmica decrescente R² = 0,27	Linear crescente R² = 0,76	-

Nota: η = porosidade aparente; ω = absorção d'água; $\rho'd$ = massa específica seca aparente; σ_c = resistência a compressão uniaxial; LA = resistência ao abrasão Los Angeles; Esm = resistência ao esmagamento modificado; R² = coeficiente de correlação.

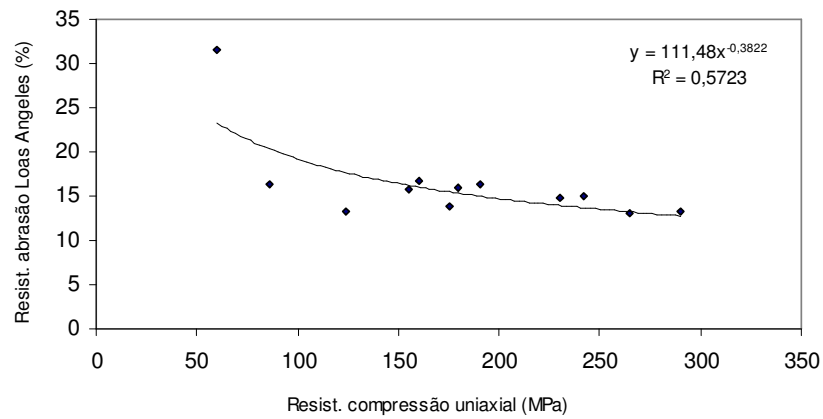


FIGURA 72 - Regressão potencial decrescente para correlação entre resistência ao abrasão Los Angeles e resistência à compressão uniaxial.

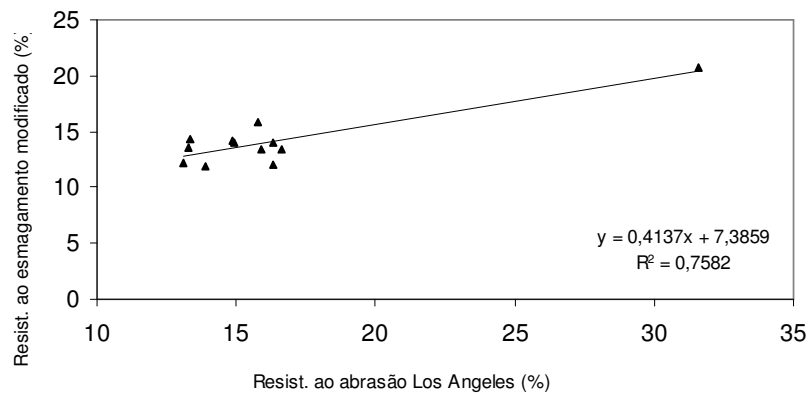


FIGURA 73 - Regressão linear crescente para correlação entre Resistência ao esmagamento modificado e resistência ao abrasão Los Angeles.

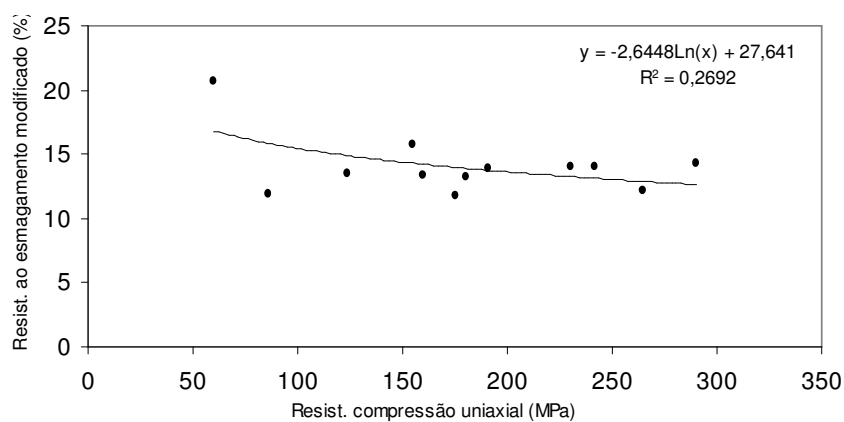


FIGURA 74 - Regressão logarítmica decrescente para correlação entre resistência ao esmagamento modificado e resistência à compressão uniaxial.

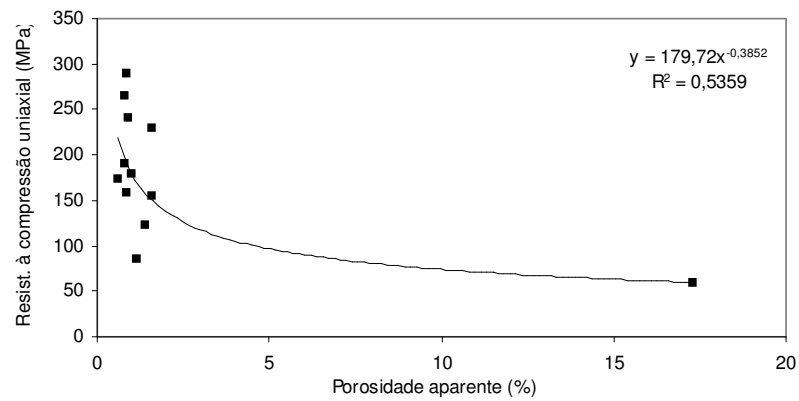


FIGURA 75 - Regressão potencial decrescente para correlação entre resistência à compressão uniaxial e porosidade aparente.

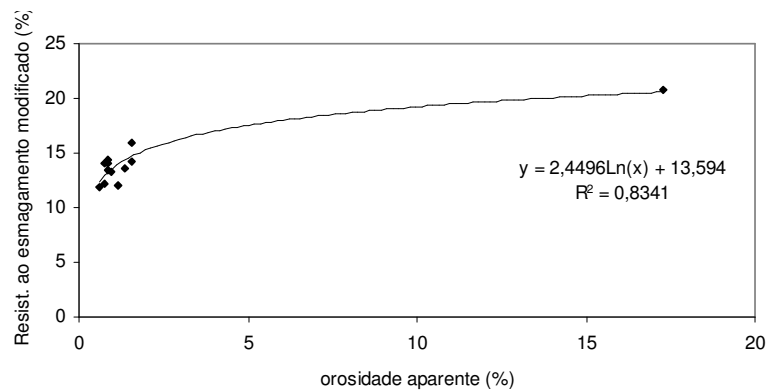


FIGURA 76 - Regressão logarítmica crescente para correlação entre resistência ao esmagamento modificado e porosidade aparente.

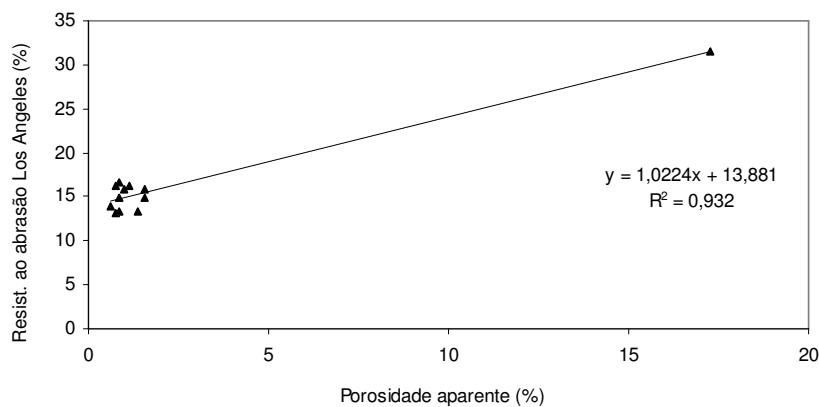


FIGURA 77 - Regressão linear crescente para correlação entre resistência ao abrasão Los Angeles e porosidade aparente.

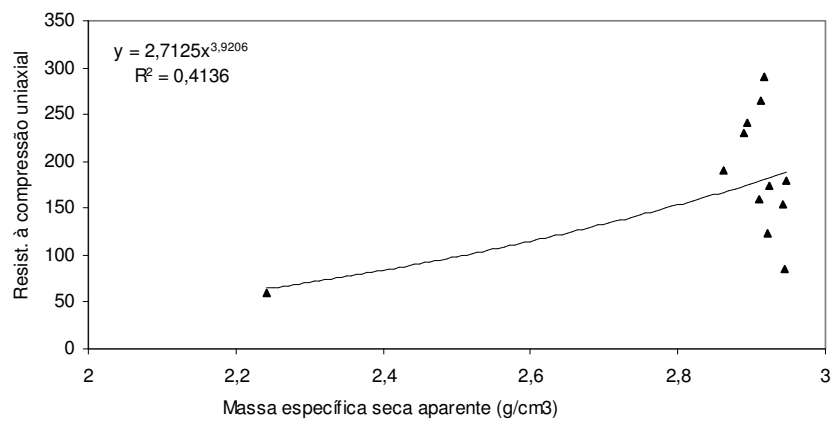


FIGURA 78 - Regressão potencial crescente para correlação entre resistência à compressão uniaxial e massa específica seca aparente.

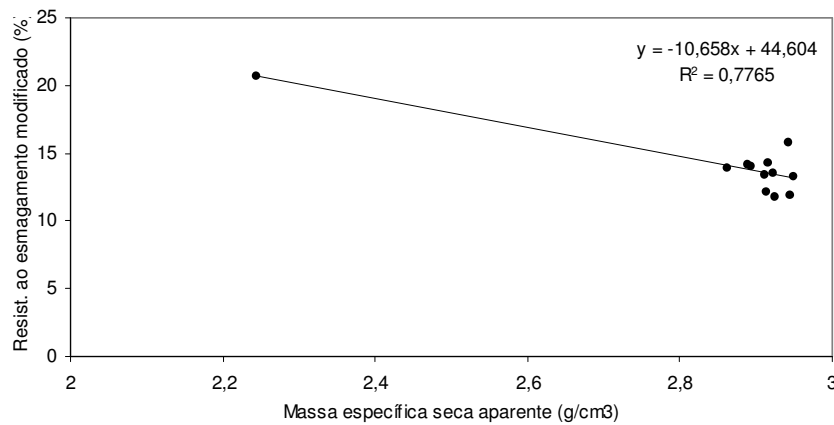


FIGURA 79 - Regressão linear decrescente para correlação entre resistência ao esmagamento modificado e massa específica seca aparente.

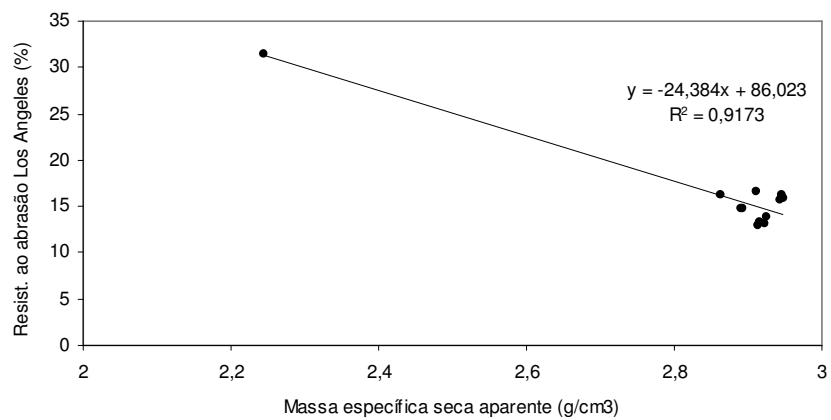


FIGURA 80 - Regressão linear decrescente para correlação entre resistência ao abrasão Los Angeles e massa específica seca aparente.

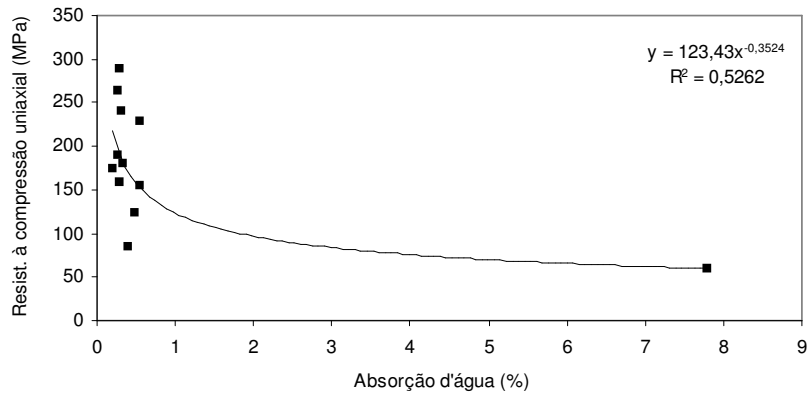


FIGURA 81 - Regressão potencial decrescente para correlação entre resistência à compressão uniaxial e absorção d'água.

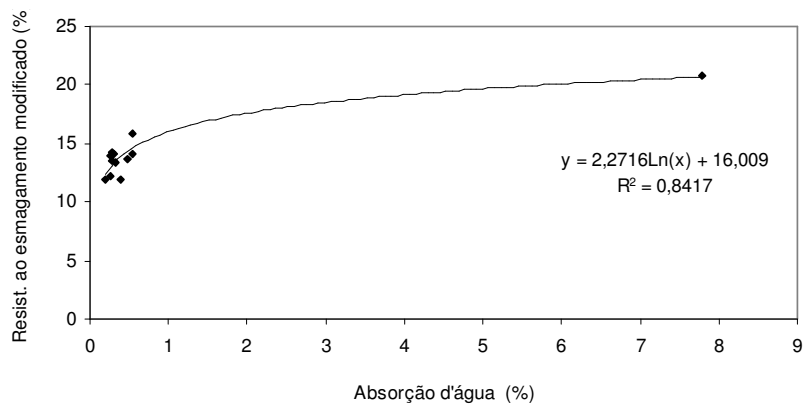


FIGURA 82 - Regressão logarítmica crescente para correlação entre resistência ao esmagamento modificado e absorção d'água.

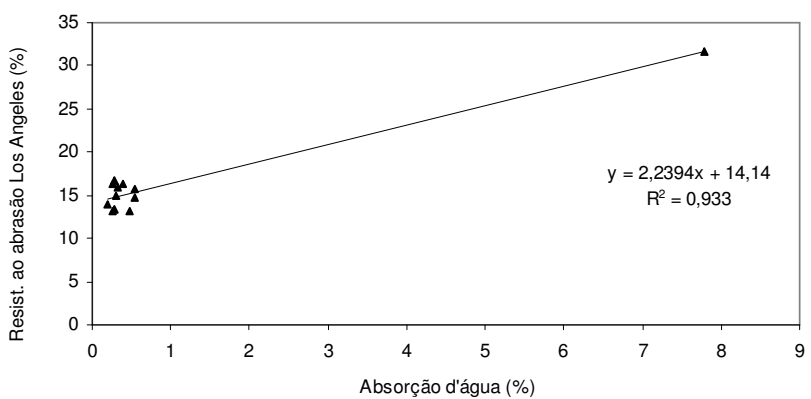


FIGURA 83 - Regressão linear crescente para correlação entre resistência ao abrasão Los Angeles e absorção d'água.

5.5 Imersão em Etileno Glicol

Este ensaio tem o objetivo de simular, com maior rapidez, a reação entre a água e os argilominerais expansivos presentes na amostra. O etileno glicol (CH_2OH)₂, em contato com argilominerais expansivos presentes na rocha, pode promover a sua desagregação. Este fato, está associado à quantidade de argilominerais expansivos presentes e ao acesso do etileno glicol até estes argilominerais.

As amostras foram imersas na solução de etileno glicol por um período de 21 dias e a cada 3 dias realizou-se a avaliação da quantidade de partículas afetadas.

A Figura 84 apresenta a avaliação da imersão em etileno glicol de todas as amostras com a exceção das amostras *SCC*, *SCE*, *PAV*, *IND* e *SAD*, que não foram afetadas por este ensaio.

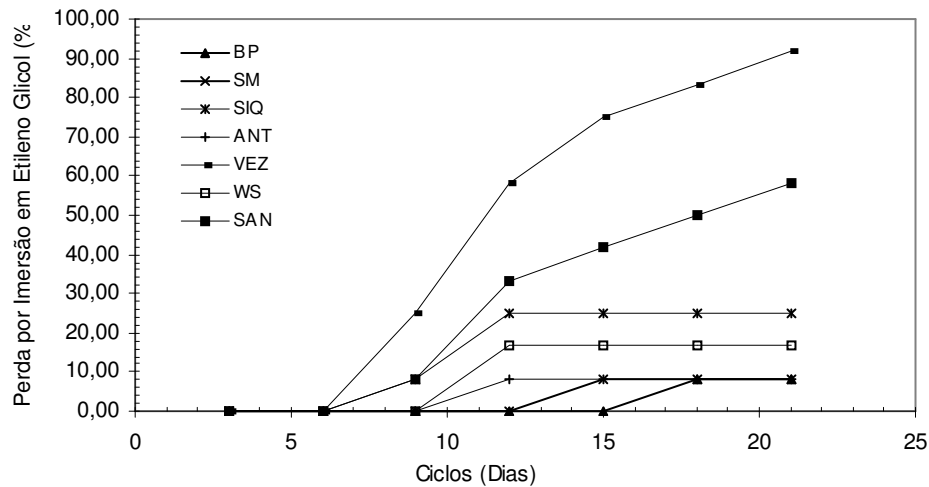


FIGURA 84 – Variação das perdas por imersão em etileno glicol.

Depreende-se da Figura 84 que as amostras *VES*, *SAN* e *SIQ*, no nono ciclo, apresentaram os primeiros indícios de fragmentação, correspondentes, respectivamente, a 30%, 10% e 10% de fragmentos afetados. Em seguida, no décimo segundo ciclo, manifestaram-se as amostras *WS* (16%) e *ANT* (8%). Já no décimo quinto ciclo, a amostra *SM* apresentou 8% de fragmentos afetados. Finalmente, no décimo oitavo ciclo do ensaio a amostra *BP* teve, também, cerca de 8% de seus fragmentos afetados pela imersão em etileno glicol.

O comportamento das curvas na Figura 84 é tal que, as amostras *SM*, *WS*, *ANT* e *BP* mantiveram a porcentagem de seus fragmentos afetados de forma constante, apesar do andamento da imersão. Para as amostras *VES* e *SAN* houve o aumento gradativo na quantidade de fragmentos afetados com o passar do tempo, até o término do ensaio. Já a amostra *SIQ* teve desagregação crescente até o 12^o ciclo e depois manteve-se constante.

Do exposto, pode-se avaliar hierarquicamente as amostras, em ordem decrescente de quantidade de fragmentos afetados e em relação ao tempo (ciclos) gasto para a primeira manifestação de desagregação, na seguinte ordem: *VES* > *SAN* > *SIQ* > *WS* > *ANT* > *SM* > *BP*. Vale ressaltar, que as amostras *SCC*, *SCE*, *PAV*, *IND* e *SAD* não foram afetadas por este ensaio.

A Figura 85, apresenta o gráfico da relação entre os valores dos índices petrográficos K1 e K2, com o resultado do ensaio de imersão em etileno glicol das amostras estudadas. Altos valores dos índices petrográficos indicam a ausência ou pequena quantidade de argilominerais, de minerais deletérios e de microfissuras que poderiam afetar a durabilidade do material rochoso. Desta forma, é de se esperar que altos valores dos índices petrográficos estejam associados a baixos valores no ensaio de imersão em etileno glicol.

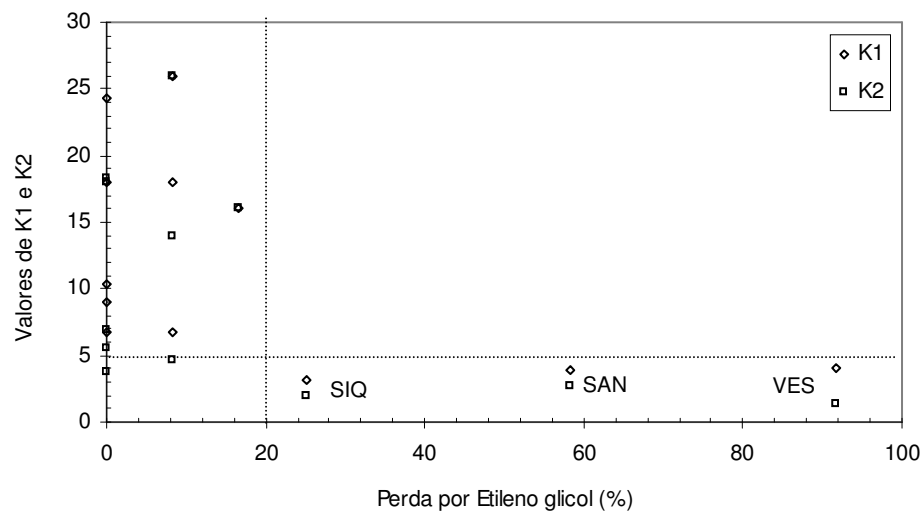


FIGURA 85 – Perdas por imersão em etileno glicol versus índices petrográficos K1 e K2.

Depreende-se da Figura 85 que 75% das amostras tiveram menos que 20% de fragmentos afetados com a imersão em etileno glicol. As amostras *VES*, *SAN* e *SIQ* representam os 25% restantes, associados a valores de fragmentação maiores que 20%. No que se refere aos índices petrográficos K1 e K2, cerca de 66,6% das amostras apresentam valores maiores que 5, enquanto que cerca de 33,3% apresentam valores abaixo de 5. Desta forma, pode-se afirmar que 75% das amostras que apresentam valores dos índices K1 e K2 menores que cinco, associam-se a valores dos resultados da imersão em etileno glicol maiores que 20%. Depreende-se também, que 88,8% das amostras que possuem valores de índices K1 e K2 maiores que cinco associam-se a valores de resultado do ensaio de imersão em etileno glicol menores que 20%.

A relação entre perda por imersão em etileno glicol com o Índice SAI (*Smectite Alteration Index*) é representada na Figura 86. De forma geral, altos valores do índice SAI associam-se a altos valores de perdas por imersão em etileno glicol. As amostras, *SAN* e *SIQ* foram exceções a esta regra pois, apesar de valores de perda no etileno glicol maiores que 20%, os picos na difratometria de raios x, representativos dos argilominerais expansivos, foram imperceptíveis. Desta forma, resultando em baixos valores do índice SAI.

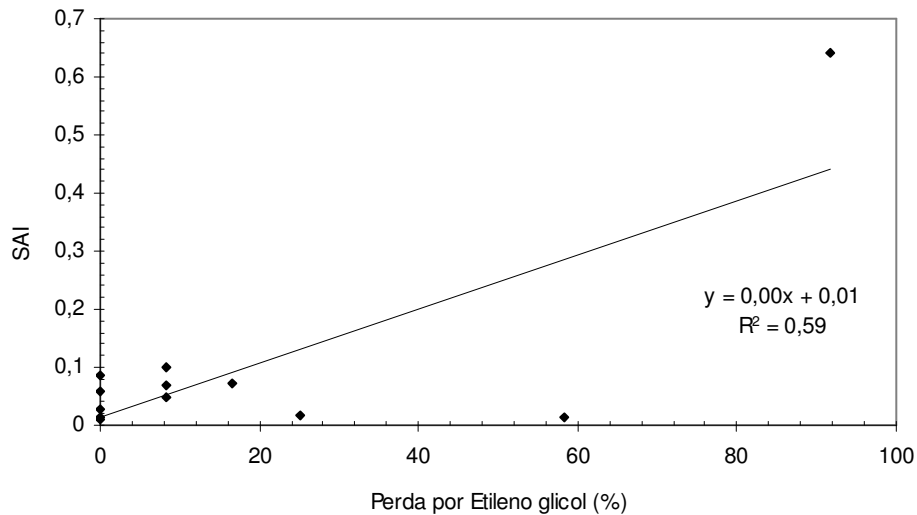


FIGURA 86 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI e perda por imersão em etileno glicol.

As características mineralógicas e texturais da rocha, mais precisamente a presença de argilominerais expansivos e microfissuras, são fatores que influenciam tanto o valor do índice Rsm “*Secondary mineral rating*” (Cole & Sandy, 1980) quanto as perdas por imersão em etileno glicol. O gráfico da Figura 87 demonstra que altos valores do índice Rsm estão associados a altos valores de perdas por imersão em etileno glicol.

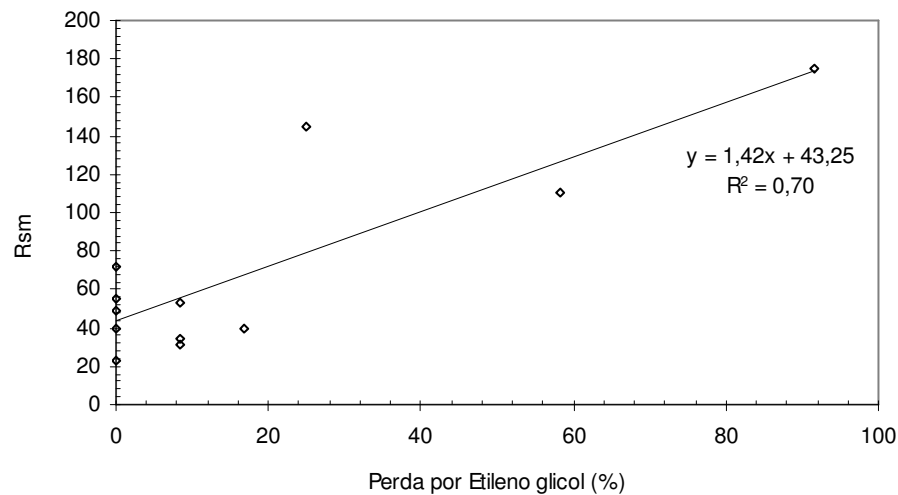


FIGURA 87 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice Rsm e perda por imersão em etileno glicol.

As perdas por imersão em etileno glicol não estão associadas apenas a presença de argilominerais expansivos na rocha. Sem a possibilidade de penetração do etileno glicol na amostra, para que este reaja com o argilomineral presente, as perdas neste ensaio serão nulas ou pequenas. Neste contexto, e de forma geral, os valores de porosidade e absorção d'água estão diretamente associados as perdas por imersão em etileno glicol, dependentes, é claro, da presença e quantidades de argilominerais presentes. As Figuras 88 e 89 apresentam as variações de porosidade e absorção d'água das amostras estudadas, relacionadas com as perdas provocadas pela imersão em etileno glicol.

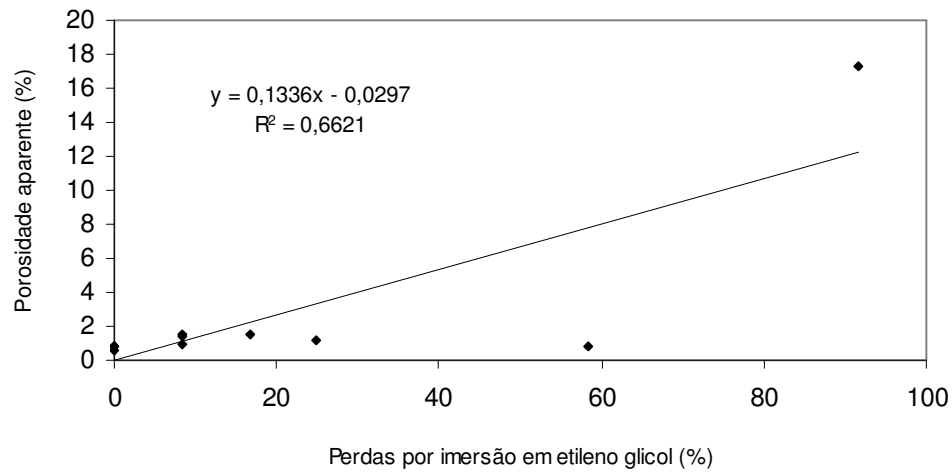


FIGURA 88 – Regressão linear crescente para correlação entre a porosidade aparente e perda por imersão em etileno glicol.

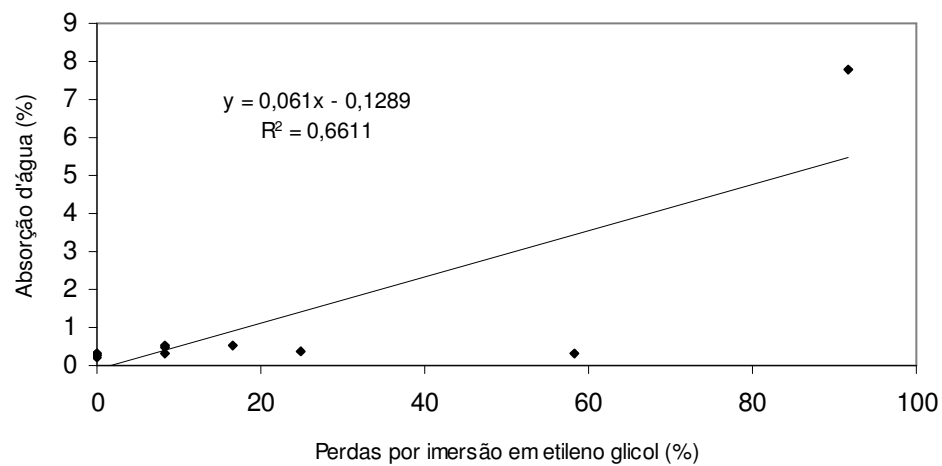


FIGURA 89 – Regressão linear crescente para correlação entre a absorção d'água e perda por imersão em etileno glicol..

Do exposto nas Figuras 88 e 89, à exceção das amostras *SAN* e *SIQ*, houve o aumento tanto da porosidade quanto da absorção d'água com o aumento das perdas por imersão em etileno glicol. As amostras *SAN* e *SIQ* tiveram comportamentos adversos devido, provavelmente, a influencia do alto conteúdo em argilominerais expansivos (ver Figura 43) que, nestes casos, tornou-se mais marcante que o aspecto microfissural, quantificado pelos índices de porosidade e absorção d'água.

5.6 Adsorção de Azul de Metileno

Os resultados dos ensaios de azul de metileno, expressos em valores de adsorção de azul de metileno (MBA), da capacidade de troca catiônica (CTC) e de superfície específica (SE), são apresentados na Tabela 21 e representados nas Figuras 90 a 95.

TABELA 21 – Resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno.

Amostra	MBA (g/100g)	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)
VES	2,41	7,56	29,53
SIQ	0,68	2,12	8,29
WS	0,9	2,83	11,06
PAV	0,22	0,7	2,75
SAN	0,60	1,88	7,34
ANT	0,60	1,88	7,36
BP	0,45	1,41	5,5
SM	0,37	1,16	4,52
IND	0,22	0,70	2,75
SAD	0,22	0,70	2,74
SCC	0,22	0,70	2,78
SCE	0,52	1,62	6,34

Observando-se os resultados de MBA, atesta-se que o valor máximo encontrado foi de 2,41 (g/100g), correspondente à amostra VES e o menor valor foi de 0,22 (g/100g) relativo às amostras PAV, IND, SAD e SCC. O Histograma da Figura 91, apresenta as freqüências de distribuição dos resultados, nota-se que 50% destes possuem valores de adsorção entre 0,0 e 0,5 (g/100g) e 41,6% referem-se a valores situados entre 0,5 e 1,0 (g/100g). Os 8,33% dos resultados restantes, possuem valores de adsorção maiores que 2,0 (g/100g).

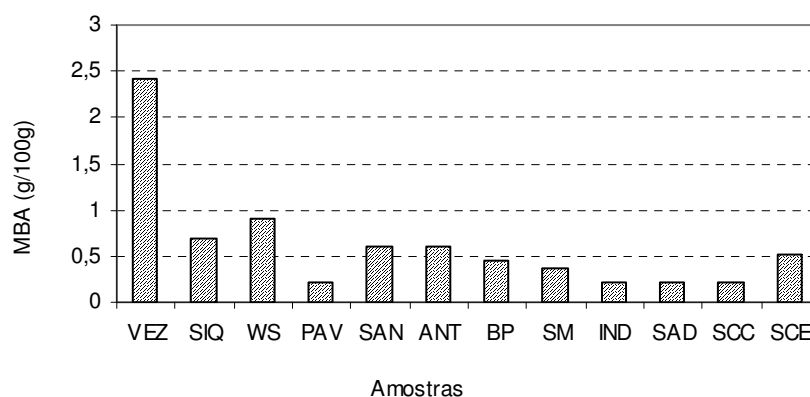


FIGURA 90 – Valores de adsorção de azul de metileno das amostras estudadas.

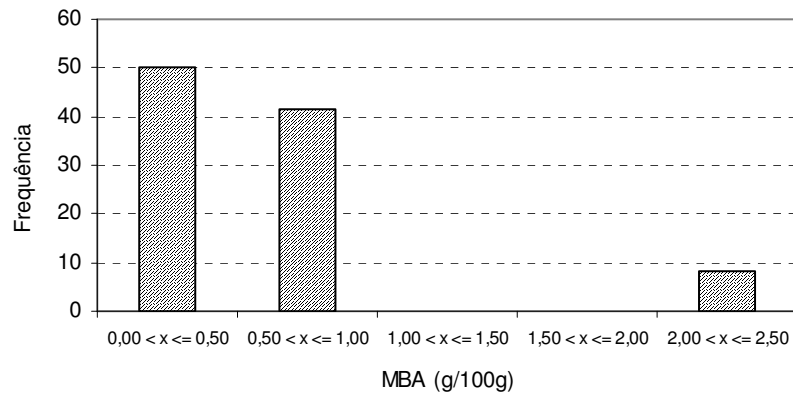


FIGURA 91 – Histograma de frequência dos resultados do valor de adsorção de azul de metileno.

Com relação aos valores da capacidade de troca catiônica (CTC), têm-se como valor máximo o de 7,56 (meq/100g) e o mínimo o de 0,70 (meq/100g) que correspondem, respectivamente, às amostras *VES* e *PAV*, *IND*, *SAD* e *SCC*. (Figura 101). As frequências dos resultados de CTC são vistos na Figura 93 e apresentam a seguinte distribuição: 33,33% dos resultados no intervalo de 0 a 1 (meq/100g); 41,66% dos resultados no intervalo de 1 a 2 (meq/100g); 16,66% dos resultados entre 2 e 3 (meq/100g) e, finalmente, 8,33% dos resultados referentes ao intervalo de 7 a 8 (meq/100g).

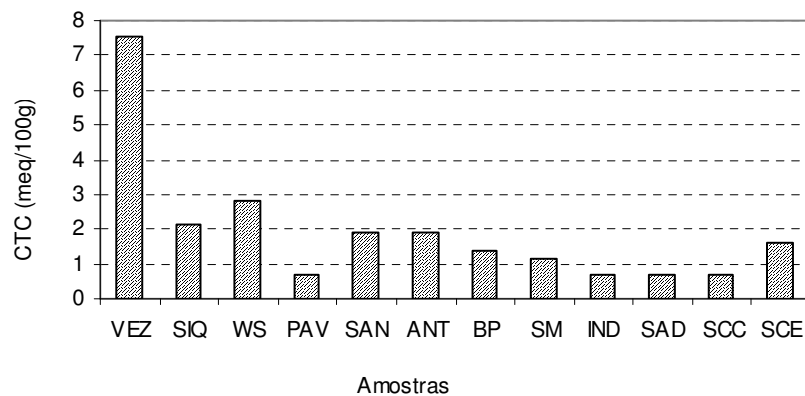


FIGURA 92 – Valores de capacidade de troca catiônica das amostras estudadas.

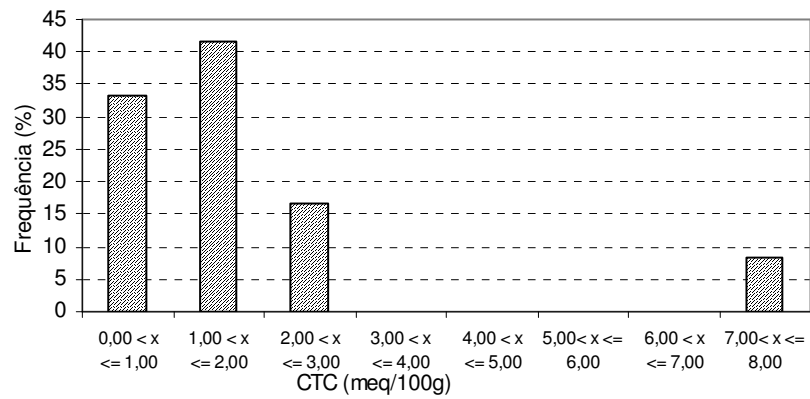


FIGURA 93– Histograma de frequência dos resultados do valor de capacidade de troca catiônica.

A superfície específica possui valores máximos e mínimos correspondentes às amostras *VEZ* e *SAD*, respectivamente, com os valores de 29,53 (m²/g) e 2,74 (m²/g). (Figura 103). As distribuições da frequência dos valores podem ser observados na Figura 95 e correspondem aos seguintes intervalos: de 0,00 a 5,00 (m²/g) têm-se 41,66% das amostras; de 5,00 até 10,00 têm-se, novamente, 41,66%; entre 10 e 15 (m²/g) apresentam-se 8,33% e correspondente ao intervalo de 25 a 30 (m²/g) têm-se, também, 8,33%.

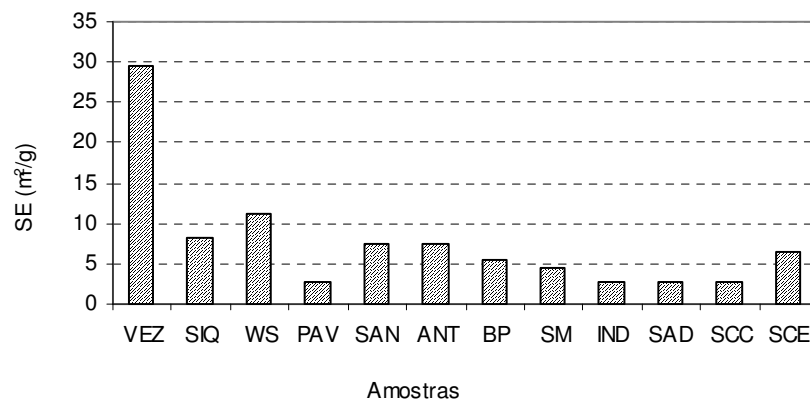


FIGURA 94 – Valores de capacidade de troca catiônica das amostras estudadas.

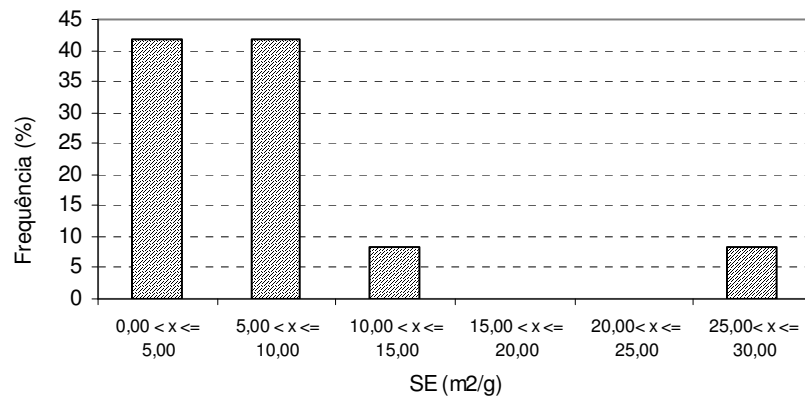


FIGURA 95 – Histograma de frequência dos resultados do valor da superfície específica.

Como visto no item 3.5.7, o valor de adsorção de azul de metileno (MBA) sofre a influência da presença de argilominerais nas amostras, da presença de microfissuramento, da diferença granulométrica da amostra ensaiada ou ainda do conjunto destes fatores.

A presença de microfissuras na amostra, no contexto deste ensaio, pode ser considerada desprezível. Pois, a fração utilizada é pulverizada e composta pelos fragmentos que passam pela peneira de malha #0,063mm.

No que se refere a granulometria, todas as amostras foram preparadas, como visto anteriormente, com fragmentos pulverizados da rocha na fração menor que #0,063mm, não havendo, portanto, variações significativas de granulometria.

Apesar das amostras possuírem aproximadamente a mesma fração granulométrica, os seus valores de superfície específica podem ser diferentes em função de suas massas e densidades, que são refletidos em diferentes volumes.

O conceito de superfície específica é dado pela relação entre a área da partícula e o seu volume. Admitindo-se, teoricamente, que as partículas são esféricas e com diâmetro variável entre 0,063mm (malha da peneira) e 0,002mm (fração argila), calculou-se a superfície específica das amostras da seguinte maneira:

$$SE = A / V$$

$$SE = (4\pi r^2) / (4/3\pi r^3)$$

$$SE = 3 / r \quad [m^{-1}]$$

$$SE = 3 / 0,0000152$$

$$SE = 197.368,4 \text{ m}^{-1}$$

Sendo:

$$SE = \text{superfície específica} \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$A = \text{área da esfera} = 4\pi r^2 \quad [\text{m}^2]$$

$$V = \text{Volume da esfera} = 4/3\pi r^3 \quad [\text{m}^3]$$

$$D = \text{diâmetro médio} = 0,063 \text{ mm} - 0,002 \text{ mm} / 2 = 0,0305 \text{ mm} = 0,0000305 \text{ m} \quad [\text{m}]$$

$$R = \text{raio médio} = D/2 = 0,0000305 / 2 = 0,00001525 \text{ m} \quad [\text{m}]$$

O valor encontrado de $SE = 197.368,4$ na unidade $[\text{m}^{-1}]$ não é útil para correlação com a superfície específica dada por $[\text{m}^2/\text{g}]$ apresentada no ensaio de adsorção de azul de metileno. Para que os resultados da superfície específica sejam dados em $[\text{m}^2/\text{g}]$ multiplicou-se a expressão ($SE = A/V$) pelo inverso da massa específica seca da amostra. Desta forma, têm-se:

$$SE = A / (V * \rho'_d)$$

$$SE = (4\pi r^2) / (4/3\pi r^3 * \rho'_d)$$

$$SE = 3 / (r * \rho'_d) \quad [\text{m}^2/\text{g}]$$

A Tabela 22 apresenta o valor da superfície específica calculada das partículas para cada amostra estudada.

Estes valores de superfície específica calculados pelo procedimento descrito acima dão a idéia da superfície específica teórica das partículas. Desta forma, quando comparados estes valores com os valores de SE encontrados pelo método de adsorção de azul de metileno, têm-se uma estimativa da influência da superfície específica dos argilominerais presentes na amostra.

A Figura 96 demonstra que, com a exceção da amostra VES que apresentou valor diferenciado de Superfície específica calculada, as demais amostras possuem valores aproximadamente constantes. Por outro lado, os valores de SE, calculados pelo método de adsorção, variam, provavelmente, com a quantidade e tipo de argilominerais presentes na amostra. Este comportamento é refletido, também, no gráfico da Figura 97 que relaciona os valores de adsorção de azul de metileno (MBA) com os de SE-calculada.

TABELA 22 – Cálculo da superfície específica teórica das amostras estudadas.

Amostra	Raio médio (m)	Massa específica seca (g/m ³)	SE (m ² /g)
VEZ	0,00001525	2.243.000	0,0877
SIQ	0,00001525	2.945.000	0,0668
WS	0,00001525	2.942.000	0,0669
PAV	0,00001525	2.862.000	0,0687
SAN	0,00001525	2.910.000	0,0676
ANT	0,00001525	2.889.000	0,0681
BP	0,00001525	2.948.000	0,0667
SM	0,00001525	2.921.000	0,0673
IND	0,00001525	2.923.000	0,0673
SAD	0,00001525	2.916.000	0,0675
SCC	0,00001525	2.912.000	0,0676
SCE	0,00001525	2.893.000	0,0680

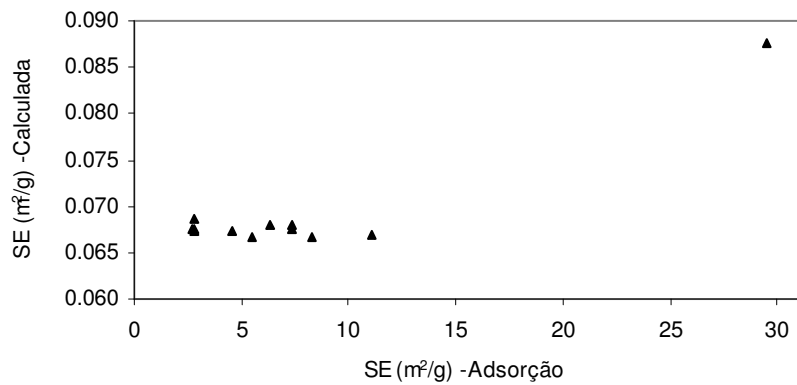


FIGURA 96 – Gráfico da relação entre SE-calculada e SE medida pelo ensaio de adsorção de azul de metileno.

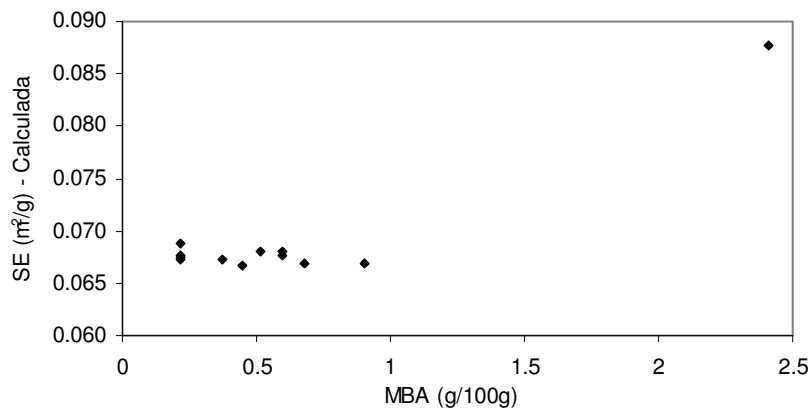


FIGURA 97 - Gráfico da relação entre SE-calculada e o Valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

A Tabela 23 e as Figuras de 98 a 109 apresentam as correlação entre os valores de adsorção de azul de metileno com as demais variáveis descritas nos itens anteriores. De forma geral, os valores de “R²” encontrados exprimem boas correlações entre as variáveis, a exceção dos índices K1 e K2 que apresentaram valores de “R²” menores que 0,5.

TABELA 23 – Correlação entre a adsorção de azul de metileno com outras variáveis.

MBA		
η	Exponencial crescente	R² = 0,93
ω	Exponencial crescente	R² = 0,93
$\rho'd$	Linear decrescente	R² = 0,82
$\rho'sat$	Linear decrescente	R² = 0,79
K1	Potencial decrescente	R² = 0,25
K2	Exponencial decrescente	R² = 0,31
Rsm	Linear crescente	R² = 0,54
SAI	Linear crescente	R² = 0,86
σ_c	Exponencial decrescente	R² = 0,58
Esm	Linear crescente	R² = 0,80
LA	Linear crescente	R² = 0,91
Etileno	Linear crescente	R² = 0,75

Nota: η = porosidade aparente; ω = absorção d'água; $\rho'd$ = massa específica seca aparente; $\rho'sat$ = massa específica saturada aparente; K1 e K2 = índices petrográficos; Rsm = Secondary mineral rating; SAI = índice de alteração da esmectita; σ_c = resistência a compressão uniaxial; LA = resistência ao abrasão Los Angeles; Esm = resistência ao esmagamento modificado; R² = coeficiente de correlação.

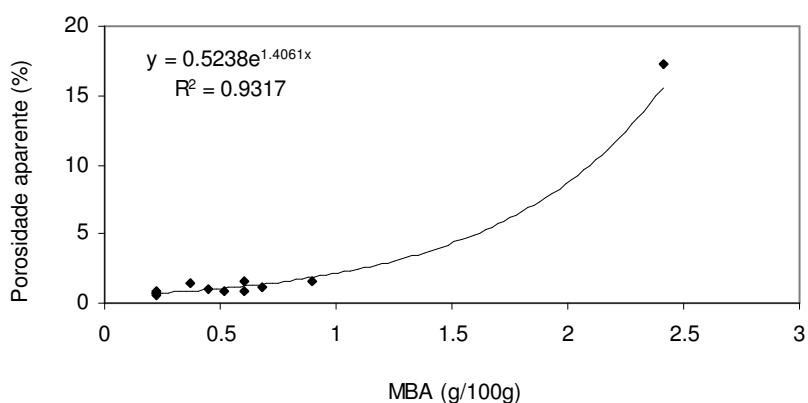


FIGURA 98 – Regressão exponencial crescente para correlação entre porosidade aparente e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

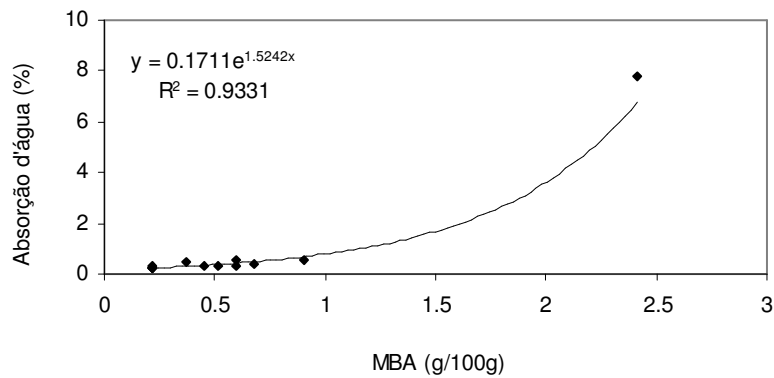


FIGURA 99 – Regressão exponencial crescente para correlação entre absorção d'água e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

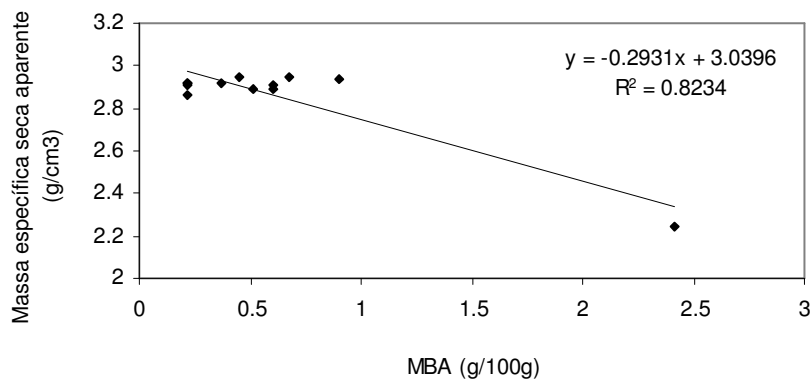


FIGURA 100 – Regressão linear decrescente para correlação entre massa específica seca aparente e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

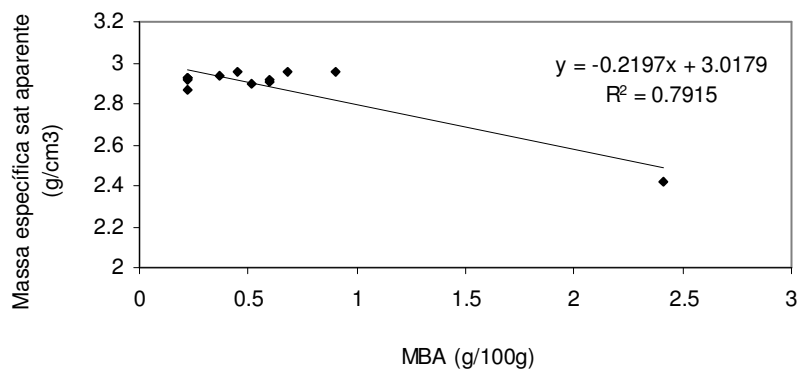


FIGURA 101 – Regressão linear decrescente para correlação entre massa específica saturada aparente e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

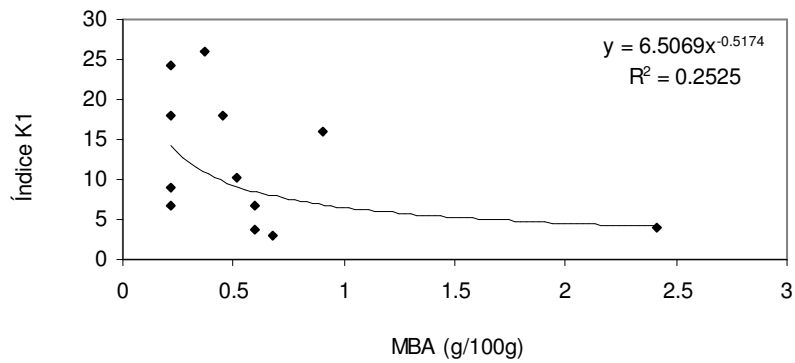


FIGURA 102 – Regressão potencial decrescente para correlação entre índice K1 e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

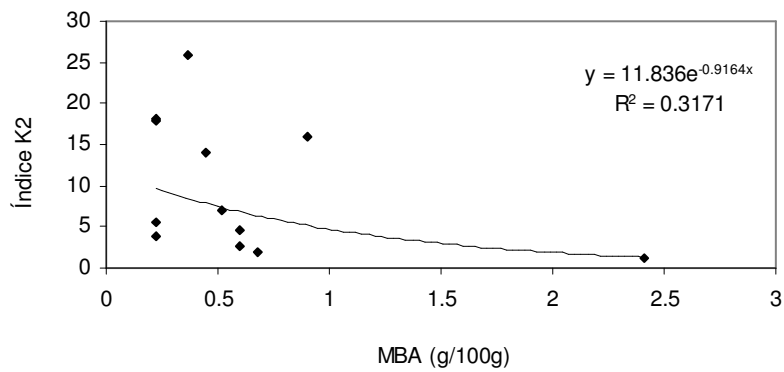


FIGURA 103 – Regressão exponencial decrescente para correlação entre índice K2 e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

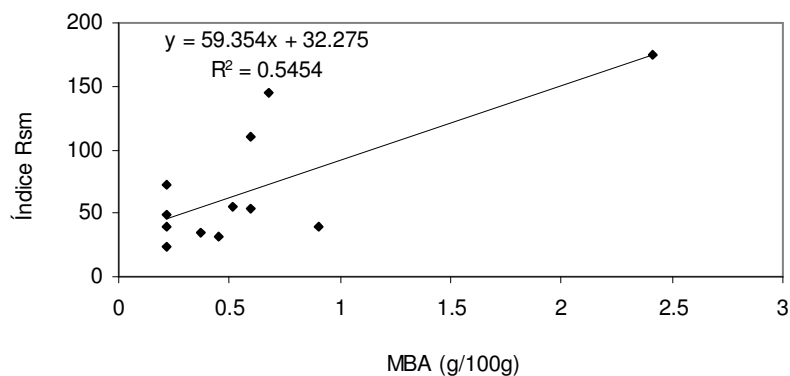


FIGURA 104 – Regressão linear crescente para correlação entre índice Rsm e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

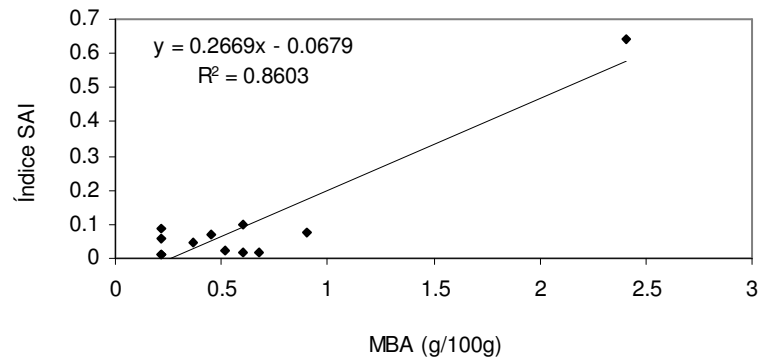


FIGURA 105 – Regressão linear crescente para correlação entre índice SAI e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

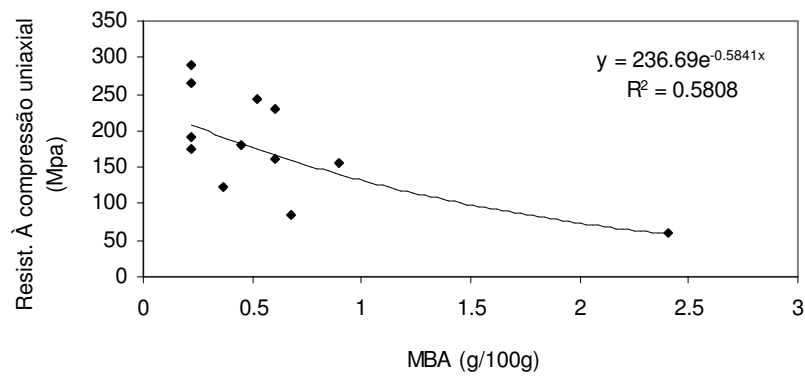


FIGURA 106 – Regressão exponencial decrescente para correlação entre índice SAI e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

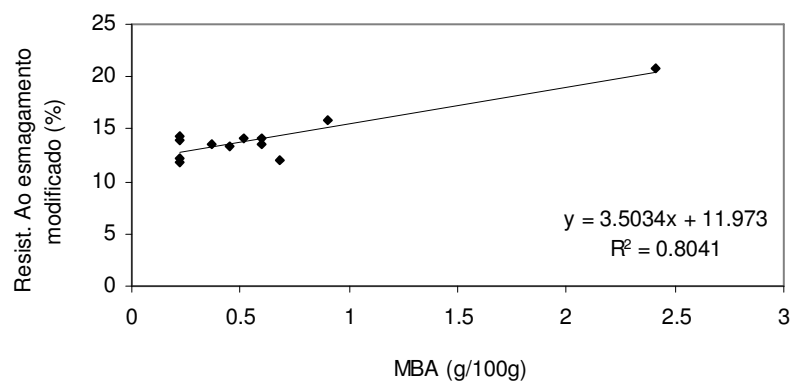


FIGURA 107 – Regressão linear crescente para correlação entre resistência ao esmagamento modificado e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

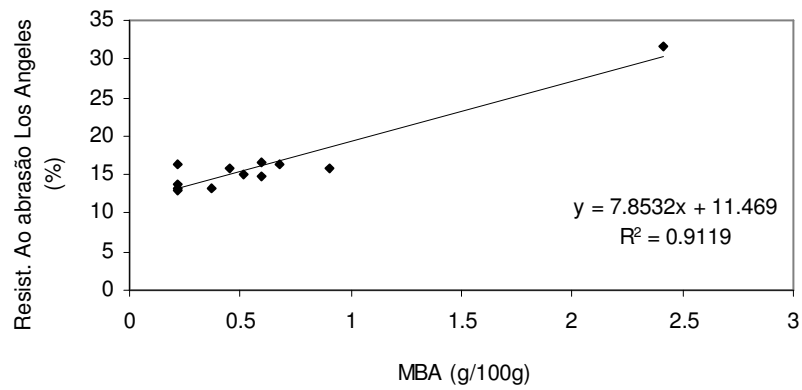


FIGURA 108 – Regressão linear crescente para correlação entre resistência ao abrasão los angeles e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

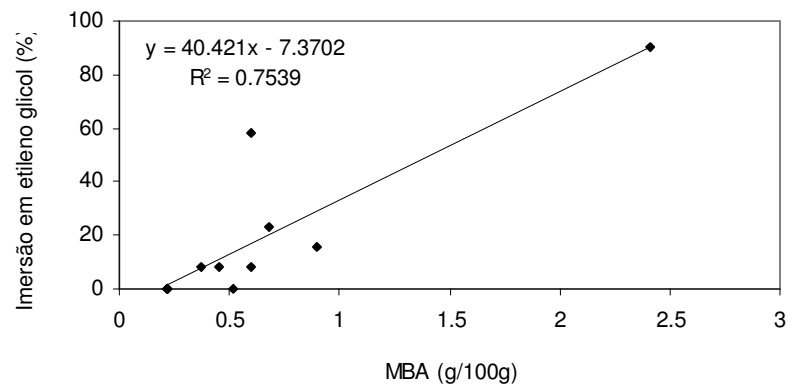


FIGURA 109 – Regressão linear crescente para correlação entre imersão em etileno glicol e valor de adsorção de azul de metileno (MBA).

5.7 pH de Abrasão

Os valores de pH medidos nas concentrações 1/64, 1/32, 1/24 e 1/16, para todas as amostras, podem ser vistos na Tabela 24 e representados graficamente na Figura 110. Como valor representativo do pH de abrasão das amostras adotou-se o resultado da concentração 1/16, ou seja 0,063 (g/ml).

TABELA 24- Valores de pH de abrasão das amostras estudadas.

Amostra	0,016 (g/ml)	0,031 (g/ml)	0,042 (g/ml)	0,063 (g/ml)
PAV	6,26	6,27	6,27	6,28
SIQ	8,04	8,19	8,26	8,45
SCE	8,18	8,37	8,44	8,48
SAN	8,35	8,41	8,48	8,51
SCC	8,03	8,19	8,31	8,61
WS	8,19	8,57	8,71	8,71
SM	8,44	8,70	8,70	8,70
BP	8,37	8,56	8,61	8,72
ANT	8,39	8,56	8,64	8,83
IND	8,31	8,74	8,80	8,87
SAD	8,63	8,94	9,01	9,09
VES	9,34	9,45	9,47	9,49

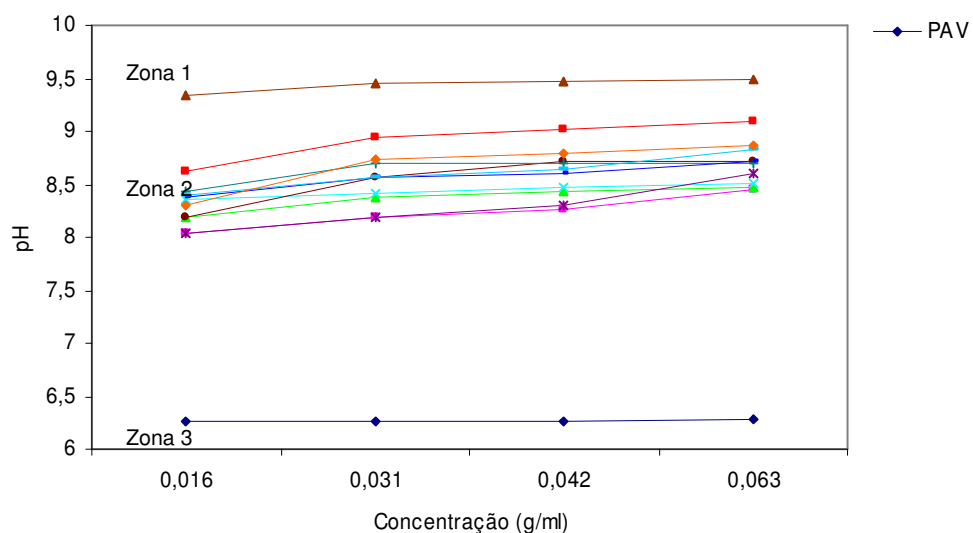


FIGURA 110 – Valores de pH de abrasão das amostras estudadas.

Depreende-se da Figura 110 três diferentes zonas de valores de pH, em todas as concentrações. A primeira zona, é caracterizada por valores de pH acima de 9,34, representada pela amostra *VES*. A segunda está associada a valores de pH que variam de 8,04 até 9,09 e é representada pelas amostras *SCC*, *SCE*, *SAN*, *ANT*, *IND*, *SAD*, *BP*, *SM*, *WS* e *SIQ*. Já a terceira zona, apresenta valores de pH entre 6,26 e 6,28 e está associada aos resultados da amostra *PAV*.

O Histograma de freqüência de distribuição dos valores de pH confirma que as classes de valores entre 8,0 e 9,0 representam cerca de 81,25% dos resultados. Enquanto que os valores compreendidos maiores que 9,0 representam 10,49%. A faixa de valores de pH associadas a amostra *PAV* representam cerca de 8,33% dos valores dos resultados.

Avaliando-se apenas o pH de abrasão ou seja, apenas o valor de pH para concentração 0,063 (g/ml), temos a distribuição representada no histograma da Figura 119. Neste histograma , a classe de valores de pH de abrasão compreendidos entre 6,0 e 6,5 ocorre em 8,33% da amostras, ou seja, valor relativo a amostra *PAV*. As classes de 8,0 a 8,5 e de 8,5 a 9,0, representam juntas cerca de 75% dos resultados. Enquanto que a classe de valores compreendidos entre 9,0 e 9,5 representam 16,7% dos valores de pH de abrasão.

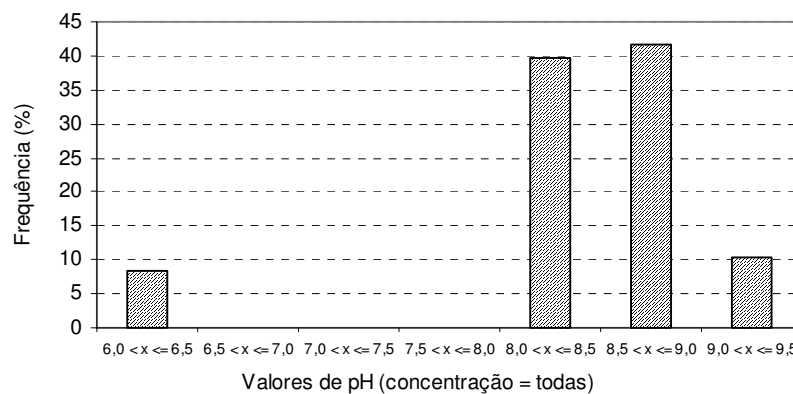


FIGURA 111 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de pH das diversas concentrações do ensaio.

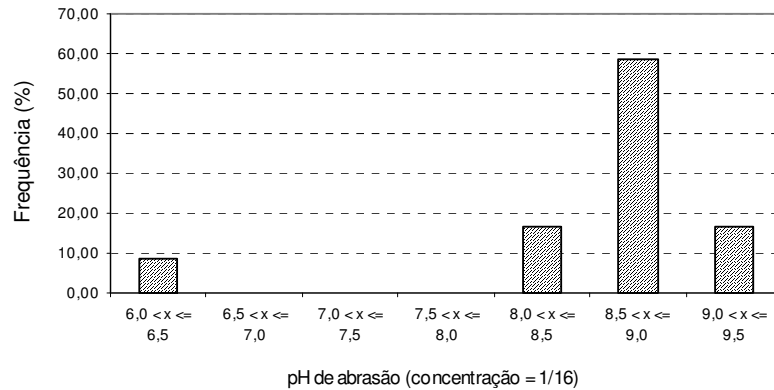


FIGURA 112 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de pH de abrasão.

Observando-se, ainda, o gráfico da Figura 110, pode-se avaliar a utilidade deste ensaio no que se refere à identificação de amostras com presença maciça de argilominerais (Zona 1), representadas neste caso pela amostra proveniente de basaltos vesículo-amigdaloidais.

Grant (1969) sugere a ação no valor de pH de abrasão da presença de argilominerais na amostra, que adsorvem parte dos íons básicos presentes na solução e, conseqüentemente, aumentando a concentração de íons OH^- e o valor do pH. Os argilominerais, principalmente do tipo 2:1, apresentam cargas negativas distribuídas em sua superfície que adsorvem, também, íons de hidrogênio livres na solução provocando o aumento de concentração de OH^- e, conseqüentemente, aumentando o valor de pH.

Os baixos valores de pH da amostra PAV, representados pela Zona 3, podem ocorrer devido à presença na rocha de minerais metálicos, mais precisamente os sulfetos. A pirita (FeS_2) e a pirrotita (Fe_{1-x}S) são os mais abundantes sulfetos de ferro presente nas rochas e o estudo de sua oxidação é de importância fundamental na avaliação da durabilidade e da qualidade do agregado. De forma geral, as reações de oxidação dos sulfetos produzem sulfatos, óxidos e íons livres de H^+ . Com o andamento desta reação, ocorre o aumento de concentração de íons livres de H^+ o que provoca, conseqüentemente, a acidez da solução. A seguir apresentam-se as reações predominantes de oxidação da pirita e da pirrotita em meios aquosos.

- $\text{FeS}_2 + 9/2 \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4^- + 2\text{H}^+$
- $8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 31/2 \text{O}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7(\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}) + \text{SO}_4^- + 2\text{H}^+$
- $\text{FeS}_2 + 9/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOOH} + 2\text{SO}_4^- + \text{H}^+$
- $8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 67/4 \text{O}_2 + 25/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7(\text{FeOOH}) + 8\text{SO}_4^- + 16\text{H}^+$
- $\text{FeS}_2 + 17/4 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{SO}_4^- + 2\text{H}^+$
- $8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 69/4 \text{O}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7/2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_4^- + 16\text{H}^+$
- $\text{FeS}_2 + 18/4 \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^- + \text{H}^+$
- $8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 21 \text{O}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{SO}_4^- + \text{H}^+$

A correlação entre os valores de pH de abrasão com os demais resultados de índices físicos, índices mineralógicos, resistências, sanidade em etileno glicol, etc., de forma geral, não obtiveram bons resultados. A melhor correlação encontrada foi com o índice SAI, apresentando valor de $R^2 = 0,60$ (Figura 113). Esta correlação foi feita sem os dados da amostra PAV, visando-se apenas a avaliação do conteúdo em argilominerais expansivos.

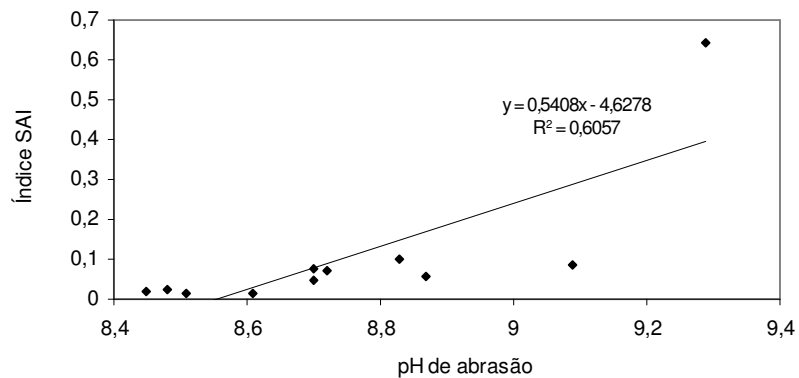


FIGURA 113 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI e o pH de abrasão.

5.8 Condutividade de abrasão

Seguindo-se o mesmo procedimento adotado para determinação do pH de abrasão os valores de condutividade medidos nas concentrações 1/64, 1/32, 1/24 e 1/16, para todas as amostras, são apresentados na Tabela 25 e representados graficamente na Figura 114. Como valor representativo da condutividade de abrasão da amostra, adotou-se o resultado da concentração 1/16 (0,063 g/ml).

TABELA 25 – Valores de condutividade das amostras estudadas.

Amostra	0,016 (mmohm)	0,031 (mmohm)	0,042 (mmohm)	0,063 (mmohm)
PAV	84,00	152,00	196,00	203,04
SIQ	8,52	13,00	17,00	22,00
SCE	9,80	15,70	20,30	26,50
SAN	9,90	15,00	19,00	24,00
SCC	8,04	12,00	15,20	23,00
WS	12,00	20,00	28,00	36,00
SM	10,76	17,00	22,00	27,00
BP	9,00	14,30	18,50	25,00
ANT	11,00	17,00	22,50	31,00
IND	9,20	14,30	19,00	24,70
SAD	10,00	16,30	21,50	28,00
VES	54,00	83,00	102,50	126,00

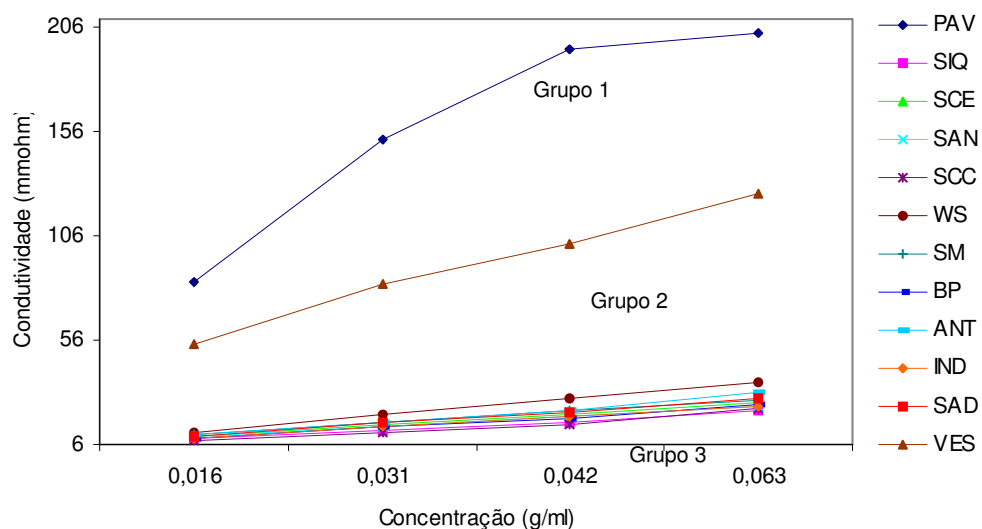


FIGURA 114 – Valores de condutividade das amostras estudadas.

Observando-se as curvas do gráfico da Figura 114, verifica-se a presença de três grupos de valores de condutividade. O Grupo 1, representa os altos valores de condutividade da amostra *PAV*, seguido pelo Grupo 2, representativo dos valores da amostra *VES*. As demais curvas, representativas do restante das amostras, compõem o Grupo 3 e associam-se a valores mais baixos de condutividade.

O Histograma da Figura 115, que apresenta a frequência dos resultados dos valores da condutividade de abrasão, delimita de maneira clara os 3 grupos vistos na Figura 114. O Grupo 1, é representado por 83,33% dos resultados das amostras, pertencentes ao intervalo de valores compreendidos entre 0,00 e 50,0 (mmohm). O Grupo 2, representa 8,33% dos resultados e associa-se ao intervalo de valores entre 100,00 e 150,00 (mmohm). Já o Grupo 3, relativo a amostra *PAV*, representa, também, 8,33% das amostras que possuem valores compreendidos entre 250,00 e 300,00 (mmohm).

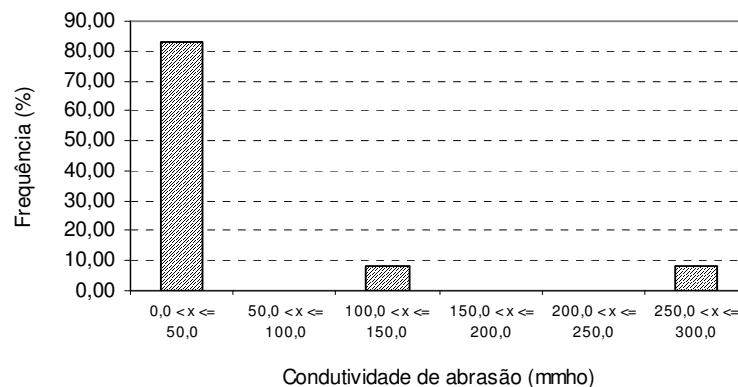


FIGURA 115 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de condutividade de abrasão.

O incremento da condutividade é dado pelo aumento de concentração de íons na solução e pelos tipos de íons presentes. No caso da amostra *PAV*, representativa das altas condutividades do Grupo 1, o destaque é dado para o aumento de concentração dos íons H^+ resultantes do processo de oxidação de sulfetos presentes na amostra, o que provocou, também a queda dos valores de pH da solução. Com relação a amostra do Grupo 2 (*VES*), os valores de condutividade relativamente mais altos que os das amostras do Grupo 3 estão associados, provavelmente, ao aumento de íons de elementos alcalinos e alcalinos terrosos na solução e, também, devido a sua alta concentração de OH^- , o que resulta, como visto anteriormente, em altos valores de pH. As condutividades das amostras do Grupo 3,

provavelmente seja influenciada, apenas, pela quantidade de íons alcalinos e alcalinos terrosos na solução.

As correlações entre os valores de condutividade de abrasão com as outras variáveis estudadas nos itens anteriores são apresentadas nas Figuras de 116 a 129. Estas correlações não contemplam os valores de condutividade de abrasão da amostra *PAV*. Pois, o aspecto exclusivo desta amostra, no que se refere a presença de sulfetos, provocando os altos valores de condutividade de abrasão, dificulta uma boa correlação entre as variáveis estudadas. Desta forma, apenas a condutividade decorrente da quantidade de íons, provavelmente de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, provenientes das amostras e medidos na solução serão considerados.

A Tabela 26 apresenta a correlação entre os valores de condutividade de abrasão com outras variáveis medidas nos itens anteriores deste trabalho.

TABELA 26 – Correlação entre a condutividade de abrasão com outras variáveis.

	Condutividade de abrasão	
pH de abrasão	Logarítmica crescente	R² = 0,55
MBA	Linear crescente	R² = 0,90
η	Linear crescente	R² = 0,99
ω	Linear crescente	R² = 0,99
ρ'd	Linear decrescente	R² = 0,97
ρ'sat	Linear decrescente	R² = 0,96
K1	Potencial decrescente	R² = 0,11
K2	Exponencial decrescente	R² = 0,24
Rsm	Linear crescente	R² = 0,41
SAI	Linear crescente	R² = 0,98
σc	Linear decrescente	R² = 0,27
Esm	Logarítmica crescente	R² = 0,93
LA	Linear crescente	R² = 0,92
Etileno	Linear crescente	R² = 0,62

Nota: η = porosidade aparente; ω = absorção d'água; ρ'd = massa específica seca aparente; ρ'sat = massa específica saturada aparente; K1 e K2 = índices petrográficos; Rsm = Secondary mineral rating; SAI = índice de alteração da esmectita; σc = resistência a compressão uniaxial; LA = resistência ao abrasão Los Angeles; Esm = resistência ao esmagamento modificado; R² = coeficiente de correlação.

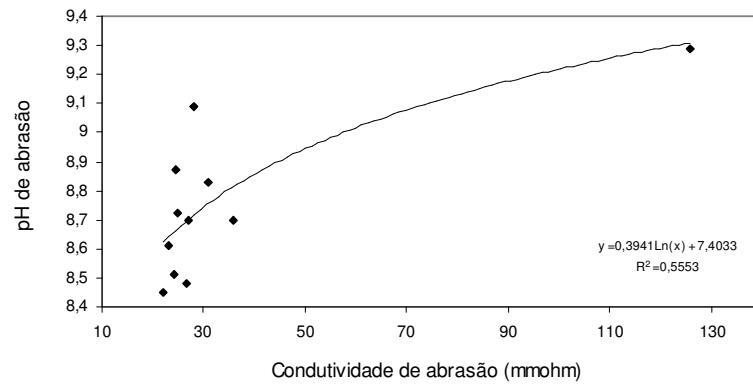


FIGURA 116 – Regressão logarítmica crescente para correlação entre o pH de abrasão e a condutividade de abrasão.

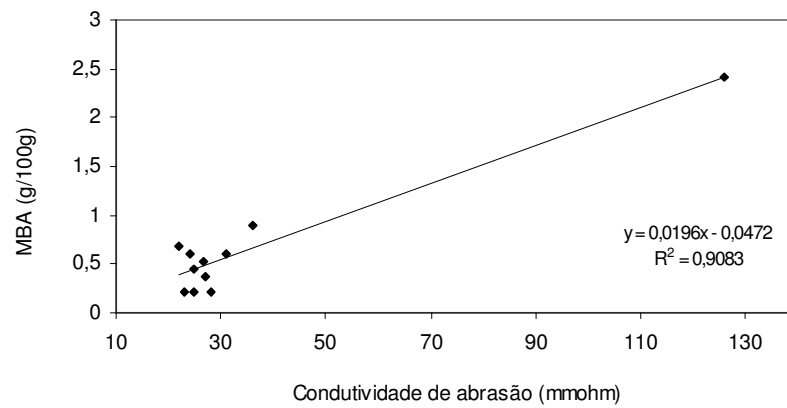


FIGURA 117 – Regressão linear crescente para correlação entre adsorção de azul de metileno e a condutividade de abrasão.

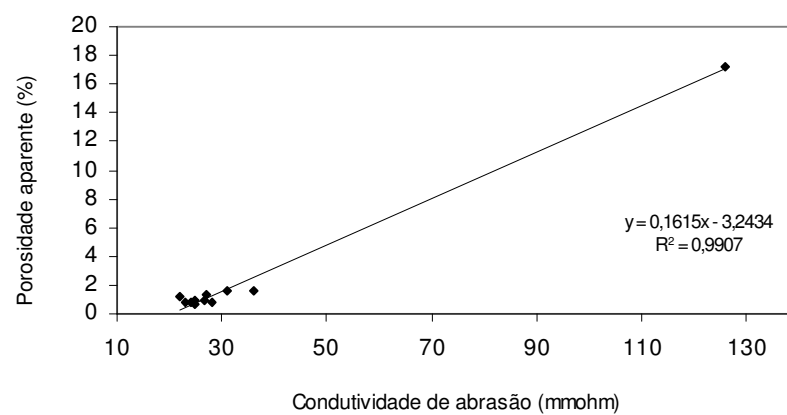


FIGURA 118 – Regressão linear crescente para correlação entre a porosidade aparente e a condutividade de abrasão.

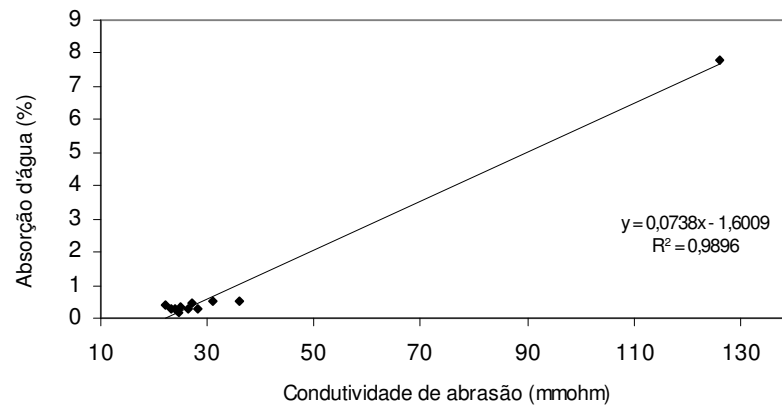


FIGURA 119 – Regressão linear crescente para correlação entre a absorção d'água e a condutividade de abrasão.

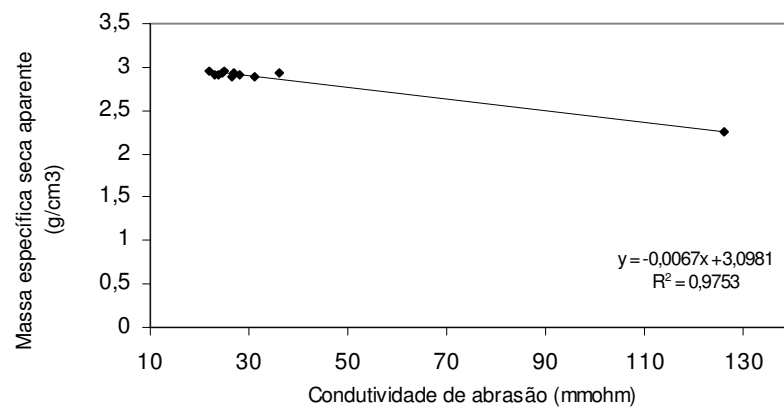


FIGURA 120 – Regressão linear decrescente para correlação entre a massa específica seca aparente e a condutividade de abrasão.

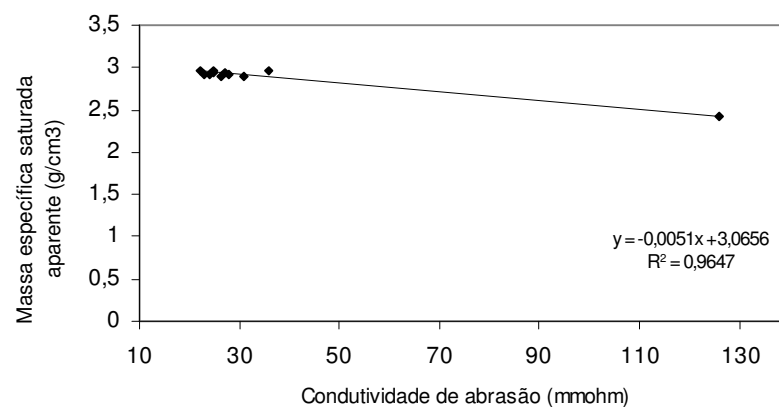


FIGURA 121 – Regressão linear decrescente para correlação entre a massa específica seca aparente e a condutividade de abrasão.

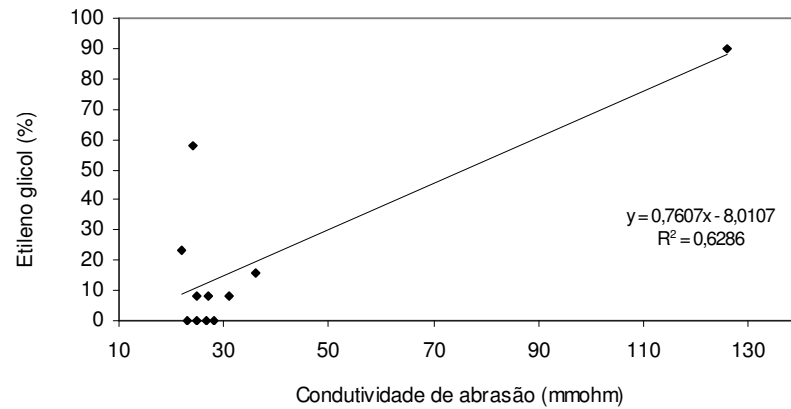


FIGURA 122– Regressão linear crescente para correlação entre a imersão em etileno glicol e a condutividade de abrasão.

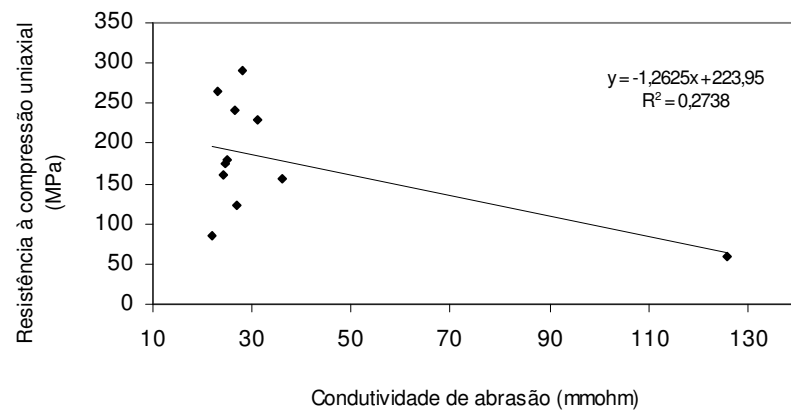


FIGURA 123– Regressão linear decrescente para correlação entre a resistência à compressão uniaxial e a condutividade de abrasão.

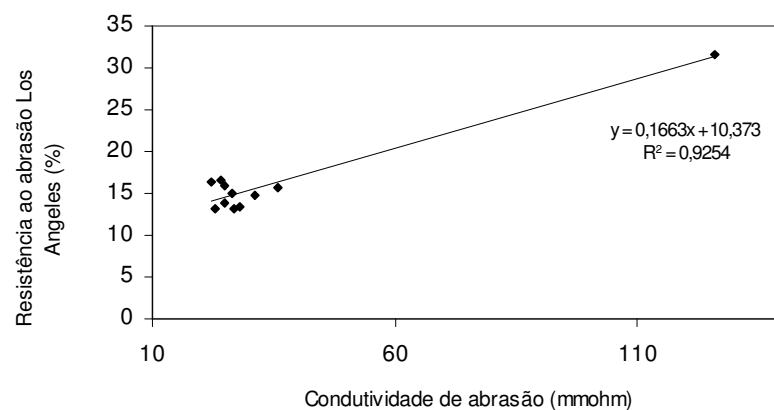


FIGURA 124 – Regressão linear crescente para correlação entre a resistência ao abrasão Los Angeles e a condutividade de abrasão.

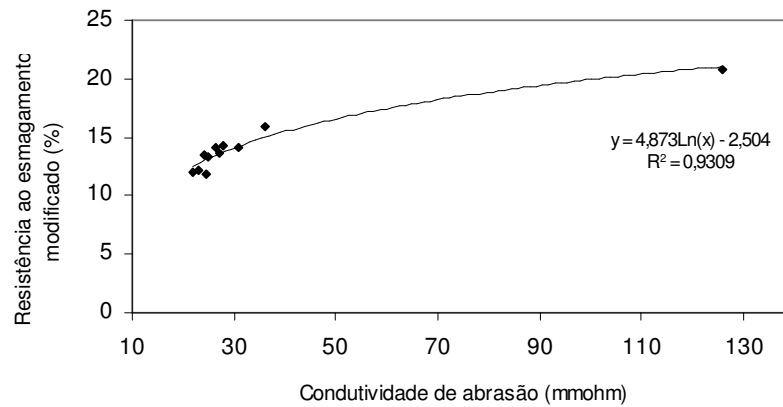


FIGURA 125 – Regressão logarítmica crescente para correlação entre a resistência ao esmagamento modificado e a condutividade de abrasão.

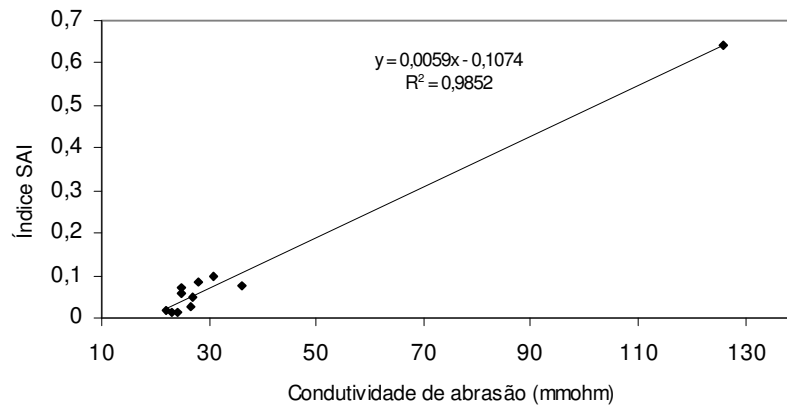


FIGURA 126 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI e a condutividade de abrasão.



FIGURA 127 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice Rsm e a condutividade de abrasão.

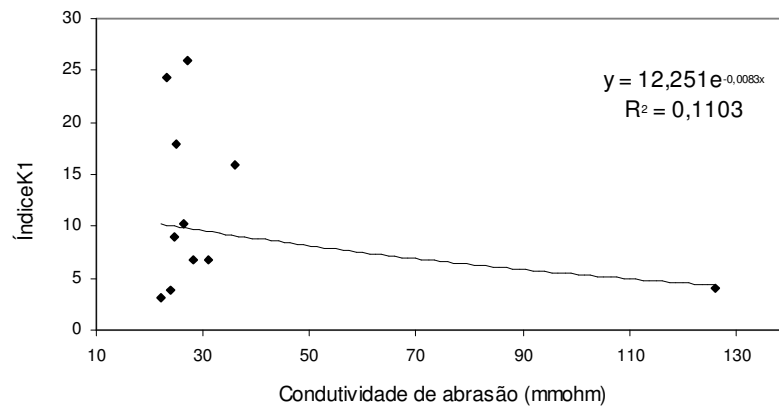


FIGURA 128 – Regressão exponencial decrescente para correlação entre o índice K1 e a condutividade de abrasão.

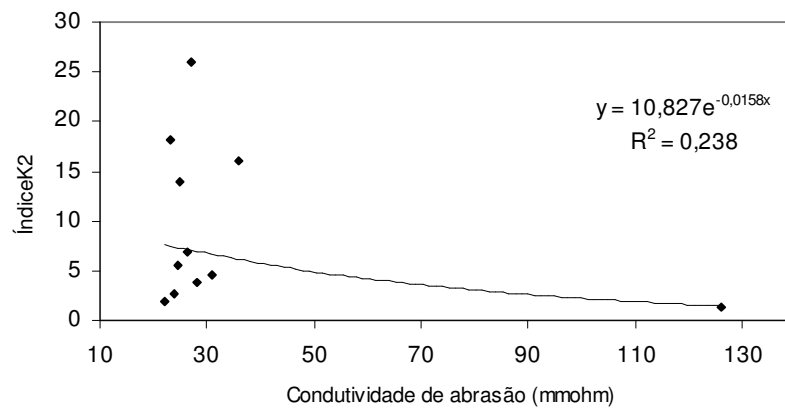


FIGURA 129 – Regressão exponencial decrescente para correlação entre o índice K2 e a condutividade de abrasão.

Capítulo 6

ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DOS MATERIAIS ESTUDADOS

6.1 Ensaio de Alteração Natural

Este ensaio objetiva a avaliação da alteração de materiais rochosos quando submetidos às condições intempéricas naturais. Para o acompanhamento da evolução da alteração, foi definido o intervalo de exposição natural de 360 ciclos, mais especificamente o período que englobou os meses de março de 1999 até fevereiro de 2000. A cada mês, ou seja, a cada 30 ciclos, realizou-se a medida de perda de massa, juntamente com a medida de resistência do material ciclado. Após estas medidas, as amostras foram submetidas a ensaios de difração de Raios-X e de adsorção de azul de metileno. Observações ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), também foram realizadas nas amostras cicladas com objetivo de visualizar, em detalhe, a superfícies das partículas destas amostras.

6.1.1 Avaliação das condições ambientais no processo de alteração natural.

Para avaliação da influência das condições ambientais no processo de alteração natural do material rochoso, adotou-se o índice climático proposto por Weinert (1964). Este índice, relaciona a taxa de evaporação do mês mais quente do ano, no presente caso o mês de janeiro, com a precipitação anual total. A Figura 130, apresenta o histograma com informações de pluviometria e evaporação, fornecidas pela estação meteorológica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, localizada ao lado da área de exposição das amostras do ensaio de alteração natural.

A precipitação pluviométrica total durante os 12 meses considerados no ensaio foi de 1158,2mm, enquanto que a evaporação total foi de 1772,7mm. Apenas nos meses de

dezembro de 1999, janeiro e fevereiro de 2000 os valores de precipitação pluviométrica mensais ultrapassaram os de evaporação.

Para o cálculo do índice “N” de Weinert (1964), utilizou-se o valor da pluviometria total para os doze meses do ensaio e a média dos valores de evaporação dos meses de janeiro de 1999 e janeiro de 2000, da seguinte maneira:

$$N = 12 * E_{Jm} / P_{total}$$

$$N = 12 * 199,6 / 1158,2$$

$$N = 2,06$$

onde:

E_{Jm} = média dos valores de evaporação dos meses de janeiro de 1999 e janeiro de 2000;

P_{total} = precipitação pluviométrica total para os doze meses do ensaio.

O valor de “N” próximo a 2, segundo Weinert (1964), indica que o tipo de intemperismo que prevalece na área é do tipo químico. Nos meses em que os valores de evaporação ultrapassaram os valores de precipitação (meses de maio/99 até novembro/99) este intemperismo se tornou mais lento. A pouca disponibilidade de água influi na diminuição de reações químicas, que por sua vez regem o mecanismo de hidrólise, resultando na baixa remoção de elementos solúveis dos minerais. Já nos meses de dezembro de 1999 até fevereiro de 2000, o índice pluviométrico excedeu os valores de evaporação, resultando em uma maior remoção de elementos solúveis dos materiais rochosos estudados.

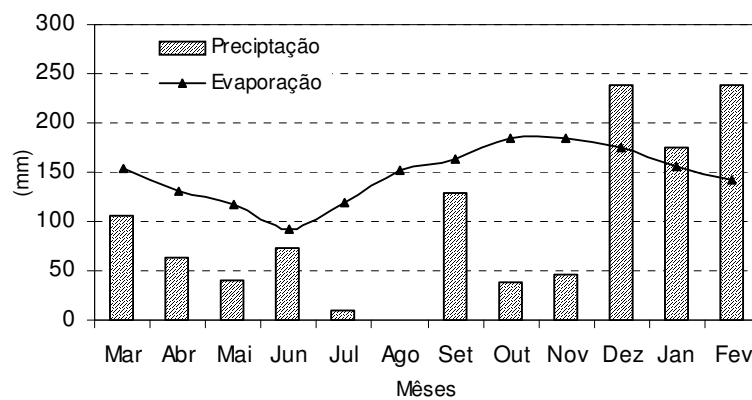


FIGURA 130 – Histograma da precipitação pluviométrica e da evaporação durante os meses de desenvolvimento do ensaio de alteração natural.

6.1.2 Análise da perda de massa

A perda de massa, consiste na quantificação de material desagregado, através de peneiramento, após a execução de um determinado ensaio de alteração, neste caso o ensaio de alteração natural. Quanto maior a porcentagem de material passante na peneira, maior é a desagregabilidade da rocha. A perda de massa é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Perda de massa} = [(m1 - m2) / m1] * 100$$

onde:

m1 = massa seca da amostra antes da ciclagem;

m2 = massa seca da amostra após ciclagem.

A Tabela 27 e a Figura de 131 apresentam a evolução da perda de massa de cada amostra, em determinados ciclos do ensaio de alteração natural.

Avaliando-se os dados do último ciclo do ensaio (ciclo 360), verifica-se que as amostras *VES*, *SAN* e *SIQ*, destacam-se como as que apresentam as maiores perdas de massa, respectivamente 11,30%, 8,27% e 5,67%.

Avaliando-se hierarquicamente as amostras (Figura 132), do menor ao maior valor de perda de massa (ciclo 360), têm-se a seguinte seqüência: *ANT* < *SM* < *BP* < *PAV* < *SCC* < *WS* < *IND* < *SAD* < *SCE* < *SIQ* < *SAN* < *VES*. Salienta-se que a grande maioria das amostras, atinge valor de perda de massa acima de 2% logo nos primeiros 90 ciclos. Como visto, com a exceção das amostras *VES*, *SIQ* e *ANT*, todas as outras permanecem no intervalo de 2% a aproximadamente 4% de perdas de massa durante o desenvolvimento do ensaio.

O Histograma da Figura 133, apresenta a freqüência dos intervalos de valores da perda de massa no ciclo 360. O intervalo de de 2,00 a 4,00% de perda de massa, representa cerca de 75% das amostras estudadas. Já os intervalos compreendidos entre 4,00 e 6,00%, 8,00 a 10,00 e de 10,00 a 12,00% de perda de massa, correspondem, cada um, a 8,33% das amostras estudadas.

TABELA 27 – Porcentagem de perda de massa com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.

Ciclos	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
30	0,80	0,25	0,46	4,02	0,14	0,60	0,65	0,76	0,98	0,66	6,65	0,49
60	1,75	0,66	1,13	4,54	0,98	2,25	1,59	1,21	1,46	0,99	9,71	1,06
90	3,29	2,44	2,66	5,57	1,89	3,79	1,62	2,09	2,51	2,02	10,75	1,49
120	1,75	2,37	2,68	4,98	2,12	3,16	1,51	2,34	3,46	2,16	10,98	2,01
150	2,12	2,43	2,46	5,65	2,46	3,22	2,06	2,86	3,88	2,18	11,02	2,14
180	2,34	2,51	2,27	6,56	2,09	3,26	2,17	3,63	4,02	2,02	11,65	1,98
210	2,48	2,12	2,19	6,23	2,12	3,34	2,10	3,64	3,96	2,17	11,22	2,13
240	3,04	1,96	2,09	5,19	2,20	3,15	2,62	3,85	3,51	2,35	11,96	2,44
270	3,24	2,01	2,12	6,02	2,45	4,03	3,06	3,88	3,34	2,70	11,18	2,65
300	3,63	2,07	2,16	6,39	2,37	5,52	3,94	3,64	3,46	3,42	11,33	3,25
330	3,55	2,26	2,18	7,05	2,66	5,55	3,32	3,66	3,28	3,12	11,26	3,02
360	3,06	2,43	2,14	8,27	3,29	5,67	3,46	3,35	3,50	3,23	11,30	2,92

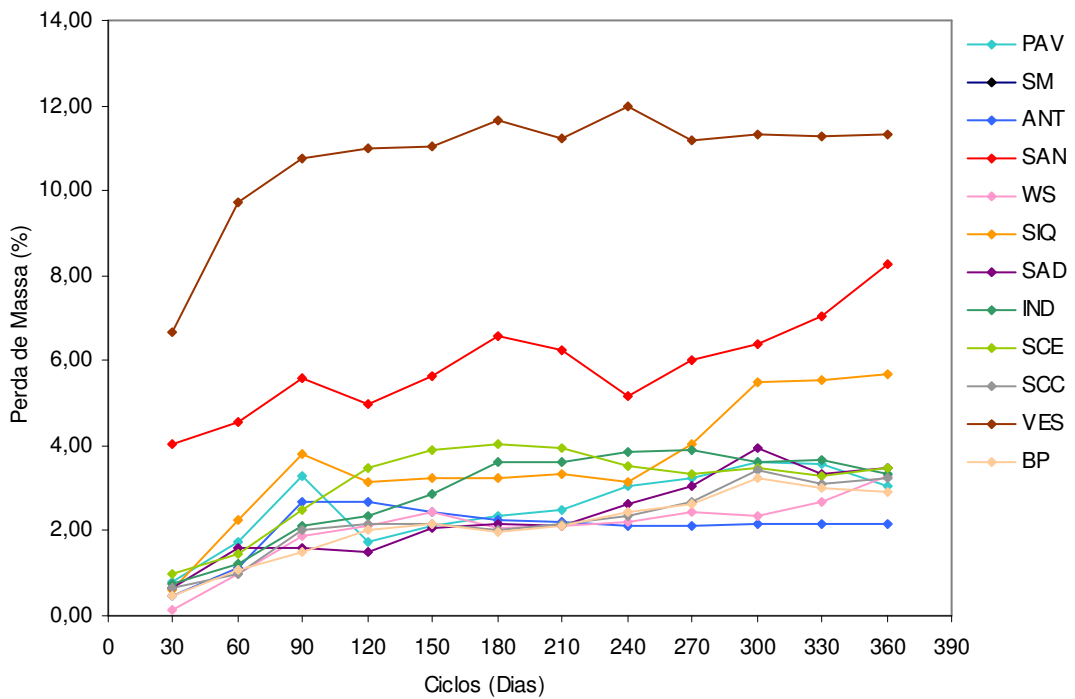


FIGURA 131 – Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração natural.

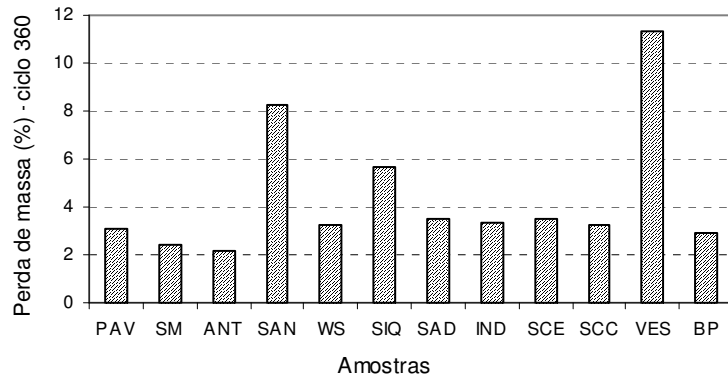


FIGURA 132 – Valores de perda de massa para o ciclo 360 das amostras estudadas.

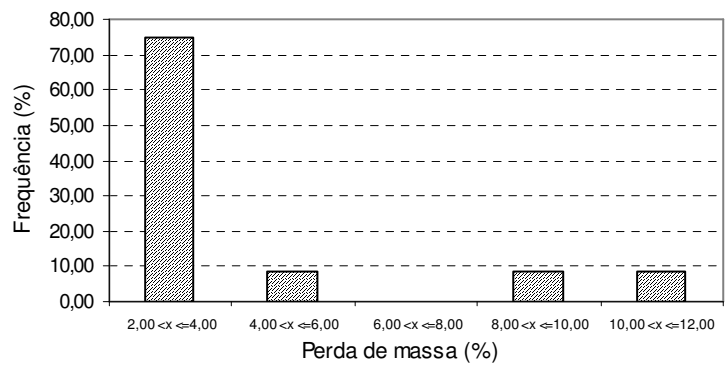


FIGURA 133 – Histograma de distribuição de Frequência os resultados de valores de perda de massa por alteração natural.

As Figuras de 134 a 145, apresentam individualmente o gráfico da perda de massa com a ciclagem natural das amostras estudadas. Nos gráficos, estão presentes os valores do índice de correlação “R²” e do tipo de curva de regressão obtida. Nota-se, com a observação destes gráficos, que o comportamento da evolução da perda de massa com a ciclagem obedece a uma configuração de curva do tipo logarítmica ou, em alguns casos, do tipo potencial. Isto indica, de forma generalizada, o crescimento elevado de valores de perda de massa logo nos primeiros ciclos do ensaio, no caso, como visto anteriormente, nos primeiros 90 ciclos., com a tendência de suavização da curva com o andamento da ciclagem.

Os valores encontrados para o coeficiente de correlação, refletem a variabilidade dos resultados de perda de massa ao longo do tempo. Tal fato é considerado esperado, pois, no procedimento adotado neste trabalho (ver fluxograma da Figura 29) cada intervalo de ciclos medidos foi representado por uma amostra individual e conseqüentemente representativo de sua perda de massa.

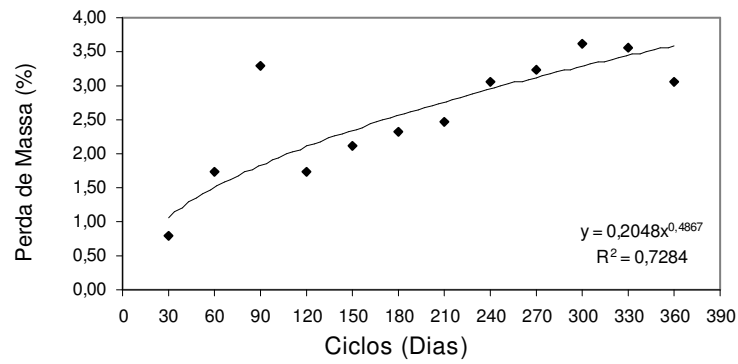


FIGURA 134 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra PAV.

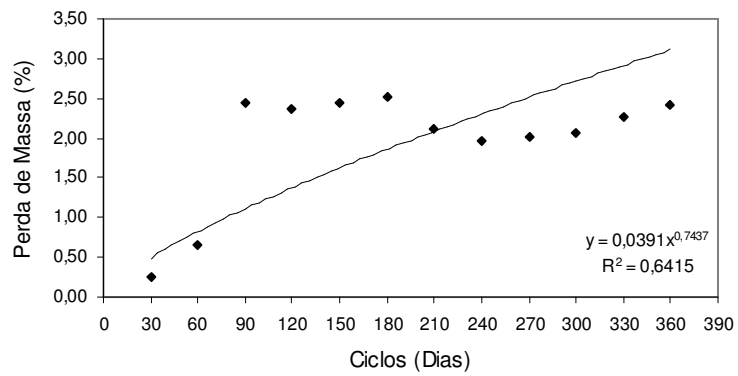


FIGURA 135 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SM.

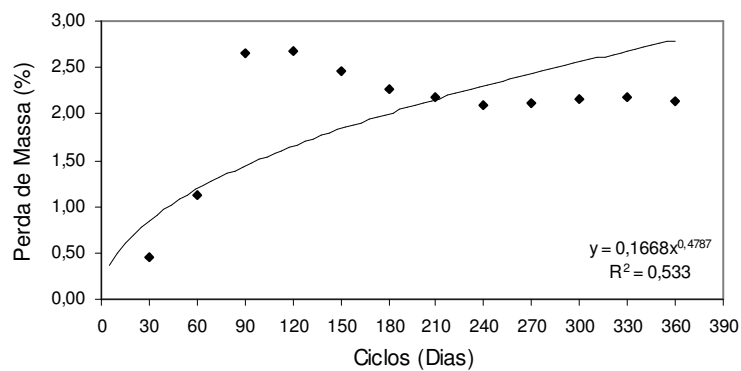


FIGURA 136 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra ANT.

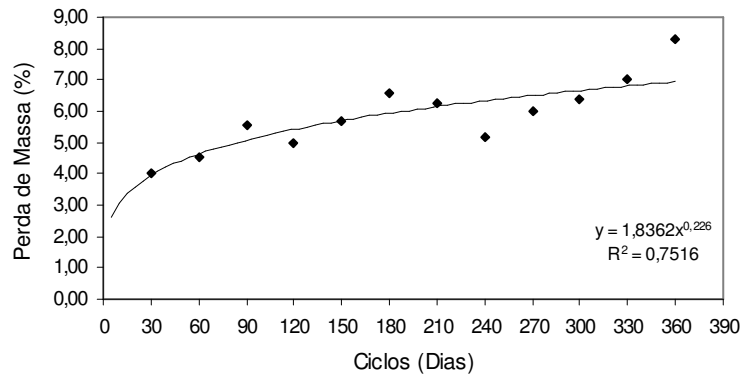


FIGURA 137 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SAN.

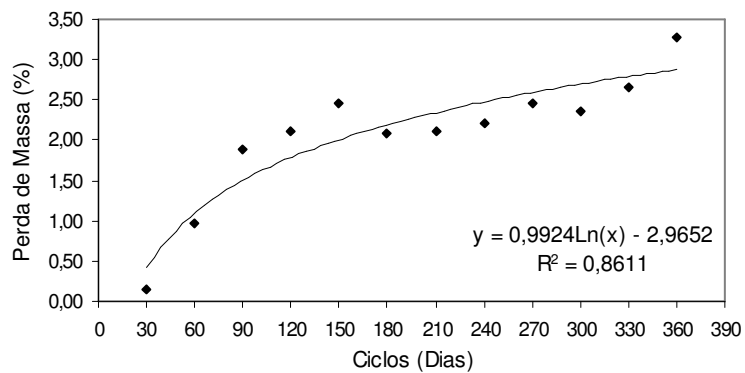


FIGURA 138 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra WS.

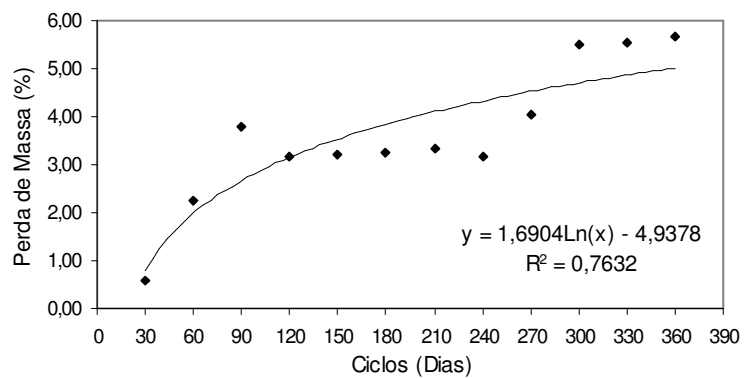


FIGURA 139 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SIQ.

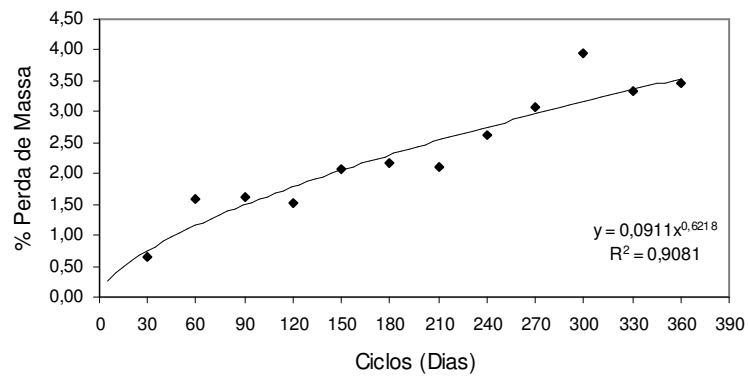


FIGURA 140 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SAD.

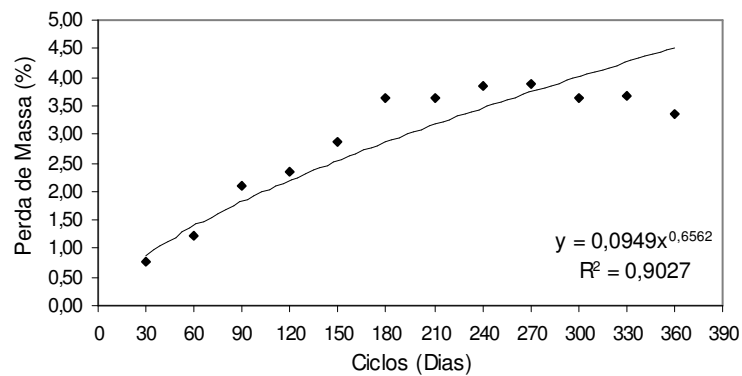


FIGURA 141 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra IND.

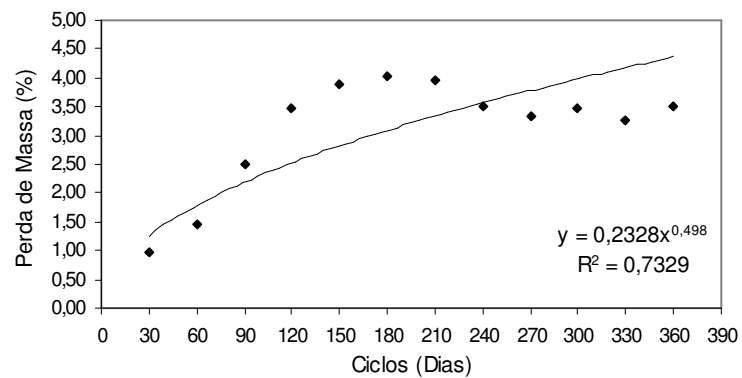


FIGURA 142 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SCE.

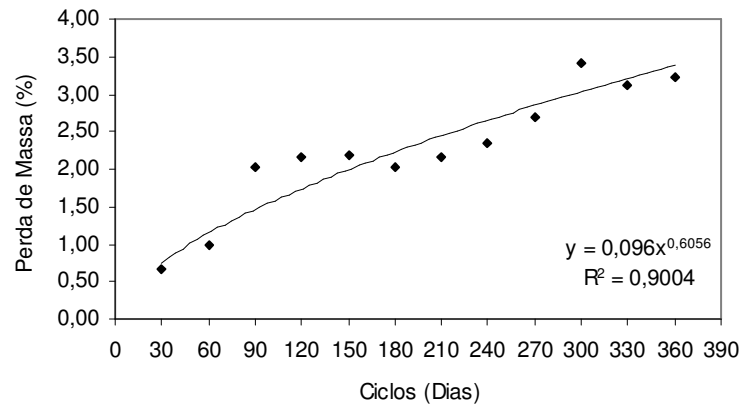


FIGURA 143 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra SCC..

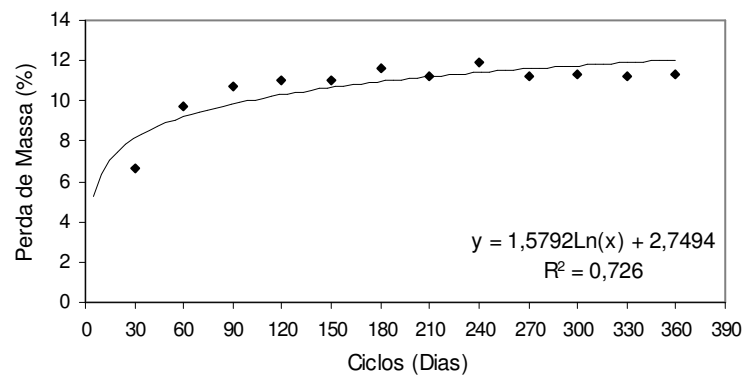


FIGURA 144 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra VES.

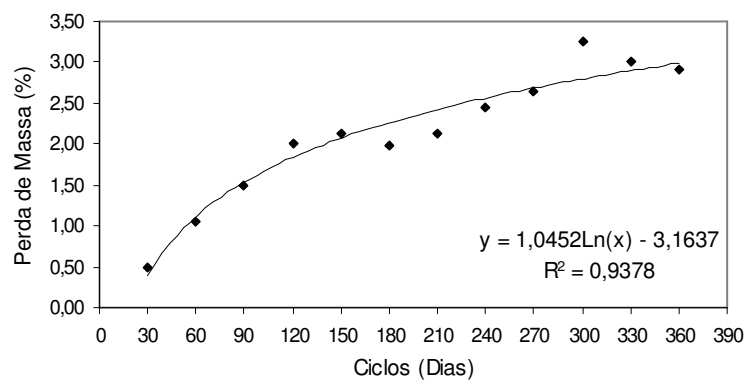


FIGURA 145 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra BP.

6.1.3 Índices de Alterabilidade

Segundo Frazão (1993), quando materiais rochosos granulares se alteram, ocorre, juntamente com as modificações granulométricas, modificações na sua resistência mecânica ao longo do tempo. Desta maneira, pode-se associar os parâmetros de perda de massa com o parâmetro de resistência e obter-se um índice que reflita o grau de alteração e a alterabilidade da rocha. Neste trabalho, para a avaliação da variação do comportamento mecânico da rocha submetida a ciclagem, utilizou-se o ensaio de esmagamento modificado. A Tabela 28 e a Figura 146 apresentam a evolução da resistência de cada amostra, em determinados ciclos do ensaio de alteração natural.

TABELA 28 – Valores de resistência ao esmagamento modificado com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.

Ciclos	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
30	14,11	13,88	14,42	13,88	16,50	12,03	14,37	13,22	14,21	13,06	20,81	13,36
60	14,02	14,04	14,35	14,56	16,37	12,93	14,28	13,40	14,67	13,21	21,82	13,85
90	14,15	14,05	14,56	14,43	16,19	13,09	14,43	13,04	14,53	13,60	20,77	13,99
120	15,52	14,09	15,39	13,78	16,02	12,85	14,91	13,11	14,40	13,91	20,56	13,81
150	14,88	14,09	15,22	14,49	16,15	12,66	15,07	13,09	14,31	13,85	20,49	13,78
180	14,20	13,95	15,37	13,71	16,32	12,72	15,01	13,16	13,95	13,79	20,32	13,86
210	14,33	14,10	15,42	14,55	16,42	12,55	15,22	13,19	14,24	13,62	21,03	13,81
240	14,73	14,16	15,56	14,83	16,36	12,61	15,19	13,24	14,31	13,47	20,66	13,92
270	14,56	14,17	15,53	14,92	16,52	12,65	15,36	13,33	14,39	13,68	20,71	13,84
300	14,75	14,08	14,66	14,85	16,22	13,10	15,49	13,56	14,43	13,73	21,66	13,75
330	14,48	14,02	15,45	15,02	17,05	13,22	15,58	13,77	14,59	13,69	21,74	13,69
360	14,83	14,10	15,81	15,35	17,21	13,17	15,60	13,88	14,73	13,82	22,14	13,71

Estes valores de resistência mecânica são utilizados para o cálculo de índices de alterabilidade como o $K\Delta t$ (Farjallat, 1971) e o R_f (Yoshida, 1972). Neste trabalho, optou-se pelo uso destes índices de alterabilidade com a modificação apenas do tipo de ensaio utilizado para a medida da resistência mecânica, visto que, o índice $K\Delta t$ utiliza resultados de resistência mecânica obtidos pelo ensaio de abrasão Los Angeles e o índice R_f utiliza resultados do aparelho Treton.

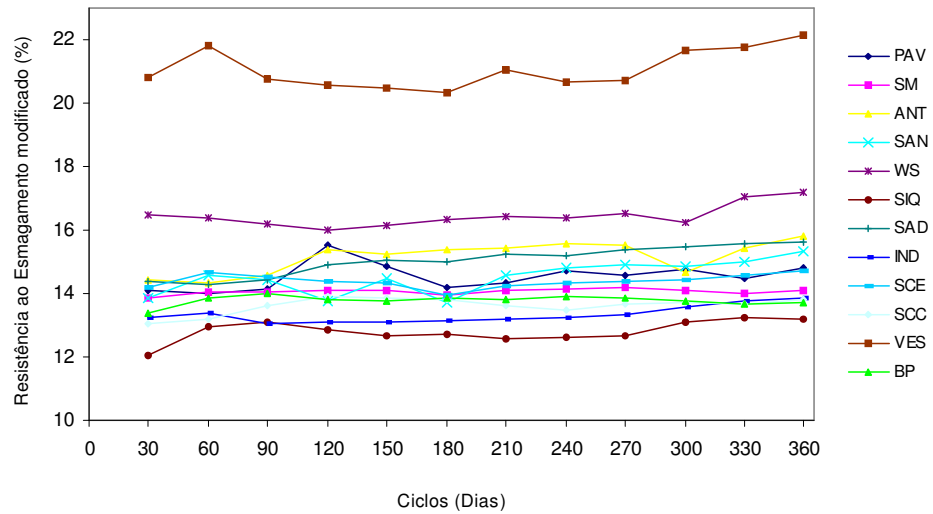


FIGURA 146 - Evolução da resistência ao esmagamento modificado com os ciclos do ensaio de alteração natural.

O índice $K\Delta t$ exprime a alterabilidade do material rochoso através da seguinte expressão:

$$K\Delta t = \{[(200 - I) - (200 - F)] / (200 - I)\}$$

$$K\Delta t = 1 - [(200 - F)/(200 - I)]$$

Onde:

200 = Soma dos limites máximos para perdas por alteração e por esmagamento;

I = Soma das perdas por alteração e pelo esmagamento da amostra “in natura” (Obs: as perdas por alteração da amostra “in natura” são iguais a zero.);

F = Soma das perdas por alteração e pelo esmagamento da amostra submetida ao ensaio de alteração.

O valor de $K\Delta t$ pode variar no intervalo de 0 a 1. Quanto maior o seu valor, maior é a alterabilidade da rocha. A Tabela 29 e a Figura 147 apresentam os valores deste índice nos diversos ciclos do ensaio de alteração natural. Em ordem crescente de valores do índice $K\Delta t$, temos a seguinte hierarquia para as amostras estudadas: $SM < BP < ANT < PAV < SCE < WS < SAD < SCC < IND < SIQ < SAN < VES$.

TABELA 29 – Valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ (Farjallat, 1971) com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.

Ciclos	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
30	0,005	0,003	0,004	0,024	0,004	0,003	0,004	0,011	0,006	0,008	0,041	0,003
60	0,010	0,006	0,007	0,030	0,008	0,017	0,008	0,015	0,011	0,011	0,060	0,008
90	0,019	0,015	0,017	0,035	0,012	0,026	0,009	0,017	0,016	0,018	0,060	0,011
120	0,018	0,015	0,021	0,028	0,012	0,021	0,011	0,019	0,020	0,021	0,060	0,013
150	0,016	0,016	0,019	0,036	0,015	0,021	0,015	0,022	0,022	0,020	0,060	0,014
180	0,014	0,015	0,019	0,036	0,014	0,021	0,015	0,026	0,021	0,019	0,063	0,013
210	0,015	0,014	0,019	0,039	0,015	0,021	0,016	0,026	0,022	0,019	0,064	0,014
240	0,020	0,013	0,019	0,035	0,015	0,020	0,019	0,028	0,020	0,019	0,066	0,016
270	0,020	0,014	0,019	0,040	0,017	0,025	0,022	0,028	0,020	0,022	0,062	0,017
300	0,024	0,014	0,014	0,042	0,015	0,035	0,028	0,028	0,020	0,026	0,068	0,020
330	0,022	0,014	0,019	0,046	0,021	0,036	0,025	0,030	0,020	0,025	0,068	0,018
360	0,021	0,016	0,020	0,054	0,025	0,036	0,026	0,029	0,022	0,026	0,071	0,018

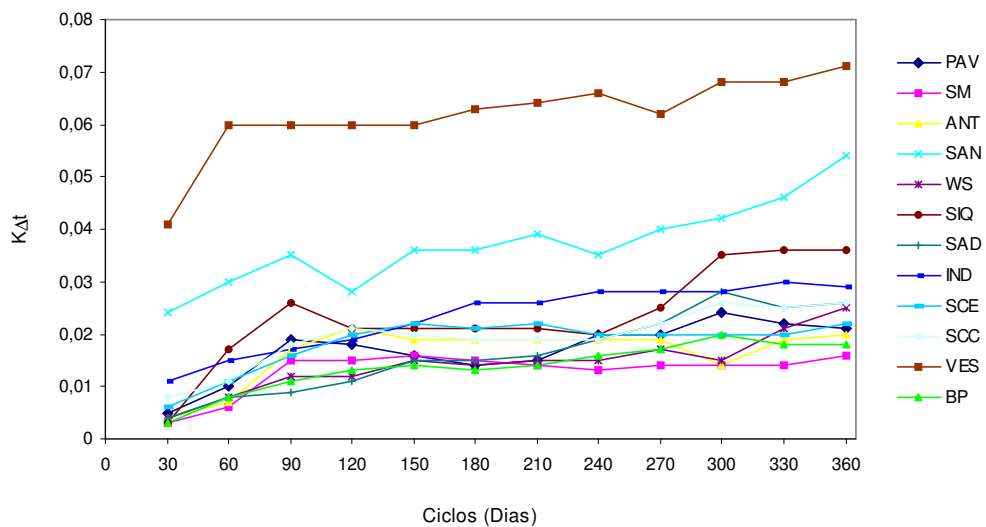


FIGURA 147 - Evolução do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração natural.

A Figura 148, apresenta os valores do índice $K\Delta t$ referentes ao ciclo 360 das amostras estudadas. O valor máximo é de 0,071 e corresponde a amostra VES Já o valor mínimo, de 0,016, é o da amostra SM.

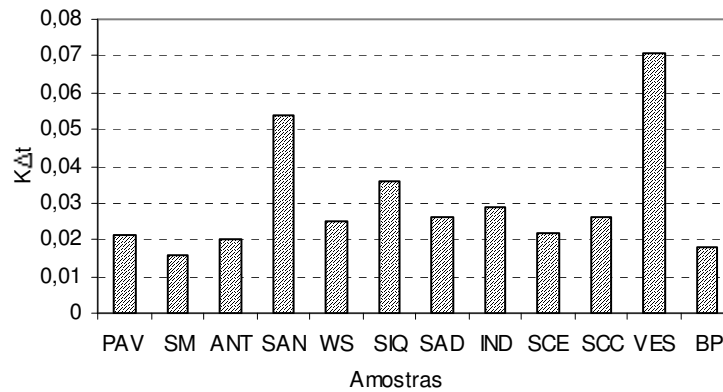


FIGURA 148 – Valores do Índice $K\Delta t$ para o ciclo 360 das amostras estudadas.

O Histograma de Frequência dos resultados do índice $K\Delta t$ é visto na Figura 149. O intervalo de valores compreendidos entre 0,01 até 0,02 engloba 50% dos valores do índice $K\Delta t$ das amostras, enquanto que o intervalo entre 0,02 e 0,03 corresponde a 50% dos resultados. Já os intervalos de 0,03 a 0,04, 0,05 a 0,06 e 0,07 a 0,08, representam, cada um, 8,33% das amostras estudadas.

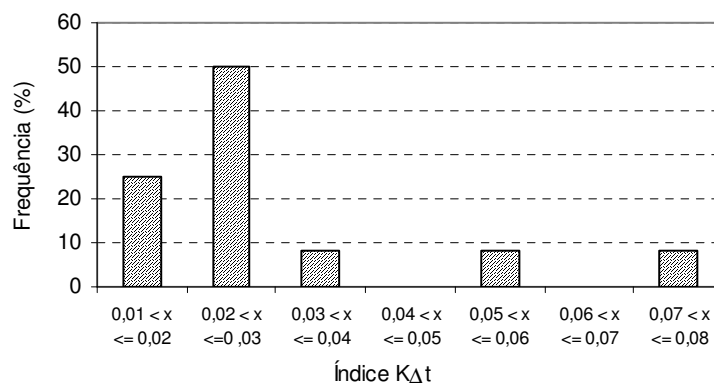


FIGURA 149 - Histograma de distribuição de Frequência de valores do Índice $K\Delta t$ no ensaio de alteração natural.

As Figuras de 150 até 161 apresentam a variação do índice $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração natural de cada amostra estudada.

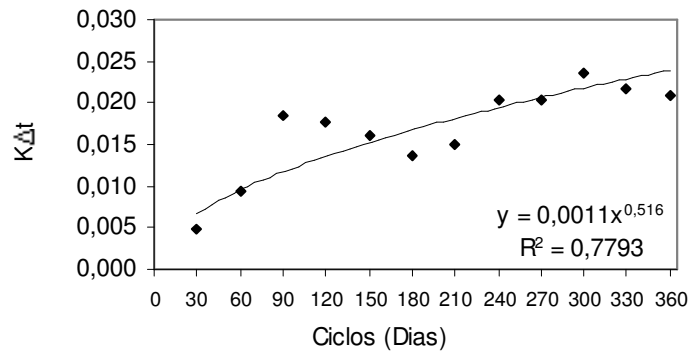


FIGURA 150 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra PAV.

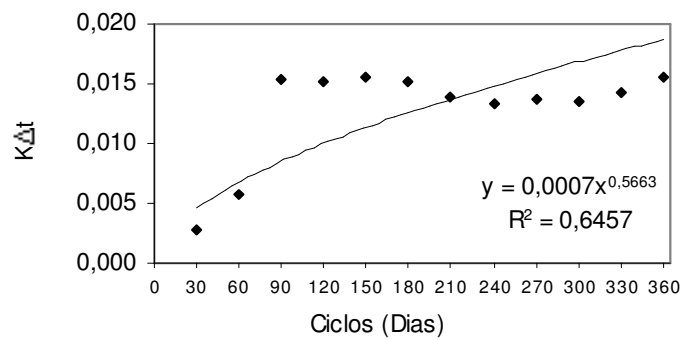


FIGURA 151 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SM.

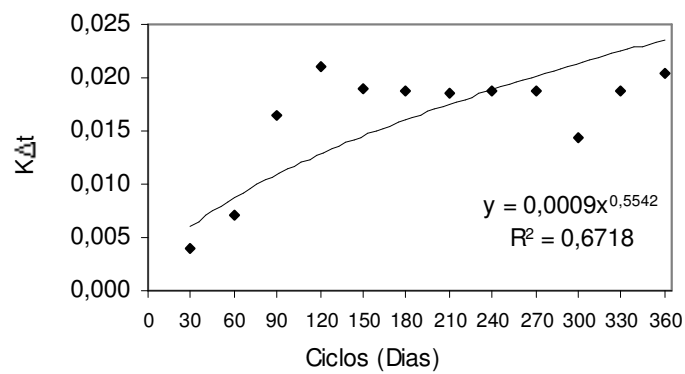


FIGURA 152 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra ANT.

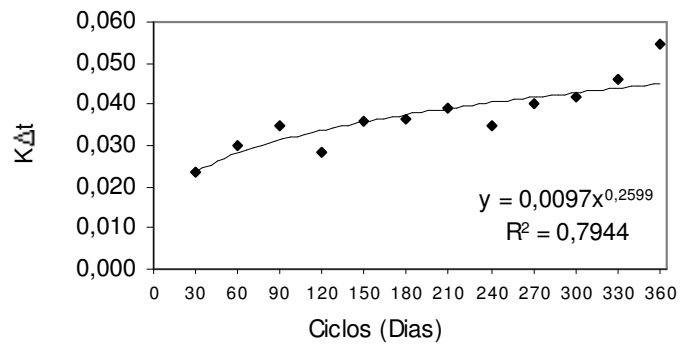


FIGURA 153 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SAN.

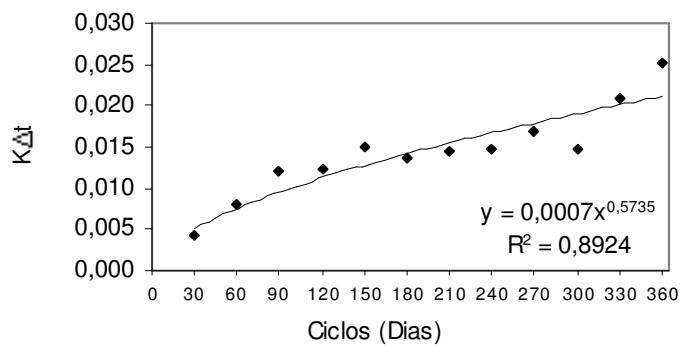


FIGURA 154 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra WS.

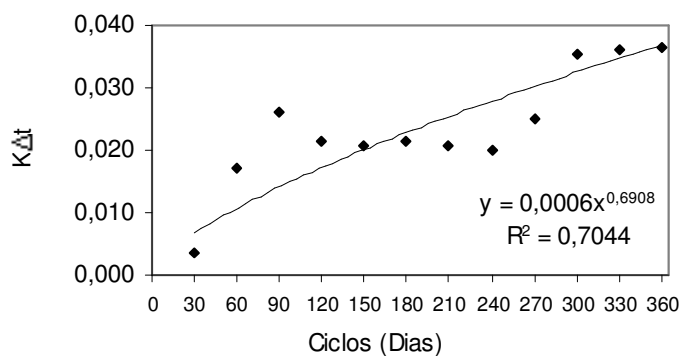


FIGURA 155 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SIQ.

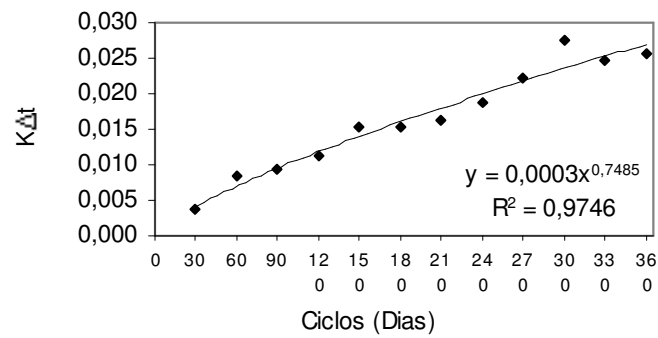


FIGURA 156 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SAD.

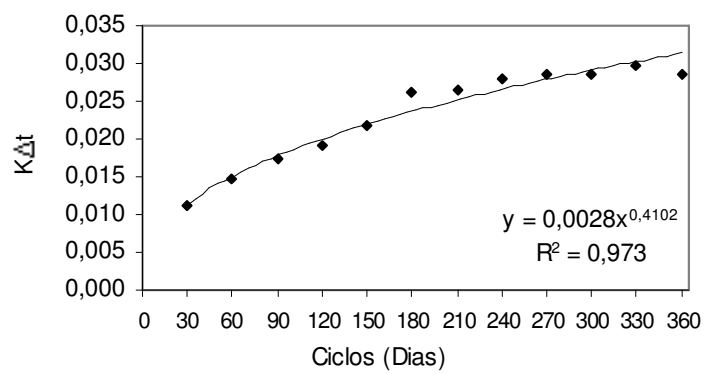


FIGURA 157 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra IND.

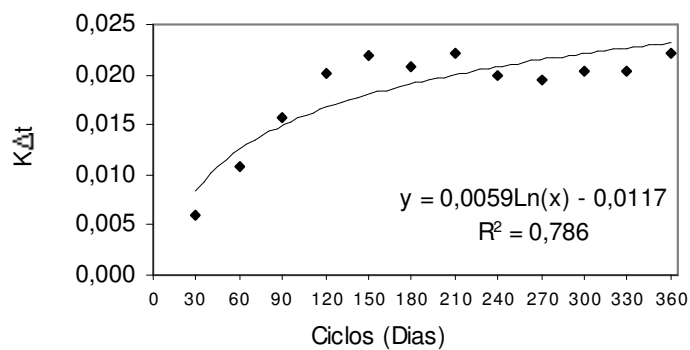


FIGURA 158 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SCE.

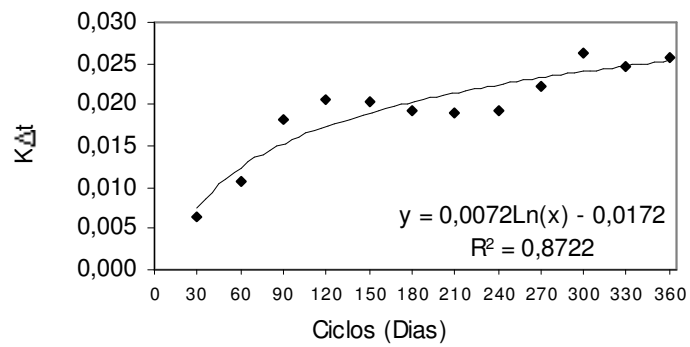


FIGURA 159 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra SCC.

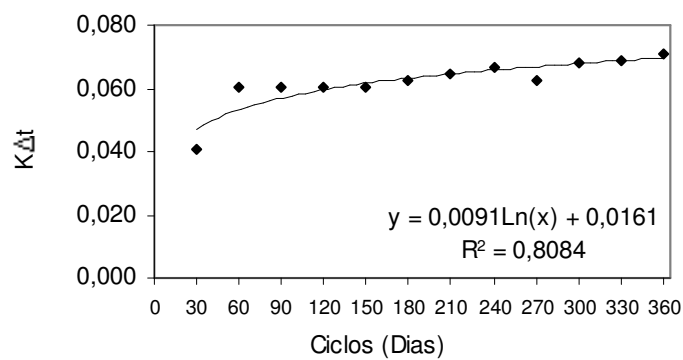


FIGURA 160 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra VES.

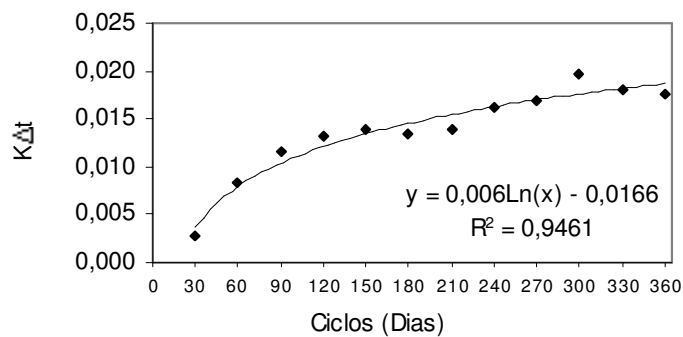


FIGURA 161 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra BP.

A Figura 162, relaciona o índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os valores de perda de massa pela ciclagem natural.

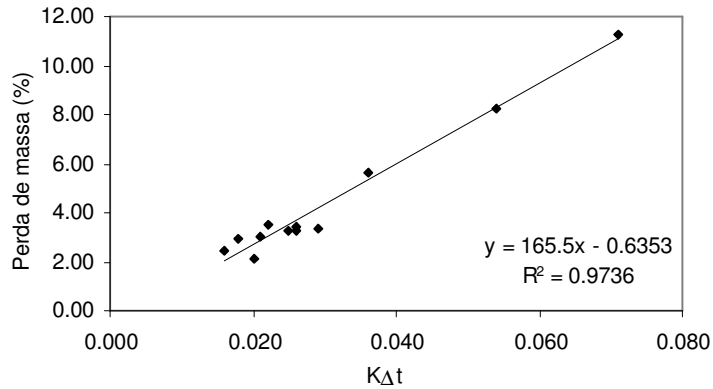


FIGURA 162 – Regressão linear crescente para correlação entre a perda de massa e o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

O Índice R_f , sugerido por Yoshida (1972), é calculado pela seguinte expressão:

$$R_f = [(100 - P) * RW] / 100$$

Onde:

100 = Limite máximo de perdas;

P = Porcentagem de perdas no ensaio de alteração;

RW = Resistência ao esmagamento da amostra submetida ao ensaio de alteração.

O índice R_f varia de 0 (rocha totalmente alterada) a R (rocha no estado são ou a um dado estado de alteração). Quanto menor o seu valor, maior é sua alterabilidade.

A Tabela 30 e o gráfico da Figura 163 apresentam a evolução dos valores do índice R_f de cada amostra, em determinados ciclos do ensaio de alteração natural. Avaliando-se hierarquicamente as amostras (Figura 164), do maior ao menor valor do índice R_f (ciclo 360), tem-se a seguinte seqüência: *SM* > *BP* > *SCC* > *IND* > *PAV* > *ANT* > *SCE* > *SIQ* > *SAD* > *WS* > *SAN* > *VES*.

O Histograma da Figura 165 apresenta a frequência dos intervalos de valores do índice Rf para o ciclo 360. Os intervalos de 68,00 a 70,00 e de 76,00 a 78,00 do índice Rf representa, cada um, 8,33% das amostras estudadas. O intervalo compreendido entre 80,00 e 82,00 corresponde a 25% das amostras. Já o intervalo entre 82,00 e 84,00 refere-se a frequência de 58,3% das amostras.

As Figuras de 166 até 177 apresentam a variação do índice Rf, com os ciclos do ensaio de alteração natural, de cada amostra estudada.

TABELA 30 – Valores do índice de alterabilidade Rf (Yoshida, 1972) com os ciclos do ensaio de alterabilidade natural.

Ciclos	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
30	85,20	85,90	85,19	82,66	83,38	87,44	85,07	86,12	84,95	86,69	73,35	86,22
60	84,48	85,39	84,68	81,56	82,81	85,11	84,36	85,55	84,08	85,93	70,59	85,24
90	83,02	83,85	83,17	80,81	82,23	83,62	84,19	85,14	83,32	84,65	70,71	84,73
120	83,01	83,87	82,34	81,92	82,20	84,40	83,81	84,85	82,64	84,23	70,72	84,45
150	83,32	83,82	82,69	80,68	81,79	84,53	83,18	84,42	82,37	84,27	70,75	84,37
180	83,79	83,89	82,71	80,63	81,93	84,44	83,15	83,69	82,59	84,47	70,40	84,44
210	83,55	84,08	82,73	80,13	81,81	84,53	83,00	83,65	82,36	84,51	70,11	84,35
240	82,67	84,16	82,67	80,75	81,80	84,64	82,59	83,42	82,68	84,50	69,85	83,98
270	82,67	84,10	82,68	79,96	81,43	83,83	82,05	83,31	82,75	83,99	70,43	83,88
300	82,15	84,14	83,50	79,71	81,80	82,10	81,18	83,30	82,61	83,32	69,46	83,45
330	82,48	84,04	82,71	78,99	80,74	81,96	81,62	83,07	82,61	83,62	69,45	83,70
360	82,56	83,81	82,39	77,65	80,07	81,91	81,48	83,24	82,29	83,40	69,06	83,77

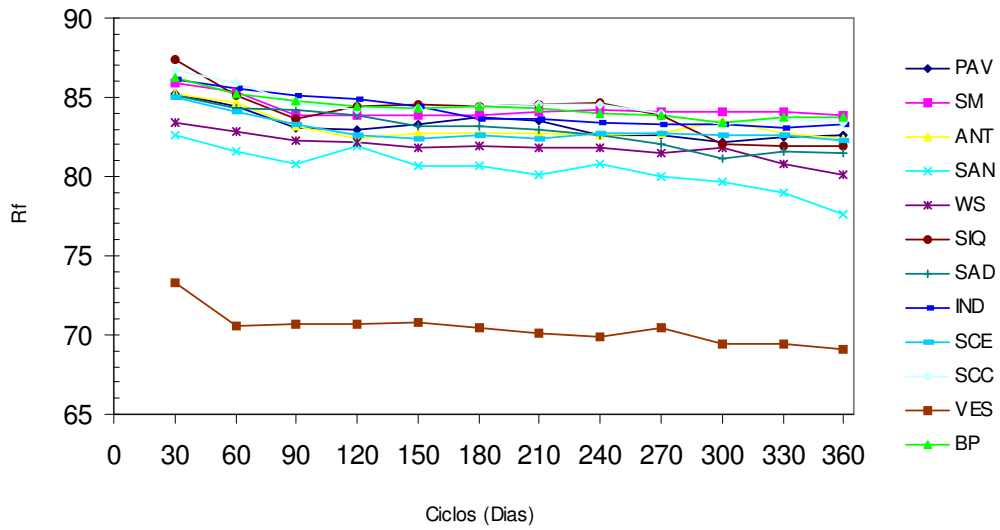


FIGURA 163 - Evolução do Índice de alterabilidade Rf com os ciclos do ensaio de alteração natural.

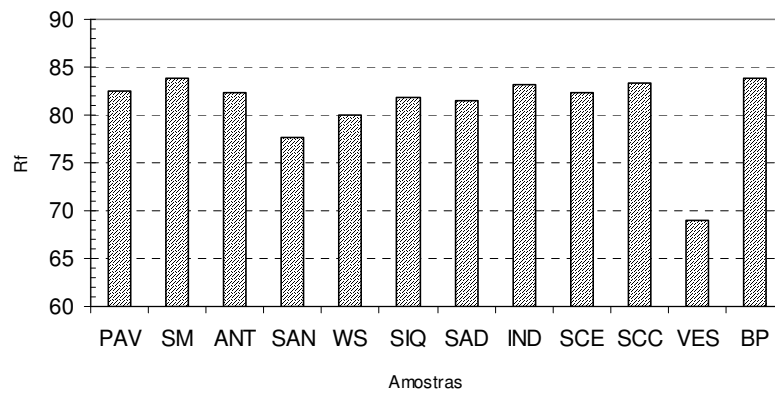


FIGURA 164 – Valores do Índice Rf para o ciclo 360 das amostras estudadas.

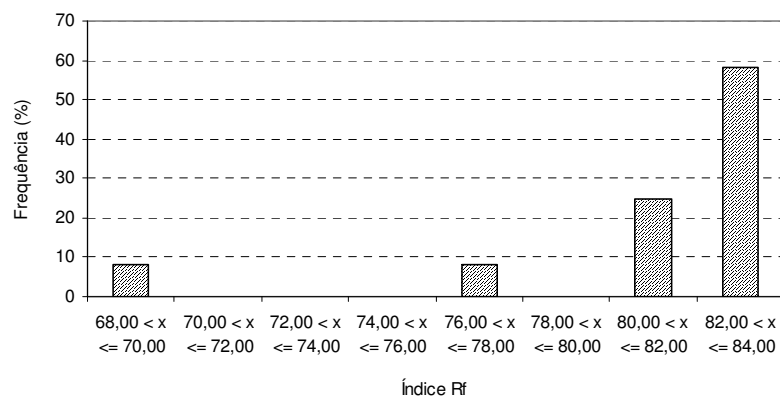


FIGURA 165 - Histograma de distribuição de Frequência de valores do Índice Rf no ensaio de alteração natural.

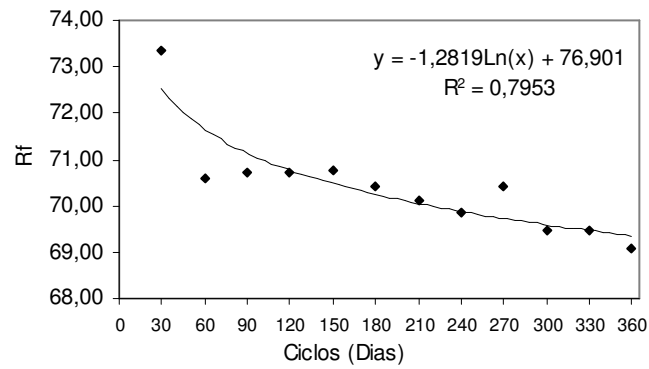


FIGURA 166 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra VES.

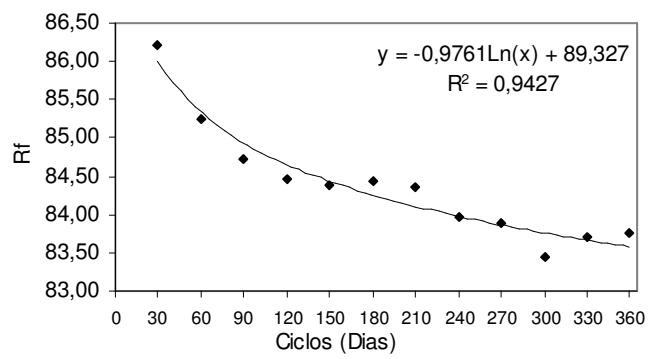


FIGURA 167 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra BP.

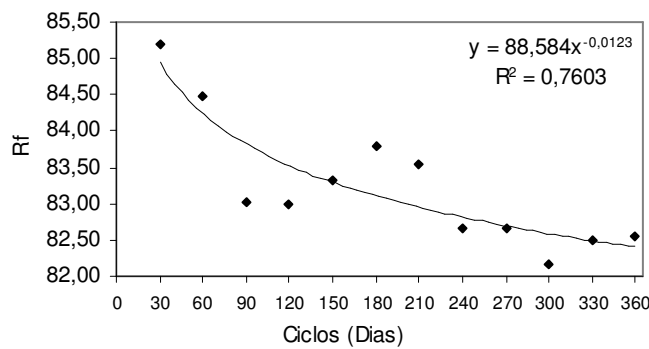


FIGURA 168 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra PAV.

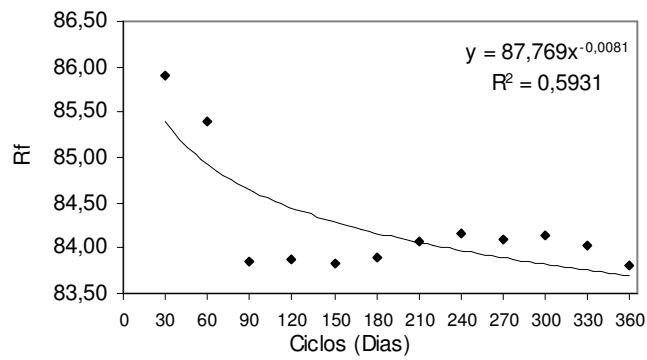


FIGURA 169 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SM.

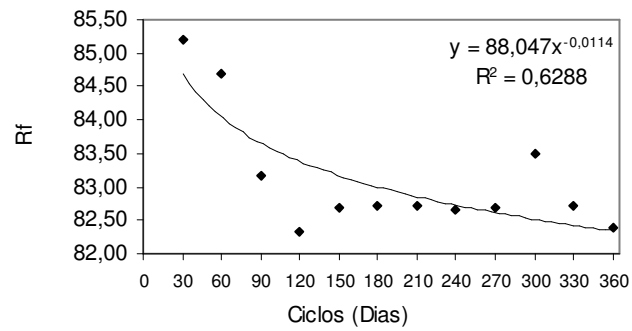


FIGURA 170 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra ANT.

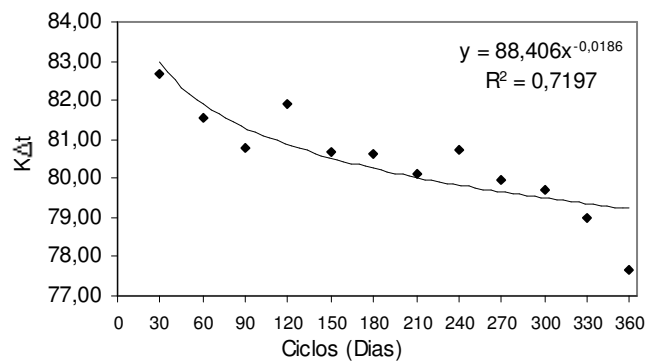


FIGURA 171 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SAN.

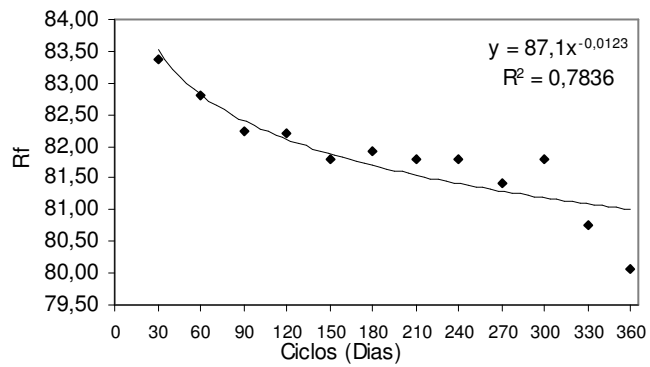


FIGURA 172 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra WS.

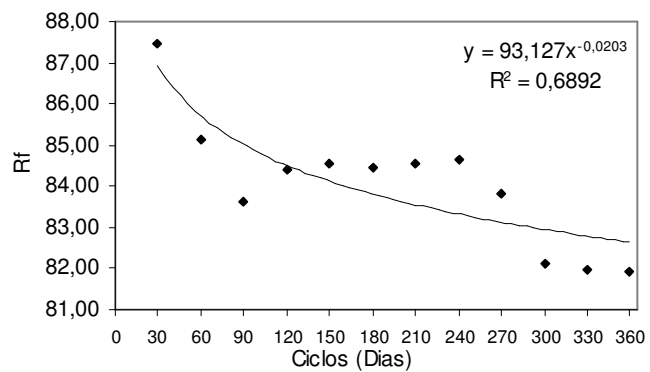


FIGURA 173 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SIQ.

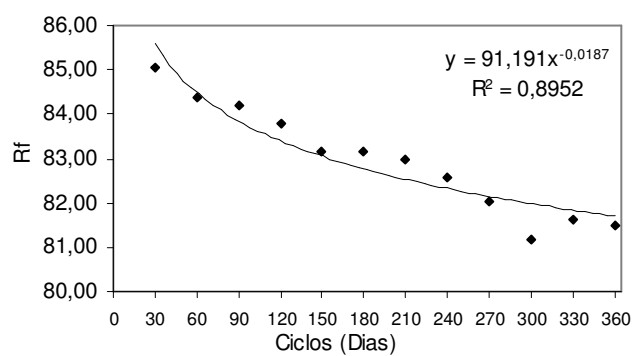


FIGURA 174 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SAD.

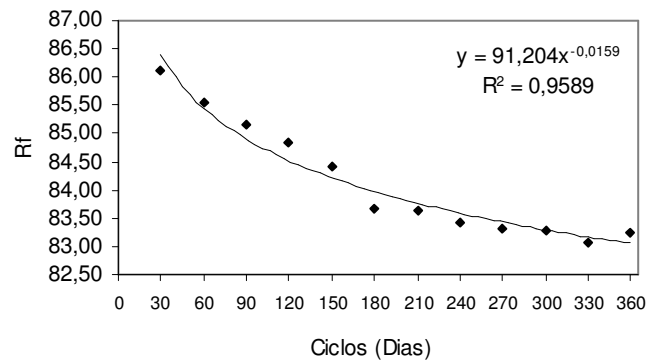


FIGURA 175 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra IND.

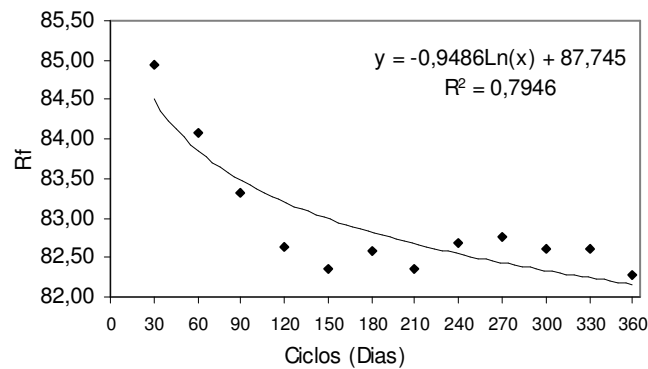


FIGURA 176 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SCE.

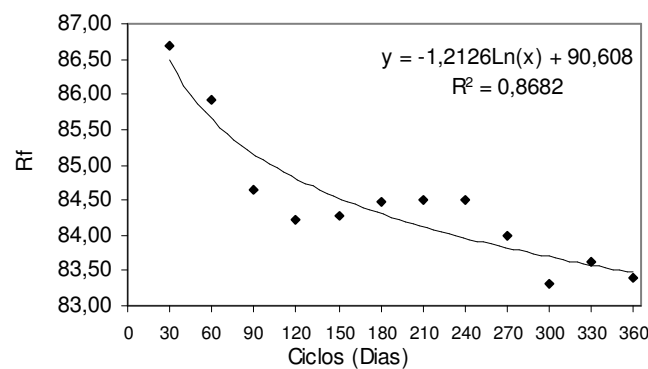


FIGURA 177 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra SCC.

As Figuras 178 e 179 apresentam a correlação entre o índice de alterabilidade Rf com a perda de massa e com o índice de alterabilidade KΔt.

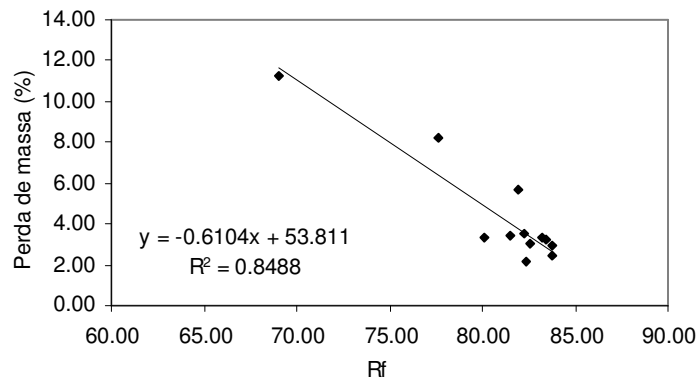


FIGURA 178 – Correlação linear decrescente para correlação entre a perda de massa e o índice de alterabilidade Rf.

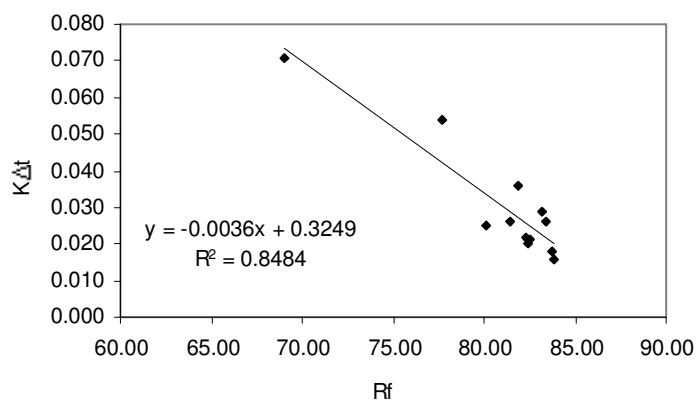


FIGURA 179 - Correlação linear decrescente para correlação entre o índice de alterabilidade KΔt e o índice de alterabilidade Rf.

6.1.4 Análise pela difratometria de raios-x

A difratometria de Raios-X, foi realizada nas amostras correspondentes ao último ciclo do ensaio de alteração natural. Não se observou diferenças significativas entre os difratogramas das não submetidas a ciclagem com as amostras do ciclo 360 do ensaio de alteração natural. Porém, a comparação entre o valor do índice SAI (“*Smectite alteration index*”) (Houston & Smith, 1997) das amostras não cicladas com o índice SAI das amostras

cicladas, demonstra que houve, em alguns casos, o aumento deste índice com a ciclagem (Tabela 31 e Figura 180). Tal fato, reflete o aumento, mesmo que pequeno, do pico da esmectita (15Å) no difratograma, o que provavelmente associa-se a um aumento na quantidade deste argilomineral. As amostras *VES*, *BP*, *SM* não apresentaram este comportamento com relação ao índice SAI.

As Figuras de 181 até 189, apresentam os difratogramas das amostras do ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

TABELA 31 – Valores para o cálculo do índice SAI do ensaio de alteração natural

Amostra	Plagioclásio		Esmectita		SAI 360	SAI *
	“Pico”	“Background”	“Pico”	“Background”		
VES	117	17	61	21	0,400	0,641
SAN	130	17	42	27	0,133	0,015
WS	224	18	44	29	0,073	0,074
SM	170	21	30	24	0,040	0,049
SCE	113	10	32	21	0,107	0,026
IND	151	19	31	23	0,062	0,059
BP	203	21	30	24	0,033	0,070
PAV	111	23	31	25	0,068	0,011
SIQ	181	13	32	24	0,048	0,017

Nota: As amostras *SAD*, *SCC* e *ANT*, foram danificadas durante a preparação deste ensaio e portanto não foram consideradas nas análises. * = Valores do índice SAI dos difratogramas das amostras não cicladas, retirados da Tabela 20.

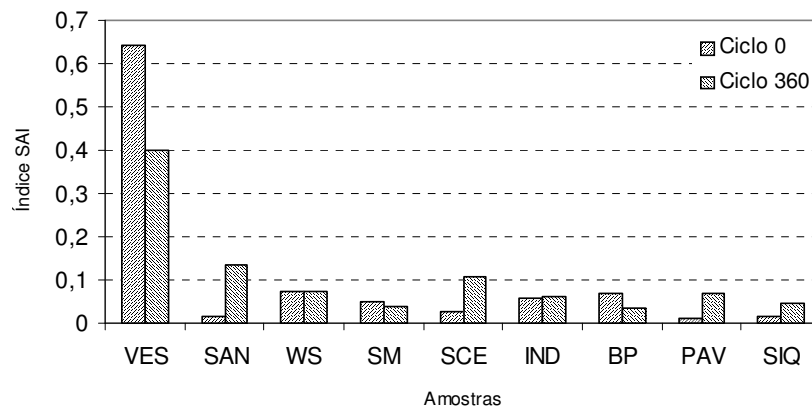


FIGURA 180 – Variação no valor do índice SAI com a ciclagem natural.

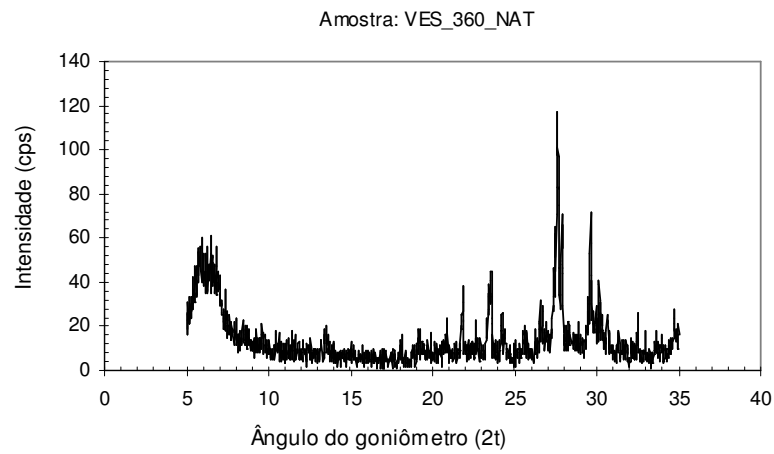


FIGURA 181 – Difratograma da amostra *VES* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

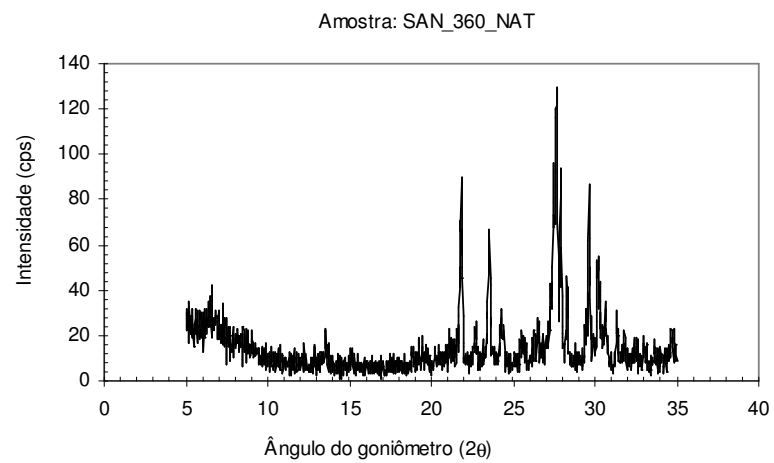


FIGURA 182 – Difratograma da amostra *SAN* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

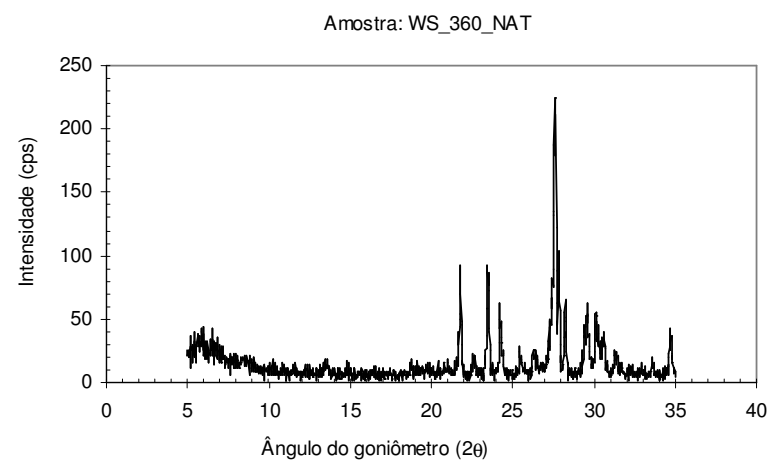


FIGURA 183 – Difratograma da amostra *WS* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

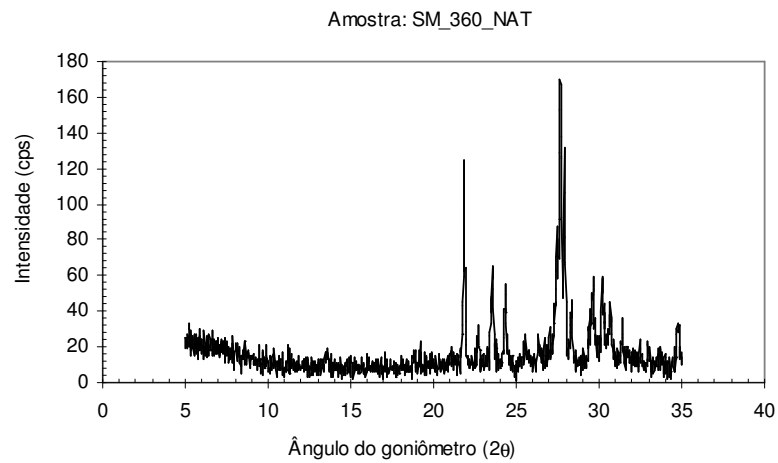


FIGURA 184 – Difratograma da amostra *SM* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

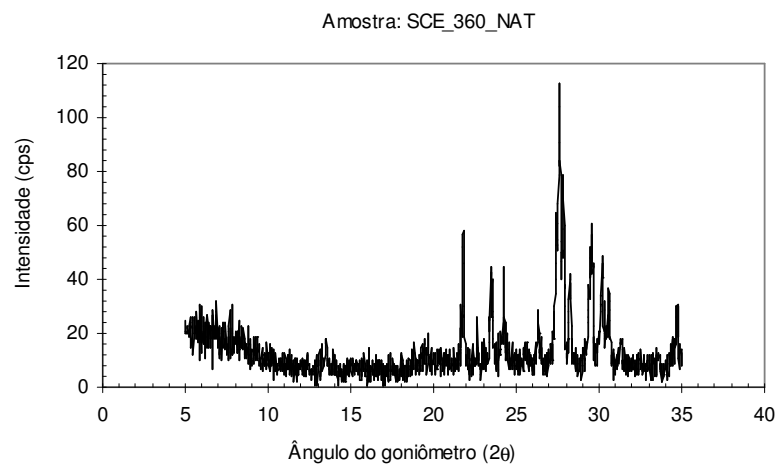


FIGURA 185 – Difratograma da amostra *SCE* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

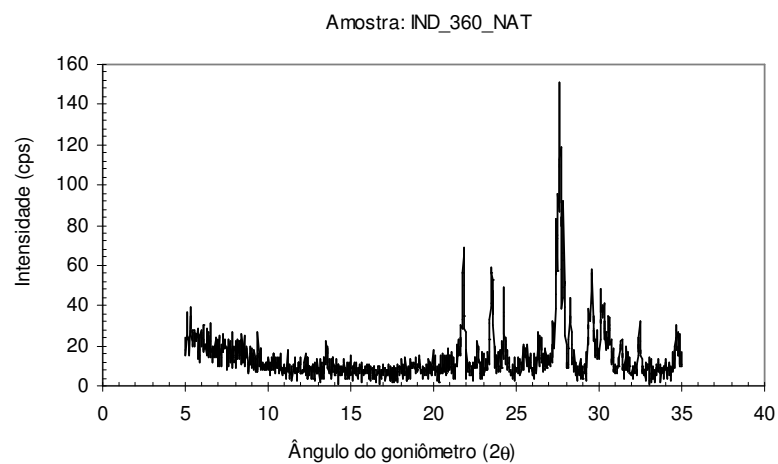


FIGURA 186 – Difratograma da amostra *IND* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

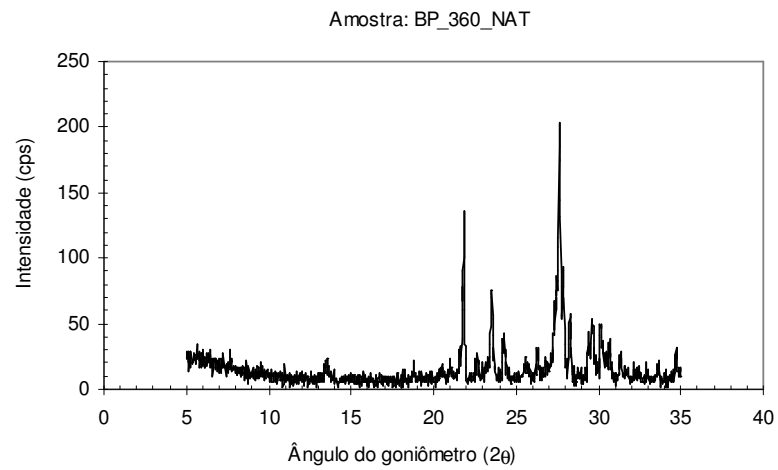


FIGURA 187 – Difratograma da amostra *BP* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

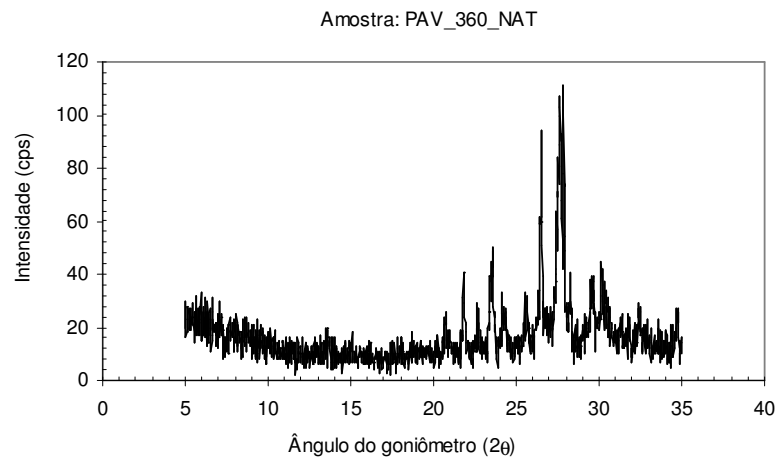


FIGURA 188 – Difratograma da amostra *PAV* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

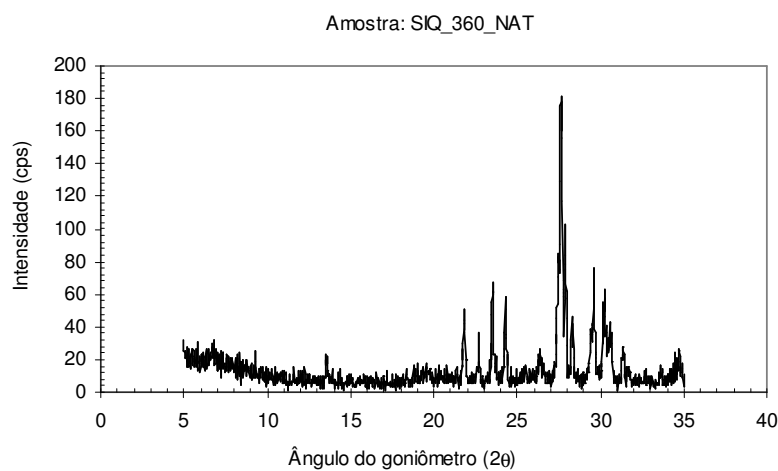


FIGURA 189 – Difratograma da amostra *SIQ* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

As Figuras 190,191 e 192 apresentam as correlações entre o índice SAI com a perda de massa, com com o índice de alterabilidade $K\Delta t$ e com o índice de alterabilidade RF.

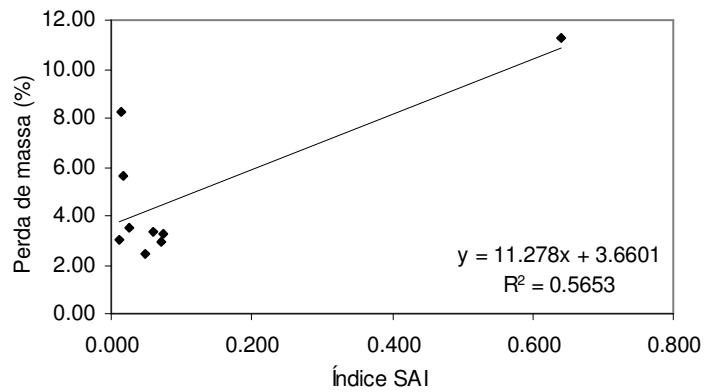


FIGURA 190 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI com a perda de massa

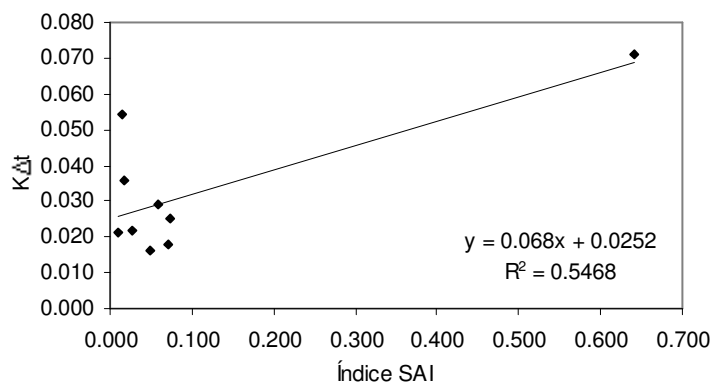


FIGURA 191 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

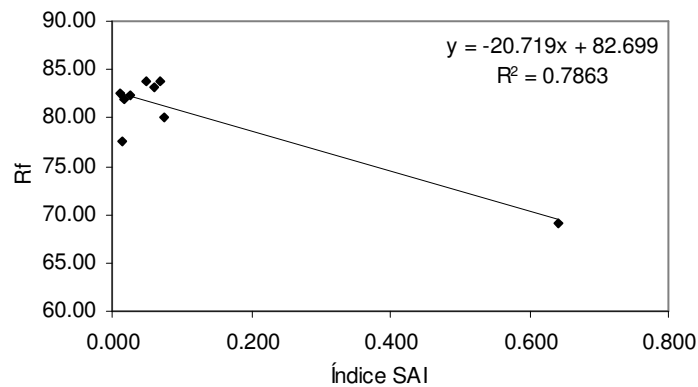


FIGURA 192 – Regressão linear decrescente para correlação entre o índice SAI com o índice de alterabilidade Rf.

6.1.5 Análise da adsorção de azul de metileno

Para análise da variação dos valores de adsorção de azul de metileno das amostras com a ciclagem natural, optou-se pela medida de adsorção a cada 120 ciclos, ou seja, a cada 4 meses de intervalo. Os resultados encontrados foram bastante satisfatórios, pois retratam de maneira clara a continuidade ou o aumento da quantidade de argilominerais expansivos presentes na amostra durante a ciclagem natural.

A Tabela 32 e a Figura 193 apresentam os resultados dos valores de adsorção de azul de metileno relacionados aos ciclos 0, 120, 240 e 360 do ensaio de alteração natural.

TABELA 32 – Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno nos ciclos 120, 240 e 360 do ensaio de alteração natural.

Amostra	MBA (g/100g)			
	Ciclo 0	Ciclo 120	Ciclo 240	Ciclo 360
VES	2,41	2,45	2,39	2,71
SIQ	0,68	0,75	0,87	1,05
WS	0,90	0,96	1,05	1,04
PAV	0,22	0,22	0,30	0,30
SAN	0,60	0,9	0,82	0,90
ANT	0,60	0,6	0,60	0,73
BP	0,45	0,45	0,45	0,52
SM	0,37	0,44	0,45	0,45
IND	0,22	0,23	0,30	0,30
SAD	0,22	0,3	0,30	0,33
SCC	0,22	0,23	0,30	0,37
SCE	0,52	0,61	0,60	0,75

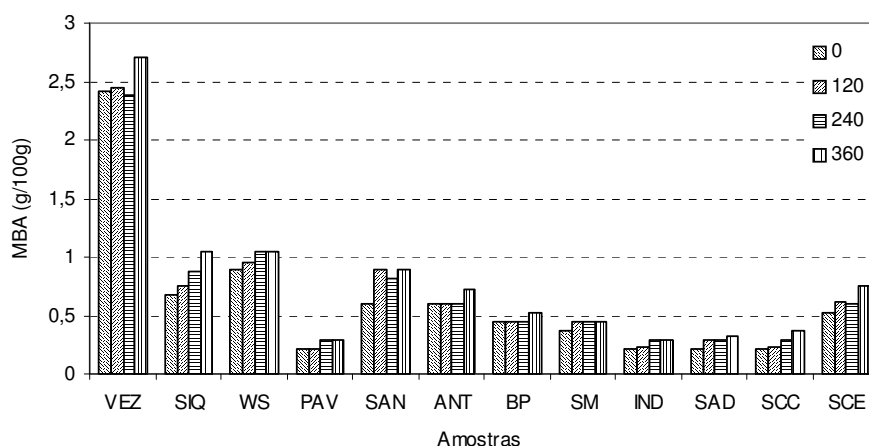


FIGURA 193 – Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem natural.

O maior valor de adsorção de azul de metileno, medido para o ciclo 360, foi de 2,71 (g/100g), correspondente a amostra *VES*. Já o menor valor, 0,30 (g/100g), refere-se as amostras *IND* e *PAV*.

As Figura de 194 a 197 apresentam as correlações entre a adsorção de azul de metileno com a perda de massa, com o índice de alterabilidade $K\Delta t$, com o índice de alterabilidade RF e com o índice SAI.

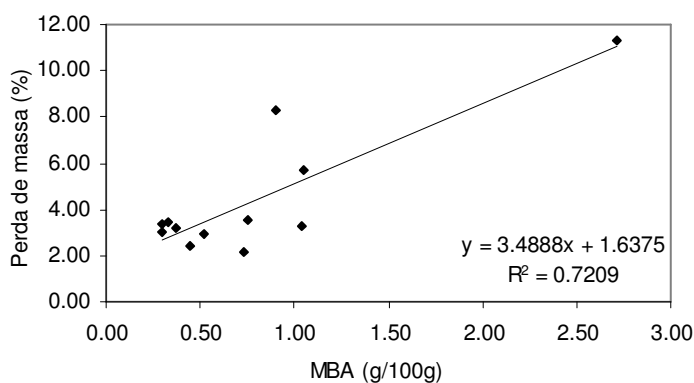


FIGURA 194 – Regressão Linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno e a perda de massa.

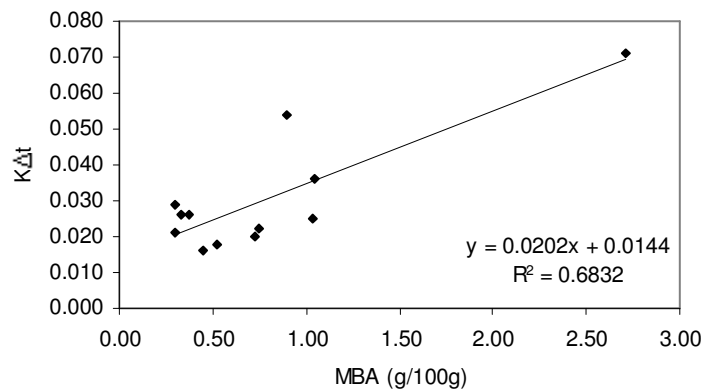


FIGURA 195 – Regressão Linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno e o índice de alterabilidade KΔt.

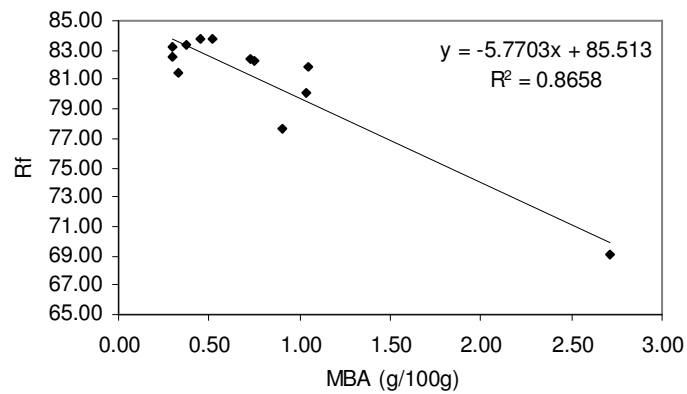


FIGURA 196 – Regressão Linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno e o índice de alterabilidade Rf.

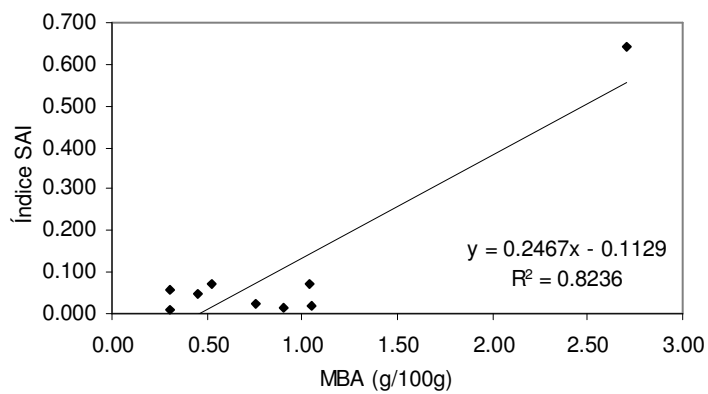


FIGURA 197 – Regressão Linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno e o índice SAI.

6.2 Ensaios de Alteração Acelerada

A alteração acelerada objetiva a determinação da resistência à alteração de materiais rochosos, submetidos a ciclos de saturação em água, a temperatura ambiente e secagem em estufa, a temperaturas que variam de 80° – 100°C. Na alteração acelerada por lixiviação contínua, utiliza-se o extrator “Soxhlet” na tentativa de simular as condições naturais de alteração, porém em velocidade muito maior. A ciclagem no extrator “Soxhlet” provoca a lixiviação contínua devido ao fato de a água percolar a amostra a uma temperatura que varia de 60° – 70°C.

Tanto o umedecimento e secagem quanto a lixiviação contínua, solicitam as rochas por remoção iônica, decorrente da lixiviação de íons de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, além de promover a hidratação de minerais secundários através da saturação em água, a temperatura ambiente (umedecimento e secagem) ou aquecida (extrator “Soxhlet”).

Neste trabalho, optou-se pela medida das concentrações dos íons Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ e K^+ da solução de saturação das amostras o que promoveu uma modificação no ensaio de umedecimento e secagem tradicional. Desta maneira, não houve a substituição do líquido de saturação (água destilada) das amostras, durante os vários ciclos do ensaio. Para tanto, optou-se pela modificação no aparato de secagem do material, havendo a substituição da estufa elétrica por recipientes de secagem individual. Desta forma, cada amostra foi colocada em recipientes plásticos dotados de um dreno que foi utilizado para coleta da solução de saturação. Como forma de secagem do material utilizou-se lâmpadas de infra vermelho de 250 watts de potência, acopladas a cada recipiente individual. No ensaio por lixiviação contínua coletou-se amostra da solução de lixiviação diretamente do “balão”, presente no aparelho “Soxhlet”.

Os ciclos de saturação e secagem foram definidos em intervalos diários de 16 e 8 horas, respectivamente. No caso da lixiviação contínua, cada ciclo de saturação e secagem durou aproximadamente 6 horas.

Com relação às medidas de perda de massa e a de resistência mecânica, o procedimento foi semelhante ao ensaio de alteração natural, ou seja os ciclos de avaliação foram 20, 70 e 100, para o ensaio de umedecimento e secagem, e 30, 60 e 100 para a ciclagem no extrator “Soxhlet”. Feito isto, as amostras foram submetidas a ensaios de

difração de Raios-X e adsorção de azul de metileno. Observações ao microscópio eletrônico de varredura, também foram realizadas nas amostras cicladas. As Tabelas 33 e 34 apresentam os resultados dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e por lixiviação contínua, respectivamente.

TABELA 33 – Resultados do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

	Ciclos	Perda de Massa (%)	Resistência (%)	Índice K Δ t	Índice Rf	Índice SAI	MBA (g/100g)
PAV	20	0,65	14,48	0,006	84,97	-	0,22
	70	2,34	14,83	0,017	83,18	-	0,24
	100	2,22	15,94	0,022	82,19	0,299	0,30
SM	20	0,34	14,12	0,005	85,59	-	0,37
	70	0,56	14,08	0,005	85,43	-	0,37
	100	1,55	14,42	0,013	84,25	0,185	0,37
ANT	20	0,89	14,19	0,005	85,05	-	0,60
	70	1,87	14,43	0,012	83,97	-	0,60
	100	2,61	14,78	0,017	82,99	0,078	0,60
SAN	20	2,08	13,81	0,013	84,40	-	0,60
	70	6,96	14,13	0,041	79,89	-	0,70
	100	8,59	14,63	0,052	78,04	0,246	0,81
WS	20	1,17	16,19	0,008	82,83	-	0,82
	70	0,19	16,80	0,006	83,04	-	0,85
	100	2,13	17,09	0,018	81,14	0,049	0,97
SIQ	20	0,31	12,36	0,004	87,37	-	0,67
	70	1,64	12,65	0,012	85,91	-	0,67
	100	4,81	13,16	0,032	82,66	0,034	0,67
SAD	20	0,26	14,88	0,004	84,90	-	0,22
	70	1,95	15,56	0,017	82,79	-	0,29
	100	2,30	16,11	0,022	81,96	0,100	0,38
IND	20	0,42	12,71	0,007	86,92	-	0,22
	70	1,24	13,99	0,018	84,94	-	0,26
	100	3,23	14,06	0,029	83,16	0,155	0,30
SCE	20	1,15	14,21	0,007	84,81	-	0,52
	70	3,14	14,86	0,021	82,47	-	0,56
	100	2,42	14,88	0,017	83,06	0,092	0,60
SCC	20	0,63	12,74	0,006	86,71	-	0,22
	70	1,86	13,16	0,015	85,22	-	0,24
	100	3,12	13,24	0,022	84,05	0,107	0,30
VES	20	2,70	20,63	0,015	77,23	-	2,40
	70	5,68	22,13	0,040	73,45	-	2,42
	100	12,90	23,26	0,086	66,84	0,382	2,50
BP	20	0,52	13,39	0,003	86,16	-	0,44
	70	1,11	13,68	0,008	85,36	-	0,52
	100	2,93	13,70	0,018	83,77	0,142	0,60

6.2.1 Análise da Perda de Massa

A evolução da perda de massa com a ciclagem dos ensaios de alteração por umedecimento e secagem, pode ser vista no gráfico da Figura 198.

A perda de massa referente ao ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem, mostra valores máximos e mínimos, correspondentes, respectivamente, a 12,90 % (*VES*) e 1,55 % (*SM*). Nota-se, ainda, que as amostras *VES*, *SAN* e *SIQ*, destacam-se das demais conforme verificado, também, no ensaio de alteração natural. Verifica-se, por outro lado, uma maior concentração de amostras correspondentes ao intervalo de perda de massa variando de 0 a aproximadamente 3% (Figura 199). Classificando-se decrescente e hierarquicamente as amostras com relação à perda de massa no ciclo 100 têm-se: *VES*> *SAN*> *SIQ*> *IND*> *SCC*> *BP*> *ANT*> *SCE*> *PAV*> *SAD*> *WS*> *SM*.

TABELA 34 – Resultados do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua com o uso do extrator “soxhlet”.

	Ciclos	Perda Massa (%)	Resistência (%)	Índice KDt	Índice Rf	Índice SAI	MBA (g/100g)
<i>PAV</i>	30	1,16	14,12	0,007	84,88	-	0,37
	60	0,63	14,30	0,005	85,16	-	0,37
	100	1,50	14,28	0,010	84,43	0,009	0,37
<i>SM</i>	30	3,94	13,89	0,023	82,72	-	0,45
	60	3,08	14,59	0,022	82,78	-	0,53
	100	1,56	14,60	0,014	84,06	0,110	0,55
<i>ANT</i>	30	1,30	14,21	0,007	84,68	-	0,6
	60	1,18	14,36	0,007	84,63	-	1,02
	100	1,36	14,78	0,011	84,06	-	1,21
<i>SAN</i>	30	4,37	13,85	0,025	82,38	-	1,05
	60	3,02	14,20	0,020	83,21	0,161	1,60
<i>WS</i>	60	1,36	16,03	0,008	82,83	-	0,90
	100	2,48	16,12	0,015	81,80	-	1,21
<i>SIQ</i>	60	1,40	12,81	0,012	85,97	-	1,05
	100	2,48	13,12	0,019	84,73	0,089	1,19
<i>SAD</i>	30	1,09	14,21	0,005	84,86	-	0,45
	60	1,10	14,76	0,008	84,30	-	0,45
	100	1,32	15,92	0,016	82,97	0,130	0,45
<i>IND</i>	30	1,32	12,56	0,011	86,29	-	0,29
	60	2,28	13,72	0,022	84,32	-	0,30
	100	2,35	14,08	0,024	83,90	-	0,30
<i>SCE</i>	60	4,47	14,36	0,025	81,81	-	0,60
	100	2,92	14,85	0,020	82,67	0,154	0,60
<i>SCC</i>	30	2,55	13,08	0,018	84,71	-	0,30
	60	2,31	13,84	0,021	84,17	-	0,30
	100	2,18	14,11	0,022	84,02	0,200	0,30
<i>VES</i>	30	6,18	22,13	0,042	73,06	-	2,41
	60	6,17	23,16	0,048	72,10	0,459	2,48
<i>BP</i>	60	1,66	13,85	0,012	84,72	-	0,54
	100	1,83	14,12	0,014	84,31	-	0,55

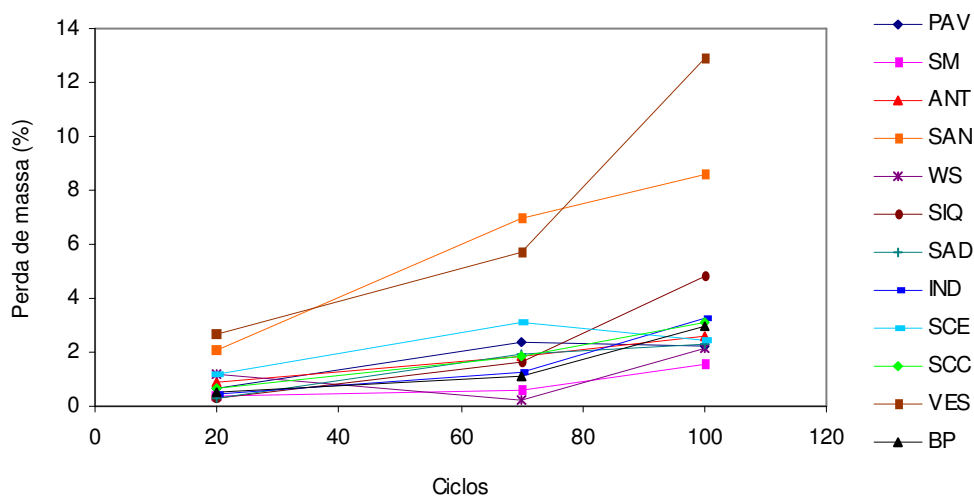


FIGURA 198 - Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

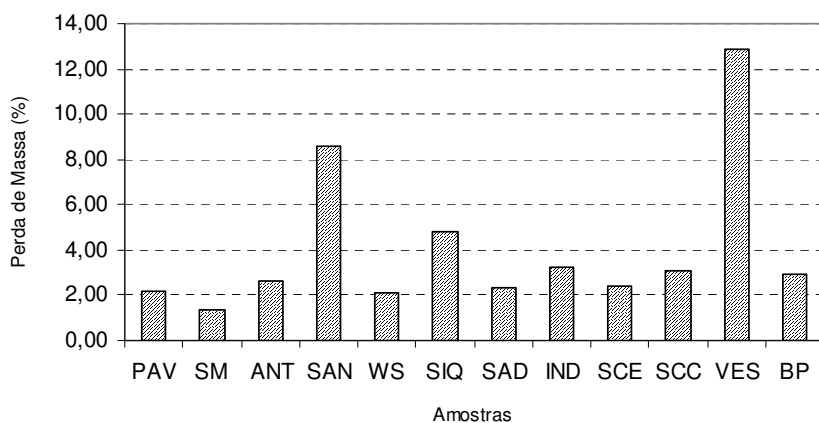


FIGURA 199 – Valores de perda de massa no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.

A Figura 200 apresenta o histograma de frequência dos intervalos de valores de perda de massa no ciclo 100. Os intervalos de 0 a 2%, de 4 a 6%, de 8 a 10% e de 12 a 14% são representados, cada um, por cerca de 8,33% das amostras. Já o intervalo entre 2 e 4% representa 66,68% dos valores encontrados.

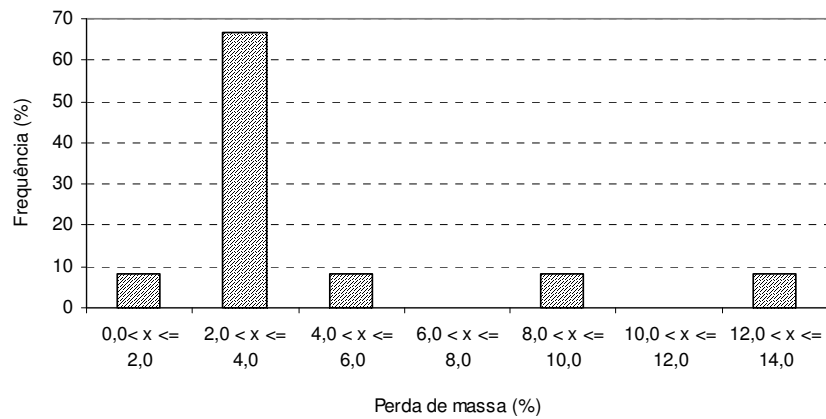


FIGURA 200 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de perda de massa por umedecimento e secagem.

As Figuras de 201 a 212, apresentam os gráficos da perda de massa com a ciclagem de cada amostra estudada.

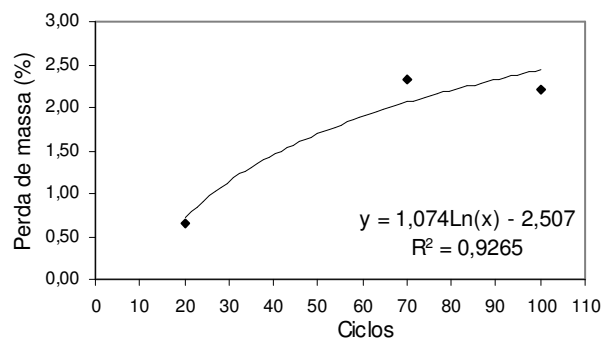


FIGURA 201 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra PAV.

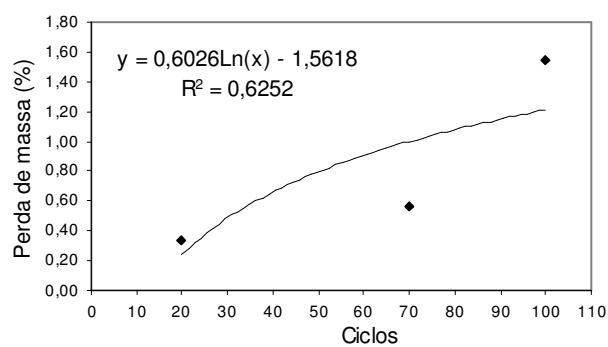


FIGURA 202 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SM.

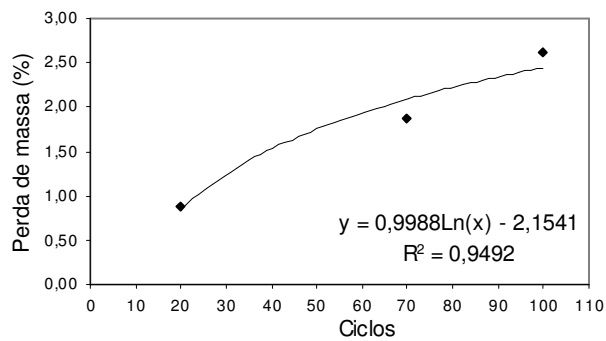


FIGURA 203 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra ANT.

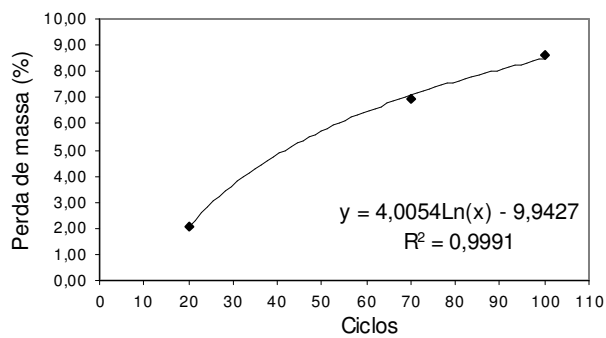


FIGURA 204 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SAN.

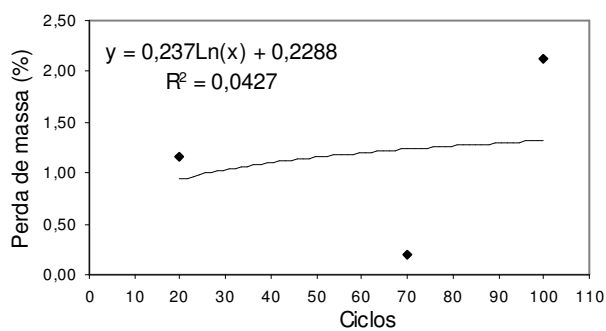


FIGURA 205 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra WS.

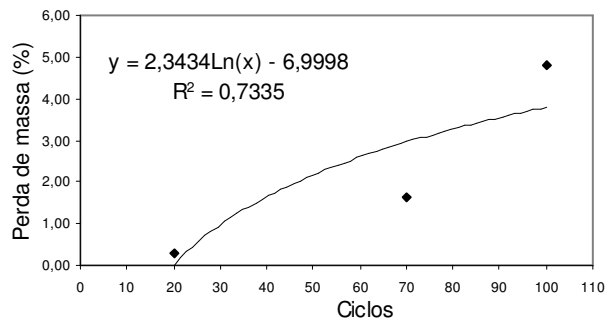


FIGURA 206 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SIQ.

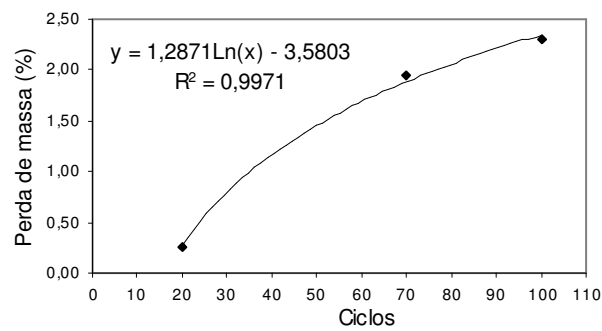


FIGURA 207 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SAD.

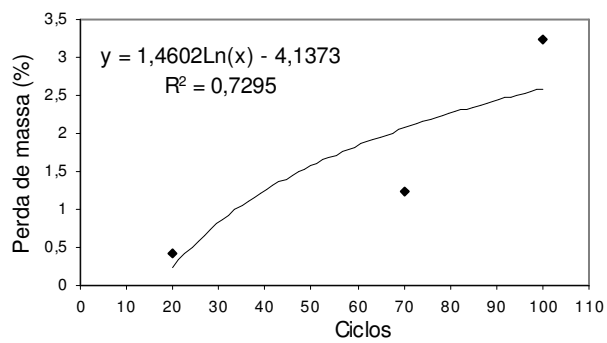


FIGURA 208 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra IND.

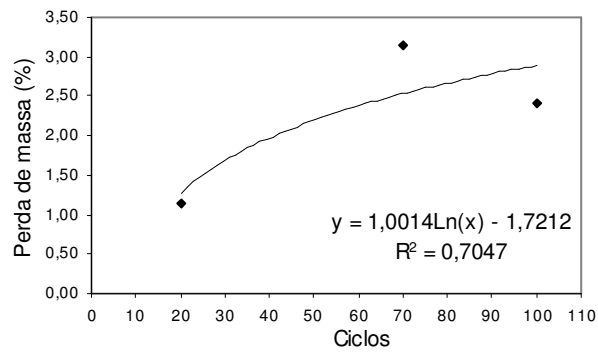


FIGURA 209 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SCE.

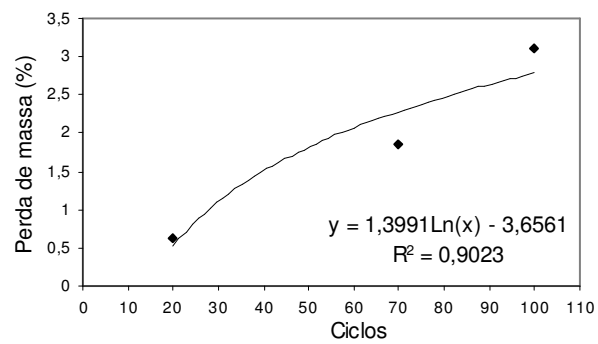


FIGURA 210 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SCC.

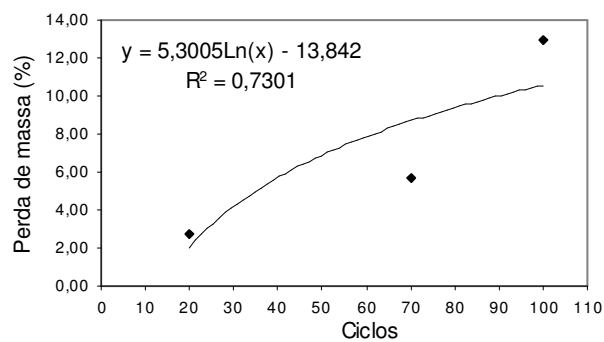


FIGURA 211 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra VES.

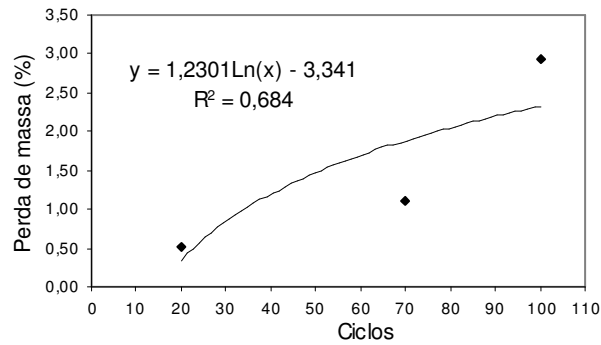


FIGURA 212 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra BP.

Os resultados do ensaio de alteração por lixiviação contínua, mostraram uma tendência de maiores valores de perda de massa para os primeiros 30 ciclos do ensaio (Figura 213). Este fato, possivelmente decorre do posicionamento da amostra, no ciclo 30, próxima a saída de vapor do aparelho Soxhlet. Algumas amostras, por motivos operacionais do extrator “Soxhlet”, não foram submetidas aos 100 ciclos do ensaio. Por este motivo optou-se pela análise das perdas de massa no ciclo intermediário do ensaio, o ciclo 60. A classificação hierárquica das amostras (Figura 214), com relação a perda de massa no ciclo 60 é: VES> SCE> SM> SAN> SCC> IND> BP> SIQ> WS> ANT> SAD> PAV.

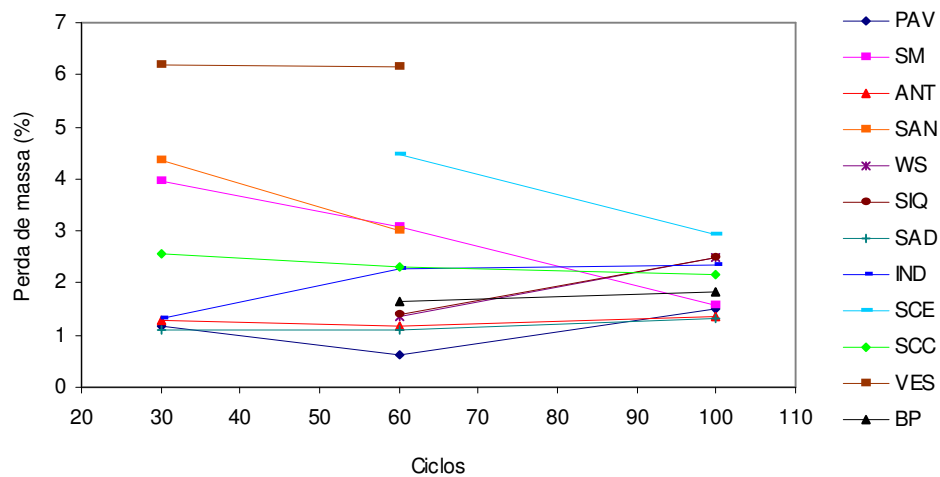


FIGURA 213 - Evolução da perda de massa com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua.

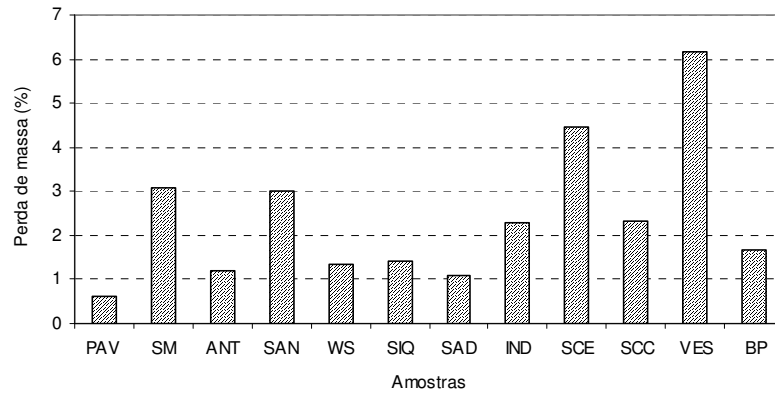


FIGURA 214 – Valores de perda de massa para o ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.

De acordo com o histograma de distribuição de frequência dos valores de perda de massa pela lixiviação contínua (Figura 215), tem-se que os intervalos de 0 a 1%, de 4 a 5% e de 6 a 7% representam, individualmente, cerca de 8,33% das amostras, enquanto que os intervalos de 2 a 3% e de 3 a 4%, representam, cada, cerca de 16,64% dos valores das amostras. Já o intervalo entre 1 e 2%, representa a maioria das amostra estudadas, ou seja, 41,73%.

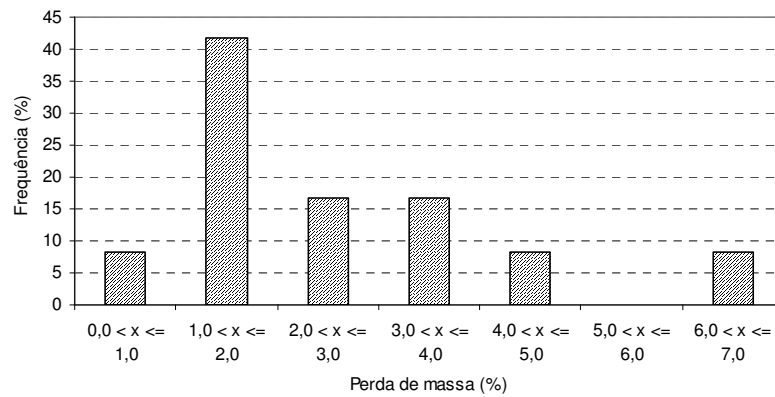


FIGURA 215 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de perda de massa pela lixiviação contínua.

As figuras de 216 a 227, apresentam a evolução da perda de massa com a ciclagem pelo extrator “soxhlet” das amostras estudadas.

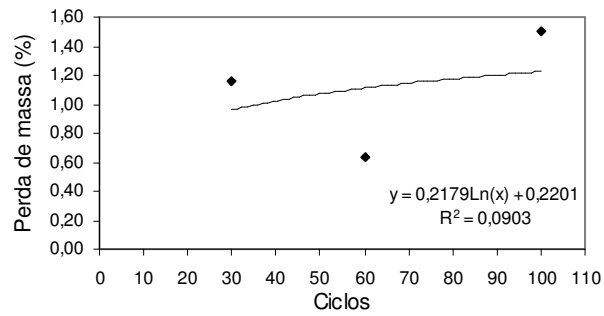


FIGURA 216 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra PAV.

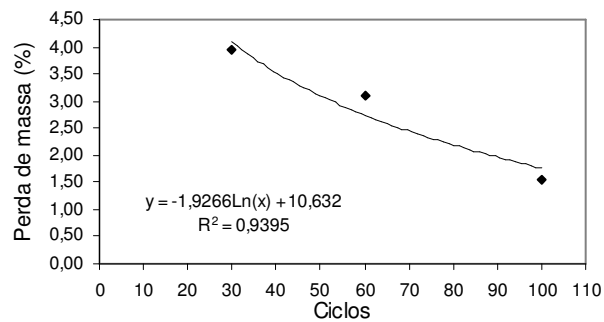


FIGURA 217 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SM.

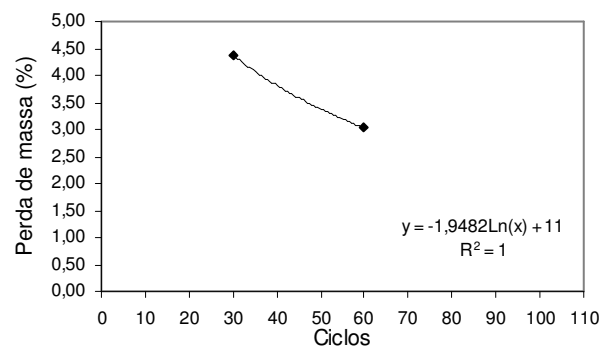


FIGURA 218 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SAN.

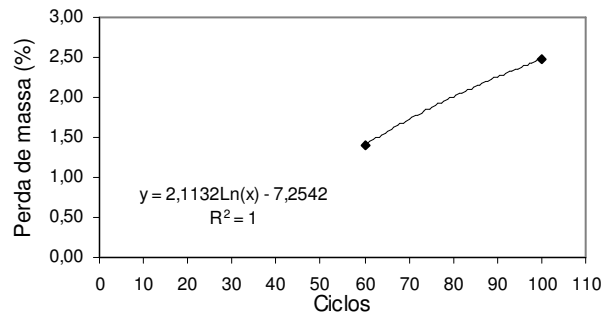


FIGURA 219 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SIQ.

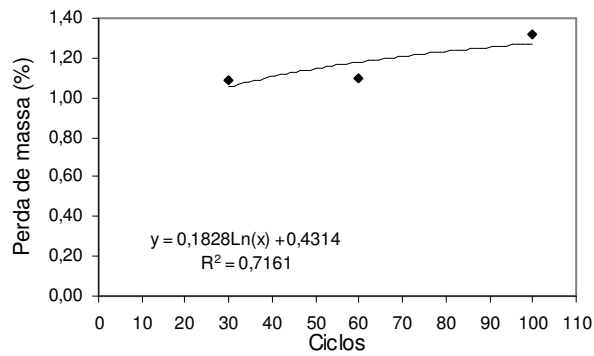


FIGURA 220 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SAD.

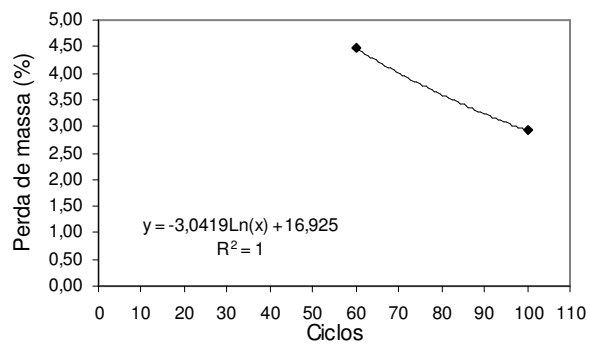


FIGURA 221 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SCE.

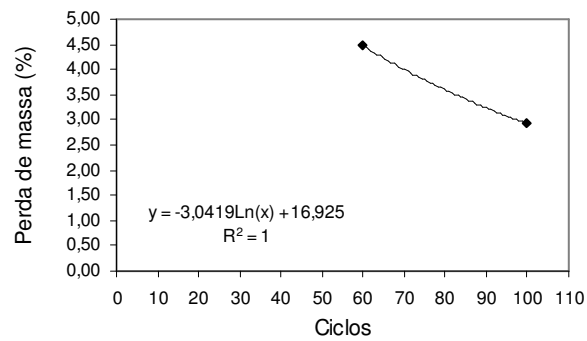


FIGURA 222 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SCC.

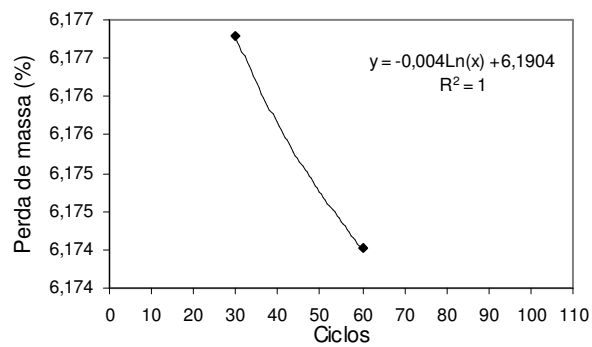


FIGURA 223 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra VES.

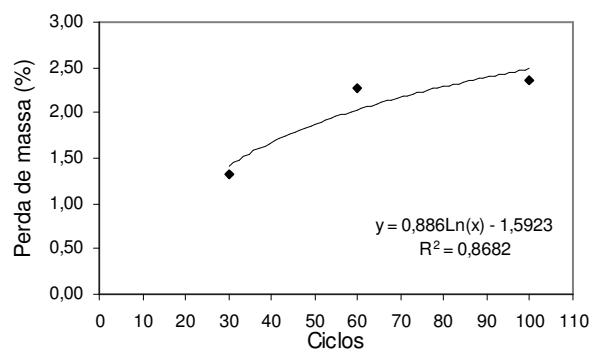


FIGURA 224 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra IND.

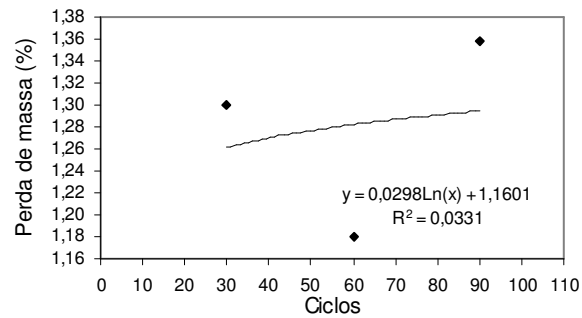


FIGURA 225 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra ANT.

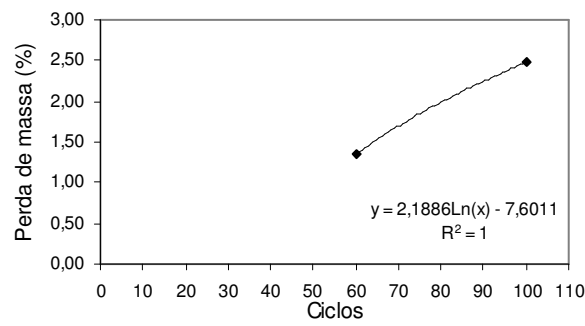


FIGURA 226 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra WS.

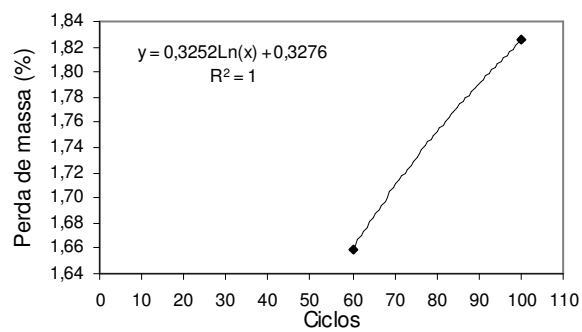


FIGURA 227 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra BP.

6.2.2 Índices de Alterabilidade

A Figura 228 demonstra claramente a evolução do índice de alterabilidade $K\Delta t$ com a ciclagem por umedecimento e secagem. Depreende-se que as amostras *VES* e *SAN* possuem comportamento diferenciado em comparação aos valores deste índice para as outras amostras. Analisando-se o ciclo 100, a amostra *VES* possui valor de índice $K\Delta t$ de 0,086, enquanto que a amostra *SAN* o valor deste índice é de 0,052. Já o restante das amostras possui valores que variam de 0,013 até 0,032, correspondentes, respectivamente, as amostras *SM* e *SIQ*. Desta forma, com relação aos valores do índice $K\Delta t$ do ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem (Figura 229), têm-se a seguinte hierarquia das amostras: *VES* > *SAN* > *SIQ* > *IND* > *SCC* > *SAD* > *PAV* > *SCE* > *BP* > *WS* > *ANT* > *SM*.

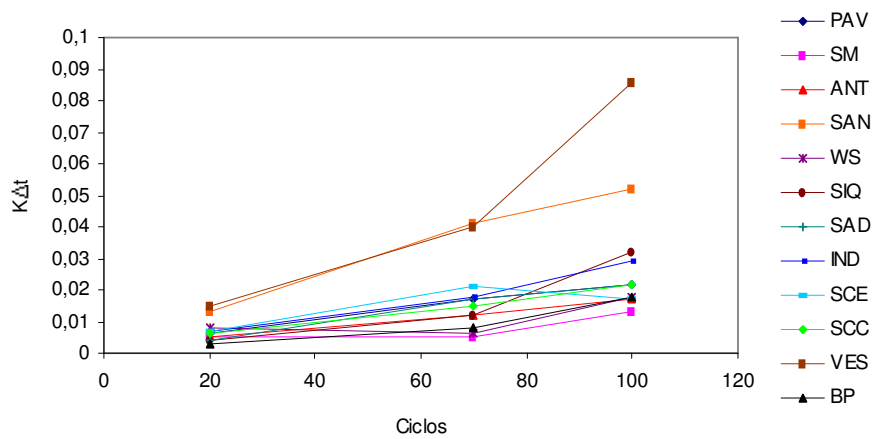


FIGURA 228 - Evolução do índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

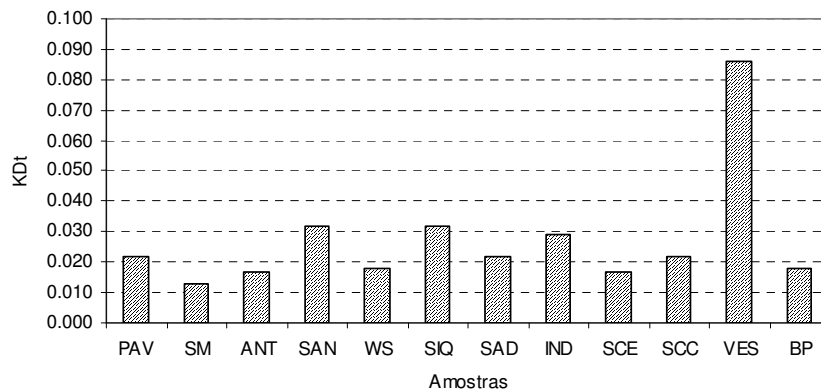


FIGURA 229 - Valores do índice $K\Delta t$ no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.

O histograma da Figura 230, apresenta a frequência dos intervalos de valores para o índice $K\Delta t$ do ensaio de umedecimento e secagem. Depreende-se que os intervalos de valores entre 0,00 a 0,02, de 0,02 a 0,03 e de 0,03 até 0,04, representam a grande maioria das amostras, respectivamente, com 41,66%, 33,33% e 16,66%. O intervalo entre 0,08 e 0,09 representa o valor da amostra *VES*, que corresponde estatisticamente a 8,33% dos valores das amostras.

As figuras de 231 a 242, apresentam os valores do índice $K\Delta t$ com a ciclagem das amostras estudadas.

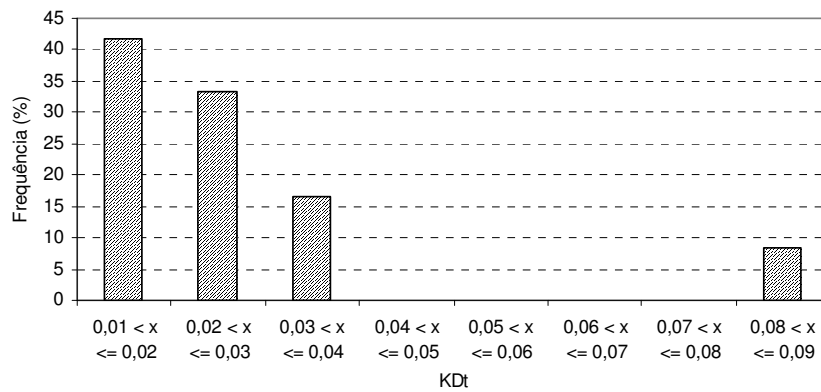


FIGURA 230 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ do ensaio de umedecimento e secagem.

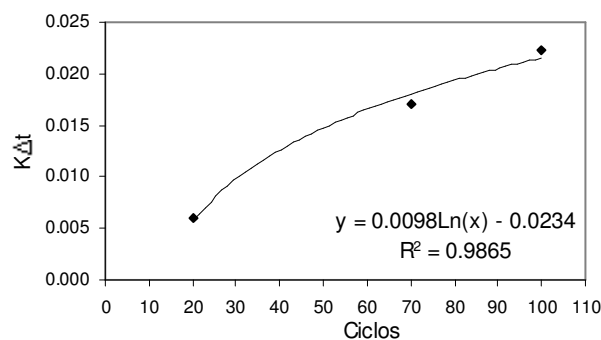


FIGURA 231 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *PAV*.

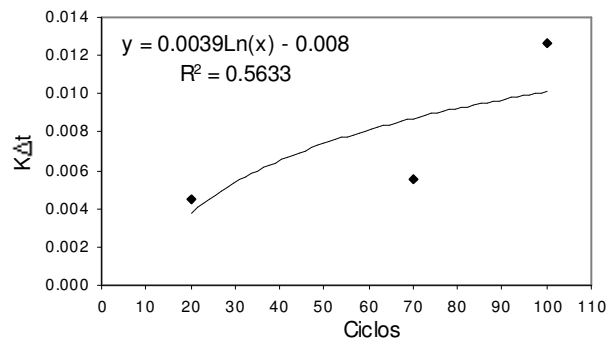


FIGURA 232 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SM*.

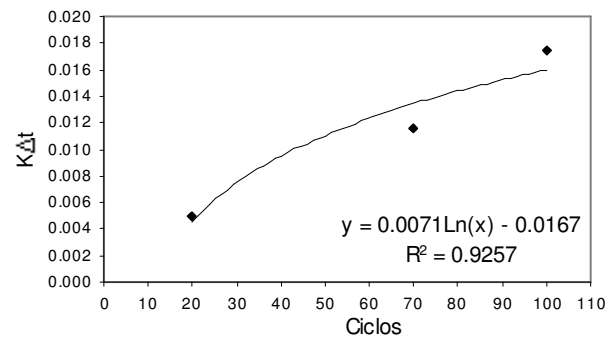


FIGURA 233 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *ANT*.

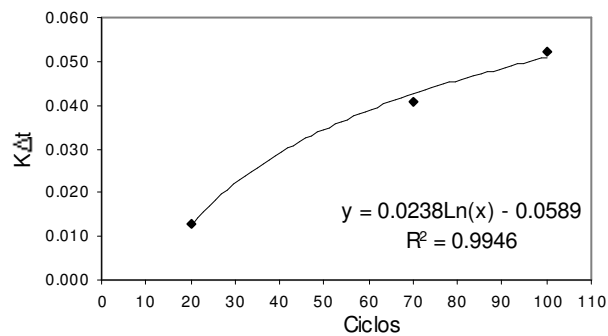


FIGURA 234 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SAN*.

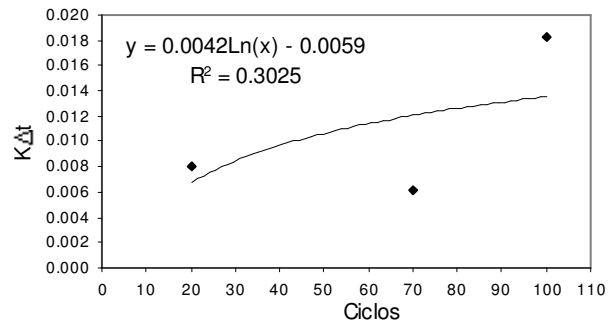


FIGURA 235 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra WS.

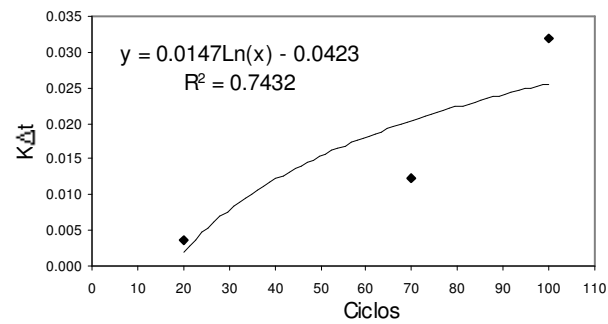


FIGURA 236 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SIQ.

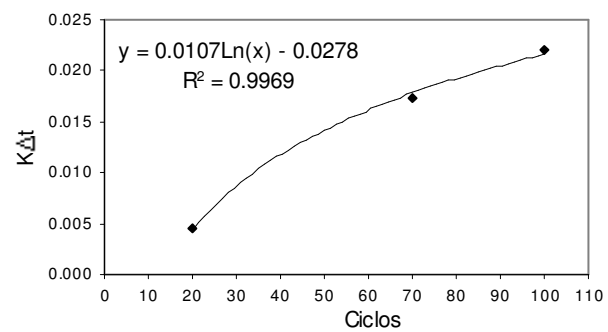


FIGURA 237 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SAD.

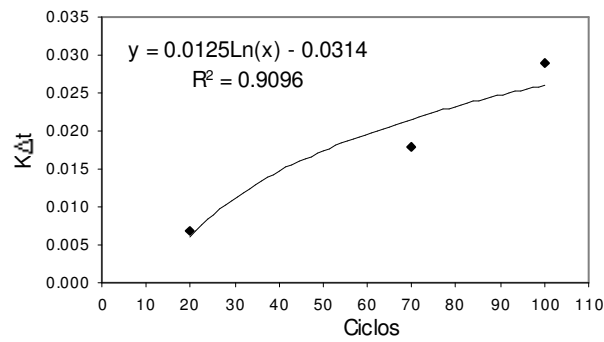


FIGURA 238 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *IND*.

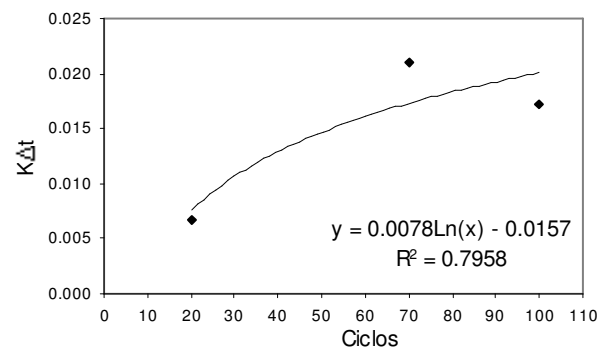


FIGURA 239 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SCE*.

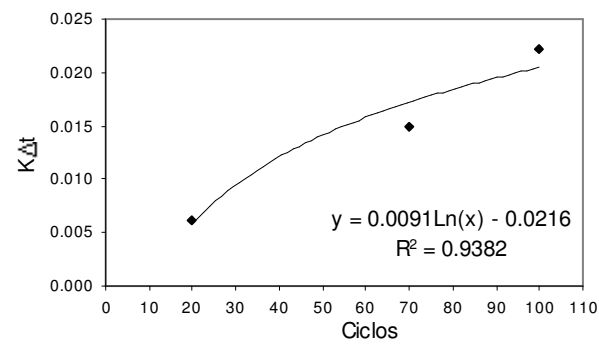


FIGURA 240 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SCC*.

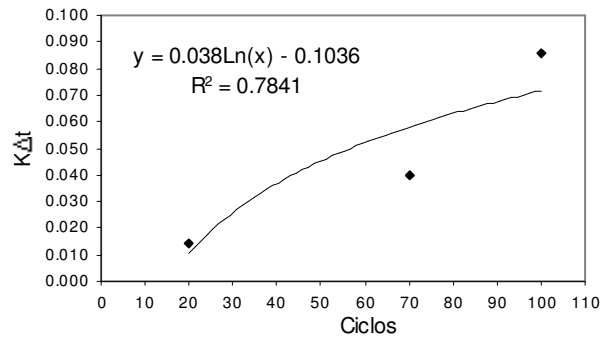


FIGURA 241 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *VES*.

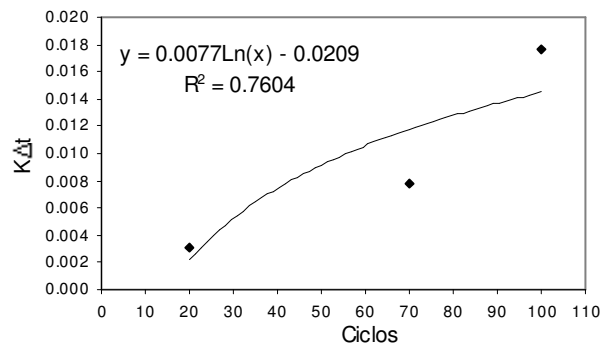


FIGURA 242 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *BP*.

Com relação ao índice $K\Delta t$ para o ensaio com o uso do extrator “Soxhlet”, nota-se o agrupamento de amostras com valores abaixo de 0,03 (Figura 243). O destaque se dá a amostra *VES*, com valor de $K\Delta t = 0,048$. As amostras foram classificadas hierarquicamente para o ciclo 60 da seguinte maneira (Figura 244): *VES*> *SCE*> *SM*> *IND*> *SCC*> *SAN*> *SIQ*> *BP*> *SAD*> *WS*> *ANT*> *PAV*.

A Figura 245, apresenta o histograma de freqüências dos intervalos de valores do índice $K\Delta t$. Depreende-se que, cerca de 91,67% das amostras possuem valores de índice $K\Delta t$ abaixo de 0,03.

Comparando-se os valores de $K\Delta t$ entre os ensaios de umedecimento e secagem e de lixiviação contínua têm-se que com relação ao ciclo 60, as amostras submetidas à lixiviação contínua, em geral, possuem valores mais elevados.

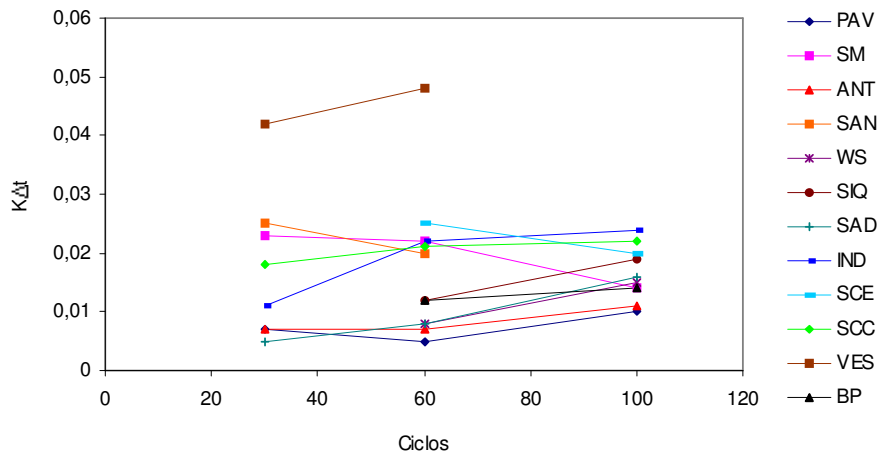


FIGURA 243 - Evolução do índice de alterabilidade $K\Delta t$ com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por Lixiviação contínua.

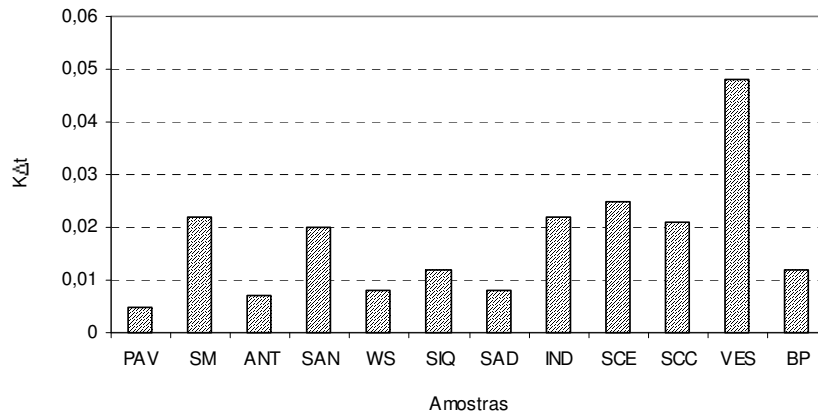


FIGURA 244 – Valores do índice $K\Delta t$ no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.

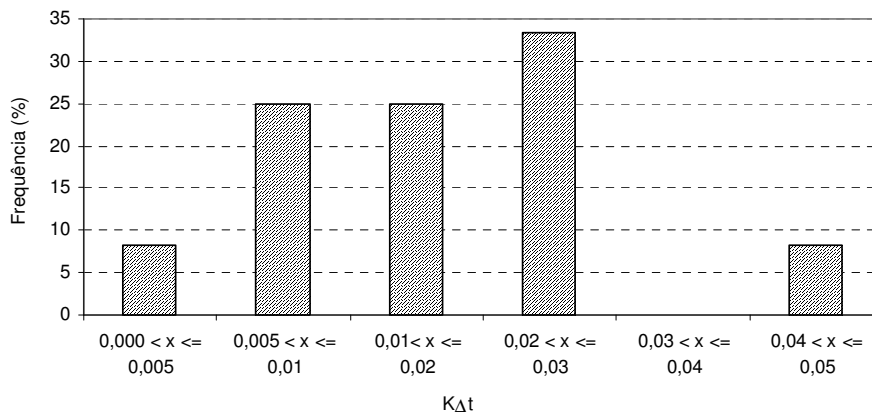


FIGURA 245 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ do ensaio de lixiviação contínua.

As Figuras de 246 a 264 apresentam os gráficos da evolução do índice $K\Delta t$ com a ciclagem no ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua, de cada amostra estudada.

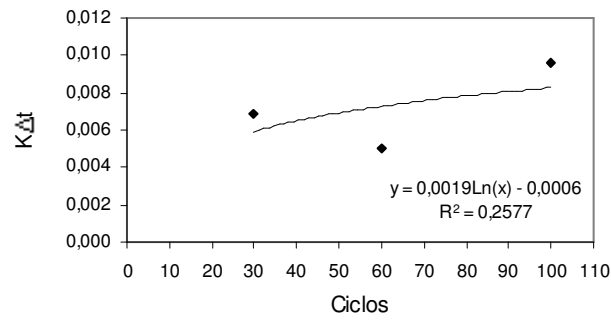


FIGURA 246 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra PAV.

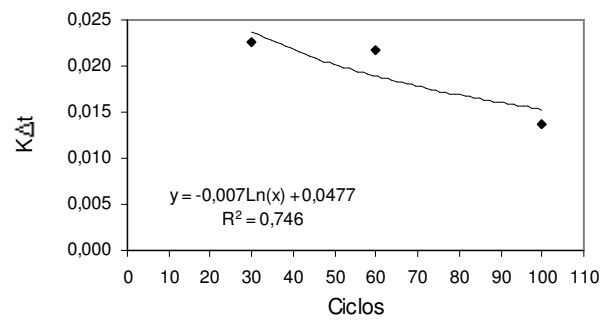


FIGURA 247 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SM.

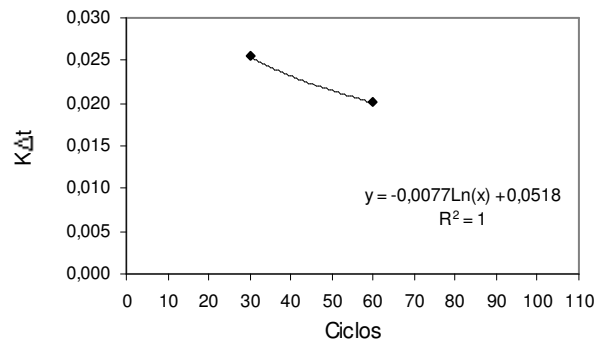


FIGURA 248 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SAN.

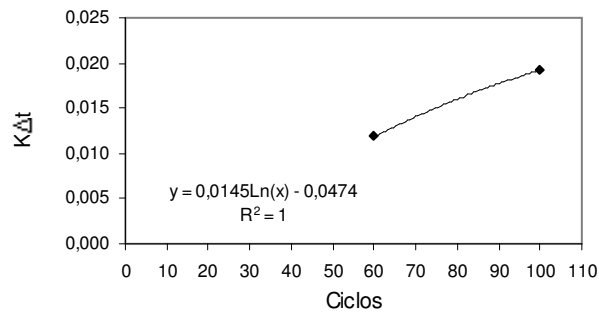


FIGURA 249 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *SIQ*.

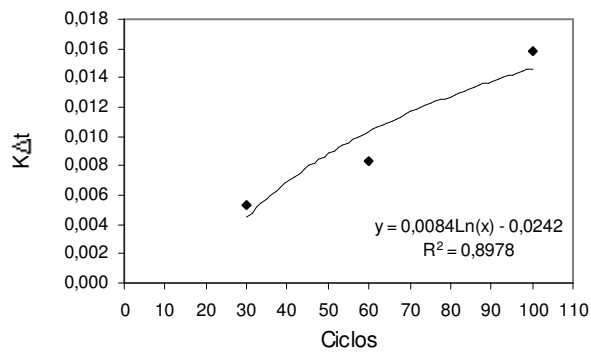


FIGURA 250 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *SAD*.

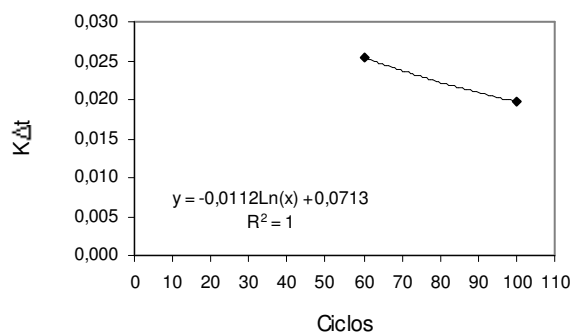


FIGURA 251 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *SCE*.

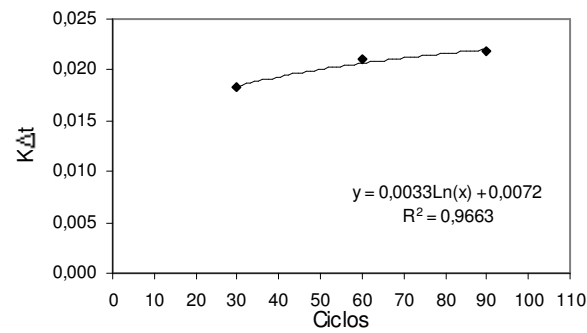


FIGURA 252 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *SCC*.

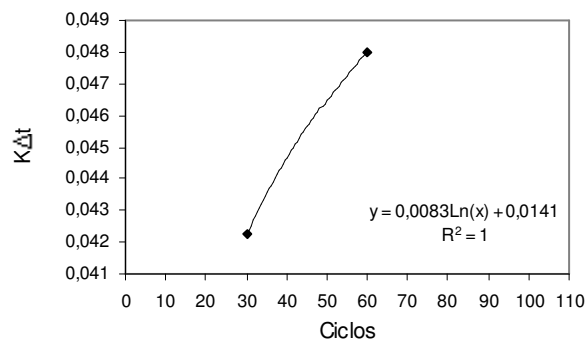


FIGURA 253 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *VES*.

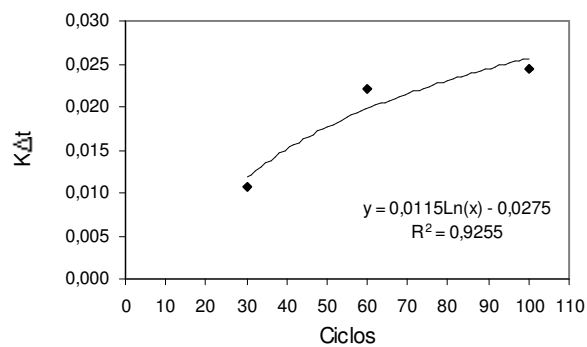


FIGURA 254 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra *IND*.

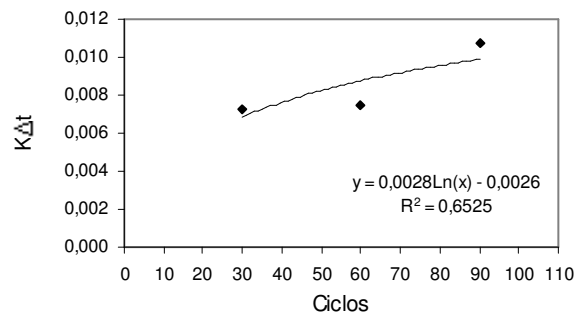


FIGURA 255 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra ANT.

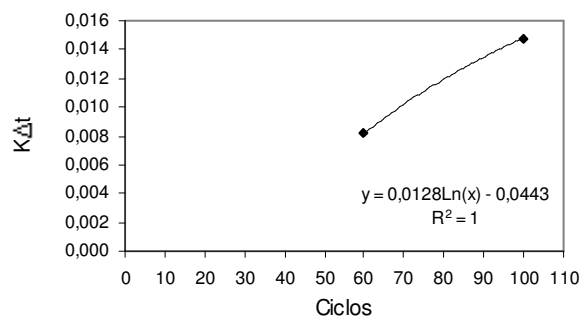


FIGURA 256 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra WS.

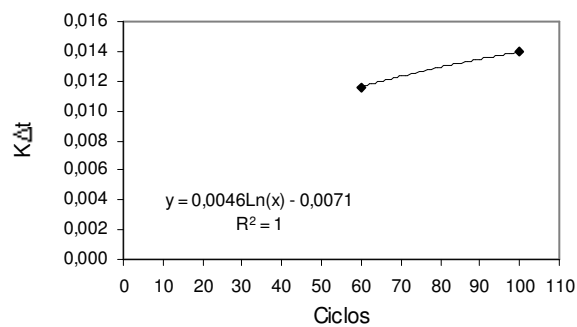


FIGURA 257 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra BP.

Observando-se o gráfico da Figura 258, referente aos valores do índice de alterabilidade Rf, nota-se o mesmo zoneamento ocorrido com os valores do índice KΔt. Destacam-se, também, as amostras VES e SAN com valores de Rf iguais a 66,84 e 82,99, respectivamente. As demais amostras tiveram valores de Rf inferiores a 81,14 (Figura 259).

A classificação hierárquica das amostras, com relação ao valor do índice de alterabilidade Rf para o ensaio por umedecimento e secagem é: SM > SCC > BP > IND > SCE > ANT > SIQ > PAV > SAN > WS > VES > VES > VES.

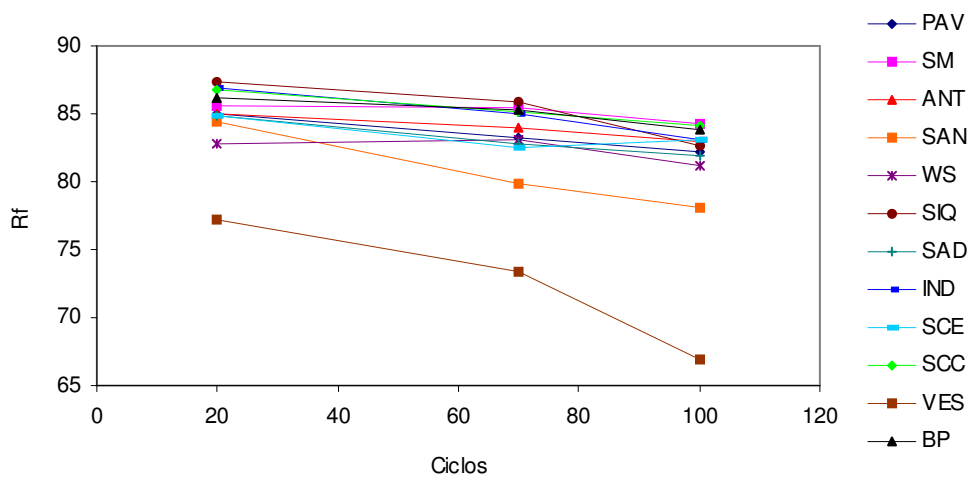


FIGURA 258 - Evolução do índice de alterabilidade Rf com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

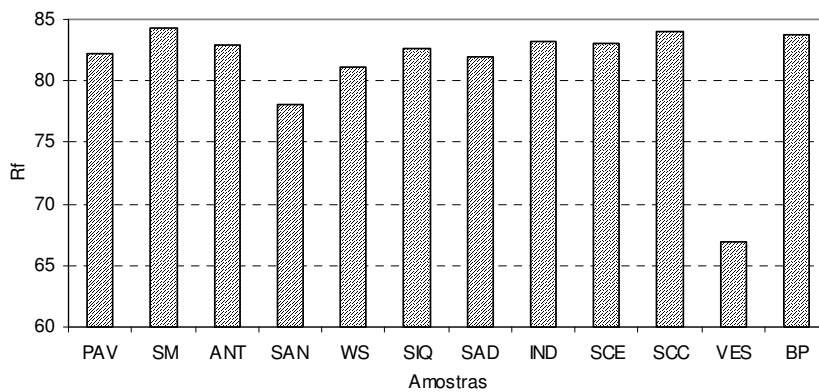


FIGURA 259 - Valores do índice Rf no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.

O histograma da Figura 260 apresenta as frequências dos intervalos de valores para o índice Rf no ensaio de alteração por umedecimento e secagem. Os intervalos de valores de

Rf de 78 a 80%, de 80 a 82%, de 82 a 84% e de 84 a 86% representam, respectivamente, as seguintes frequências: 8,33%, 16,66%, 50% e 16,66%. Já o intervalo de valores entre 66 e 68%, representa cerca de 8,33% dos valores das amostras, relativo a amostra VES.

As figuras de 261 a 271, apresentam os valores do índice Rf com a ciclagem por umedecimento e secagem, das amostras estudadas.

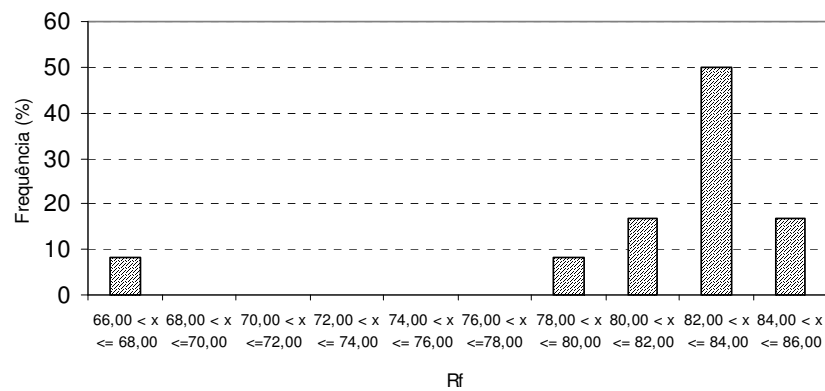


FIGURA 260 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade Rf do ensaio de umedecimento e secagem.

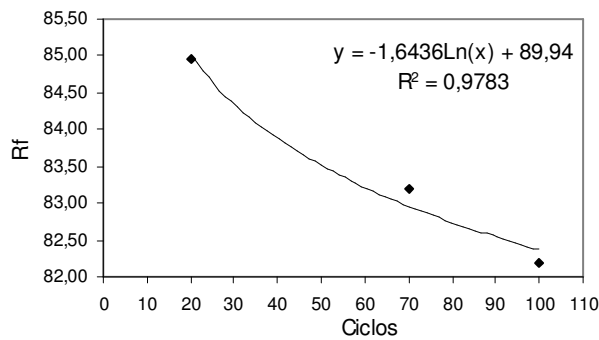


FIGURA 261 – Gráfico do índice KΔt x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra PAV.

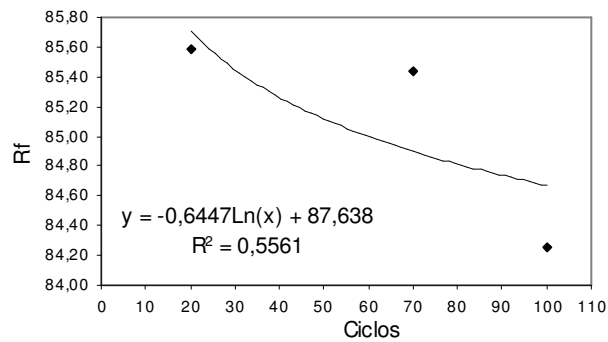


FIGURA 262 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SM*.

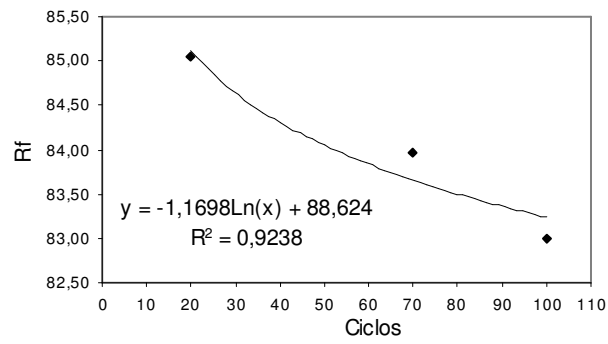


FIGURA 263 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *ANT*.

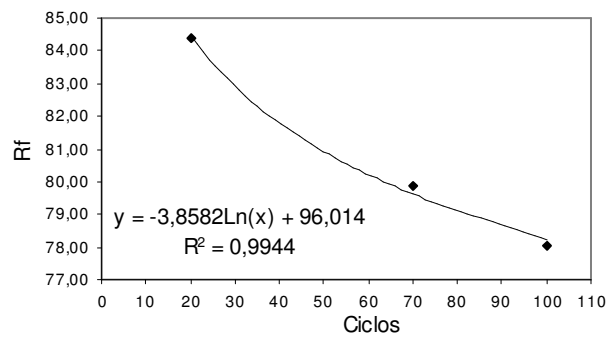


FIGURA 264 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SAN*.

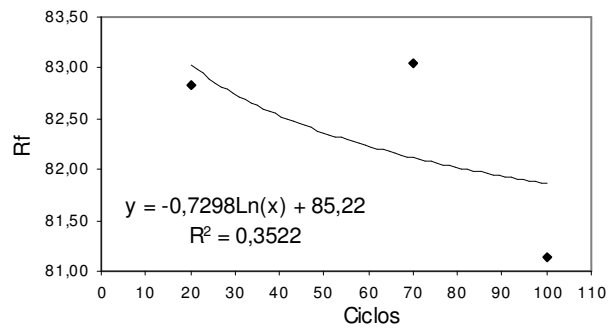


FIGURA 265 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra WS.

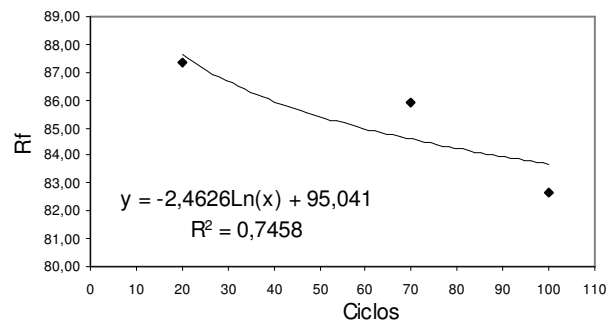


FIGURA 266 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SIQ.

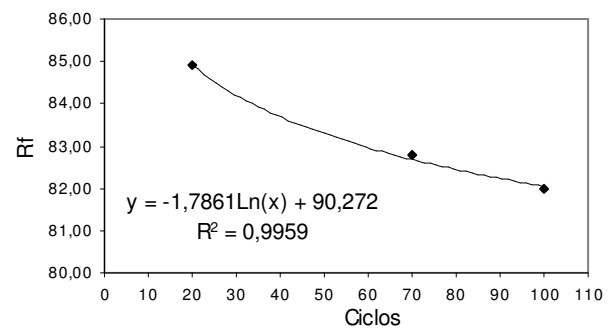


FIGURA 267 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SAD.

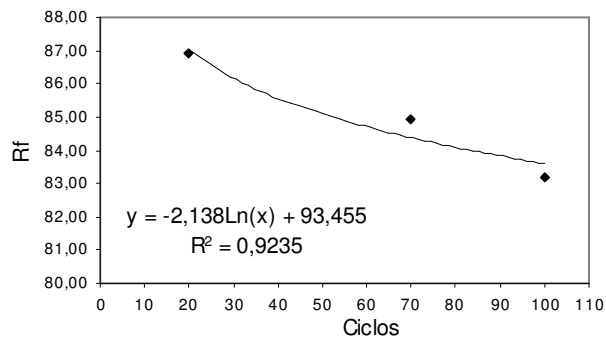


FIGURA 268 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *IND*.

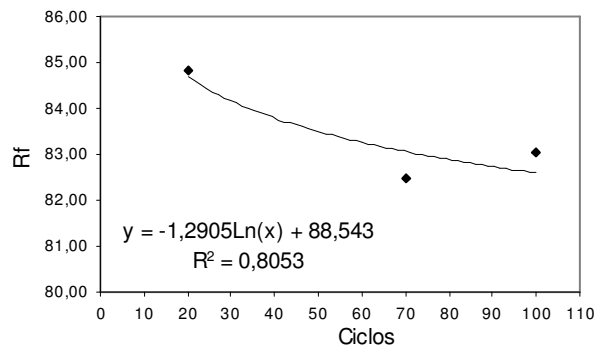


FIGURA 269 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SCE*.

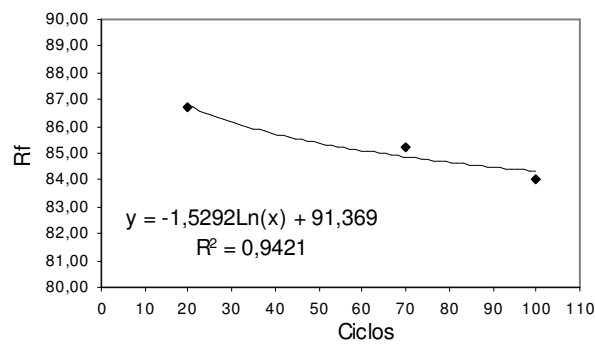


FIGURA 270 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *SCC*.

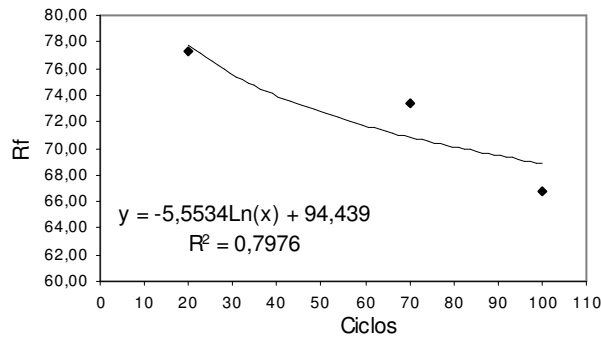


FIGURA 271 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *VES*.

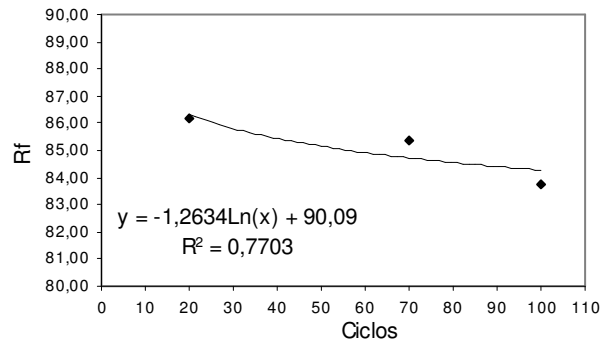


FIGURA 272 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra *BP*.

A Figura 273 apresenta os valores de R_f para o ensaio de alteração por lixiviação contínua. Com exceção da amostra *VES*, de valor de R_f igual 72,10, todas as amostras restantes possuem valores inferiores a 84,17. A classificação hierárquica das amostras, com relação ao valor do índice de alterabilidade R_f para o ensaio de lixiviação contínua é: *PAV* > *SIQ* > *ANT* > *IND* > *BP* > *SAD* > *SCC* > *SAN* > *SM* > *SCE* > *WS* > *VES* (Figura 274).

O histograma de frequência da Figura 275, demonstra que 91,67% dos valores do índice R_f , do ensaio de alteração por lixiviação contínua, são menores 82,00.

As Figuras de 276 a 287 apresentam os gráficos da evolução do índice R_f com a ciclagem no ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua, de cada amostra estudada.

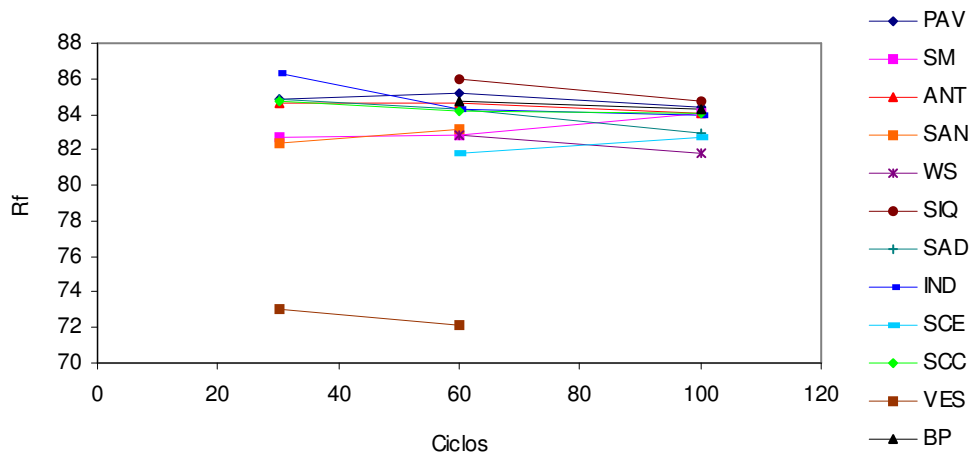


FIGURA 273 - Evolução do índice de alterabilidade Rf com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por Lixiviação contínua.

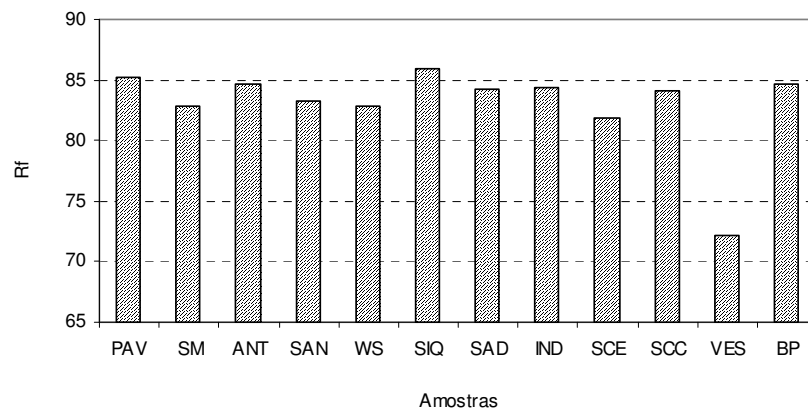


FIGURA 274 - Valores do índice Rf no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.

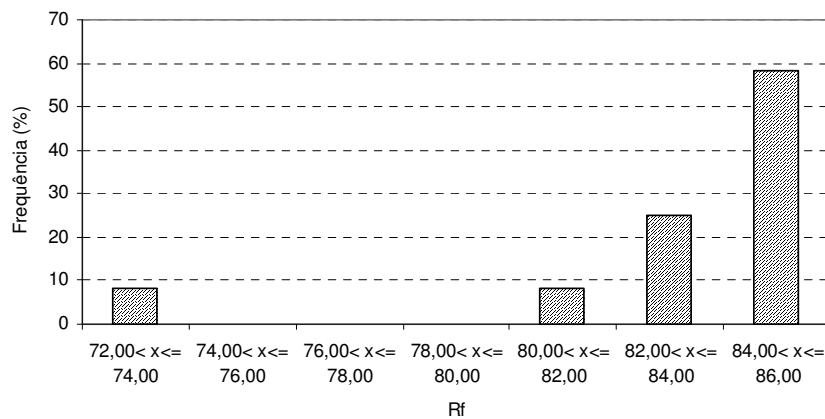


FIGURA 275 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade Rf do ensaio de lixiviação contínua.

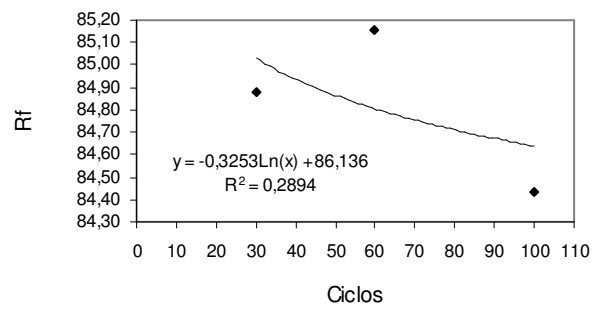


FIGURA 276 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra PAV.

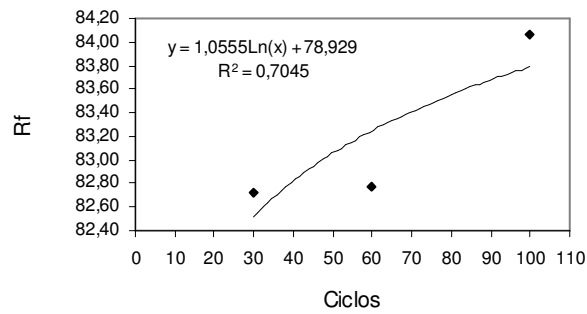


FIGURA 277 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SM.

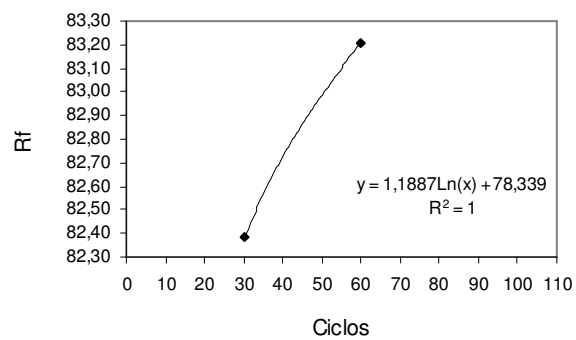


FIGURA 278 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SAN.

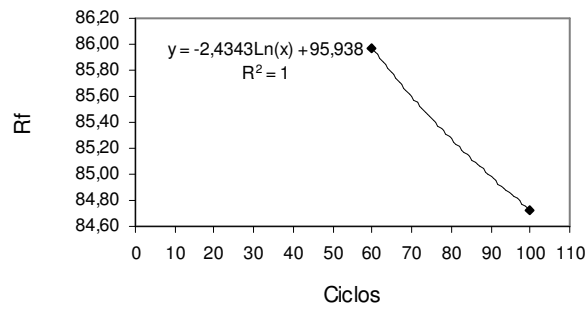


FIGURA 279 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SIQ.

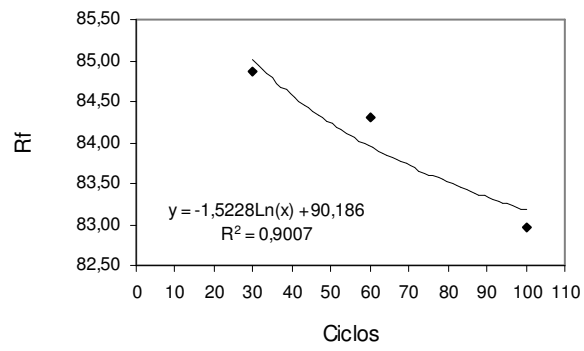


FIGURA 280 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SAD.

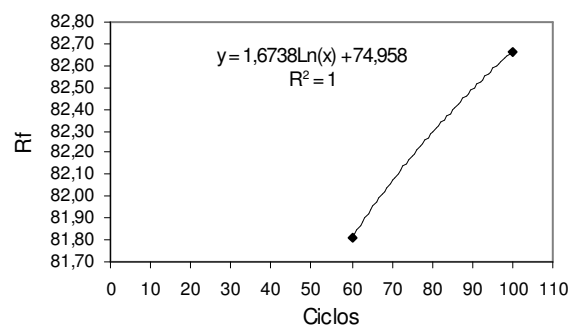


FIGURA 281 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SCE.

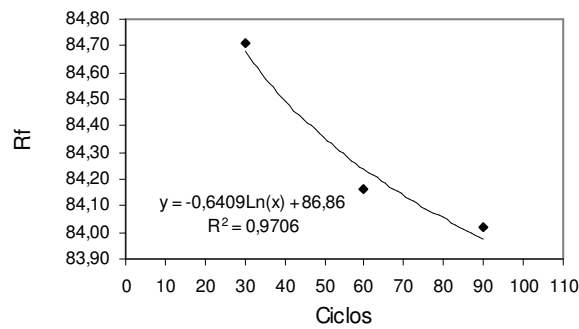


FIGURA 282 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra SCC.

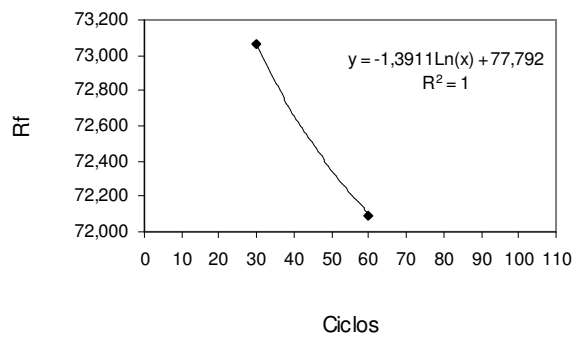


FIGURA 283 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra VES.

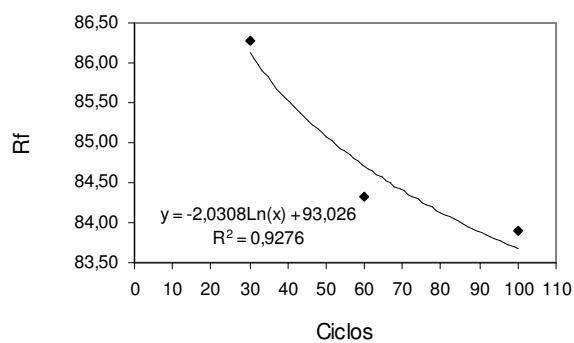


FIGURA 284 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra IND.

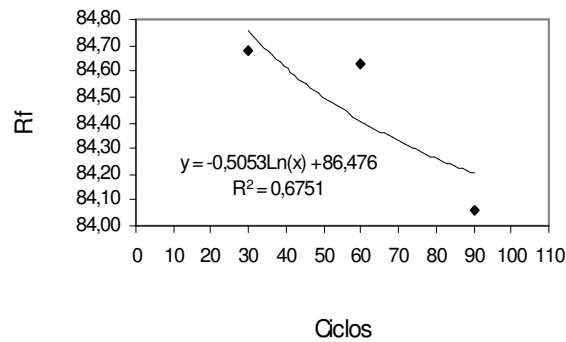


FIGURA 285 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra ANT.

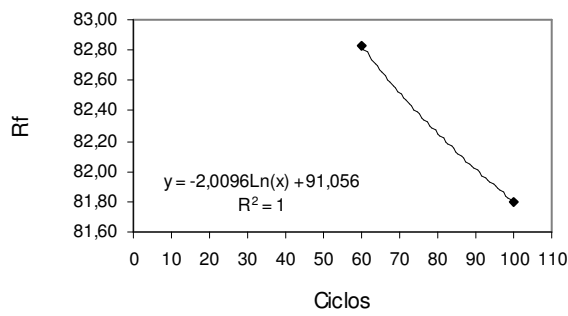


FIGURA 286 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra WS.

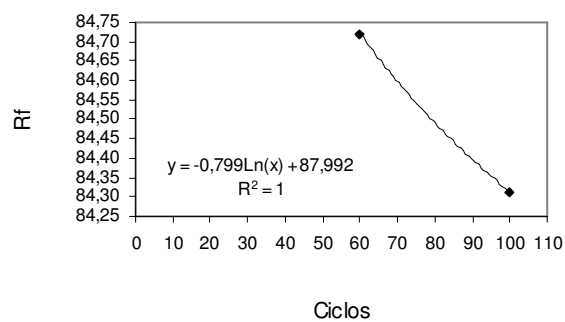


FIGURA 287 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra BP.

6.2.3 Índice de Parker

Uma outra forma de quantificação da alteração sofrida pelo material rochoso pode ser realizada levando-se em conta a mobilidade de elementos alcalinos e alcalinos terrosos com o processo de alteração. A lixiviação provoca a remoção destes íons, modificando a composição química da água destilada utilizada no ensaio.

A Tabela 35 e a Figura 288 apresentam a variação dos valores de pH medidos nos diferentes ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem. Os valores de pH concentraram-se no intervalo de 6,38 a 8,52 com tendência de crescimento com a evolução da ciclagem. Já a amostra PAV possui valores de pH inferiores a 4,92 e tendência decrescente.

TABELA 35 –Valores de pH medidos com a evolução da ciclagem por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	6,94	7,23	7,38	7,48	6,80	7,52	7,65	7,02	4,92	7,35	7,90	7,24
30	7,21	7,37	7,94	7,68	7,71	7,72	7,82	7,75	4,80	6,91	7,28	7,41
40	8,52	7,89	8,23	7,94	7,88	7,74	7,92	7,90	4,49	6,66	7,18	7,40
50	7,21	7,63	8,25	7,94	7,97	7,97	8,05	7,96	4,05	6,52	7,18	7,46
60	7,03	6,88	7,50	7,06	6,95	6,93	7,10	6,88	3,70	6,04	6,80	6,82
70	6,89	7,05	7,84	7,67	7,78	7,82	7,96	6,22	3,70	7,65	7,45	6,84
80	7,86	7,72	7,06	7,53	7,92	7,81	7,57	7,85	3,75	6,91	7,84	7,95
90	7,81	7,47	7,43	7,57	7,80	7,75	7,52	7,71	3,79	6,38	7,54	7,73
100	8,22	6,98	7,72	7,83	8,00	7,98	7,84	7,88	3,36	6,83	7,52	7,68

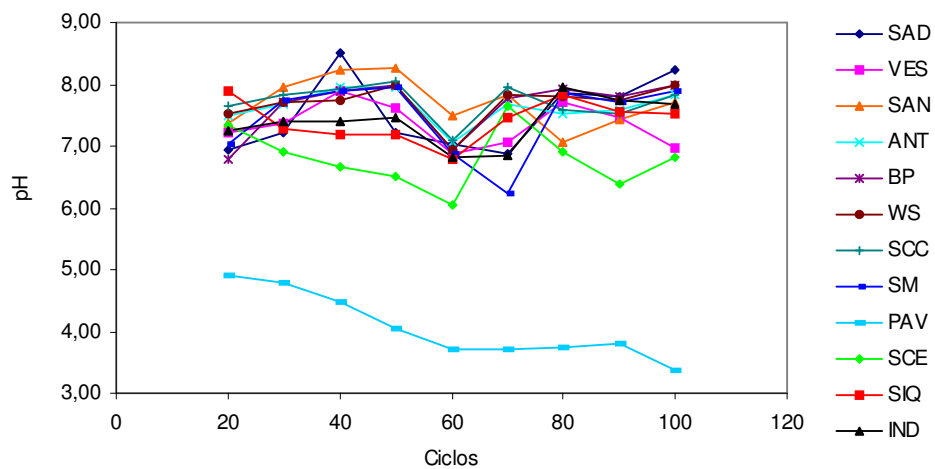


FIGURA 288 – Valores de pH de diferentes ciclos do ensaio por umedecimento e secagem

Com relação à medida de condutividade, as amostras *PAV* e *VES* se destacam pelos altos valores registrados no ciclo 100 do ensaio, respectivamente, 4000 e 1680 mmohm. As demais amostras agrupam-se no intervalo entre 114 e 260 mmohm (Tabela 36 e Figura 289).

Se considerarmos a hipótese de que quanto maior a condutividade, maior a concentração de íons na solução de lixiviação e por analogia maior a alteração do material rochoso, têm-se a seguinte hierarquia de alteração das amostras: *PAV* > *VES* > *SCE* > *SAN* > *SAD* > *BP* > *ANT* > *WS* > *IND* > *SM* > *SCC* > *SIQ*.

TABELA 36 – Valores de condutividade (mmohm) medidos com a evolução da ciclagem por umedecimento e secagem.

Ciclos	<i>SAD</i>	<i>VES</i>	<i>SAN</i>	<i>ANT</i>	<i>BP</i>	<i>WS</i>	<i>SCC</i>	<i>SM</i>	<i>PAV</i>	<i>SCE</i>	<i>SIQ</i>	<i>IND</i>
20	32,00	178,00	27,30	27,10	35,00	33,30	25,70	29,90	572,00	31,70	25,00	31,10
30	73,00	427,00	58,00	52,60	70,00	70,00	48,70	54,60	1508,00	61,00	56,00	51,20
40	109,00	588,00	88,80	75,70	105,00	95,30	65,60	72,30	2710,00	82,70	83,20	87,80
50	128,50	761,00	111,14	96,30	108,80	110,90	74,10	87,30	3110,00	103,10	89,60	106,70
60	94,00	751,00	150,00	89,60	112,00	108,90	85,70	91,50	3420,00	104,30	159,50	133,40
70	150,00	941,00	120,00	115,00	128,00	125,20	94,80	100,00	3580,00	130,00	95,00	120,00
80	155,70	1163,00	156,50	127,10	177,00	131,80	121,00	124,00	3390,00	183,10	88,00	129,00
90	207,00	1627,00	236,00	166,00	174,00	182,00	127,00	151,00	4010,00	220,00	116,00	141,00
100	192,00	1680,00	194,00	172,00	180,00	162,00	130,00	133,00	4000,00	260,00	114,00	145,00

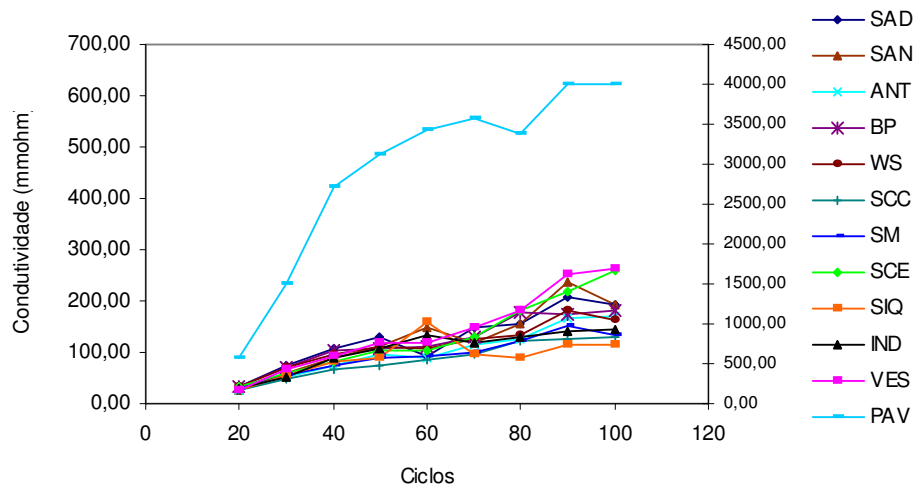


FIGURA 289 – Valores de condutividade de diferentes ciclos do ensaio por umedecimento e secagem

Os valores de pH medidos no ensaio de alteração por lixiviação contínua apresentaram-se mais elevados que os do ensaio de umedecimento e secagem. As amostras *VES* e *SAD* destacam-se com valores de 11,50 (ciclo 60) e 10,45 (ciclo 100),

respectivamente. Como mostrado na Tabela 37 e na Figura 290, as demais amostras apresentaram valores de pH de no mínimo 7,59 (amostra *SIQ*) até o valor máximo de 9,56 (amostra *PAV*).

TABELA 37 –Valores de pH medidos com a evolução da ciclagem por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	9,81	11,17	9,53	8,60	9,09	9,52	9,14	7,59	8,87	9,02	8,89	8,74
20	10,10	11,10	9,42	8,76	9,28	8,30	9,06	9,29	8,76	9,08	8,92	8,85
30	10,38	11,35	8,18	8,89	9,36	8,89	9,10	9,45	8,83	9,18	9,03	8,92
40	10,28	11,41	8,52	8,78	9,35	9,53	9,20	9,15	8,91	9,21	9,12	8,88
50	10,31	11,69	8,66	8,81	9,20	9,18	9,08	9,06	8,95	9,24	9,16	8,90
60	10,35	11,50	8,96	8,89	9,34	9,56	9,13	9,37	8,73	9,12	9,08	8,91
70	10,42			8,09	9,06	8,61	9,13	9,22	8,84	9,00	9,15	8,95
80	10,32			8,94	9,06	9,20	9,10	9,33	8,90	9,06	9,12	8,98
90	10,50			8,94	9,05	9,26	9,16	9,42	8,91	9,13	9,08	8,94
100	10,45			8,95	9,03	9,24	9,08	9,38	8,88	9,09	9,13	8,97

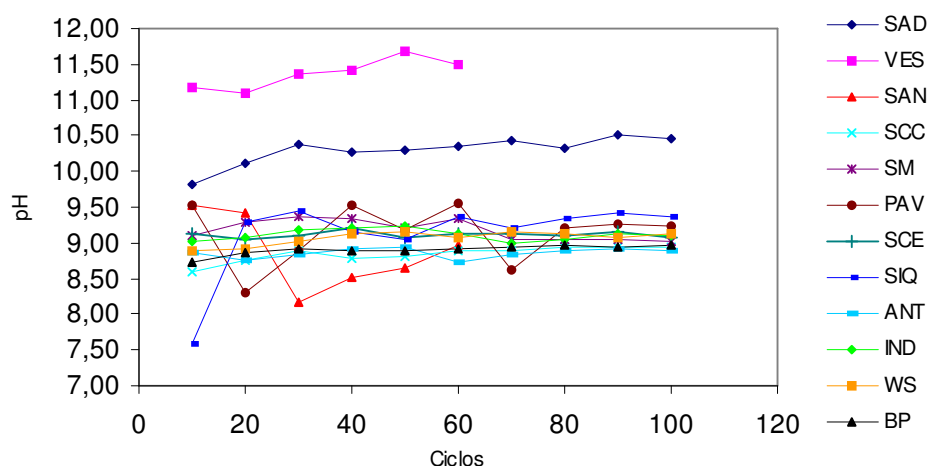


FIGURA 290 – Valores de pH de diferentes ciclos do ensaio por lixiviação contínua.

A Tabela 38 e a Figura 291 apresentam os valores de condutividade medidos com a evolução da ciclagem por lixiviação contínua. Do mesmo modo que o ensaio por umedecimento e secagem, as amostras *VES* e *PAV* destacaram-se pelos elevados valores encontrados, respectivamente, de 4030 mmohm e 1080 mmohm. As outras amostras possuem valores compreendidos entre 161 mmohm (amostra *SAN*) e 635 mmohm (amostra *SAD*).

Hierarquicamente, as amostras são classificadas da seguinte maneira: *VES*> *PAV*> *SAD*> *ANT*> *SCC*> *BP*> *IND*> *SM*> *SCE*> *WS*> *SIQ*> *SAN*.

TABELA 38 – Valores de condutividade (mmohm) medidos com a evolução da ciclagem por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	248,00	2440,00	148,00	80,50	82,70	668,00	62,80	80,10	212,00	76,00	79,00	78,00
20	320,00	2250,00	170,00	135,00	122,10	669,00	139,50	94,00	295,00	129,00	115,00	127,00
30	337,00	3000,00	170,00	152,30	145,60	707,00	207,00	123,60	319,00	145,00	128,00	145,00
40	382,00	3660,00	172,00	147,00	162,10	867,00	182,10	134,00	351,00	152,00	155,00	152,00
50	473,00	3700,00	177,00	295,00	201,00	880,00	187,00	181,00	448,00	208,00	192,00	203,00
60	526,00	4030,00	161,00	255,00	210,00	920,00	181,00	183,00	495,00	254,00	218,00	261,00
70	565,00			250,00	182,40	986,00	223,00	220,00	538,00	256,00	203,00	272,00
80	603,00			251,00	216,00	937,00	266,00	230,00	586,00	251,00	224,00	269,00
90	615,00			320,00	192,00	910,00	300,00	236,00	619,00	314,00	232,00	315,00
100	635,00			332,00	310,00	1080,00	300,00	241,00	624,00	312,00	297,00	321,00

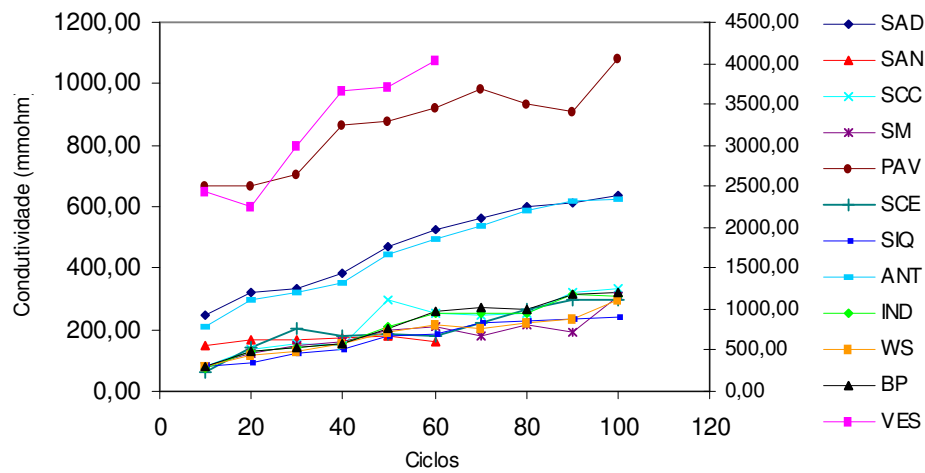


FIGURA 291 – Valores de pH de diferentes ciclos do ensaio por lixiviação contínua.

Parker (1970), propõe o índice de proporções de metais alcalinos e alcalinos terrosos, na tentativa de quantificar alteração do material rochoso através da medida da concentração dos íons Ca⁺⁺, K⁺, Na⁺ e Mg⁺⁺, na solução de lixiviação, da seguinte maneira:

$$I = (Na)a/(Na-O)b + (Mg)a/(Mg-O)b + (Ca)a/(Ca - O)b \times 100$$

onde:

(X)a = indica a proporção atômica do elemento X, definida como a porcentagem atômica dividida pelo peso atômico.

(X - O)b = é a resistência da ligação do elemento X com o oxigênio.

Por meio do Índice I, pode-se medir o grau de alteração alcançado em relação à rocha antes da ciclagem.

As Tabelas 39 a 46 apresentam os valores de concentração dos íons Ca^{++} , K^+ , Na^+ e Mg^{++} medidos durante a ciclagem, nos ensaios de alteração por umedecimento e secagem e por lixiviação contínua.

Os valores do índice de Parker podem ser encontrados nas Tabelas 47 e 48 e ilustrados graficamente nas Figuras 292 e 293.

TABELA 39 – Valores de concentração (p.p.m.) de K^+ nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	1,00	0,00
30	1,50	1,70	1,30	1,30	1,10	1,30	1,30	0,00	4,20	4,00	1,00	1,10
40	1,50	1,70	1,30	1,30	1,10	1,30	1,30	0,00	4,20	4,00	1,00	1,10
50	2,00	2,00	1,30	1,30	1,10	1,30	1,30	0,00	5,00	5,00	1,00	1,10
60	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	6,00	6,00	2,00	2,00
70	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	5,00	6,00	2,00	2,00
80	2,00	3,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	2,00	1,00
90	4,00	5,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	7,00	10,00	2,00	3,00
100	4,00	6,00	3,00	4,00	3,00	3,00	3,00	2,00	6,00	10,00	2,00	3,00

TABELA 40 – Valores de concentração (p.p.m.) de Ca^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	119,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	193,0	0,0	0,0	0,0
50	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	100,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	115,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	109,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,00	0,00	0,00	0,00
90	1,00	43,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	108,00	0,00	0,00	0,00
100	1,00	57,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	117,00	0,00	0,00	0,00

TABELA 41 – Valores de concentração (p.p.m.) de Na^+ nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	10,00	38,00	5,00	8,00	9,00	10,00	5,00	8,00	15,00	6,00	7,00	9,00
30	17,00	51,00	9,00	12,00	15,00	15,00	7,00	13,00	29,00	9,00	13,00	14,00
40	21,00	62,00	10,00	14,00	18,00	16,00	8,00	14,00	39,00	10,00	16,00	19,00
50	23,00	71,00	11,00	16,00	20,00	21,00	9,00	17,00	47,00	12,00	19,00	24,00
60	23,00	70,00	11,00	14,00	19,00	18,00	9,00	15,00	44,00	11,00	17,00	21,00
70	24,00	75,00	11,00	16,00	19,00	19,00	9,00	16,00	43,00	11,00	18,00	22,00
80	29,00	80,00	15,00	21,00	25,00	23,00	13,00	21,00	49,00	17,00	19,00	26,00
90	32,00	93,00	17,00	24,00	25,00	26,00	12,00	23,00	60,00	17,00	20,00	27,00
100	32,00	99,00	16,00	25,00	27,00	25,00	12,00	21,00	59,00	18,00	20,00	27,00

TABELA 42 – Valores de concentração (p.p.m.) de Mg^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,2	0,00	0,00	0,00
30	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,3	0,00	0,00	0,00
40	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,0	0,00	0,00	0,00
50	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64,00	0,00	0,00	0,00
60	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00
70	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,00	0,00	0,00	0,00
80	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	0,00	0,00	0,00
90	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,00	0,00	0,00	0,00
100	0,24	0,48	3,50	0,98	0,47	0,32	2,11	0,66	106,00	3,30	0,60	0,26

TABELA 43 – Valores de concentração (p.p.m.) de K^+ nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	2,00	10,00	148,00	12,0	1,00	8,00	10,0	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00
20	4,00	10,00	170,00	16,0	3,00	8,00	22,0	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00
30	6,00	10,00	170,00	20,0	4,00	8,00	26,0	1,00	7,00	2,00	3,00	4,00
40	5,00	11,50	175,00	22,0	6,00	10,00	26,0	2,00	6,00	4,00	4,00	4,00
50	6,00	13,00	177,00	34,00	6,00	11,00	27,0	3,00	7,00	4,00	5,00	5,00
60	6,00	18,00	161,00	35,00	8,00	15,00	26,0	3,00	7,00	6,00	5,00	5,00
70	7,00			33,00	6,00	13,00	34,0	3,00	8,00	6,00	6,00	5,00
80	7,00			38,00	7,00	14,00	34,0	3,00	8,00	6,00	5,00	6,00
90	8,00			42,00	8,00	14,00	36,00	3,00	10,00	7,00	6,00	6,00
100	12,00			44,00	15,00	14,00	40,00	4,00	12,00	7,00	7,00	6,00

TABELA 44 – Valores de concentração (p.p.m.) de Ca^{++} nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	0,00	11,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,00	10,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2,00	12,00	0,00	0,00	1,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	2,00	15,00	0,00	0,00	1,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	3,00	17,00	0,00	2,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
60	3,00	21,00	0,00	2,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
70	3,00			2,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
80	3,00			2,00	1,00	7,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
90	3,00			2,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
100	3,00			2,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00

TABELA 45 – Valores de concentração (p.p.m.) de Na⁺ nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	30,00	115,00	8,00	8,00	20,00	40,00	8,00	8,00	22,00	20,00	10,00	32,00
20	46,00	113,00	13,00	8,00	25,00	41,00	15,00	13,00	35,00	24,00	18,00	38,00
30	46,00	133,00	14,00	16,00	32,00	42,00	21,00	20,00	38,00	27,00	27,00	45,00
40	53,00	145,00	17,00	17,00	36,00	45,00	20,00	24,00	42,00	30,00	32,00	46,00
50	60,00	150,00	19,00	29,00	36,00	49,00	21,00	30,00	48,00	35,00	35,00	49,00
60	72,00	159,00	23,00	27,00	37,00	59,00	21,00	31,00	50,00	42,00	46,00	51,00
70	85,00			28,00	30,00	50,00	23,00	31,00	50,00	46,00	44,00	51,00
80	88,00			33,00	31,00	53,00	29,00	32,00	55,00	50,00	48,00	53,00
90	91,00			34,00	33,00	53,00	27,00	42,00	55,00	50,00	51,00	53,00
100	90,00			36,00	32,00	53,00	30,00	51,00	56,00	53,00	50,00	54,00

TABELA 46 – Valores de concentração (p.p.m.) de Mg⁺⁺ nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	0,69	1,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,23			0,54	1,32	0,10	0,05	0,54	0,85	0,32	0,40	0,38

TABELA 47 – Valores do Índice de Parker nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	SAD	VES	SAN	ANT	BP	WS	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	IND
20	0,12	0,47	0,06	0,10	0,11	0,12	0,06	0,10	0,24	0,10	0,10	0,11
30	0,23	0,66	0,13	0,16	0,20	0,20	0,10	0,16	0,95	0,15	0,17	0,19
40	0,28	0,80	0,14	0,19	0,24	0,21	0,11	0,17	1,44	0,17	0,21	0,25
50	0,31	0,92	0,15	0,21	0,26	0,27	0,13	0,21	1,28	0,20	0,25	0,31
60	0,32	0,92	0,16	0,19	0,26	0,24	0,13	0,20	1,34	0,20	0,23	0,28
70	0,32	0,98	0,16	0,22	0,26	0,26	0,13	0,20	1,28	0,20	0,24	0,29
80	0,38	1,06	0,20	0,28	0,32	0,30	0,17	0,27	1,42	0,29	0,26	0,33
90	0,44	1,36	0,24	0,33	0,35	0,35	0,18	0,31	1,69	0,31	0,27	0,37
100	0,44	1,50	0,25	0,36	0,37	0,34	0,19	0,28	1,70	0,34	0,27	0,37

TABELA 48 – Valores do Índice de Parker nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	0,39	1,57	1,61	0,22	0,26	0,59	0,20	0,11	0,28	0,26	0,13	0,42
20	0,62	1,54	1,90	0,26	0,34	0,61	0,41	0,17	0,47	0,32	0,25	0,49
30	0,64	1,80	1,91	0,40	0,44	0,62	0,53	0,26	0,54	0,36	0,37	0,60
40	0,72	1,97	2,00	0,44	0,51	0,68	0,51	0,32	0,58	0,41	0,44	0,61
50	0,82	2,06	2,05	0,72	0,51	0,74	0,54	0,40	0,67	0,48	0,49	0,66
60	0,97	2,24	1,94	0,70	0,55	0,90	0,53	0,42	0,69	0,58	0,62	0,69
70	1,14			0,69	0,44	0,77	0,64	0,42	0,70	0,63	0,61	0,69
80	1,18			0,81	0,46	0,83	0,71	0,43	0,77	0,68	0,65	0,72
90	1,22			0,86	0,50	0,82	0,71	0,55	0,79	0,69	0,70	0,73
100	1,25			0,91	0,56	0,82	0,79	0,68	0,82	0,73	0,70	0,74

Depreende-se do gráfico da Figura 292 que as amostras *SM*, *SAN*, *WS*, *BP*, *SAD*, *IND*, *SCC*, *SCE* e *SIQ* possuem valores no ciclo 100 que variam de 0,19 até 0,44. As amostras *ANT*, *VES* e *PAV*, possuem valores diferenciados, respectivamente 0,98, 1,50 e 1,70. O aumento no valor do índice de Parker da amostra *PAV*, como visto no ensaio de condutividade de abrasão, se refere a oxidação de sulfetos presentes que se alteram transformando-se em sulfatos e liberando íons de H^+ . Este processo faz com que a solução de lixiviação fique enriquecida de sulfatos e com baixo pH. Estas condições tornam a solução de lixiviação bastante agressiva quando em contato com o material rochoso ciclado. Esta agressividade da solução lixivia com maior rapidez os elementos alcalinos e alcalinos terrosos presentes na amostra e, quanto maior a lixiviação, maior a remoção de íons e consequentemente maior a sua concentração. Esta elevada taxa de concentração de íons, principalmente de Ca^{++} faz com que, a depender das condições do ensaio, ocorra a precipitação de sulfato de cálcio na superfície da amostra. Tal fato pode ser observado tanto no microscópio óptico como no eletrônico de varredura (Foto 33).

No caso da amostra *VES*, os elevados valores do índice de Parker estão associados a uma maior mobilidade dos íons provocada por fatores intrínsecos dos basaltos vesiculares como a elevada concentração de argilominerais e as altas porosidade e absorção d'água. Estes fatores ajudam no processo de lixiviação do material rochoso com a ciclagem.

Já a amostra *ANT*, teve seu valor de índice de Parker aumentado bruscamente no ciclo 100, quando comparado com os valores dos ciclos 20 e 70. Tal fato pode ser relacionado, provavelmente, à contaminação externa da solução de lixiviação, já que a amostra não possui, originalmente, características que possam conduzir a este

comportamento anômalo. Com relação aos valores do índice de Parker do ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem, têm-se a seguinte hierarquia das amostras: *PAV* > *VES* > *ANT* > *SAD* > *IND* > *BP* > *WS* > *SCE* > *SM* > *SIQ* > *SAN* > *SCC*.



FOTO 33 – Imagem gerada pelo microscópio eletrônico de varredura apresentando cristais de sulfato de cálcio na superfície da amostra *PAV*, no ciclo 70 do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

A Figura 293 apresenta a evolução do índice de Parker com os ciclos do ensaio de alteração acelerada pela lixiviação contínua. A amostra *PAV* destaca-se das demais amostras porém, não tanto quanto os valores obtidos pelo ensaio por umedecimento e secagem. Na lixiviação contínua, a cada ciclo, a solução de lixiviação é evaporada do “balão” do aparelho “Soxhlet” e condensa-se sob a forma de água destilada sobre a amostra. Desta forma, o ataque desta solução nas partículas da amostra não é tão agressivo quanto o do ensaio por umedecimento e secagem.

A amostra *VES* apresenta o maior índice de Parker, devido aos motivos citados no ensaio de umedecimento e secagem. As demais amostras tiveram valores de índice de Parker inferiores a 0,81. A classificação hierárquica das amostras, com relação ao índice de Parker, para o ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua é: *VES* > *PAV* > *SAD* > *SCE* > *BP* > *SCC* > *IND* > *ANT* > *SM* > *WS* > *SIQ* > *SAN*.

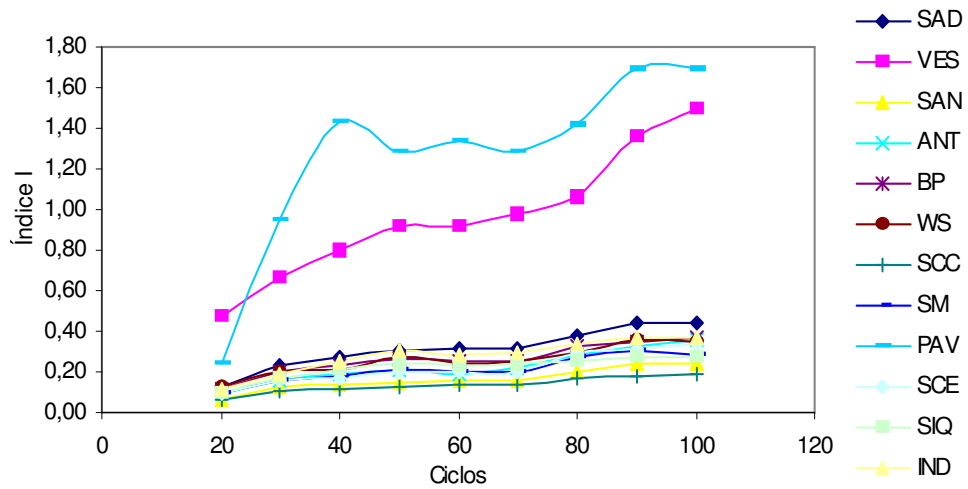


FIGURA 292 - Evolução do índice de Parker com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

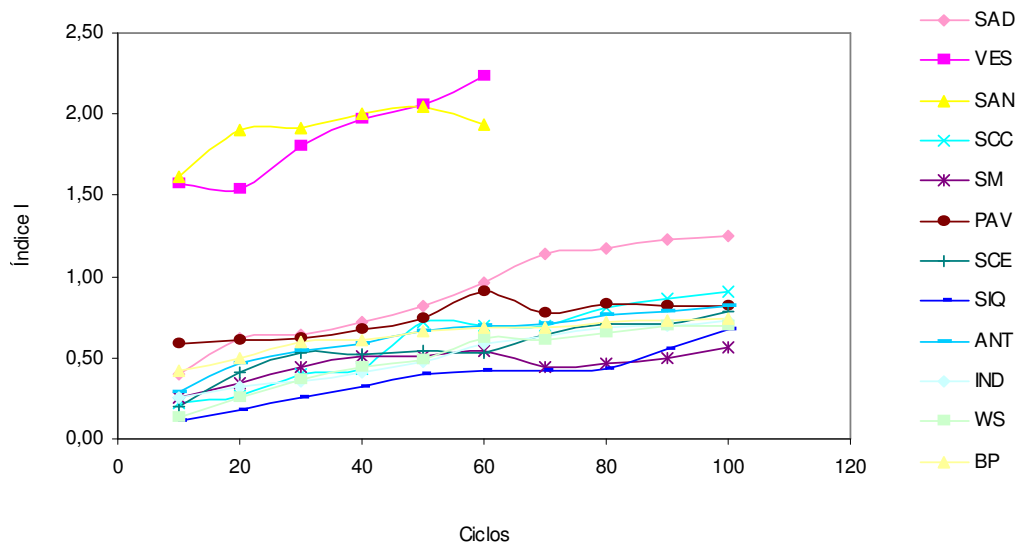


FIGURA 293 - Evolução do índice de Parker com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua.

Como visto, o valor do índice de Parker é dado pela concentração dos íons Ca^{++} , K^{+} , Na^{+} e Mg^{++} na solução de lixiviação. No cálculo deste índice não se considera as quantidades iniciais destes elementos nas diferentes amostras estudadas. Desta forma, por exemplo, uma amostra que contenha uma maior quantidade de elementos Ca, Mg, K e Na em relação às outras amostras, provavelmente terá um maior valor de índice de Parker.

Para verificar o efeito da influência da quantidade inicial dos elementos avaliados no valor do índice de Parker, as amostras foram submetidas a análise química por microsonda eletrônica com objetivo de detectar a porcentagem em peso dos elementos Ca, Mg, Na e K (Tabela 49).

TABELA 49 – Porcentagem dos elementos K, Na, Ca e Mg nas amostras.

	<i>SAD</i>	<i>VES</i>	<i>SAN</i>	<i>ANT</i>	<i>BP</i>	<i>WS</i>	<i>SCC</i>	<i>SM</i>	<i>PAV</i>	<i>SCE</i>	<i>SIQ</i>	<i>IND</i>
K	1,97	2,05	2,60	2,03	2,07	1,64	2,41	1,69	2,16	2,53	0,95	2,31
Na	5,13	5,09	4,63	4,25	4,91	4,41	4,76	4,56	6,09	3,99	4,50	5,18
Ca	8,58	7,38	8,01	9,00	8,90	9,86	9,13	10,49	7,73	8,83	10,03	7,95
Mg	4,60	8,64	4,86	4,57	5,11	5,58	4,84	6,09	3,60	4,77	5,40	5,01

As diferentes quantidades dos elementos Ca, Mg, Na e K foram incorporadas à fórmula de cálculo do índice de Parker da seguinte maneira:

$$Im = [(Na)a/(Na-O)b] / y(Na) + [(Mg)a / (Mg-O)b] / y(Mg) + [(Ca)a / (Ca - O)b] / y(Ca) \times 100$$

onde:

Im = Índice de Parker modificado;

(X)a = indica a proporção atômica do elemento X, definida como a porcentagem atômica dividida pelo peso atômico;

(X - O)b = é a resistência da ligação do elemento X com o oxigênio;

y(X) = porcentagem em peso do elemento X.

As Tabelas 50 e 51 e as Figuras 294 e 294 apresentam os valores do Índice de Parker modificado nos diferentes ensaios de alteração acelerada.

TABELA 50 – Valores do Índice de Parker modificado nos ciclos do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

CICLOS	<i>SAD</i>	<i>VES</i>	<i>SAN</i>	<i>ANT</i>	<i>BP</i>	<i>WS</i>	<i>SCC</i>	<i>SM</i>	<i>PAV</i>	<i>SCE</i>	<i>SIQ</i>	<i>IND</i>
20	0,02	0,09	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02
30	0,05	0,13	0,03	0,04	0,04	0,05	0,02	0,04	0,17	0,04	0,05	0,04
40	0,06	0,16	0,03	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,25	0,05	0,05	0,05
50	0,07	0,19	0,03	0,05	0,06	0,07	0,03	0,05	0,25	0,06	0,06	0,06
60	0,07	0,19	0,04	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05	0,26	0,06	0,07	0,06
70	0,07	0,20	0,04	0,06	0,06	0,07	0,03	0,04	0,25	0,06	0,07	0,06
80	0,08	0,22	0,04	0,07	0,07	0,07	0,04	0,06	0,28	0,09	0,07	0,07
90	0,10	0,27	0,06	0,09	0,08	0,09	0,04	0,07	0,34	0,09	0,08	0,08
100	0,10	0,30	0,06	0,09	0,08	0,09	0,05	0,07	0,34	0,10	0,08	0,08

TABELA 51 – Valores do Índice de Parker modificado nos ciclos do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

CICLOS	SAD	VES	SAN	SCC	SM	PAV	SCE	SIQ	ANT	IND	WS	BP
10	0,08	0,34	0,60	0,07	0,06	0,12	0,07	0,03	0,07	0,05	0,03	0,09
20	0,13	0,33	0,70	0,09	0,09	0,12	0,14	0,05	0,12	0,07	0,07	0,11
30	0,14	0,38	0,71	0,13	0,11	0,13	0,17	0,07	0,15	0,07	0,09	0,13
40	0,16	0,42	0,73	0,14	0,13	0,14	0,17	0,09	0,15	0,09	0,12	0,14
50	0,18	0,44	0,75	0,22	0,13	0,15	0,18	0,12	0,18	0,10	0,13	0,15
60	0,21	0,49	0,70	0,22	0,15	0,19	0,17	0,12	0,18	0,13	0,16	0,15
70	0,24			0,21	0,12	0,17	0,21	0,12	0,19	0,14	0,16	0,15
80	0,25			0,25	0,13	0,18	0,23	0,12	0,20	0,15	0,17	0,16
90	0,26			0,27	0,14	0,18	0,23	0,15	0,21	0,15	0,18	0,16
100	0,28			0,28	0,18	0,18	0,26	0,18	0,23	0,16	0,18	0,17

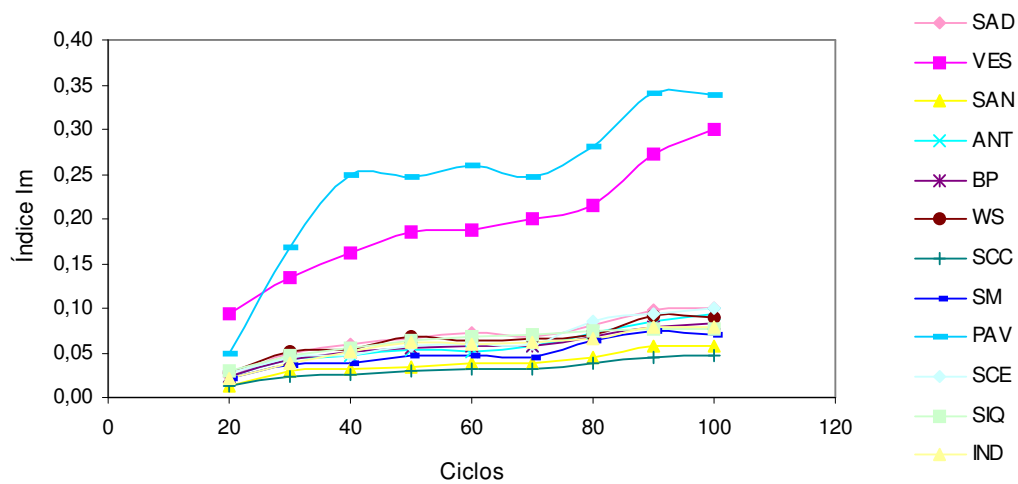


FIGURA 294 - Evolução do índice de Parker modificado com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem.

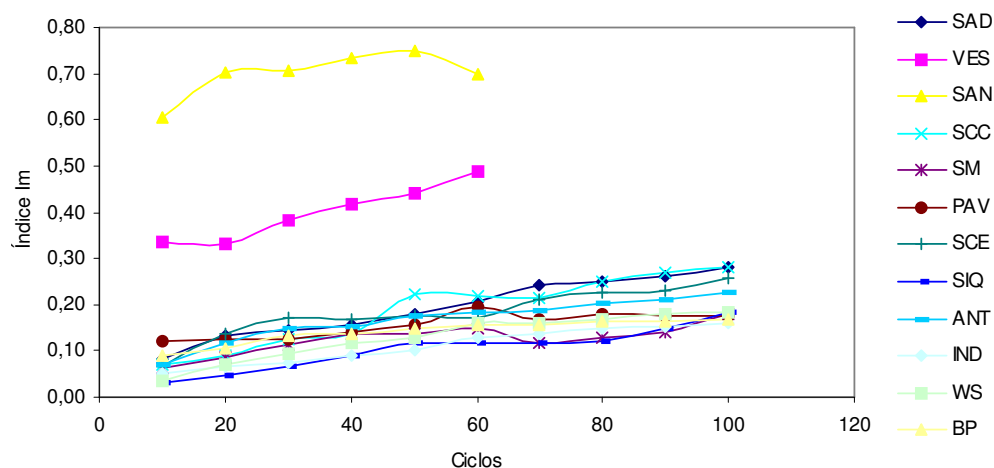


FIGURA 295 - Evolução do índice de Parker modificado com os ciclos do ensaio de alteração acelerada por lixiviação contínua.

Comparando-se os valores do Índice de Parker com os valores do Índice de Parker modificado dos ensaio de alteração por umedecimento e secagem e pela lixiviação contínua, têm-se uma diferenciação na hierarquia das amostras (Figuras 296 a 299).

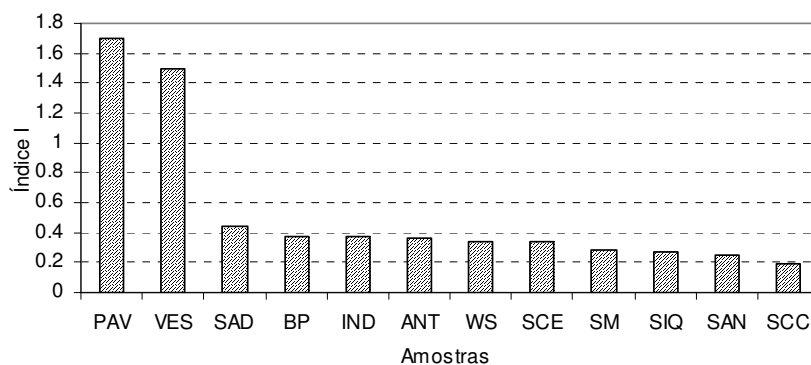


FIGURA 296 – Valores do Índice de Parker no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.

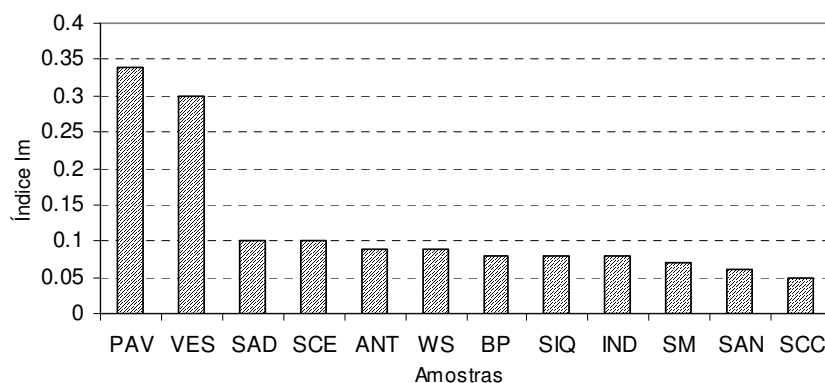


FIGURA 297 – Valores do Índice de Parker modificado no ciclo 100 do ensaio de umedecimento e secagem.

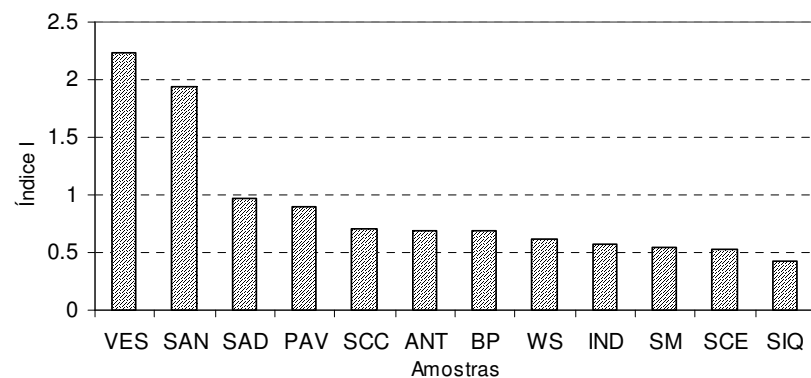


FIGURA 298 – Valores do Índice de Parker no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.

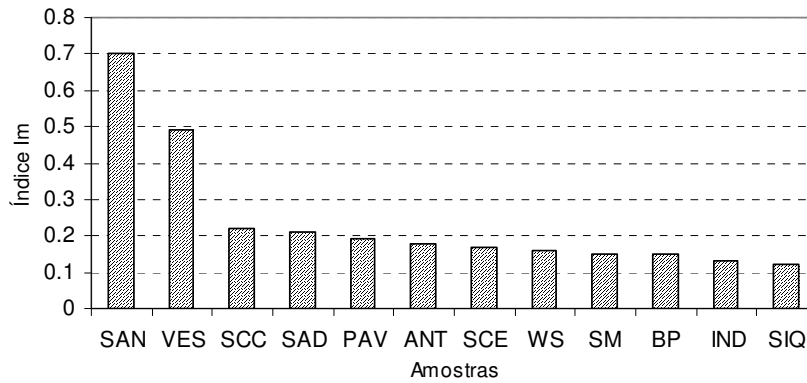


FIGURA 299 – Valores do Índice de Parker modificado no ciclo 60 do ensaio de lixiviação contínua.

6.2.4 Análise pela difratometria de Raios-x

Realizou-se difratometria de Raios-X nas amostras correspondentes ao ciclo 100 de ambos os ensaios de alteração acelerada. Os valores do Índice SAI (“*Smectite alteration index*”) (Houston & Smith, 1997), podem ser vistos nas Tabelas 33 e 34 e visualizados no gráfico da Figura 300.

Partindo-se da premissa de que o aumento do valor do índice SAI reflete o aumento, mesmo que pequeno, do pico da esmectita (15\AA) no difratograma e que provavelmente este aumento associa-se a um aumento na quantidade do argilomineral expansivo conclui-se que, com exceção das amostras *VES* e *WS*, todas as outras tiveram aumentadas as suas quantidades de argilominerais expansivos, quando cicladas no ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

Com relação a ciclagem por lixiviação contínua, também foi observado o aumento do valor do índice SAI, comparativamente ao ciclo 0, com a exceção da amostra *PAV* e *VES*.

Comparando-se os valores nos dois tipos de ensaio de alteração acelerada, têm-se que as amostras *PAV*, *SAN* e *SM* tiveram valores de índice SAI menores para o ensaio de lixiviação contínua. O restante das amostras tiveram os valores do índice SAI maiores no ensaio de lixiviação.

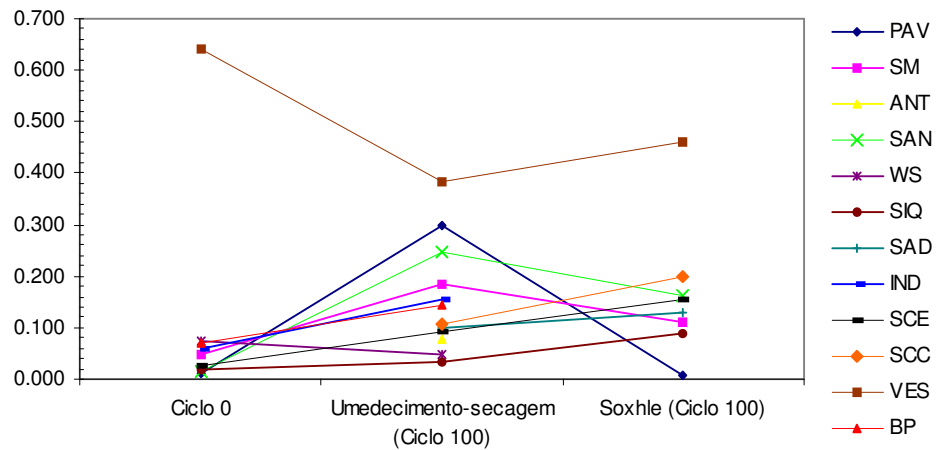


FIGURA 300 – Valores do Índice SAI das amostras estudadas.

As Figuras de 301 até 312, apresentam os difratogramas das amostras do ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

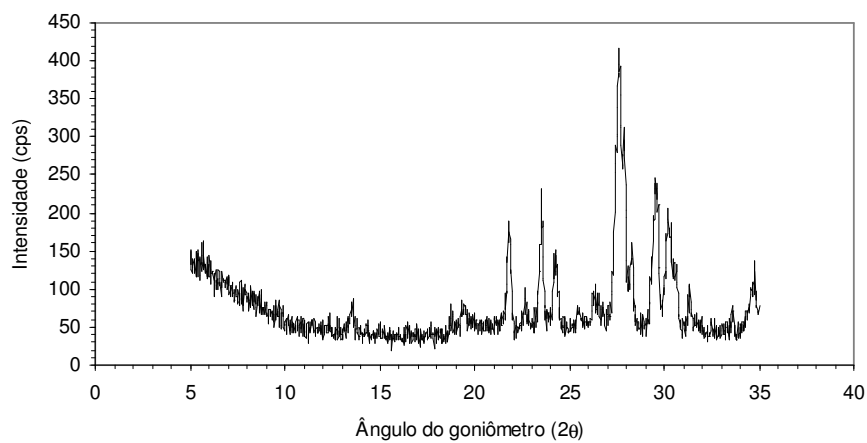


FIGURA 301 – Difratograma da amostra SCE no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

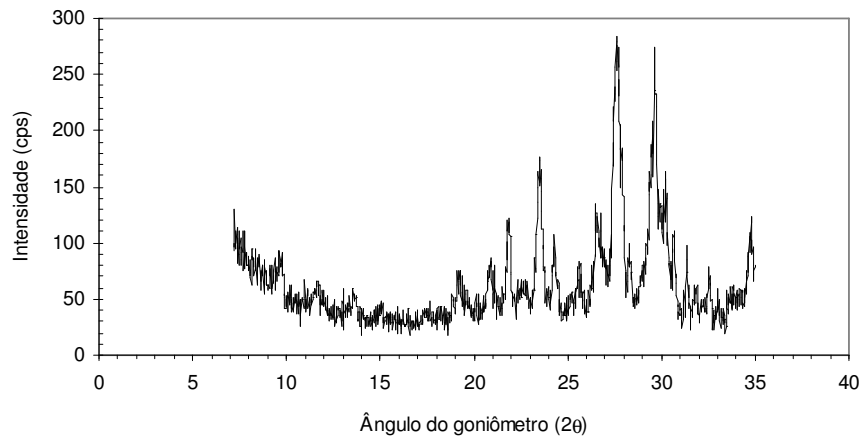


FIGURA 302 – Difratograma da amostra *VES* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

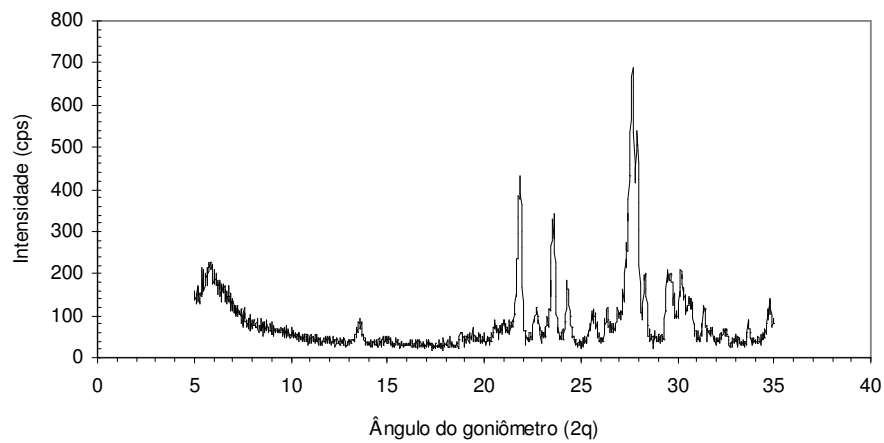


FIGURA 303 – Difratograma da amostra *BP* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

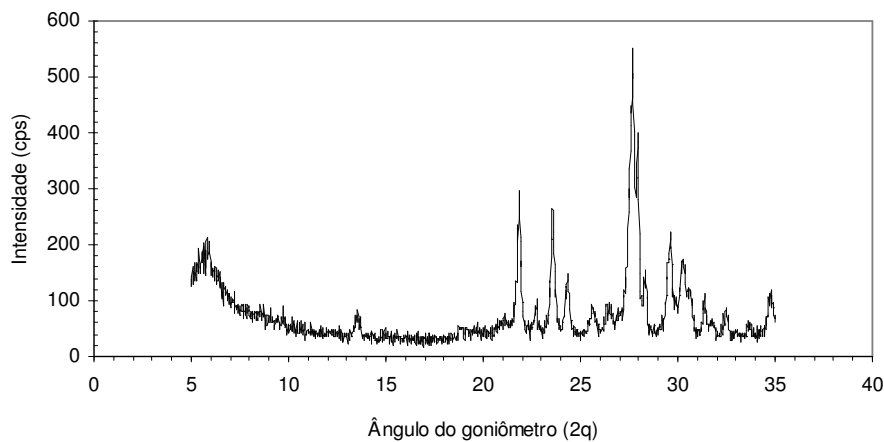


FIGURA 304 – Difratograma da amostra *IND* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

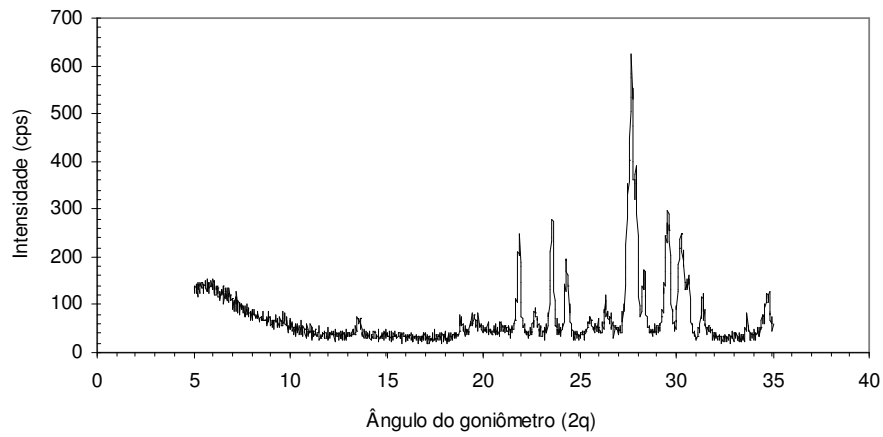


FIGURA 305 – Difratograma da amostra *SIQ* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

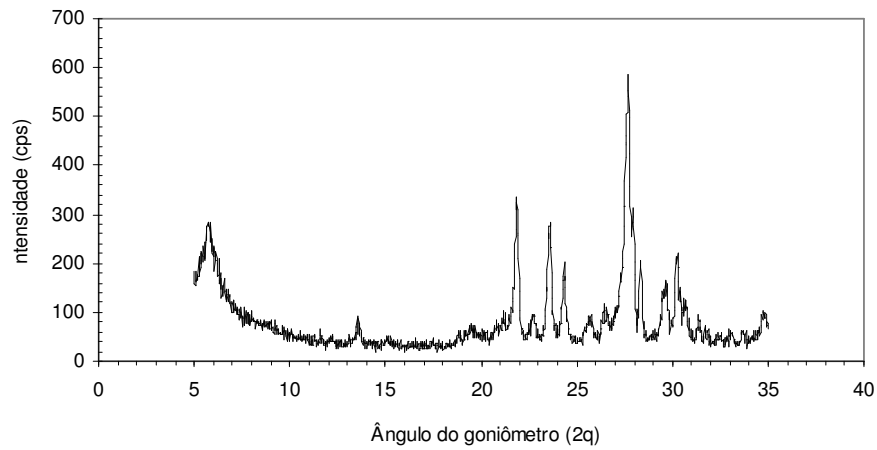


FIGURA 306 – Difratograma da amostra *SAN* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

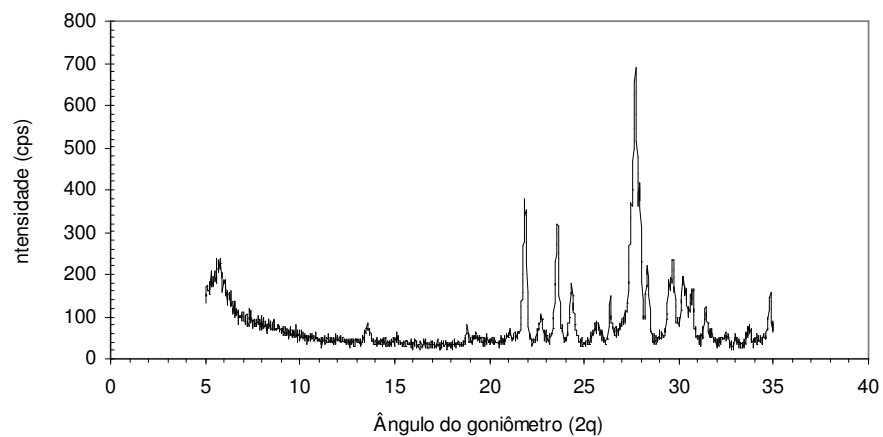


FIGURA 307 – Difratograma da amostra *SM* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

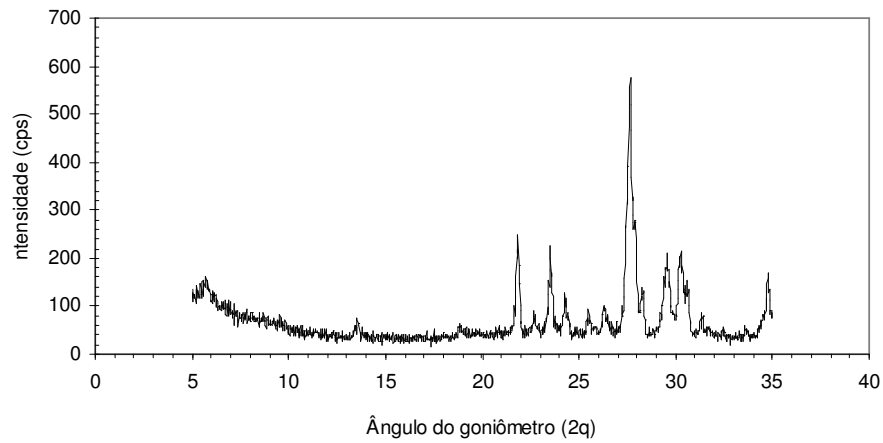


FIGURA 308 – Difratograma da amostra *SAD* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

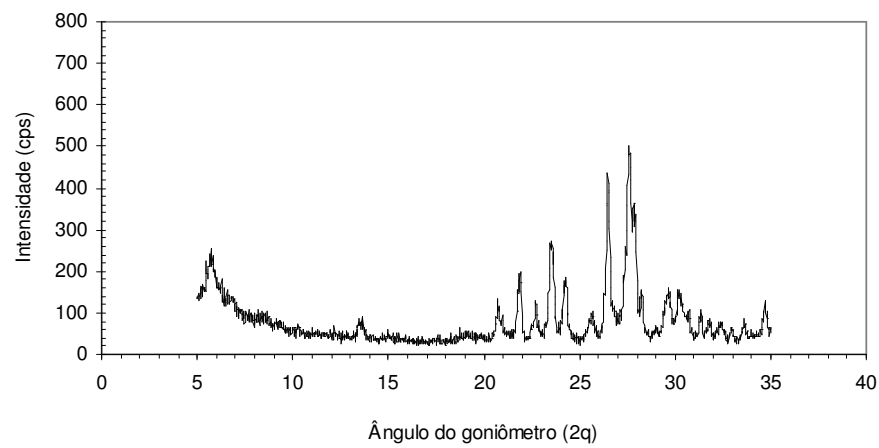


FIGURA 309 – Difratograma da amostra *PAV* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

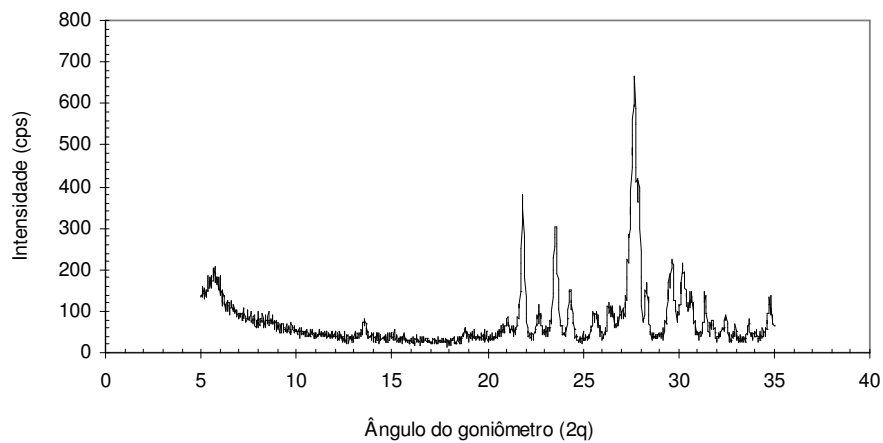


FIGURA 310 – Difratograma da amostra *SCC* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

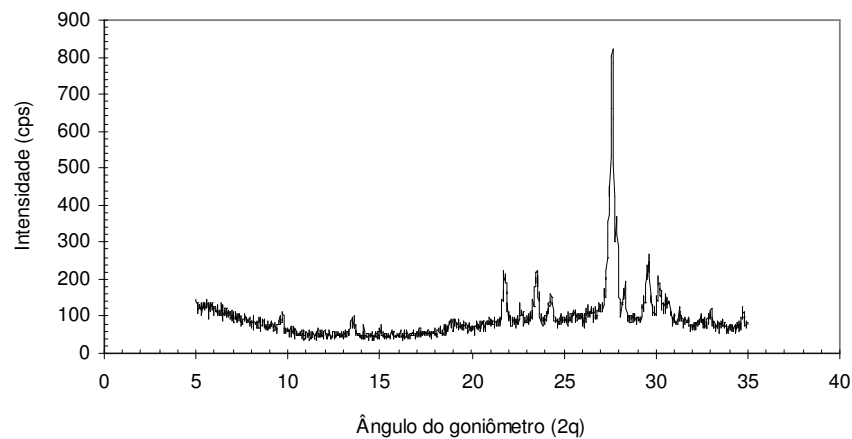


FIGURA 311 – Difratograma da amostra *WS* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

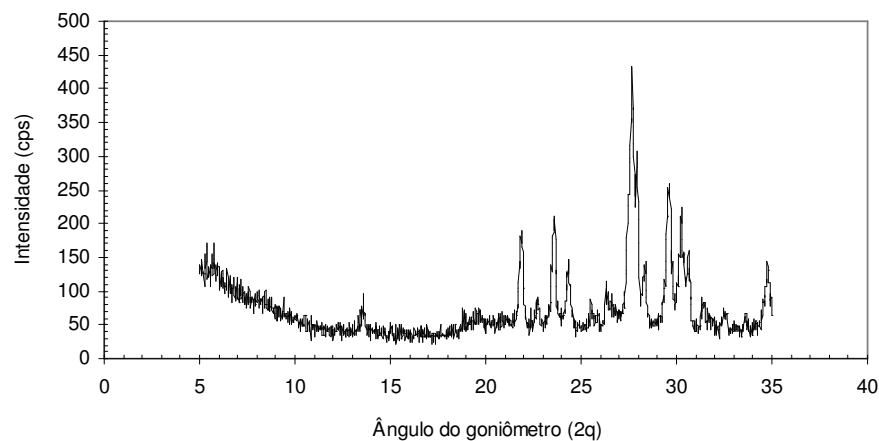


FIGURA 312 – Difratograma da amostra *ANT* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

6.2.5 Análise pela adsorção de azul de metileno

A adsorção de azul de metileno foi medida nos ciclos 20, 70 e 100 do ensaio de alteração acelerada por umedecimento e secagem, e nos ciclos 30, 60 e 100 do ensaio de alteração por lixiviação contínua.

As amostras, *VES*, *WS*, *PAV*, *SAN*, *BP*, *IND*, *SAD*, *SCC* e *SCE* tiveram seus valores de adsorção de azul de metileno aumentados com o decorrer da ciclagem por umedecimento e secagem. Tal fato retrata o aumento da quantidade de argilominerais expansivos com a evolução do ensaio de alteração. Ao passo que para as demais amostras os valores se

mantiveram constantes. No ensaio de alteração por lixiviação contínua, todas as amostras tiveram seus valores de adsorção aumentados com o avanço da ciclagem.

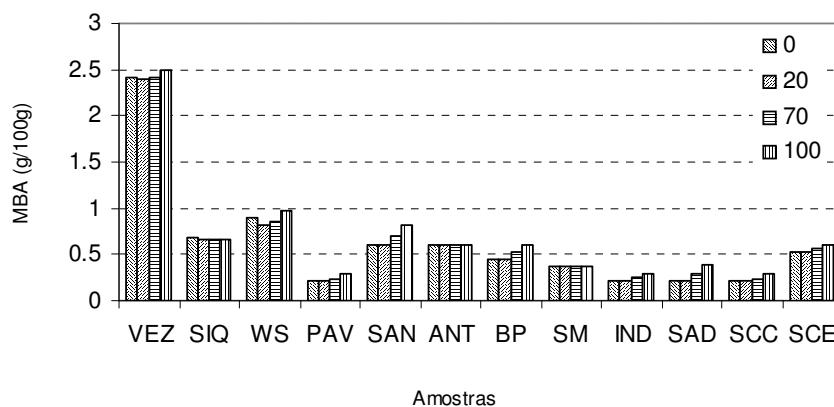


FIGURA 313 – Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem acelerada pelo umedecimento e secagem.

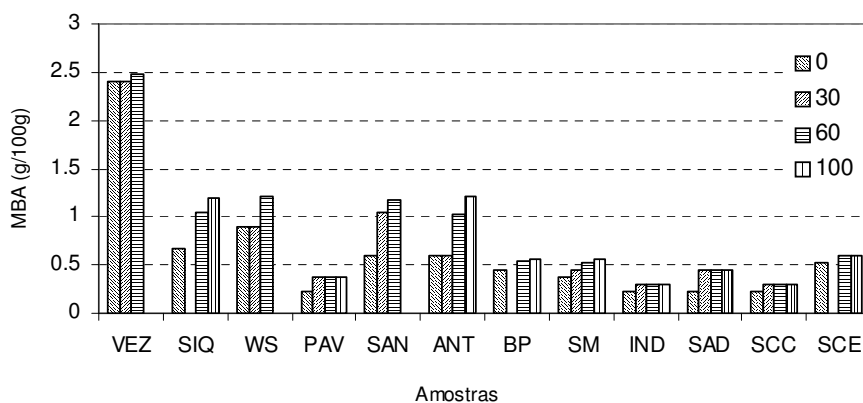


FIGURA 314 - Variação dos valores de adsorção de azul de metileno de cada amostra com a ciclagem acelerada pela lixiviação contínua.

6.3 Velocidades de Alteração e de Alterabilidade

A Tabela 52 apresenta as relações, em porcentagem, dos valores de perda de massa, do índice $K\Delta t$, do índice R_f e do índice de Parker entre os ensaios de alteração natural, de alteração acelerada por umedecimento e secagem e de alteração acelerada por lixiviação contínua nos ciclos 60 e 100. Para a composição desta tabela, considerou-se que o ensaio de alteração natural possui a menor velocidade de alteração e o de lixiviação contínua a maior. Desta maneira, as relações “umedecimento e secagem / natural” e “soxhlet / Umedecimento e secagem” possuem valores positivos e quanto maiores estes valores maiores as diferenças de velocidade de alteração entre os ensaios. Em contra partida, se os valores forem negativos significa que as velocidades dos ensaios de alteração tidos como mais lentos suplantaram às dos supostamente mais rápidos.

TABELA 52 - Relações, em porcentagem, entre os valores de perda de massa, do índice $K\Delta t$, do índice R_f e do índice de Parker, entre os ensaios de alteração nos ciclos 60 e 100.

	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
M_60 ume/nat	25,21	-17,86	39,57	34,77	-415,79	-37,20	18,46	2,42	53,50	46,77	-70,95	4,50
M_60 sox/ume	-271,43	81,82	-58,47	-130,46	86,03	-17,14	-77,27	45,61	29,75	19,48	7,94	33,13
M_100 ume/nat	-48,20	-57,42	-1,92	35,16	11,27	21,21	29,57	35,29	-3,72	35,26	16,67	49,15
M_100 sox/ume	-48,00	0,64	-91,91		14,11	-93,95	-74,24	-37,45	17,12	-43,12		-60,11
K_60 ume/nat	41,18	-20,00	41,67	26,83	-33,33	-41,67	52,94	16,67	47,62	26,67	-50,00	0,00
K_60 sox/ume	-240,00	77,27	-71,43	-105,00	25,00	0,00	-112,50	18,18	16,00	28,57	16,67	33,33
K_100 ume/nat	13,64	-15,38	0,00	32,69	33,33	18,75	59,09	41,38	5,88	18,18	30,23	38,89
K_100 sox/ume	-120,00	7,14	-54,55		-20,00	-68,42	-37,50	-20,83	15,00	0,00		-28,57
Rf_60 ume/nat	-1,56	0,05	-0,85	-2,09	0,28	0,93	-1,90	-0,72	-1,95	-0,83	3,89	0,14
Rf_60 sox/ume	2,33	-3,20	0,78	3,99	-0,25	0,07	1,79	-0,74	-0,81	-1,25	-1,87	-0,76
Rf_100 ume/nat	-1,01	0,47	-0,22	-3,55	-1,34	-1,16	-2,72	-2,38	-0,31	-0,70	-5,79	-1,15
Rf_100 sox/ume	2,65	-0,23	1,27		0,81	2,44	1,22	0,88	-0,47	-0,04		0,64
I_60 ume/nat	-42,22	62,96	60,00	56,76	39,53	42,50	60,98	57,35	62,26	81,43	56,05	-13,04
I_100 sox/ume	-107,32	50,00	-28,95		34,62	37,21	44,30	52,56	56,96	76,54		52,56

M_60 ume/nat = relação entre os valores de perda de massa no ciclo 60 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; M_60 sox/ume = relação entre os valores de perda de massa no ciclo 60 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; M_100 ume/nat = relação entre os valores de perda de massa no ciclo 100 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; M_100 sox/ume = relação entre os valores de perda de massa no ciclo 100 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; K_60 ume/nat = relação entre os valores de $K\Delta t$ no ciclo 60 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; K_60 sox/ume = relação entre os valores de $K\Delta t$ no ciclo 60 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; K_100 ume/nat = relação entre os valores de $K\Delta t$ no ciclo 100 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; K_100 sox/ume = relação entre os valores de $K\Delta t$ no ciclo 100 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; Rf_60 ume/nat = relação entre os valores de R_f no ciclo 60 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; Rf_60 sox/ume = relação entre os valores de R_f no ciclo 60 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; Rf_100 ume/nat = relação entre os valores de R_f no ciclo 100 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem; Rf_100 sox/ume = relação entre os valores de R_f no ciclo 100 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; I_60 ume/nat = relação entre os valores do índice de Parker no ciclo 60 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; I_60 sox/ume = relação entre os valores do índice de Parker no ciclo 60 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; I_100 ume/nat = relação entre os valores do índice de Parker no ciclo 100 dos ensaios de alteração natural e acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua; I_100 sox/ume = relação entre os valores do índice de Parker no ciclo 100 dos ensaios de alteração acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua.

De forma geral a perda de massa, o índice $K\Delta t$ e o índice de Parker mostraram-se bons indicadores das diferenças entre os valores encontrados. O mesmo não aconteceu com os valores do índice Rf pois. as diferenças variaram entre 3,99 (%) e 0,04 (%).

A Tabela 53 apresenta as médias dos valores positivos de perda de massa, do índice $K\Delta t$ e do índice de Parker, além da média geral dos três resultados para os dois ciclos avaliados. Depreende-se que os valores do ensaio de umedecimento e secagem são 28,89% maiores que os do ensaio de alteração natural e que os do ensaio de lixiviação contínua são em média 42,75% maiores que os do ensaio de umedecimento e secagem. Por analogia pode-se afirmar que os resultados dos valores de perda de massa, Índice $K\Delta t$ e Índice de Parker dos ensaio de alteração por lixiviação contínua são, em média, 84,60% maiores que os do ensaio de alteração natural.

TABELA 53 – Média dos valores positivos das relações “umedecimento e secagem / natural” e “soxhlet / Umedecimento e secagem”.

	Perda de massa	Índice $K\Delta t$	Índice de Parker	Média dos Ensaio
60 ume/nat	28,15 %	31,70 %		28,89 %
100 ume/nat	29,19 %	26,55 %		
60 sox/ume	43,39 %	26,88 %	57,98 %	42,75 %

Nos ensaios de alteração por ciclagem natural e por umedecimento e secagem considera-se que cada ciclo seja igual a um dia (24h). No ensaio de alteração por lixiviação contínua cada ciclo do extrator “Soxhlet” é completado em média a cada 6 horas. Portanto, cada 6 ciclos no extrator “Soxhlet” equivalem a um dia de ciclagem. Com base nos dados mostrados na Tabela 53 pode-se afirmar que uma amostra que possui, por exemplo, determinada perda de massa em 360 dias, terá esta mesma perda no ensaio de umedecimento e secagem em apenas 276 dias. Já a lixiviação contínua promoverá esta mesma perda em aproximadamente 49 dias. Em resumo, têm-se que o ensaio de umedecimento e secagem solicita a amostra cerca de 1,3 vezes mais rápido que o ensaio de ciclagem natural enquanto que a ciclagem por lixiviação contínua é aproximadamente 7,34 vezes mais rápida que a natural.

Capítulo 7

QUALIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DOS MATERIAIS ESTUDADOS

7.1 Qualificação dos Materiais

A depender do uso em construção civil, seja como agregado para concreto, agregado para pavimento e agregado para lastro ferroviário, as normas brasileiras recomendam os ensaios, com suas respectivas especificações (Tabela 54). Da observação desta tabela depreende-se que a grande maioria dos ensaios ainda não possui limites de valores normatizados para caracterização apropriada do agregado quando utilizado para as finalidades citadas. Desta forma, optou-se por utilizar em conjunto, os limites de valores apresentados em Verhoef & Van De Wall (1998), IPT (1980) e pelos limites de valores encontrados nos ensaios realizados neste trabalho (Tabela 55).

TABELA 54 – Ensaios recomendados e especificações para agregados, segundo a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Ensaios	Agregados para concreto	Agregados para pavimentos	Agregados para lastro ferroviário
Abrasão Los Angeles	máx. 50%	máx. 40%; 50%	máx. 40%
Esmagamento	máx. 30%	máx. 30% *	máx. 30%
Impacto Treton	máx. 30% *	máx. 20% *	máx. 20%
Massa Específica	mín. 2,5g/cm ³ *	mín. 2,5g/cm ³ *	mín. 2,4g/cm ³
Porosidade	máx. 2% *	máx. 2% *	máx. 1%
Absorção d'água	máx. 1% *	máx. 1% *	máx. 1%
Índice de forma	máx. 3	máx. 2	cúbica
Partícula lamelar	n.e.	n.e.	máx. 10%
Material pulverulento	máx. 1%	n.e.	máx. 1%
Torrões de argila	máx. 3%	n.e.	máx. 0,5%
Sanidade com sulfato de sódio ou magnésio	máx. 18% *	máx. 20%	máx. 18% *
Compressão Uniaxial	mín. 100MPa *	mín. 140MPa *	mín. 140MPa *
Alteração	n.e.	n.e.	n.e.
Análise petrográfica	n.e.	n.e.	n.e.

Abreviações: n.e. = não especificado; * = valor proposto IPT (1980) – não especificado na norma Agregados para concreto (NBR 7211), Agregados para pavimentos (NBR 1183 e 11806) e Agregados para lastro ferroviário (NBR 5564).

TABELA 55 – Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Verhoef & Van De Wall, 1998 e IPT,1980).

Ensaio (índice)	Excelente (peso 3)	Bom (peso 2)	Razoável (peso 1)	Ruim (peso 0)
Massa Específica seca (g/cm ³)	> 2,9	2,6 – 2,9	2,3 – 2,6	< 2,3
Absorção d' água (%)	< 0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,0	> 6,0
Porosidade (%)	<2	2 - 3	3 - 4	>4
Sanidade em etileno glicol (%)	< 2	2 - 12	12 - 30	> 30
Adsorção de azul de metileno (g/100g)	< 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 1,0	> 1,0
Resistência a compressão simples (MPa)	> 200	100 - 200	50 - 100	< 50
Resistência ao esmagamento (%)	< 20	20 - 25	25 - 30	>30
Resistência ao abrasão los angeles (%)	<40	40 - 45	45 - 50	>50
Índice petrográfico K1	-	> 5	5 - 3	< 3
Índice Petrográfico K2	-	> 5	5 - 1	< 1
Índice Rsm	< 60	60 - 110	110 - 140	> 140
Índice SAI	< 0,08	0,08 – 0,13	0,13 – 0,4	> 0,4
pH de abrasão	-	-	-	> 9,3 ou < 6,5
Condutividade de abrasão	-	-	-	> 120
Alterabilidade - perda de massa (%)	-	< 3,50	3,50 – 11,00	> 11,00
Índice de alterabilidade KΔt	< 0,001	0,001	– 0,030	– > 0,070
		0,030	0,070	
Índice de alterabilidade Rf	> 90,00	90,00	– 80,00	– < 70,00
		80,00	70,00	

Na Tabela 55 os resultados dos ensaios foram subdivididos em quatro classes de valores. Cada uma destas classes possui um peso diferente que varia de 0 a 3 com aumento da qualidade do atributo avaliado no sentido crescente. Desta forma, têm-se as seguintes correspondências: peso = 0 (qualidade ruim), peso = 1 (qualidade razoável), peso = 2 (boa qualidade) e peso = 3 (excelente qualidade).

Para avaliação de todas as informações e visando a apresentação de uma nota final que retrate a qualidade do material analisado, foi criado um algoritmo que se baseia no somatório dos pesos de cada atributo dividido pelo peso máximo e multiplicado pelo número de atributos. Entende-se por atributo, neste trabalho, cada característica avaliada, como por exemplo o grau de alteração, a porosidade, a absorção de água, o abrasão Los Angeles, etc. Sendo assim, têm-se um total de 17 atributos avaliados, cada um com seu peso relacionado aos resultados de ensaios. A título de ilustração apresenta-se a fórmula do algoritmo utilizado:

$$R = \sum_j^i Pa_{i,j} / P_{\text{máx}} * N$$

onde:

R = Valor final (varia de 0 a 1);

$P_{ai,j}$ = Peso de cada atributo;

$P_{máx}$ = Peso máximo do atributo;

N = Número total de atributos.

A Tabela 56, apresenta os pesos de cada ensaio nas diversas amostras estudadas. Como visto, os materiais rochosos são classificados de acordo com o seu potencial de uso como agregado, nas seguintes classes: “Ruim”, “Razoável”, “Bom” e “Excelente”. Desta maneira, se o valor final R varia de 0 a 1, respectivamente da pior para melhor qualidade, é possível então se definir intervalos de valores para R associados às diferentes classes de qualidade. Sendo assim, para valores de R entre 0 e 0,25 tem-se a classe “Ruim”, para valores de R entre 0,26 e 0,50 associa-se a classe “Razoável”, para valores de R situados entre 0,51 e 0,75 tem-se a classe “Bom” e para valores de R entre 0,76 e 1,00, a classe “Excelente”.

De acordo com os resultados classificatórios apresentados na Tabela 56, com a exceção da amostra representativa dos basaltos vesículo amigdaloidais (VES), todas as outras foram classificadas como de excelente e boa qualidade. A amostra PAV, possui excelentes qualidades no que se refere as suas características tecnológicas e de resistência. No quesito alterabilidade, esta amostra requer cuidados quando do seu uso devido a possível oxidação dos sulfetos presentes em sua mineralogia, podendo transformar-se em sulfatos que se cristalizam na superfície e nas microfissuras do agregado causando a sua desagregação.

As amostras SM, SAD, IND, SCE, SCC e BP foram classificadas como de excelente qualidade, resultado classificatório corroborado pelos resultados dos ensaios realizados. A amostra SAD, apresentou baixo valor do índice petrográfico K2, devido a presença de esmectitas interligadas observadas ao microscópio petrográfico, o que poderia influenciar negativamente em sua qualidade. Entretanto, a sua estrutura bastante compacta, de baixa porosidade e baixa absorção d’água, fez com que não houvesse a influência da presença destes argilominerais nos resultados dos ensaios de alterabilidade.

As amostras ANT, WS, SIQ e SAN, foram classificadas como de boa qualidade. A amostra ANT, devido à presença de aproximadamente 28% de vidro vulcânico em sua mineralogia, apresentou valor reduzido para o índice petrográfico K2. A presença de

argilominerais do grupo da esmectita nesta amostra, provavelmente resultante da mesóstase do vidro vulcânico, foi detectada pelo elevado valor do índice SAI e pela adsorção de azul de metileno. Com relação à alterabilidade, esta amostra apresentou resultados de perda de massa e valores de índices de alterabilidade compatíveis com os valores das amostras classificadas como de excelente qualidade. Mais uma vez, verifica-se que não houve relação direta entre a quantidade de argilominerais expansivos com os resultados dos ensaios de alterabilidade.

TABELA 56 – Respective pesos dos resultados associados a classificação da qualidade das amostras estudadas.

Amostra / Ensaio	PAV	SM	ANT	SAN	WS	SIQ	SAD	IND	SCE	SCC	VES	BP
ρ_d	2	3	2	3	3	3	3	3	2	3	0	3
ω	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	0	3
η	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3
EG	3	2	2	0	1	1	3	3	3	3	0	2
MBA	3	3	2	2	1	2	3	3	2	3	0	2
σ_c	3	2	3	2	2	1	3	2	3	3	1	2
Esm	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3
LA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
K1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2
K2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2
Rsm	3	3	3	1	3	0	2	3	3	3	0	3
SAI	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	0	3
pH ab.	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
Cond. ab	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
Perda de massa	3	3	3	1	3	1	3	3	2	3	0	3
K Δ t	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	0	2
Rf	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	0	2
Somatório dos pesos dos atributos	40	43	39	32	38	32	42	44	42	45	8	42
Peso máximo dos atributos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Número de atributos	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Valor de R	0,78	0,84	0,76	0,63	0,74	0,63	0,82	0,86	0,82	0,88	0,15	0,82
Classificação	Exc.	Exc.	Bom	Bom	Bom	Bom	Exc.	Exc.	Exc.	Exc.	Ruim	Exc.

Nota: ρ_d = massa específica seca aparente; η = porosidade aparente; ω = absorção d'água; EG = perdas pelo etileno glicol; MBA = adsorção de azul de metileno; σ_c = resistência à compressão uniaxial; Esm = resistência ao esmagamento; LA = resistência ao abrasão Los Angeles; K1 e K2 = índices petrográficos; R_{sm} = "secondary mineral rating"; SAI = "smectite alteration index"; pH ab. = pH de abrasão; Cond. Ab. = condutividade de abrasão; K Δ t = índice de alterabilidade; Rf = índice de alterabilidade.

Na amostra *WS* o ensaio de adsorção por azul de metileno identificou quantidades significativas de argilominerais expansivos que, associadas a valores de porosidade e absorção d'água relativamente maiores que os valores das amostras classificadas como de excelente qualidade, proporcionou uma perda significativa no ensaio de imersão em etileno glicol. Tal fato reflete-se no resultado do índice de alterabilidade *Rf*.

As amostras *SAN* e *SIQ*, apesar de apresentarem excelentes valores de índices físicos e também seus difratogramas de raios x não detectarem argilominerais expansivos, possuem péssimos resultados nos quesitos: perda por etileno glicol, índices petrográficos *K1* e *K2* e índice *Rsm*. Este comportamento se repetiu nos resultados dos ensaios de alterabilidade pois, os valores de perda de massa e dos índices *KAt* e *Rf* apresentam resultados diferenciados em relação às demais amostras. Desta forma, apesar das amostras *SAN* e *SIQ* terem obtido uma boa classificação, o seu uso como material de construção requer alguns cuidados no que diz respeito principalmente à sua alterabilidade.

No que se refere à análise comparativa entre a qualidade dos materiais rochosos provenientes dos diferentes compartimentos, optou-se pela comparação dos valores de *R* encontrados para as amostras do entablamento e do colunata provenientes de um mesmo derrame basáltico. Desta forma, comparou-se os valores classificatórios das amostras *IND*, *SAD*, *SCC*, *SCE*, *SAN* e *ANT*.

Os compartimentos entablamento (*SAD*) e colunata (*IND*) do derrame basáltico explotado pelas pedreiras Said e Inderp (Ribeirão Preto-SP), apresentaram valores de “*R*” bastante próximos, respectivamente 0,82 e 0,86. Estes valores indicam uma melhor qualidade referente ao compartimento colunata. As amostras dos compartimentos entablamento (*SCE*) e colunata (*SCC*) dos derrames na região de São Carlos-SP, também, apresentaram uma pequena melhora na qualidade da amostra proveniente do compartimento colunata ou seja valor de “*R*”= 0,82 para a amostra do entablamento e valor de “*R*”= 0,88 para a amostra do colunata. Já a comparação entre os compartimentos entablamento e colunata presentes no derrame explotado pela pedra Santo Antônio em Araraquara-SP, a situação é inversa. Neste caso, o valor de “*R*”= 0,76 da amostra do entablamento (*ANT*) é maior que o valor de “*R*”= 0,63 da amostra do colunata (*SAN*).

7.2 Método Prático para Avaliação de Qualidade

A avaliação da qualidade dos materiais rochosos realizada no item anterior requer a quantificação de diversos índices e parâmetros o que de certa forma, dificulta a sua realização de maneira prática e rápida. Neste contexto, sugere-se um método embasado em resultados de ensaios de caracterização tecnológica de fácil execução que reflita, de forma clara a qualidade dos materiais rochosos analisados.

Para a escolha dos ensaios adotados neste método, analisou-se os valores do índice de correlação “R²” dos diversos ensaios com os resultados do índice de alterabilidade KΔt. Para tanto, foram feitas as curvas de regressão das variáveis independentes (Massa específica seca aparente, Absorção d’água, Porosidade aparente, Sanidade em etileno glicol, etc.) com a variável dependente KΔt (Figuras 322 a 335). Os valores de “R²” e as respectivas equações de correlação são apresentados na Tabela 57.

TABELA 57 – Valores do índice de correlação R² e respectivas equações de correlação entre os resultados de ensaios tecnológicos com o índice de alterabilidade KΔt.

Ensaio	R ²	Equação
Massa específica seca aparente	0,60	$\rho_d = -9,1897 K\Delta t + 3,1374$
Absorção d’água	0,60	$\omega = 101,71 K\Delta t - 2,1127$
Porosidade aparente	0,60	$\eta = 221,54 K\Delta t - 4,3367$
Sanidade em etileno glicol	0,90	$EG = 1653,7 K\Delta t - 32,106$
Adsorção de azul de metileno	0,62	$MBA = 29,175 K\Delta t - 0,2675$
Resistência à compressão uniaxial	0,31	$\sigma_c = -2359,5 K\Delta t + 251,4$
Resistência ao esmagamento	0,38	$Esm = 88,762 K\Delta t + 11,443$
Resistência ao abrasão Los Angeles	0,68	$LA = 251,48 K\Delta t + 8,6892$
Índice petrográfico K1	0,37	$K1 = -299,75 K\Delta t + 21,259$
Índice petrográfico K2	0,36	$K2 = -300,05 K\Delta t + 19,008$
“Secondary mineral rating”	0,76	$Rsm = 2590,5 K\Delta t - 9,6627$
“Smectite alteration index”	0,53	$SAI = 7,733 K\Delta t - 0,1377$
pH de abrasão	0,12	$pH = 16,173 K\Delta t + 8,0711$
Condutividade de abrasão	0,05	$Cond. = 763,01 K\Delta t + 26,542$

Depreende-se da Tabela 57 que os valores de “R²” para os índices físicos, para a adsorção de azul de metileno, para a imersão em etileno glicol, para a resistência ao abrasão Los Angeles e para o índice R_{sm}, estão compreendidos entre 0,60 e 0,90 o que denota bons níveis de correlação com a variável dependente KΔt. Desta forma, pode-se calcular valores do índice KΔt_{calc} a partir das equações de correlação dos ensaios citados anteriormente. A

expressão matemática apresentada abaixo representa a média dos valores de $K\Delta t_{calc}$ encontrados para cada ensaio adotado.

$$K\Delta t_{calc} = (-0,11\rho_d + 0,01\omega + 0,0045\eta + 0,006EG + 0,034MBA + 0,0004Rsm + 0,004LA + 0,39) / 7$$

Onde:

ρ_d = Massa específica seca aparente (g/cm³)

ω = Absorção d'água (%)

η = Porosidade aparente (%)

EG = Perdas por imersão em etileno glicol (%)

MBA = Valor da adsorção de azul de metileno (g/100g)

Rsm = “Secondary Mineral Rating”

LA = Resistência ao Abrasão Los Angeles (%)

A Tabela 58 apresenta o cálculo do $K\Delta t_{calc}$ a partir dos resultados encontrados para os ensaios realizados.

TABELA 58 – Valores utilizados para o cálculo do índice $K\Delta t_{calc}$.

Amostra	ρ_d (g/cm ³)	η (%)	ω (%)	Rsm	LA (%)	EG (%)	MBA (g/100g)	$K\Delta t_{calc}$
SCC	2,912	0,77	0,27	23	13,09	0	0,22	0,020
SCE	2,893	0,87	0,30	55	14,91	0	0,52	0,025
SAN	2,910	0,84	0,29	110	16,65	42,00	0,60	0,065
ANT	2,889	1,57	0,54	53	14,84	8,33	0,60	0,033
IND	2,923	0,60	0,20	49	13,87	0	0,22	0,022
SAD	2,916	0,83	0,29	72	13,32	0	0,22	0,023
VES	2,243	17,27	7,78	175	31,58	75,00	2,41	0,146
PAV	2,862	0,77	0,27	40	16,32	0	0,22	0,024
BP	2,948	0,97	0,33	31	15,88	0	0,45	0,023
SM	2,921	1,38	0,47	34	13,26	8,33	0,37	0,029
SIQ	2,945	1,15	0,39	145	16,33	25,00	0,68	0,052
WS	2,942	1,58	0,54	40	15,76	16,67	0,90	0,041

Com o intuito de se buscar uma correspondência entre os valores de $K\Delta t$ e de $K\Delta t_{calc}$ estabeleceu-se a correlação apresentada no gráfico da Figura 336. O valor de 0,84 para o valor de “R²” indica uma boa correlação entre estas duas variáveis.

Para avaliação da qualidade dos materiais rochosos a partir dos valores do índice $K\Delta t_{calc}$, utilizou-se os limites de valores sugeridos na Tabela 55. Desta forma, as amostras SCC, SCE, IND, SAD, PAV, BP e SM foram classificadas como de boa qualidade. Já as

amostras *SAN*, *ANT* e *WS* foram avaliadas como de qualidade “razoável”, enquanto que a amostra *VES* teve sua qualidade classificada como “Ruim”. Tal fato possibilita constatar que estes resultados são mais rigorosos, em relação à qualificação realizada, que aqueles estabelecidos pelo índice “R” (Tabela 56).

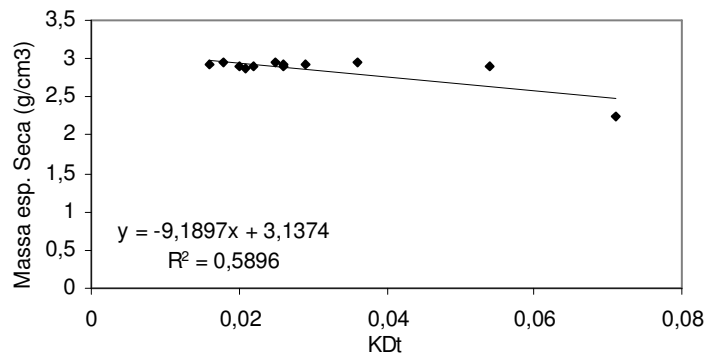


FIGURA 315 – Regressão linear decrescente para correlação entre a massa específica seca aparente com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

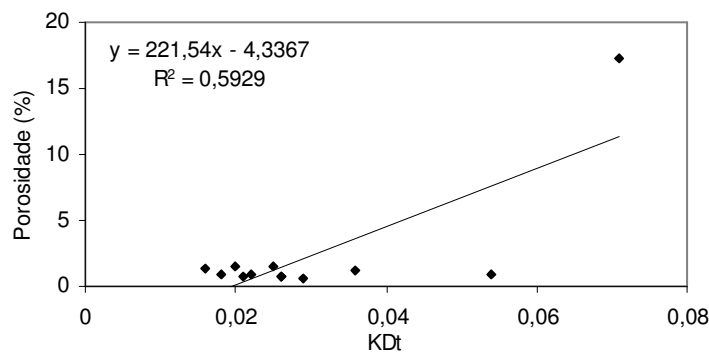


FIGURA 316 – Regressão linear crescente para correlação entre a porosidade aparente com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

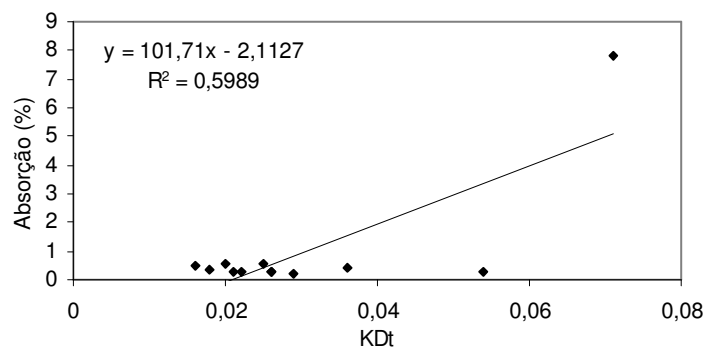


FIGURA 317 – Regressão linear crescente para correlação entre a absorção d'água com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

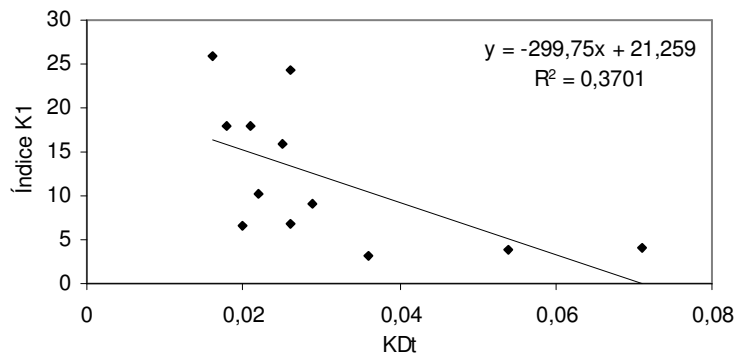


FIGURA 318 – Regressão linear decrescente para correlação entre o índice K1 com o índice de alterabilidade KΔt.

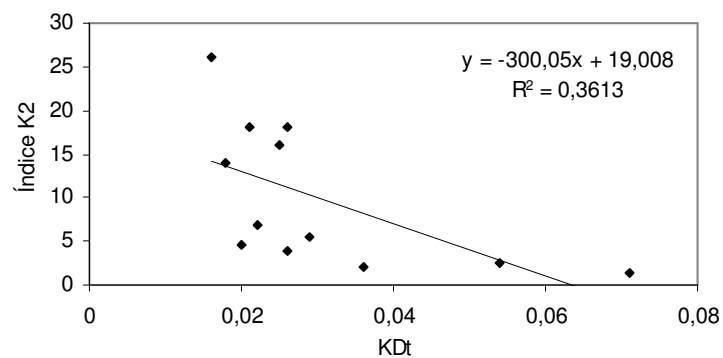


FIGURA 319 – Regressão linear decrescente para correlação entre o índice K2 com o índice de alterabilidade KΔt.

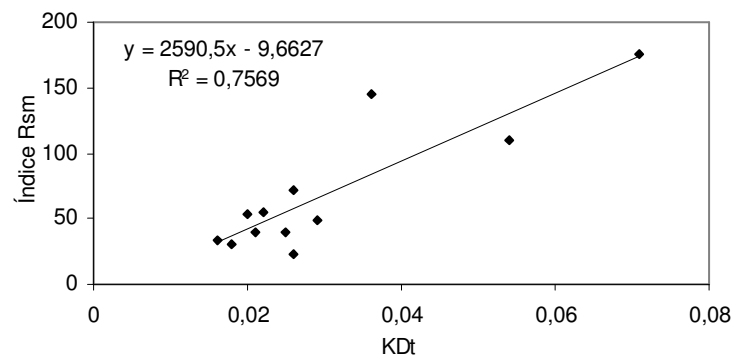


FIGURA 320 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice Rsm com o índice de alterabilidade KΔt.

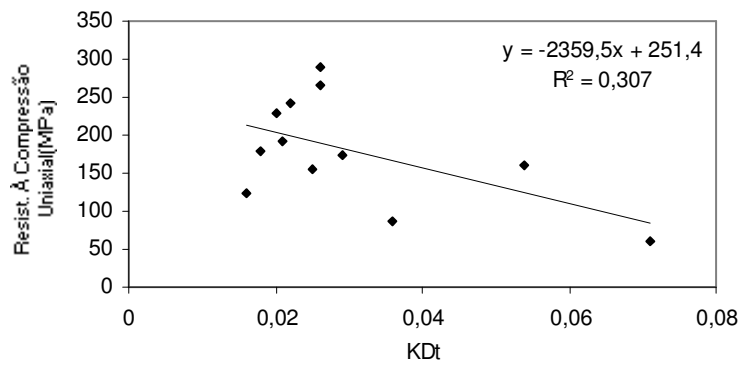


FIGURA 321 – Regressão linear decrescente para correlação entre a Resist. à compressão uniaxial com o índice de alterabilidade KΔt.

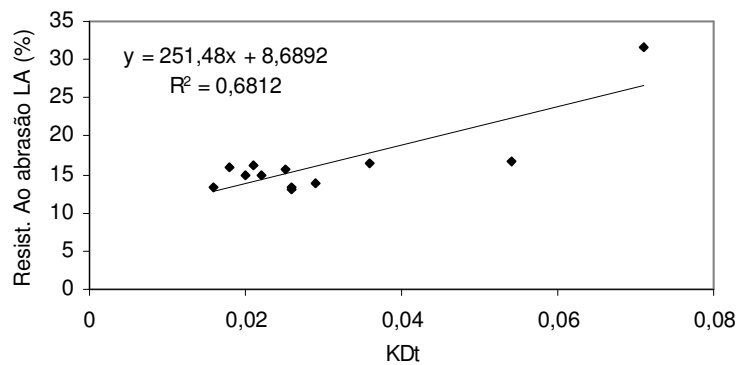


FIGURA 322 – Regressão linear crescente para correlação entre a Resist. ao abrasão Los Angeles com o índice de alterabilidade KΔt.

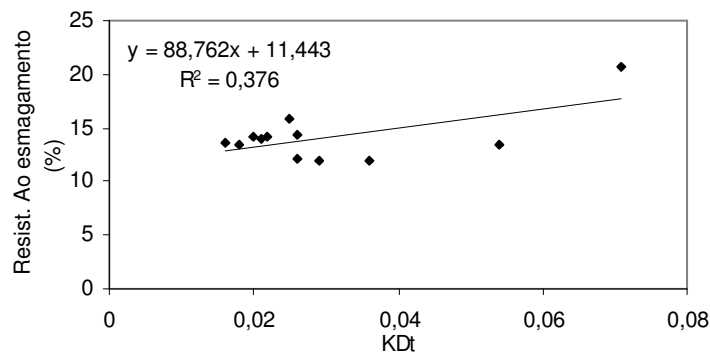


FIGURA 323 – Regressão linear crescente para correlação entre a Resist. ao esmagamento com o índice de alterabilidade KΔt.

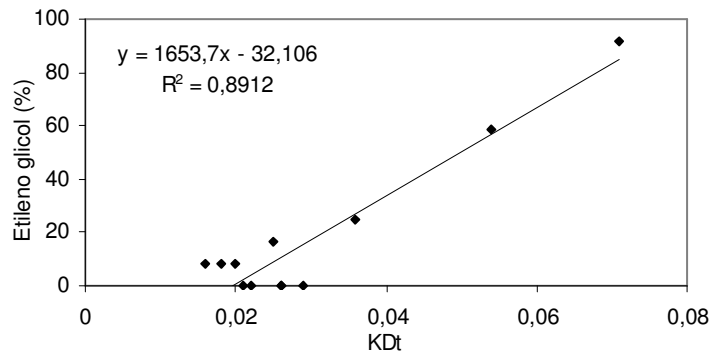


FIGURA 324 – Regressão linear crescente para correlação entre a sanidade em etileno glicol com o índice de alterabilidade KΔt.

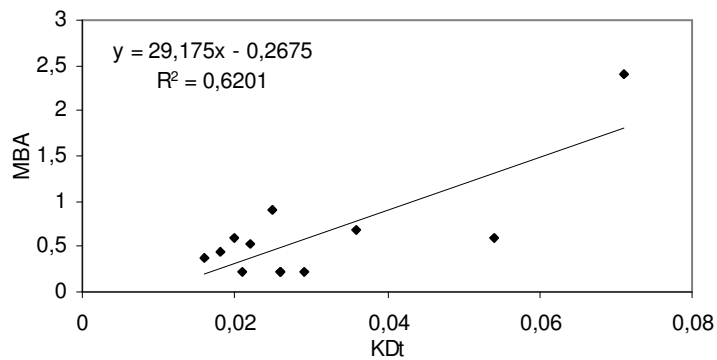


FIGURA 325 – Regressão linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno com o índice de alterabilidade KΔt.

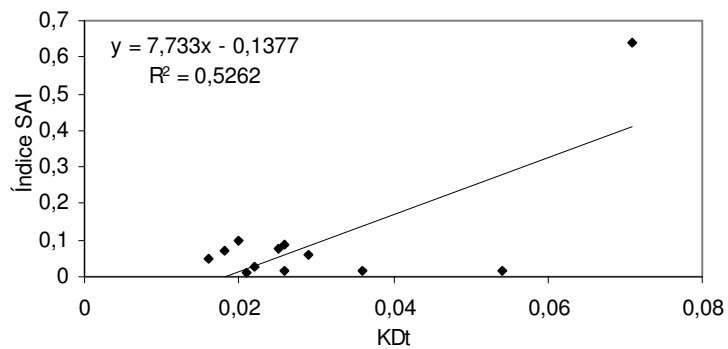


FIGURA 326 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI com o índice de alterabilidade KΔt.

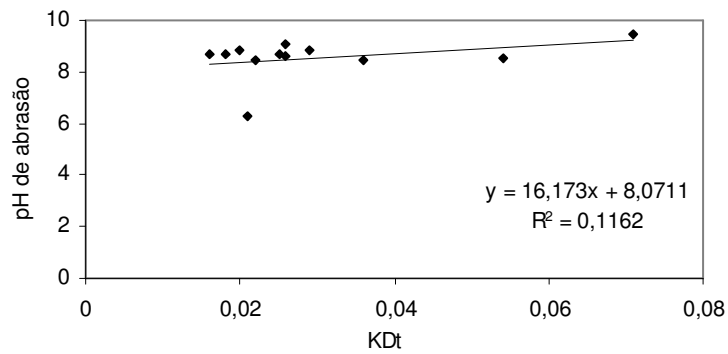


FIGURA 327 – Regressão linear crescente para correlação entre o pH de abrasão com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

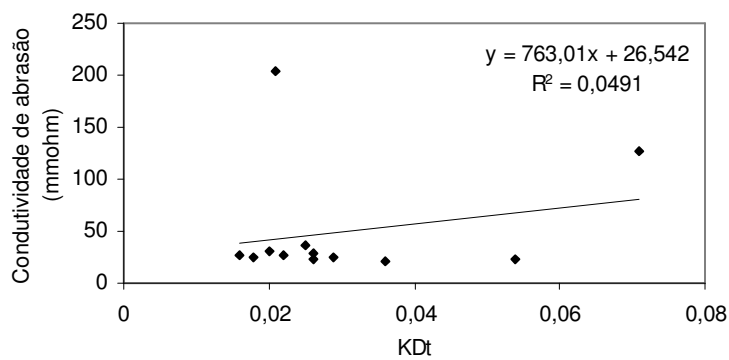


FIGURA 328 – Regressão linear crescente para correlação entre a condutividade de abrasão com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

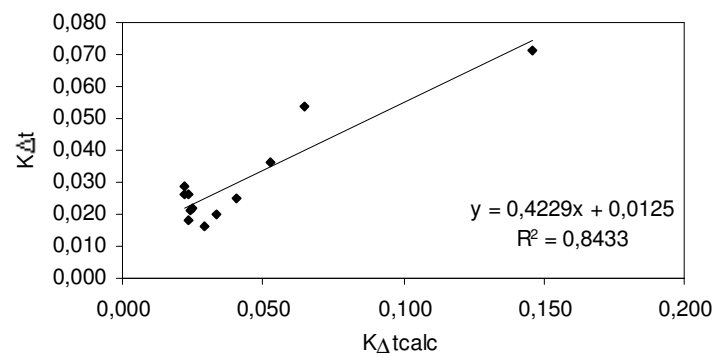


FIGURA 329 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice $K\Delta t_{calc}$ com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

7.3 Sistematização do Procedimento de Avaliação de Qualidade

Apresenta-se neste item uma proposta de sistematização para a avaliação de materiais rochosos visando seu uso como agregados na construção civil. No lugar de planilhas descritivas tradicionais, optou-se por método informatizado usando-se formulários eletrônicos. Dois módulos principais de análise e avaliação do material rochoso são utilizados. Um deles se refere a uma análise qualitativa, que abrange informações geológico-geotécnicas tradicionais e simples de serem obtidas; o outro módulo se baseia em resultados de ensaios tecnológicos utilizados para se avaliar quantitativamente os materiais. Este módulo quantitativo apresenta duas opções de análise, uma delas utiliza o valor de R como índice quantificador de qualidade, já a outra utiliza o índice $K\Delta_{calc}$. Desta forma, os materiais rochosos a serem usados como agregados são classificados em quatro níveis hierárquicos de qualidade, os quais buscam, principalmente, orientar o usuário na escolha do melhor material a ser utilizado para diversos fins.

7.3.1 Sistemática de Avaliação

Para a avaliação da qualidade do material rochoso visando sua utilização como agregado para construção civil, foi desenvolvido um sistema computacional baseado no fluxograma da Figura 330. A linguagem utilizada para a confecção do aplicativo foi a Pascal orientada a objeto, utilizando-se o programa Delphi 5.0 da Borland, registrado no Departamento de Geotecnia da EESC/USP.

A interface com o usuário do aplicativo é bastante simples e baseia-se em formulários que são preenchidos pela escolha de itens ou pelo preenchimento de campos. O primeiro formulário diz respeito ao tipo de análise adotada, se qualitativa ou quantitativa. Uma outra opção é a avaliação do material baseada nas especificações das normas brasileiras para uso de agregados em concreto hidráulico, asfáltico e em lastro ferroviário (Figura 331).

7.3.1.1 Análise Qualitativa

Na análise qualitativa, as características observadas, tanto no maciço rochoso quanto na amostra, estão associadas a informações gerais referentes aos aspectos tecnológicos. Este módulo do aplicativo é composto por três formulários. O primeiro diz respeito às características gerais do maciço rochoso e, neste caso, o usuário deve marcar apenas uma

opção no que se refere ao grau de alteração, resistência do agregado, textura da superfície e grau de fraturamento. Os aspectos mineralógicos e físicos são apresentados no segundo formulário, que abrange conhecimentos a respeito da presença de minerais potencialmente problemáticos. (Figura 332). O terceiro formulário refere-se ao relatório gerado a partir dos itens marcados nos formulários anteriores (Figura 333).

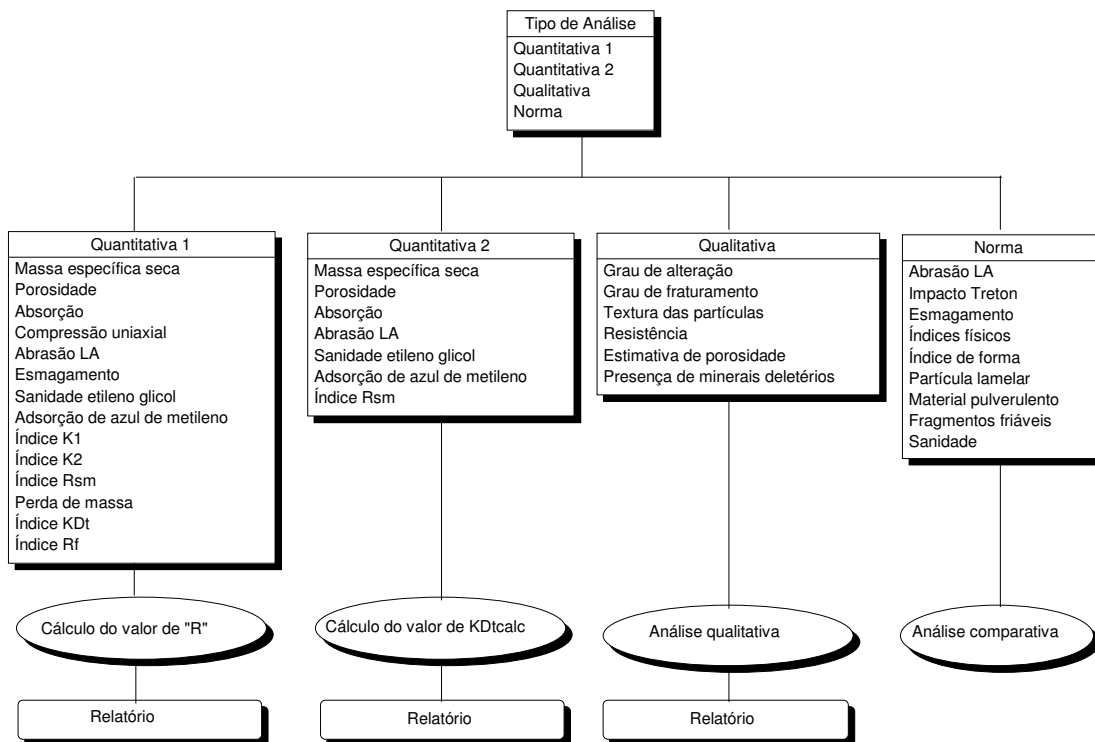


FIGURA 330 – Fluxograma de avaliação quantitativa e qualitativa.

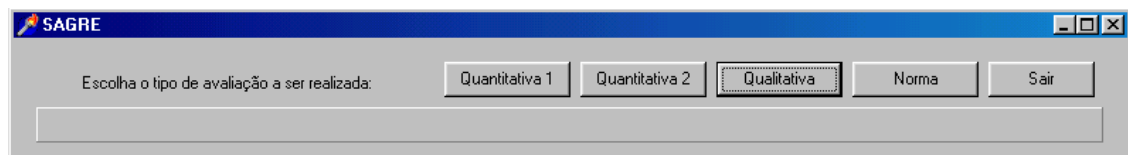


FIGURA 331 – Formulário para escolha do tipo de análise adotada.

Como exemplo, pode-se avaliar qualitativamente um maciço rochoso que possua as seguintes características: fracamente alterado, forte resistência, medianamente fraturado e textura granular das partículas. Com relação aos aspectos físicos e mineralógicos da amostra de rocha, para este exemplo, estabeleceu-se as características: porosidade estimada menor

que 2% com poros não estão interconectados (análise visual). Do ponto de vista mineralógico, verificou-se a presença de zeólitas, sulfetos, sulfatos e vidro vulcânico.

A partir destas características definidas para este material rochoso fictício, chega-se ao relatório qualitativo apresentado na Figura 333.

Características do maciço rochoso

Escolha as opções abaixo de acordo com as características do maciço rochoso:

Grau de alteração

- Solo residual - Todo material rochoso foi destruído.
- Completamente alterado - Toda rocha está decomposta e transformada em solo. Preserva a estrutura original.
- Altamente alterado - Mais da metade da rocha está decomposta e transformada em solo.
- Moderadamente alterado - Menos da metade da rocha está decomposta.
- Levemente alterado - A descoloração indica alteração na rocha e nas zonas de descontinuidades.
- Fracamente alterado - Descoloração nas superfícies das descontinuidades
- Rocha sã - Sem alteração

Resistência do agregado

- Muito fraco - Quebra com a pressão dos dedos
- Fraco - Facilmente cortado com uma faca
- Moderadamente forte - Quebra facilmente com uma martelada
- Forte - Quebra com dificuldade com o martelo

Textura da Superfície do agregado

- Porosa
- Cristalina
- Rugosa
- Granular
- Levemente rugosa
- Vítreo

Grau de fraturamento do maciço rochoso

- >20 fraturas/m - Extremamente fraturado
- 11 a 20 fraturas/m - Muito fraturado
- 6 a 10 fraturas/m - Medianamente fraturado
- 1 a 5 fraturas/m - Pouco fraturado
- < 1 fratura/m - Ocasionalmente fraturado

Características físicas e mine...

Qual a porosidade estimada?

- > 2%
- < 2%

Os poros do agregado estão interconectados?

- Não
- Sim

Observe a amostra e click nas opções abaixo:

- Presença de zeólitas
- Presença de periclásio
- Presença de quartzo microcristalino
- Presença de cloretos
- Presença de minerais metálicos
- Presença de calcedônia
- Presença de sulfetos
- Presença de quartzo
- Presença de vidro vulcânico
- Presença de opala
- Existência de minerais micáceos e fibrosos
- Presença de partículas solúveis
- Presença de matéria orgânica
- Presença de sulfatos

FIGURA 332 – Formulários “Características do Maciço Rochoso” e “Características Físicas e Mineralógicas”.

Este tipo de consulta baseia-se na associação de textos pré escritos e armazenados no corpo do programa que são visualizados no formulário “relatório” quando da escolha nos formulários 1 e 2. O objetivo deste módulo é gerar informações de caráter generalizado.

O formulário “relatório” apresenta botões, em sua parte inferior, que atuam nos processos de armazenar o arquivo (botão “Salvar”), de imprimir o relatório e de “Sair” que finaliza o aplicativo para o módulo qualitativo.

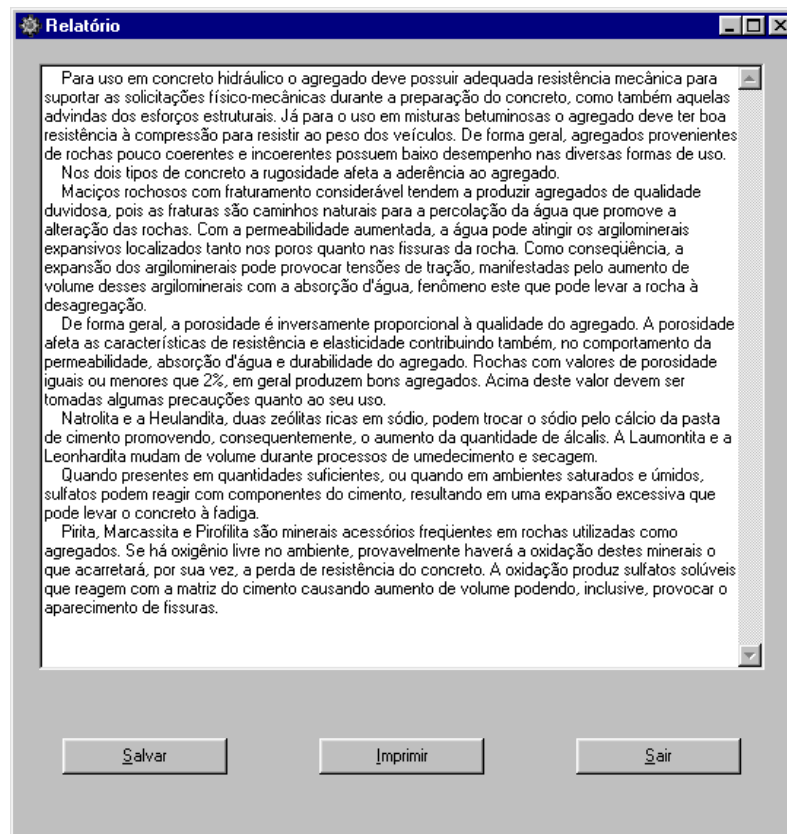


FIGURA 333 – Formulário “Relatório Qualitativo”.

7.3.1.2 Análise Quantitativa

Para a avaliação quantitativa do material rochoso, torna-se necessário o conhecimento dos seus parâmetros tecnológicos obtidos a partir de ensaios laboratoriais. O aplicativo computacional, no módulo “Quantitativo 1”, possui os seguintes formulários: “Índices Físicos” (Figura 334); “Resistência Mecânica” (Figura 335); “Sanidade e Adsorção” (Figura 336); “Índices Petrográficos” (Figura 337); “Alterabilidade” (Figura 338) e “Relatório” (Figura 339).


Após o preenchimento de todos os formulários, o aplicativo estará pronto para fazer a análise quantitativa.

Cada campo de preenchimento, relativo tanto aos resultados de ensaios quanto às informações, é composto por quatro itens. Cada um destes itens possui um peso diferente que varia de 0 a 3 com aumento da qualidade do atributo avaliado no sentido crescente. Desta forma, como visto no item 7.1, têm-se as seguintes correspondências: peso = 0 (qualidade ruim), peso = 1 (qualidade razoável), peso = 2 (boa qualidade) e peso = 3

(excelente qualidade). Para avaliação de todas as informações utilizou-se o algoritmo apresentado na página 276, para o cálculo do índice R.

O último formulário refere-se ao relatório final de avaliação no qual constam dados gerais tais como: nome da amostra, data, listagem geral dos ensaios e seus resultados (Figura 339).

Neste relatório final são visualizados dois parágrafos, um deles é exclusivo e dedicado aos valores dos ensaios marcados pelo usuário. O outro parágrafo aborda a avaliação do material e seu conteúdo depende do resultado do valor de R. Na porção inferior do formulário “relatório” encontram-se botões para armazenar o arquivo (botão “Salvar”), para imprimir o relatório e para “Sair” que finaliza o aplicativo para o módulo qualitativo.



Índices Físicos

Massa específica seca aparente (g/cm³)

> 2,9 2,6 - 2,9 2,3 - 2,9 < 2,3

Porosidade aparente (%)

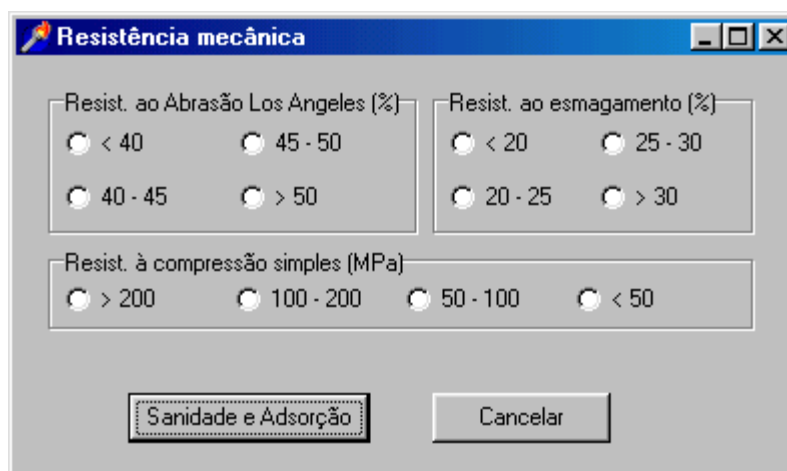
< 2,0 2,0 - 3,0 3,0 - 4,0 > 4,0

Absorção d'água (%)

< 0,5 0,5 - 2,0 2,0 - 6,0 > 6,0

Resistência Cancelar

FIGURA 334 – Formulário “Índices Físicos”.



Resistência mecânica

Resist. ao Abrasão Los Angeles (%)

< 40 45 - 50

40 - 45 > 50

Resist. ao esmagamento (%)

< 20 25 - 30

20 - 25 > 30

Resist. à compressão simples (MPa)

> 200 100 - 200 50 - 100 < 50

Sanidade e Adsorção Cancelar

FIGURA 335 – Formulário “Resistência Mecânica”.

Sanidade e Adsorção

Sanidade em Eteno glicol (%)

< 2 2 - 12 12 - 30 > 30

Adsorção de Azul de Metileno (g/100g)

< 2 2 - 12 12 - 30 > 30

Índices Petrográficos Cancelar

FIGURA 336 – Formulário “Sanidade e Adsorção”.

Índices Petrográficos

Índice K1

> 10
 5 - 10
 3 - 5
 < 3

Índice K2

> 10
 5 - 10
 1 - 5
 < 1

Índice Rsm

< 60
 60 - 110
 110 - 140
 > 140

Alterabilidade Cancelar

FIGURA 337 – Formulário “Índices Petrográficos”.

Alterabilidade

Perda de massa (%)

< 2,0
 2,0 - 3,5
 3,5 - 11,0
 > 11,0

Índice KDt

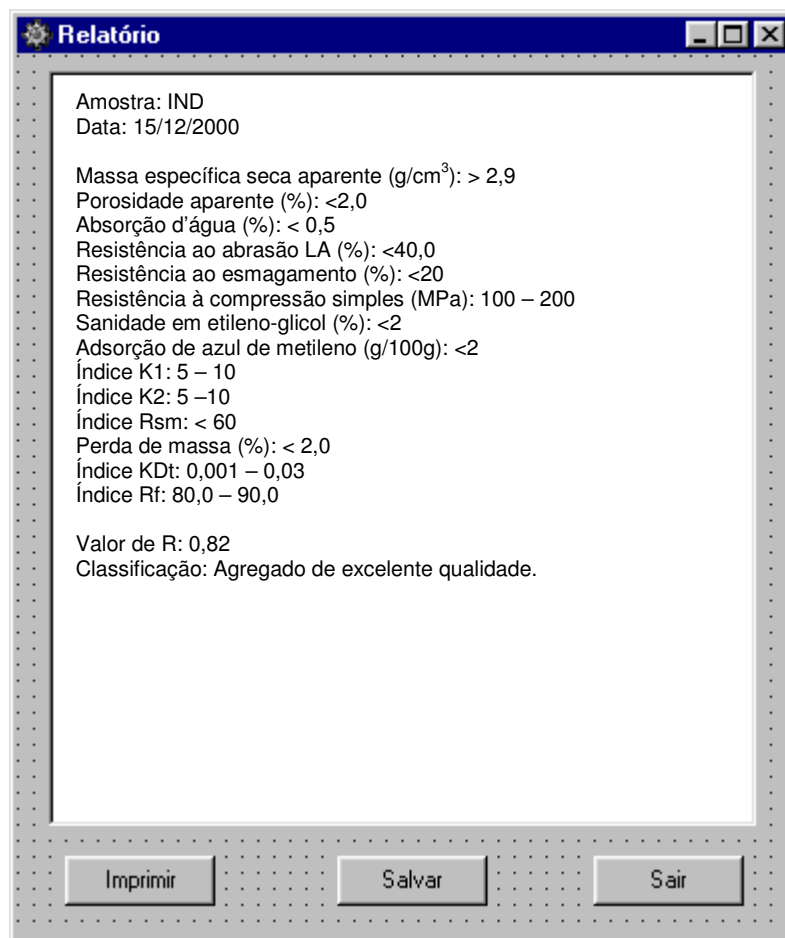
< 0,001
 0,001 - 0,03
 0,03 - 0,07
 > 0,07

Índice Rf

> 90,0
 90,0 - 80,0
 80,0 - 70,0
 < 70,0

Relatório Cancelar

FIGURA 338 – Formulário “Alterabilidade”.



Relatório

Amostra: IND
Data: 15/12/2000

Massa específica seca aparente (g/cm³): > 2,9
Porosidade aparente (%): <2,0
Absorção d'água (%): < 0,5
Resistência ao abrasão LA (%): <40,0
Resistência ao esmagamento (%): <20
Resistência à compressão simples (MPa): 100 – 200
Sanidade em etileno-glicol (%): <2
Adsorção de azul de metileno (g/100g): <2
Índice K1: 5 – 10
Índice K2: 5 –10
Índice Rsm: < 60
Perda de massa (%): < 2,0
Índice KDt: 0,001 – 0,03
Índice Rf: 80,0 – 90,0

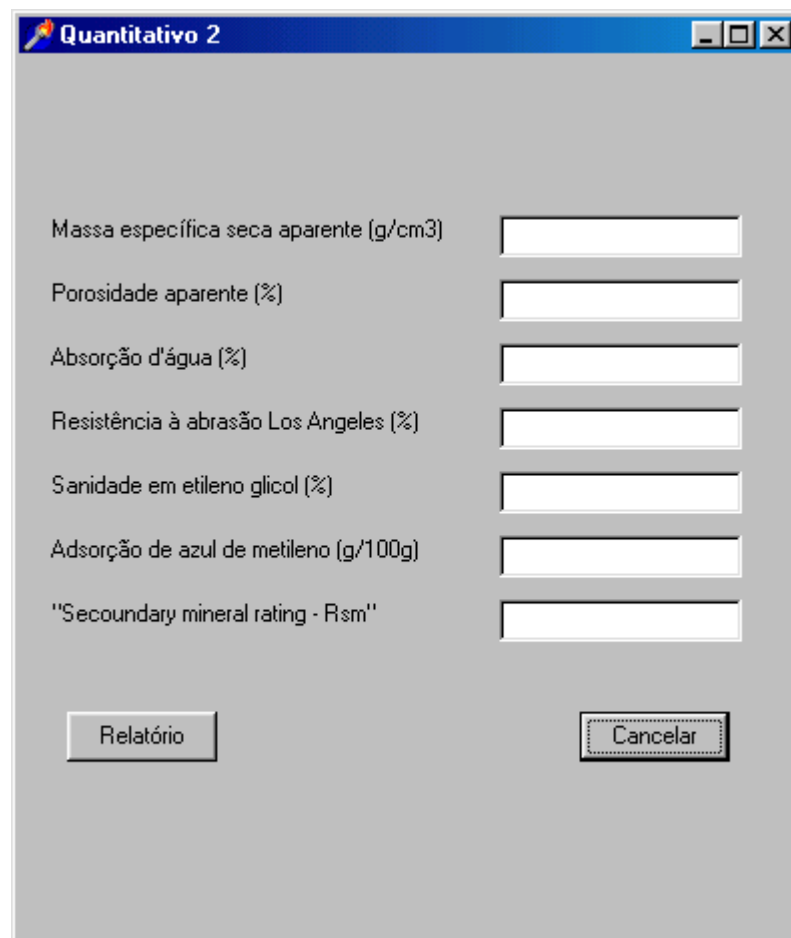
Valor de R: 0,82
Classificação: Agregado de excelente qualidade.

Imprimir Salvar Sair

FIGURA 339 – Formulário “Relatório”.

O módulo Quantitativo 2 é composto por dois formulários. O primeiro, apresenta campos para serem preenchidos com os respectivos valores dos ensaios adotados (Figura 340). Já o segundo formulário representa a saída de informação através de um relatório.

Como visto, este módulo baseia-se no cálculo do índice $K\Delta t_{\text{calc}}$ para avaliação da qualidade do material analisado. Os atributos utilizados são os índices físicos, a resistência ao abrasão Los Angeles, a sanidade em etileno glicol, a adsorção de azul de metileno e o índice R_{sm} . Desta forma, os valores destes atributos preenchidos no primeiro formulário são utilizados pela fórmula de cálculo do índice $K\Delta t_{\text{calc}}$. Este valor é comparado com os intervalos de qualidade presentes na Tabela 55 o que resulta na avaliação da qualidade da amostra.



Quantitativo 2

Massa específica seca aparente (g/cm³)

Porosidade aparente (%)

Absorção d'água (%)

Resistência à abrasão Los Angeles (%)

Sanidade em etileno glicol (%)

Adsorção de azul de metileno (g/100g)

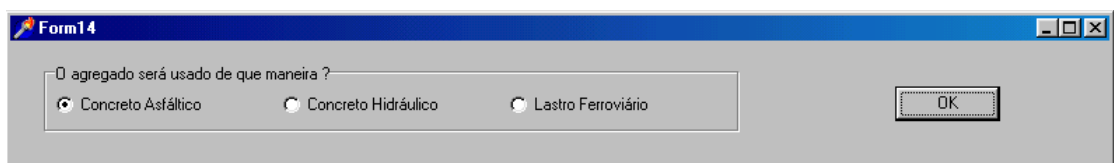
"Secondary mineral rating - Rsm"

Relatório

Cancelar

FIGURA 340 – Formulário “Relatório”.

Caso o interesse seja apenas saber se o agregado se enquadra nas especificações impostas pelas normas brasileiras, deve-se optar pelo módulo “Norma” no formulário para escolha do tipo de análise adotada (Figura 331). Desta forma aparecerá, a depender da escolha do tipo de uso do agregado, o formulário para preenchimento com os resultados dos ensaios requeridos pela norma e automaticamente se constata se o material é ou não qualificado (Figura 341).



Form14

O agregado será usado de que maneira ?

Concreto Asfáltico Concreto Hidráulico Lastro Ferroviário

OK

FIGURA 341 – Formulário “Uso do material”

ENSAIOS:	ESPECIFICAÇÃO	
Abrasão Los Angeles (%)	25	Qualificado
Esmagamento (%)	15	Qualificado
Impacto Treton (%)	16	Qualificado - não especificado na norma
Massa Específica (g/cm ³)	2	Qualificado - não especificado na norma
Porosidade (%)	2	Não Qualificado
Absorção (%)	1	Qualificado - não especificado na norma
Índice de Forma	3	Não Qualificado
Partícula Lamelar (%)	30	Não Qualificado
Material Pulverento (%)	15	Não Qualificado
Fragmentos Friáveis (%)	10	Não Qualificado
Sanidade com Sulfato de Sódio ou Magnésio (%)	12	Qualificado - não especificado na norma

Sair

FIGURA 342 – Formulário “Ensaio Recomendados e Especificações: Agregados para Concreto Hidráulico”.

Capítulo 8:

CONCLUSÕES

8.1 Quanto a Aplicação do Conceito Entablamento-Colunata

Os trabalhos de campo permitiram definir de maneira clara os principais tipos de derrames basálticos e diferenciá-los de acordo com o conceito entablamento-colunata. A facilidade de identificação no campo dos compartimentos entablamento e colunata e do basalto vesicular, auxiliou na definição dos pontos de amostragem.

A aplicação do modelo de Long & Wood (1986) para a classificação dos derrames basálticos estudados mostrou-se bastante satisfatória, pois retrata, de forma simples e objetiva, a história evolutiva destes derrames e, conseqüentemente, a origem da compartimentação entablamento-colunata.

Os derrames basálticos nas regiões de Ribeirão Preto-SP, São Carlos-SP e Araraquara-SP, classificam-se em derrames Tipo III. São caracterizados pela presença do compartimento entablado na parte central do derrame, sobreposto ao colunata inferior. O colunata superior não está presente. O contato basal com outro derrame ou com os sedimentos da Formação Botucatu se dá pela presença do basalto vesículo-amigdaloidal.

Na faixa compreendida entre os municípios de Jaú-SP, São Manuel-SP até Assis-SP, os derrames basálticos apresentam características típicas de derrames Tipo I, podendo, em alguns locais, apresentar características de derrames Tipo III. Em geral, a rocha é formada por colunata irregular. O contato entre derrames também é marcado pela presença de basalto vesículo-amigdaloidais.

Do ponto de vista da geologia de engenharia, as diferenças mineralógicas, texturais e estruturais entre os compartimentos entablamento e colunata, refletem diferentes

comportamentos geotécnicos e tecnológicos. O entablamento, por apresentar-se bastante fraturado e com grandes quantidades de matéria vítrea em sua composição mineralógica apresenta atributos que podem prejudicar o seu uso.

Apesar de conter uma maior quantidade de matéria vítrea e de se destacar pela maior quantidade de argilominerais expansivos, às amostras do entablamento apresentam-se bastante compactas, ou seja, com valores de massa específica acima da média, com baixa porosidade e com baixa absorção d'água. Tais condições dificultam o acesso da água e, conseqüentemente, restringem o contato com os argilominerais presentes.

8.2 Quanto aos Ensaios de Caracterização Tecnológica

A execução quase que simultânea de ensaios de caracterização tecnológica e de alterabilidade proporcionou informações relevantes para o cálculo de inúmeros índices de qualidade, tais como: Índices petrográficos K1 e K2, Índice petrográfico R_{sm} (*Secondary mineral rating*), Índice SAI (*Smectite alteration index*), Índice de alterabilidade $K\Delta t$ e o índice de alterabilidade Rf.

Apesar das características petrográficas das amostras estudadas serem muito semelhantes, os índices petrográficos K1, K2 e R_{sm} indicaram claramente a baixa qualidade das amostras *SIQ*, *SAN* e *VES*.

A difratometria de Raios-X identificou argilominerais do grupo das esmectitas, em diferentes quantidades, nas amostras *IND*, *VES*, *BP*, *SM* e *WS*. Nas demais amostras, os picos do difratograma, representativos destes argilominerais, não permitiram a sua identificação.

Os valores dos índices físicos, da resistência a compressão uniaxial, da resistência ao abrasão Los Angeles e da resistência ao esmagamento, quando analisados isoladamente não forneceram informações que pudessem discriminar as amostras com relação a sua qualidade, com exceção da amostra *VES* correspondente ao basalto vesicular.

Os resultados do ensaio de imersão de fragmentos de rocha em etileno glicol mostraram-se eficazes para discriminação das amostras quanto a sua potencialidade à

desagregação. Houve também boa correlação de seus resultados com os valores encontrados para os índices petrográficos. Constatou-se que o limite de 20% de perda em etileno glicol corresponde a aproximadamente ao valor 5 para os índices petrográficos K1 e K2.

Os ensaios alternativos de adsorção de azul de metileno, de pH e condutividade de abrasão mostraram-se bastante apropriados. O de azul de metileno foi útil na avaliação da presença e na determinação de quantidades de argilominerais. O de pH e o da condutividade de abrasão possibilitaram a verificação da presença de minerais metálicos do tipo sulfeto. Estes ensaios destacam-se pela sua facilidade e rapidez na obtenção de seus resultados.

A análise conjunta dos resultados dos ensaios de caracterização tecnológica não permitiu uma diferenciação clara dos dois compartimentos. O mesmo aconteceu com os resultados dos ensaios de alterabilidade.

8.3 Quanto aos Ensaios de Alteração e Alterabilidade

A adoção de três tipos de ensaios de alteração (natural, acelerada por umedecimento e secagem e acelerada por lixiviação contínua possibilitou o estabelecimento de relação entre as velocidades de alteração destes ensaios.

O monitoramento dos fluidos de saturação nos ensaios de alteração acelerada proporcionou o uso do índice de Parker (1970) como mais um indicador da alterabilidade dos materiais. Este monitoramento auxiliou, também, na identificação de elevadas quantidades de argilominerais e na presença de sulfetos nas amostras estudadas.

A conjugação do parâmetro mecânico, obtido pelo ensaio de esmagamento, aos ensaios de alteração natural e acelerada, mostrou-se adequada para revelar a alterabilidade das amostras estudadas. Os índices de alterabilidade $K\Delta t$ e R_f mostraram-se úteis na avaliação da alterabilidade, pois discriminaram satisfatoriamente as amostras.

8.4 Quanto a Qualificação dos Materiais

O índice de qualidade “R” proposto pelo autor permitiu avaliar de forma satisfatória as informações geradas com a execução dos ensaios tecnológicos e de alterabilidade e ainda concluir que não existem diferenças significativas entre a qualidade de materiais provenientes do compartimento colunata e do entablamento. Porém o índice “R” utiliza em seus cálculos 17 atributos, o que de certa forma dificulta sua utilização. Por outro lado, a proposta do índice $K\Delta t_{calc}$ utiliza apenas informações dos índices físicos, das perdas por imersão em etileno glicol, de adsorção por azul de metileno, de resistência ao abrasão Los Angeles e do Índice R_{sm} . O índice $K\Delta t_{calc}$ reflete satisfatoriamente a qualidade dos materiais rochosos analisados.

Os índices “R” e $K\Delta t_{calc}$ mostraram concordância entre si e indicaram ser aplicáveis à avaliação da desagregabilidade por processos de alteração

A sistemática de avaliação de materiais rochosos para uso como agregados em construção civil apresentada neste trabalho, não objetiva propor um novo método de caracterização tecnológica, e sim o de sistematizar as informações, principalmente as de origem geológico-geotécnicas. Sendo assim, optou-se por substituir planilhas de campo tradicionais por formulários eletrônicos com recursos de computação. Estes formulários, apresentados em dois módulos, são acessíveis aos usuários comuns.

O módulo qualitativo mostrou-se bastante adequado para o profissional não familiarizado com os procedimentos de avaliação e requisitos tecnológicos que o material rochoso deve ter para a correta utilização como material de construção.

O módulo quantitativo apresenta uma gama de ensaios que podem ser realizados para tal objetivo, porém, a contribuição mais relevante é a de possibilitar a classificação do material em quatro classes: Excelente, Bom, Razoável e Ruim. Os ensaios requeridos neste módulo vão além dos especificados nas normas brasileiras para concreto hidráulico, concreto asfáltico e lastro ferroviário.

O relatório gerado como forma final dos resultados, tanto para o módulo qualitativo quanto para o quantitativo, apresenta todos os dados considerados para avaliação dos materiais bem como as suas adequabilidades, quando utilizados como agregados em construção civil.

Capítulo 9:

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- ABGE (1983). *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*. São Paulo. (Tradução, 12).
- AIRES-BARROS, L. (1971). *Alteração e alterabilidade de rochas*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- AIRES-BARROS, L. (1991). *Alteração e alterabilidade de rochas*. Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica..
- 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 Internatonal Association Of Engineering Geology*, 7, Lisboa, 1994. Proceedings...Rotterdam: A.A. Balkema. V.5, p. 3591-3594.
- ALMEIDA, F.F.M. (1986). Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós- Paleozóico no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, v.16, n. 4.
- ARAUJO, J.S. (1974). *Estruturas Circulares: Características e provável origem – Usina de Água Vermelha*. Rel. G/01/74, CESP.
- ARAUJO, J.S. (1982). *Estruturas Circulares de Água Vermelha*. Dissertação (Mestrado), IG-USP, São Paulo, 79p.
- ARNOLD, G.P. (1993). *Estudo do comportamento mecânico de basaltos alterados do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos rodoviários*. Dissertação (Mestrado), UFRGS, Porto Alegre.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR-6458 - Grãos de pedregulhos retidos na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção d'água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983) NBR-6465 - Agregados. Determinação da abrasão "Los Angeles".

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1956) NBR-7389 - Apreciação petrográfica de agregados.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR-12696 - Agregados. Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) NBR-12697 - Agregados. Avaliação do comportamento mediante ciclagem acelerada com etilenoglicol.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR-7211 - Agregados para concreto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991) NBR-11806 - Materiais para sub-base ou brita graduada.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980) MB-1065 - Lastro ferroviário. Determinação da resistência do material a intempérie.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985) NBR-8938 - Lastro padrão. Determinação da resistência ao choque.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987) NBR-9938 - Agregados. Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1968) NBR-7174 - Pedra britada, pedrisco e pó de pedra.

- BAGOLINI, B. (1964). Notte Sulla de Geologia del Basalto dell'alto Bacini del Fiume Paraná, nel Brasile Meridionale. Rel. Themag Engenharia, S. Paulo, 35p.
- BARTORELLI, A. (1997). *As principais cachoeiras da Bacia do Paraná e sua relação com alinhamento tectônicos*. Rio Claro, UNESP, Tese (Doutorado), v.1, v.2.
- BETHUNE, J.D. (1971). Case Histories in Roadway Failures. Report, Transport and Highways Branch, Institute of Engineers, Australia.
- BELLIENI, G; BROTZU, P; COMIM-CHIARAMONT; P. ERNESTO, M; MELFI, AJ; PACA, I.G; PICCIRILLO, E. M. & STOLFA, D. (1983). Petrological and Paleomagnetic Data on the Plateau Basalt to Rhyolite Sequences of the Southern Paraná Basin (Brazil). *An. Acad. Bras. Ciênc.* 55(4): 355-383.
- BELLIENI, G; BROTZU, P; COMIM-CHIARAMONT; P. ERNESTO, M; MELFI, AJ; PACA, I.G; PICCIRILLO, E. M. & STOLFA, D. (1984a). Flood Basalt to Rhyolite Suites in the Southern Paraná Plateau (Brazil): Paleomagnetism, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *J. Petrology*. V. 25, Part: 3: 379 – 618.
- BELLIENI, G; COMIM-CHIARAMONT; P. MARQUES, L.S; MELFI, AJ; PICCIRILLO, E. M. & STOLFA, D. (1984b). Low Pressure Evolution of Basalt Sills from Boreholes in the Paraná Basin, Brazil. *T.M.P.M. Tschermarks Min. Petro. Mott.* 33:25-47.
- BELLIENI, G; COMIM-CHIARAMONT; P. MARQUES, L.S; MELFI, AJ; PICCIRILLO, E. M; NARDY, A.J.R. & ROISENBERG, A (1984c). High and Low TiO₂ Flood Basalts from the Paraná Plateau (Brazil): Petrology and Geochemical aspects bearing on their Mantle Origin. *N.Jb. Miner. Abn.* 150:273-306.
- BOWEN, N.L. (1956) *The evolution of the igneous rocks*. New York, Dorer. 334p
- BRITO, S.N.A (1971). Feições geológicas no basalto da barragem de Volta Grande. *An. VIII Sem. Nac. Grandes Barragens.*, Rio de Janeiro, Vol. 1, p.44-61.

- CAMARGO, F.P. (1970). Geologia Aplicada a Barragem de Ilha Solteira – Sistema Urubupungá. *I Semana Paulista de Geologia Aplicada*, Public. N. 900, IPT, 30p.
- CARROL, D. (1970). *Rock Weathering*. New York. Plenum Press. 203p.
- CAWSAY, D.C. & MASSEY, S.W. (1984). Monitoring the inservice performance of highway aggregates in bituminous macadam wearing courses. *Bull. Of the International Association of Engineering Geologists*, 30.
- COLE, W.F., SANDY, M.J. (1980). A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability. *Proc. Australian Road Res. Board*, 11(3): 129-144.
- COLLET, F.R., WARNICK, C.C., HOFFMAN, D.S. (1962) Prevention of degradation of basalt aggregates used in highway base construction. *Bull. Of the Highway Research Board*, n. 334, p. 1-8.
- COMIN-CHIARAMONT, P; GOMES, C.B; PICCIRILLO, E.M. & RIVALENTI, G. (1983). High TiO₂ dykes in the Coastline of São Paulo and Rio de Janeiro States (Brazil). *Neues Jb. Min. Abn. Band 146, Heft 2:133-150*.
- DAY, H.L. (1962). A Progress report on studies of degrading basalt aggregate bases. *Bull. Of the Highway Research Board*, n. 344.
- DE ALBA, E; SESANA, F. (1978). The influence of expansive minerals on basaltic behavior. *International Congress Of The International Association Of Engineering Geology*, 3, Madrid, 1978. Proceedings...Madrid: V.1, s.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,. Anais, APGA. 9p.
- FARJALLAT, J.E.S. (1971). *Estudos experimentais sobre desagregação de rochas basálticas*. São Paulo. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências/USP.

- FARJALLAT, J.E.S. (1972). Desagregabilidade de rochas basálticas e problemas relativos à sua aplicabilidade (relato sobre o tema). In. *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, 4, São Paulo., Anais, APGA. P.19-53.
- 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., Anais, APGA. p.123-155.
- FARRAN, J., THÉNOZ, B. (1965). L'alterabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. *Annales, I.T.B.T.P.*, Paris, p. 1534-1548.
- FERREIRA, C.M. (1985). Ocorrência de "Pillow lava" em vulcanitos da Formação Serra Geral em Araguari, MG. An. 3^o *Simp. Geol. Minas Gerais*, SBG, Bol., n. 5, p.235-239.
- FERREIRA, M.O.Q. (1990). Geoquímica de alteração e propriedades dos granitos com utilização em enrocamentos. *Memórias e Notícias*. (Public. Museu Lab Mineral Geol. Univ. de Coimbra), (109):1-33.
- 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 J. of Engineering Geology*, v.21, n.1, p.33-57
- FOOKES, P.G. (1991) Geomaterials. *The Quarterly J. of Engineering Geology*, v.24, n.1, p.3-15
- 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, Proceedings., v.1, p. 234-245.

- FRASCÁ, M.H.B.O. (1998). A petrographic index for the alterability evaluation of basaltic rocks. *Proc. 8th Int. Cong. of the International Association of Engineering Geology*.
- FRAZÃO, E.B., GOULART, E.P. (1976). Aspectos das Expansibilidade de argilominerais – Algumas implicações em obras civis. In: *Congress. Bras. de Geologia de Engenharia*, 1, Rio de Janeiro, ABGE, v.2,p.351-365.
- 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. Anais. São Paulo, ABMS/ABGE. v.2.A, p.21-33
- FRAZÃO, E.B. (1993) *Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo*. São Carlos. Tese (Doutorado) - EESC-USP
- FRAZÃO, E.B. & PARAGUASSU, A.B. (1994). Basalts from Três irmãos Hydroelectric Dam, São Paulo State, Brazil. A review of methodology for alterability evaluation. *Proc. 7th Int. Cong. of the International Association of Engineering Geology*, Lisbon. V.5, 3583-3589.
- FRAZÃO, E.B., PARAGUASSU, A.B. (1998). *Materiais de Construção*. Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE, 587p.
- GOLDICH, S.S. (1938) A study in rock-weathering. *Journal of Geology*, v.46, p.17-58
- GOMES, R.L., RODRIGUES, J.E. (1999). Reconhecimento dos diferentes tipos de derrames basálticos segundo a compartimentação entablamento-colunata em algumas pedreiras do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9, São Pedro-SP, (CD-ROM).
- GONÇALVES, N.M.M. (1987). *Transformações Mineralógicas e Estruturais Relacionadas a Alteração Hidrotermal e Intempérica de Rochas Vulcânicas da Bacia do Paraná Setentrional – Região de Ribeirão Preto, Brasil*, Tese (Doutorado), IG-USP, 212p.

- GRANT, W.H. (1969). Abrasion pH, an index of weathering. *Clays and minerals*, 17, 151 – 155.
- GUIDICINI, G., OLIVEIRA CAMPOS, J.O. (1968). Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, vol. 17, n. 1, p.91-93.
- GUIDICINI, G. (1970). Derrames secundários em basaltos. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, vol. 19, n. 1.
- HAMROL, A. (1962). A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. In. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5, Paris, Proceedings, Dunod.
- HAYASE, K; MANERA, T. (1972). Presencia de Celadonita en Basalto en Foz do Iguacu, Estado do Paraná, Brasil – *Ver. Bras. Geoci.* 2(1):25-34.
- HIGGS, N.B. (1976). Slaking basalts. *Bull. Of the Association Of Engineering Geologists*, 13(2),:151-162.
- HOSKING, J.R. & TUBEY, L.W. (1969). Research on Low Grade and Unsound Aggregates. Road Research Laboratory Report LR 293, Crowthorne.
- HOUSTON, E.C.. SMITH. J.V. (1997). Assessment of rock quality variability due to smectite alteration in basalt using X-ray diffraction analysis. *Engineering Geology*. 46, p. 10-32.
- ILIEV, I.G.(1966). Na Attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico mechanical properties. In. *Intenational Congress of Rock Mechanics.*, 1, Lisboa, Proceedings, Lisboa,ISRM, p.109-114.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. (1980). Características Tecnológicas das Rochas Ornamentais Utilizadas como Materiais de Como Materiais de Construção Civil do Estado de São Paulo. São Paulo. (IPT, relatório, 14.710).

- IRFAN, T.Y., DEARMAN, W.R. (1978). The engineering petrography of weathered granite in Cornwall, England. *Q.J. Eng. Geo.*, vol. 11, p.233-244.
- ISRM (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring – *ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press, London, 211p.
- JUSTUS, P.S. (1978). Origin of curvi-columnar joints in basalt cooling units by fracture controlled quenching. *Am. Geoph. Union. Trans.*,v.59, n.4, p.379.
- LADEIRA, F.L.; MINETTE, E. (1984a) Índices físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 4, Belo Horizonte. Anais. São Paulo, ABGE. v.3, p.359-366
- LADEIRA, F.L.; MINETTE, E. (1984b) Índices geomecânicos na quantificação da alterabilidade de rochas. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 4, Belo Horizonte. Anais. São Paulo, ABGE. v.3, p.367-370
- LADEIRA, F.L.; MINETTE, E. (1984c) A quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 3., Belo Horizonte. Anais. B.Horizonte, ABGE. v.3, p.351-358
- LEINZ, V. (1949). Geologia dos Derrames Basálticos do Sul do Brasil. *Bol. 103, Geol. (5):* 61p. F.F.C.L.-USP-S. Paulo.
- LEINZ, V; BARTORELLI, A.,SADOWSKI, G.R. & ISOTTA, C.A.L. (1966). Sobre o Comportamento Espacial do Trapp Basáltico da Bacia do Paraná. *Bol. Soc. Bras. Geol.* 15(4): 79-91.
- LEVI, F. & MELFI, A.J. (1972). Geochemical and mineralogical studies on the first stage of weathering of basic and related rocks. Part 2. Geochemical Study. *Revista Bras. Geociências*, 2(1):1-7.
- LONG,P.E.,WOOD,B.J. (1986). Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 97, n.9, p. 1144-1155.

- LUMB, P. (1962). The properties of decompose granite. *Géotechnique*, 12:226-243.
- MALOMO, S. (1980). Abrasive pH of Feldspars as an Engineering Index for Weathered Granite. *Bull. Of the International Association of Engineering Geology*, 22., p. 207-211.
- MARQUES FILHO, P.L., CORREIA, P.C. LEVIS, P., ANDRADE, C. A.V. (1981). Características usuais e aspectos peculiares do manto de alteração e transição solo-rocha em basaltos. An. 3^o Simpósio Brasileiro de Geologia de Engenharia, Itapema, vol. 2, tema 3, p.53-72.
- MARRANO, A. (1997). *Caracterização Tecnológica de Rochas Basálticas da Usina Hidrelétrica de Canoas I, Rio Paranapanema, SP/PR*. Dissertação (Mestrado), EESC/USP. 201p.
- MELFI, A J. (1967). Potassium Argon ages for core samples of basaltic rocks from southern Brazil. *Geoch. Cosm. Acta*. 31(6):1079-1089.
- MELFI, A.J. & LEVI, F. (1971). Geochemical and mineralogical studies on the first stage of weathering of basic and related rocks. Part 1. Geochemical Study. *Revista Bras. Geociências*, 1(1):22-28.
- MELLON, P. (1985). *An Investigation of Altered Basalts Used for Road Aggregate in Ethopia*. PhD thesis, Hatfield, Polytechnic, UK.
- MINOR, C.E. (1960). Degradation of minerals aggregates. American Society for Testing Materials Special Publications, 227, 109-121.
- MIRANDA, A.M. (1984). Comparação entre a evolução da alteração por via experimental e evolução da meteorização em perfis naturais. *Memórias e Notícias*. (Public. Museu Lab Mineral Geol. Univ. de Coimbra), (98):217-222.
- MOLLER, W.A. & CABRERA, J.G. (1976). Características de fundações sobre rochas basálticas. An. 1^o Congresso Bras. de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, ABGE, Vol. 2, p.199-216.

PARKER, A. (1970). An index of weathering for silicates rocks. *Geol. Magaz.*: 501-504.

PEAT, D.W., MANTOVANI, M.S.M., HAWKESWORTH, C.J. (1988). Geochemical Stratigraphy of the Paraná Continental Flood Basalts: Borehole evidence. *Rev. Bras. Geoc.* 18(2):212-221.

PEDRO, G. (1968). Distribution des principaux types d'alteration chimie à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* 10: 457-470.

REICHE, P. (1950). *A survey of weathering process and products*. New Mexico, University of New Mexico. 95p.

RIMOLDI, H. V. (1982). Diagnose et evaluation de l'alteration des basaltes des la Formation Curuzu-Cuatia. In. *International Congress of the International Association of Engineering Geology*, 4, Nova Delhi, Rotterdam: A.A. Balkema. V.6, p.107-121.

ROCHA, M. (1973). *Mecânica das Rochas*. LNEC, Lisboa, vol. I,II.

RODRIGUES, J.D., GEREMIAS, F.T. (1990). Assessment of rock durability through index properties. In. *International Congress of the International Association of Engineering Geology*, 6, Amsterdam, Rotterdam: A.A. Balkema. V.4, p.3055-3060.

ROISENBERG, A., GARMERNAN, N., VIEIRA JR., N. (1984). Argilominerais em rochas basálticas inalteradas. An. XXXIII Congress. *Bras. Geol.*, Rio de Janeiro, p.4241-4252.

ROLIM FILHO, J.L. (1993). *Considerações sobre desmontes de rochas com ênfase aos basaltos feição entablamento*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 216 p.

RUIZ, M.D. (1963) *Mecanismo de desagregação de rochas basálticas semi-alteradas*. São Paulo, IPT. (IPT publicação, 696)

- SCHNEIDER, A.W.; ROCHA, F.X.P. (1968) *Emprego de basaltos em pavimentação rodoviária*. São Paulo, IPT. 42p. (IPT publicação, 443)
- SCOTT, L.E. (1955). Secondary minerals in rocks as a cause of pavement and base failure. *HBR Proceed.*, 34, 412-417.
- 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. Anais. Caracas, Sociedad Venezolana de Mecanica del Suelo e Ingenieria de Fundaciones. v.1, p.185-194
- SHOA, E.D.; MASE, G.E. (1966) Effects of confining pressure on polycrystalline rock behavior analysed by rheological theory. *In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS*, 1, Lisboa. Proceedings. Lisboa. v.1, p.733-747
- SMITH, T., McCAULEY, M.L. & MEARNES, R.W. (1970). Evaluation of Rock Slope Protection Material. *Highway Research Board* (323). National Research Council, US, National Academy of Science.
- SOBREIRO NETO, A.F., BARTORELLI, A., PEREIRA, A.C.M., ARAUJO, C.H.A., MORTATI, J.L., BITTAR, O.Y. (1982). Feições estruturais dos derrames basálticos da região de Erechim-RS. *An. XXXII Congres. Bras. Geol.*, vol. 4, Salvador, p.1317-1328.
- SOUZA JR, N.N. O (1986). *Feições Lito-estruturais de interesse geológico e geotécnico em maciços basálticos*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 183 p.
- SOUZA JR, N.N. O (1992). *O "Entablamento" em Derrames Basálticos da Bacia do Paraná: Aspectos Genéticos e Caracterização Geotécnica*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 257 p.
- SPRY, A. (1962). The origin of Columnar Jointing, Particularly in Basalt flow. *Jour. Geol. Soc. Australia*, vol. 8, n.2, p.191-221.

- STRUILLLOU, R. (1969) Pr evision de l'alterabilit e des matériaux employ ees en g enie civil. *In: COLLOQUE DE GÉOTECHNIQUE*, Toulouse. Proceedings. p.35-46
- THEMAG (1982). *Usina eclusa de Porto Primavera – Projeto executivo: Síntese dos aspectos geológico-geotécnicos das fundações das estruturas de concreto*. Rel. n. 01162, 40p.
- TOMKEIEFF, S. I. (1940). The Basalt Lavas of The Giant's Causeway District of Norther Ireland. *Bull. Volcan.*, v.6, n.2, p.89-143.
- 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, ABGE,v.1, 4,p.20.1-20.8.
- TUGRUL, A., GURPINAR, O. (1997). A proposed Weathering classification for basalts and their engineering properties (Turkey). *Bull. Of the International Association of Engineering Geology*, 55., p. 139-149.
- VERHOEF, P.N.W. & VAN DE WALL, A.R.G. (1998). Application of petrography in durability assessment of rock construction materials. *Aggregate Resources*, Balkema, p. 307-330.
- WEINERT, H.H. (1964) *Basic igneous rocks in road foundations*. Pretoria, CSIR. 47p (CSIR research report, 218)
- WEINERT, H.H. (1968) Engineering petrology for roads in South Africa. *Engineering Geology*, v.2, n.6, p.363-375
- WEINERT, M.M. (1970) Climate, engineering petrology and the durability of natural road building materials in Southern Africa. (*The Rhodesian Engineer paper, 111*)
- WEINERT H.H. (1984). Climate and the durability of south african road aggregates. *Bull. Of the IAEG*, n.29. p. 463 – 466.

WERNICK, E. (1977). *Sistemática das rochas magmáticas*. Apostila do curso de petrografia do IGCE-UNESP, Rio Claro.

WEST, T.R.; JOHNSON, R.B.; SMITH, N.M. (1970). Tests for evaluating degradation of base coarse aggregates. Washington, National Cooperative *Highway Research Program*. 92p. (Report, 98)

YOSHIDA, R. (1972). *Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos*. São Paulo. 2v. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências/USP

ZALAN, P.V. et al; (1990) *Bacia do Paraná. Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobrás, p. 135-168.

ANEXO I
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

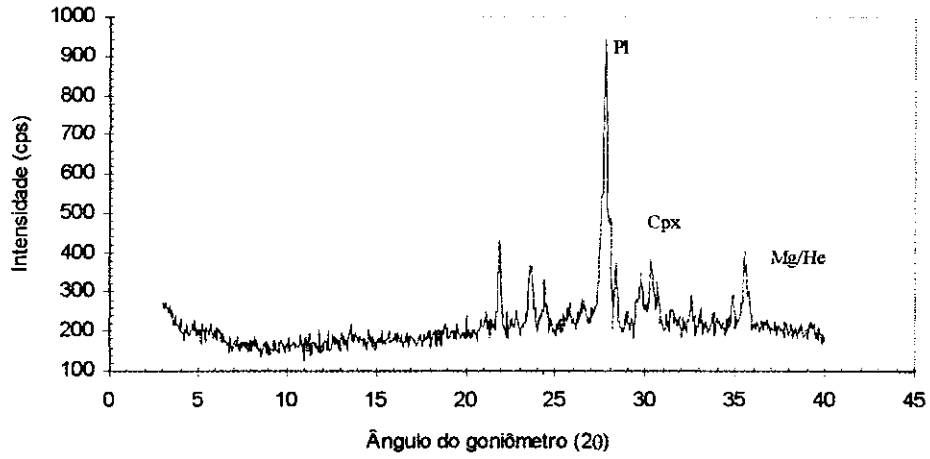


FIGURA 1 - Difratoograma da amostra *C-SCC*

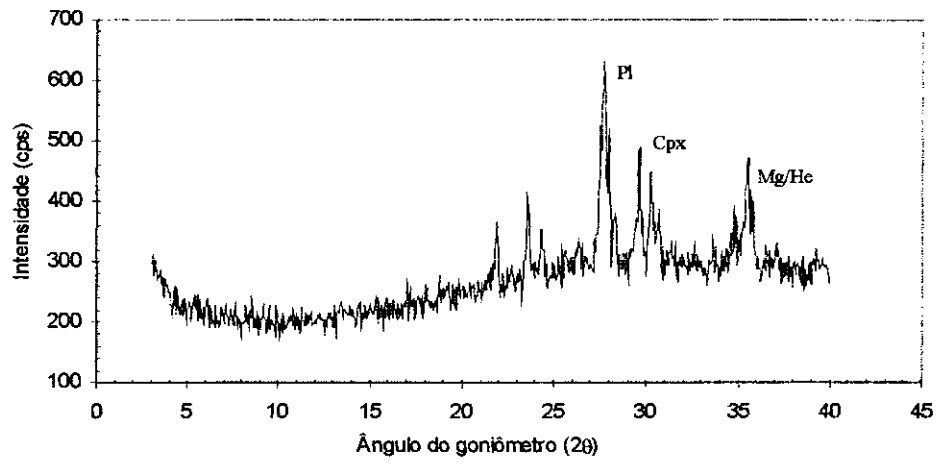


FIGURA 2 - Difratoograma da amostra *E-SCE*

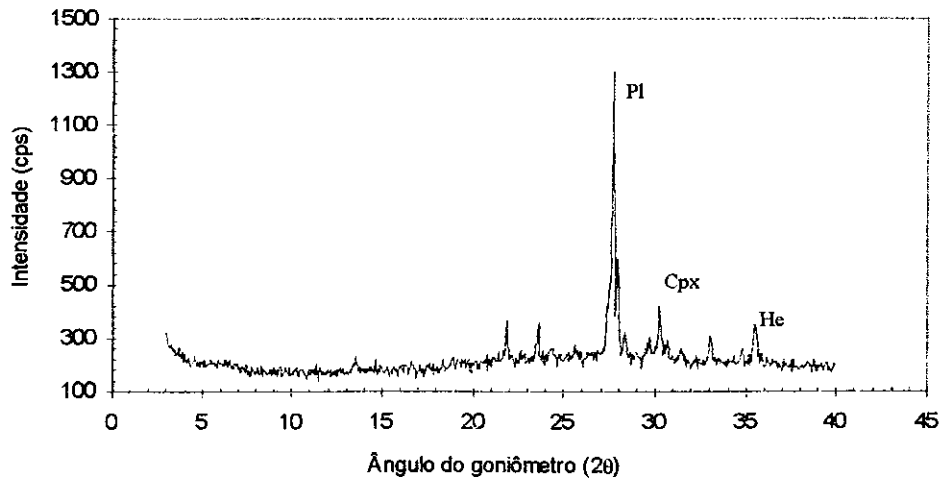


FIGURA 3 - Difratoograma da amostra *C-SAN*.

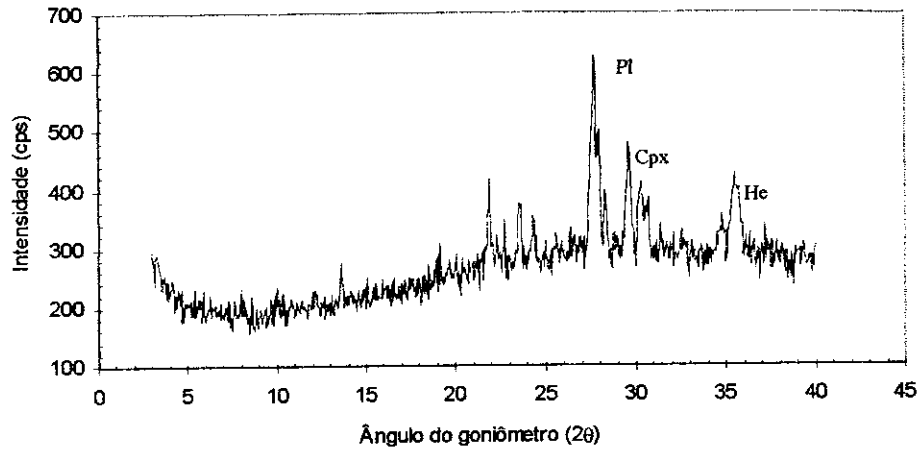


FIGURA 4 - Difratoograma da amostra *E-ANT*.

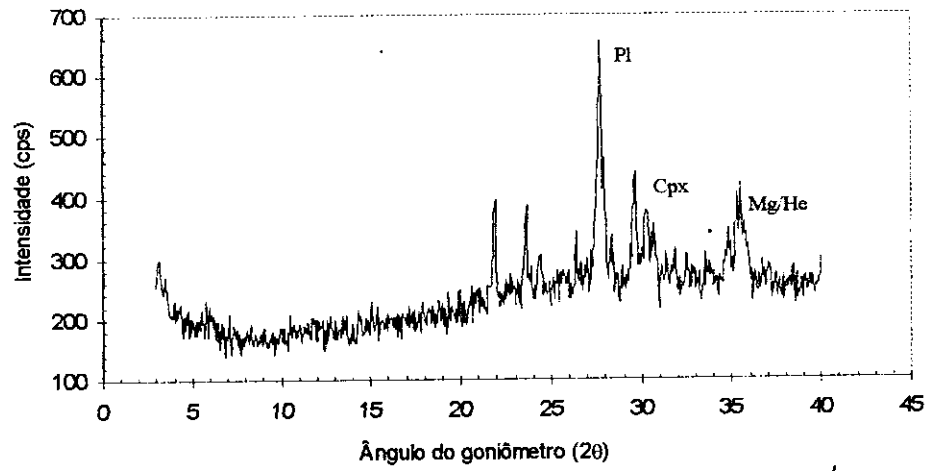


FIGURA 5 - Difratoograma da amostra *C-IND*.

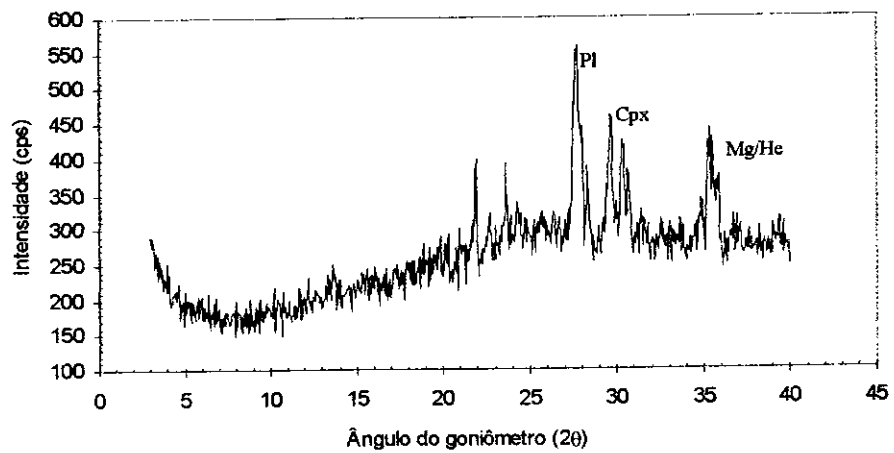


FIGURA 6 - Difratoograma da amostra *E-SAD*.

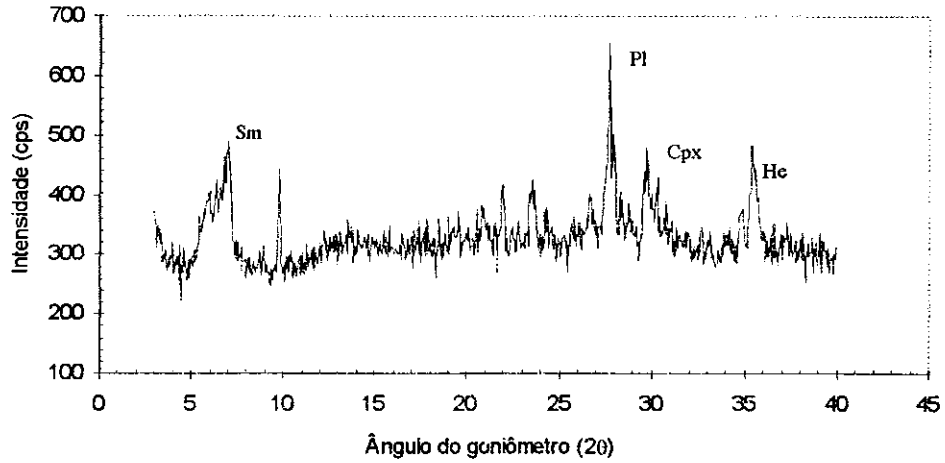


FIGURA 7 - Difratoograma da amostra *V-VES*.

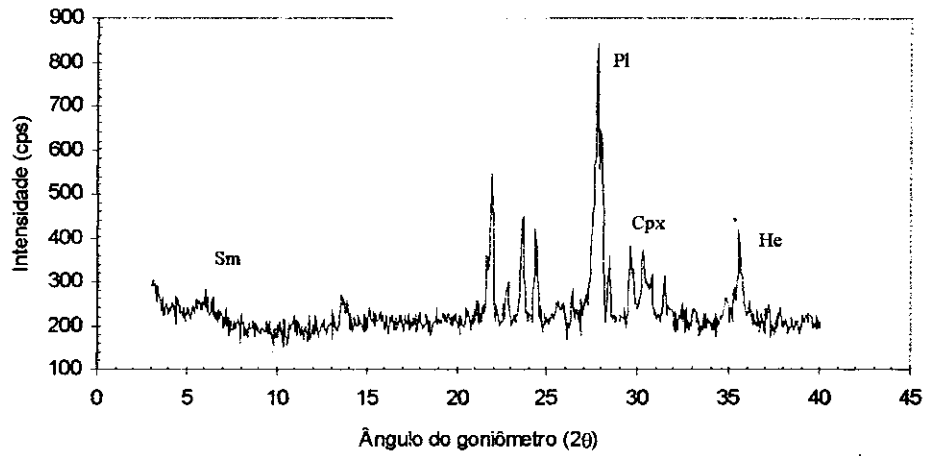


FIGURA 8 - Difratoograma da amostra *C-BP*.

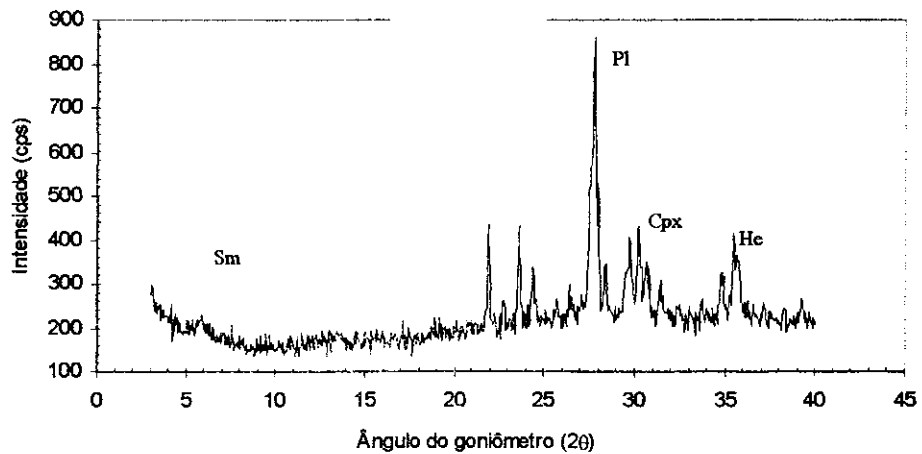


FIGURA 9 - Difratoograma da amostra *C-SM*.

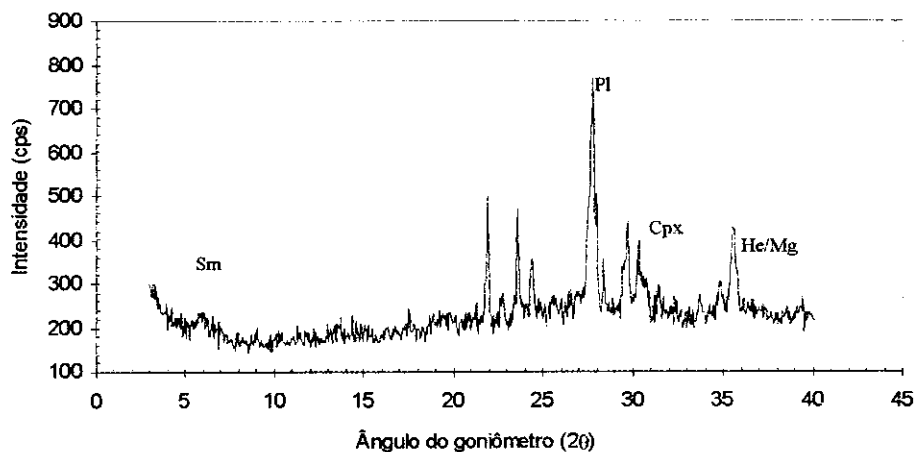


FIGURA 10 - Difratoograma da amostra *C-WS*.

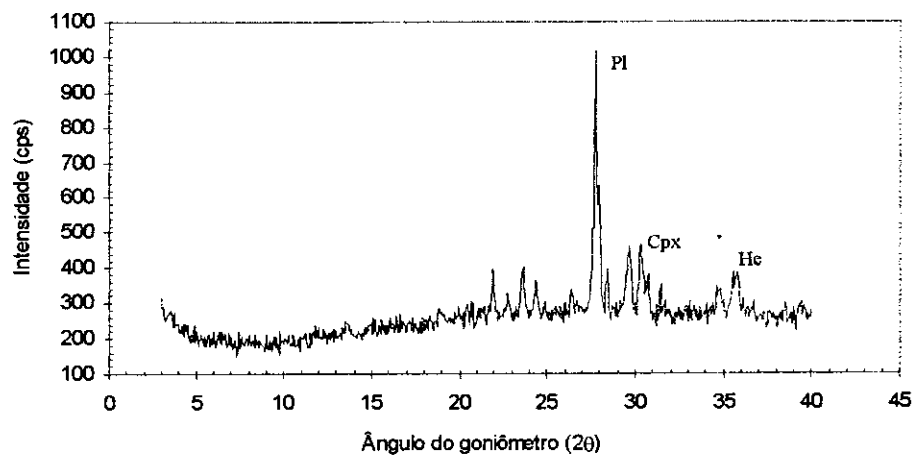


FIGURA 11 - Difratoograma da amostra *E-SIQ*.

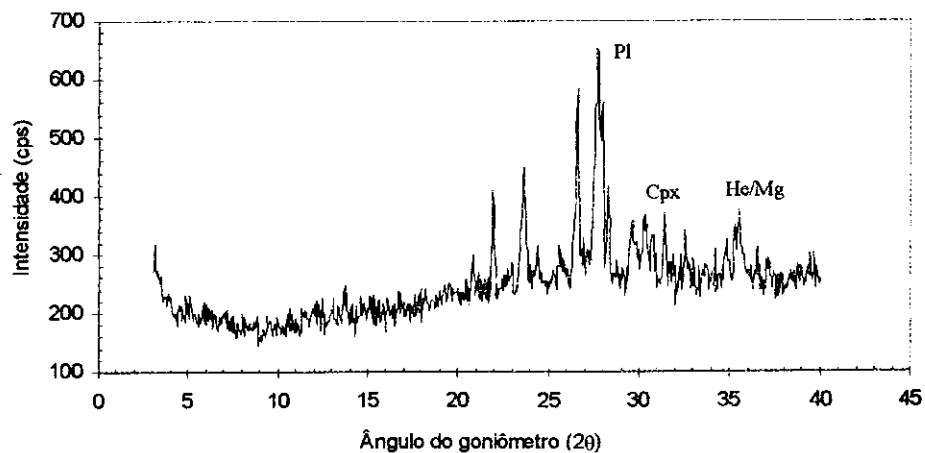


FIGURA 12 - Difratoograma da amostra *D-PAV*.

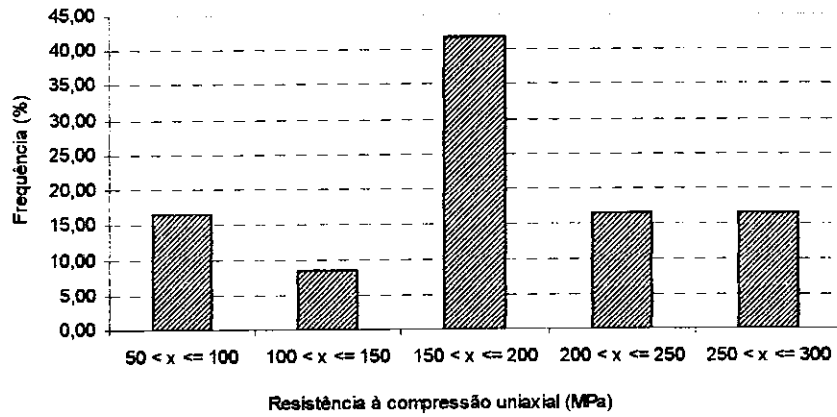


FIGURA 13 – Histograma de frequência dos valores de resistência à compressão uniaxial.

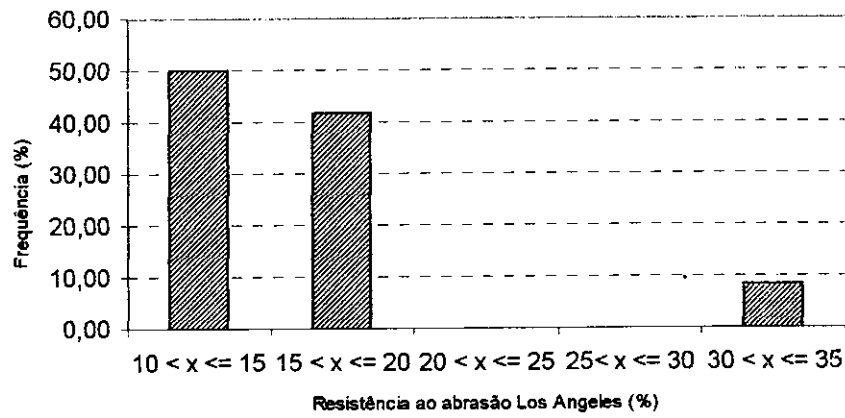


FIGURA 14 – Histograma de frequência dos valores de resistência ao abrasão Los Angeles.

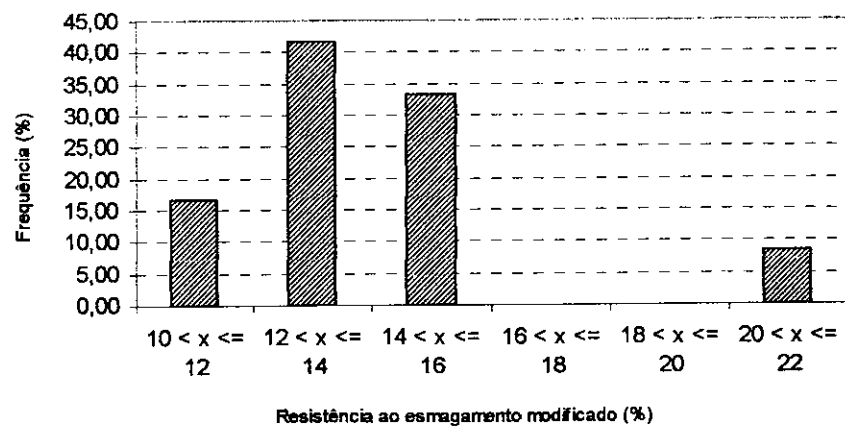


FIGURA 15 – Histograma de frequência dos valores de resistência ao esmagamento modificado.

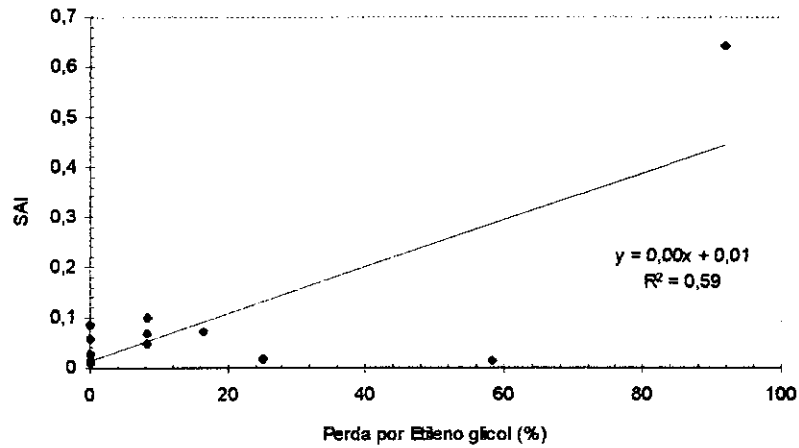


FIGURA 16 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI e perda por imersão em etileno glicol.

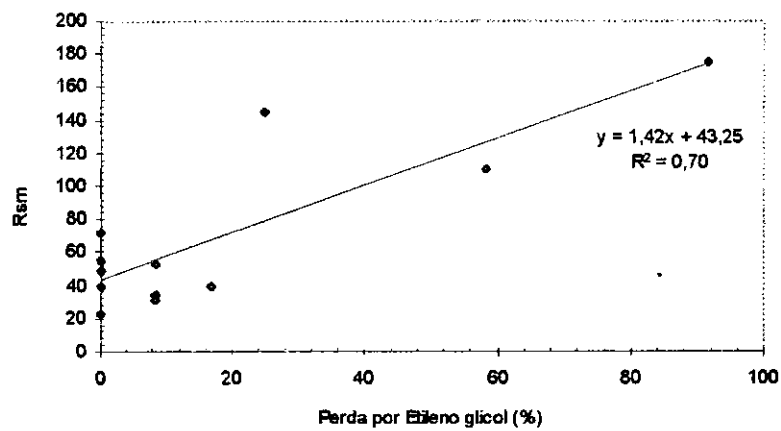


FIGURA 17 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice Rsm e perda por imersão em etileno glicol.

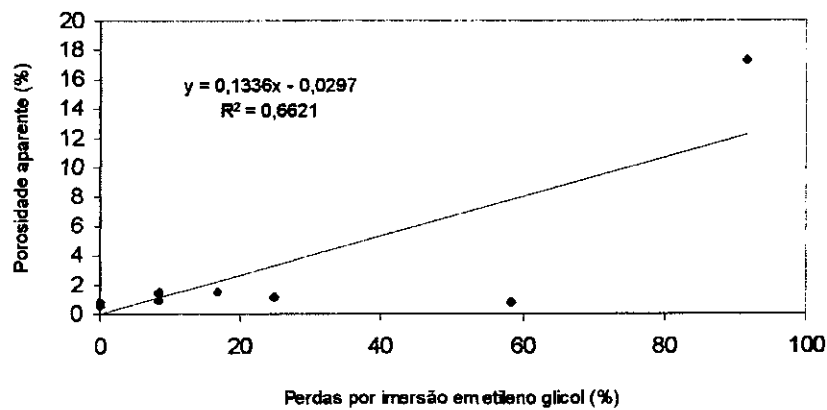


FIGURA 18 – Regressão linear crescente para correlação entre a porosidade aparente e perda por imersão em etileno glicol.

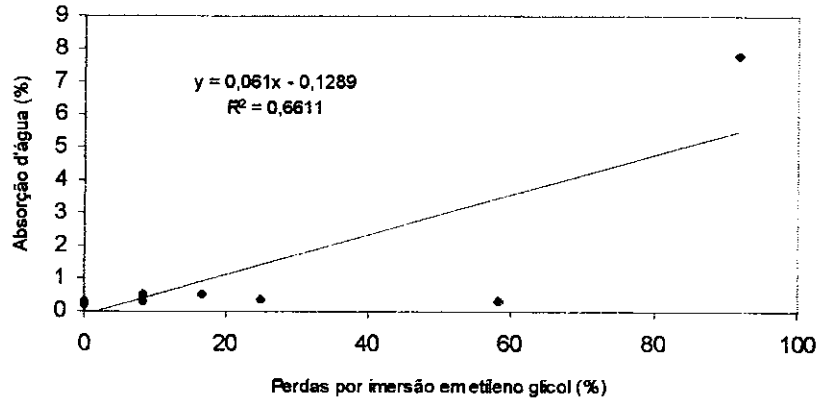


FIGURA 19 – Regressão linear crescente para correlação entre a absorção d'água e perda por imersão em etileno glicol.

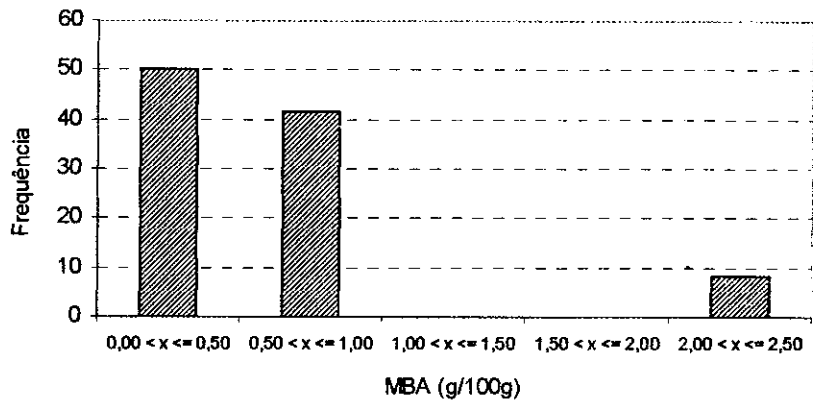


FIGURA 20 – Histograma de frequência dos resultados do valor de adsorção de azul de metileno.

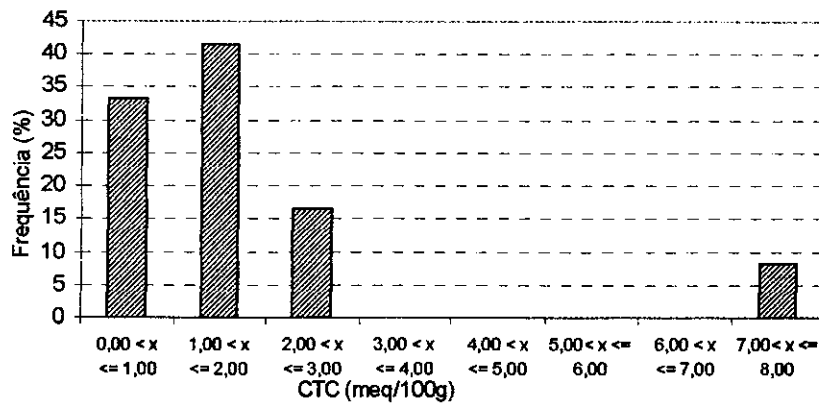


FIGURA 21– Histograma de frequência dos resultados do valor de capacidade de troca catiônica.

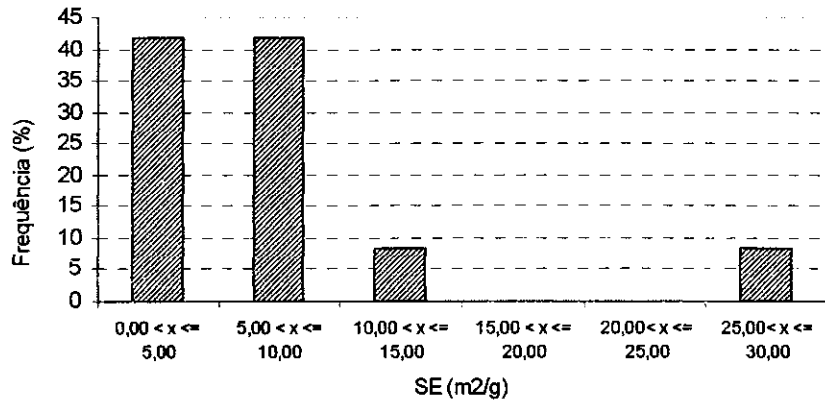


FIGURA 22 – Histograma de frequência dos resultados do valor da superfície específica.

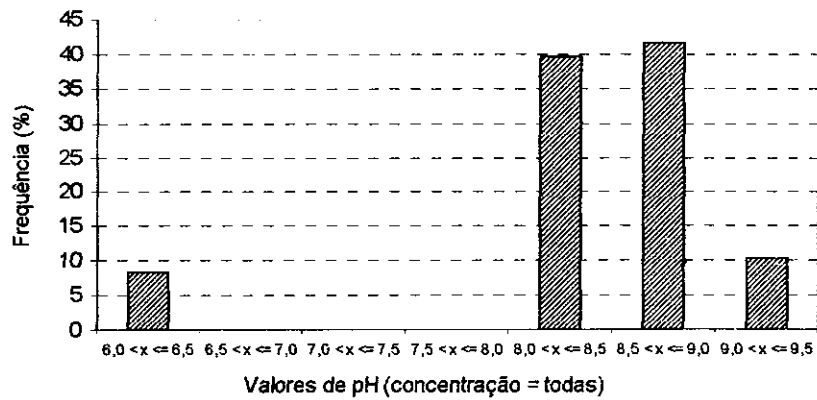


FIGURA 23 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de pH das diversas concentrações do ensaio.

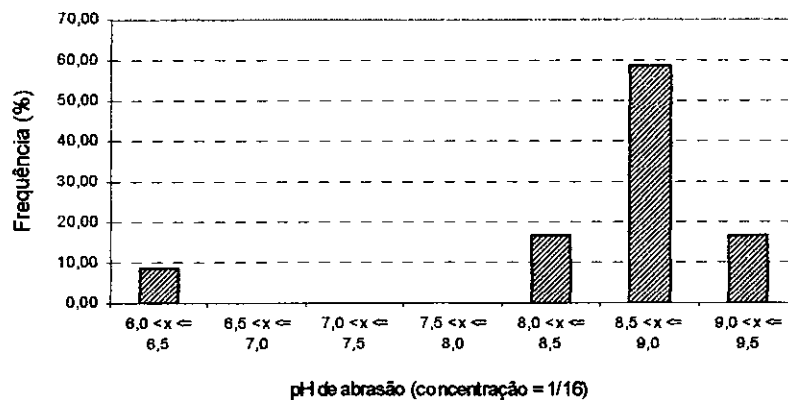


FIGURA 24 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de pH de abrasão.

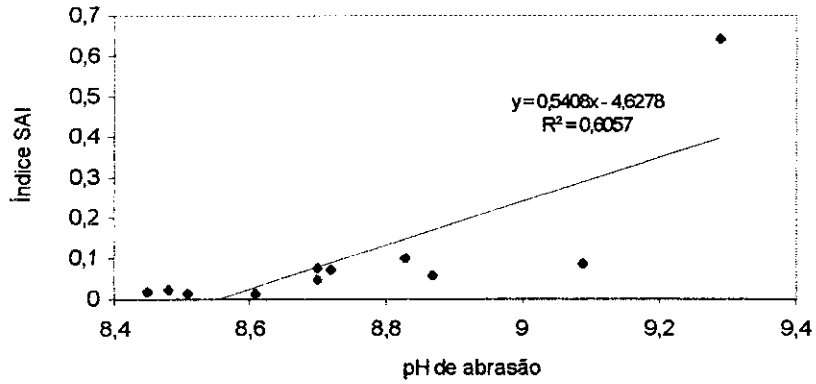


FIGURA 25 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI e o pH de abrasão.

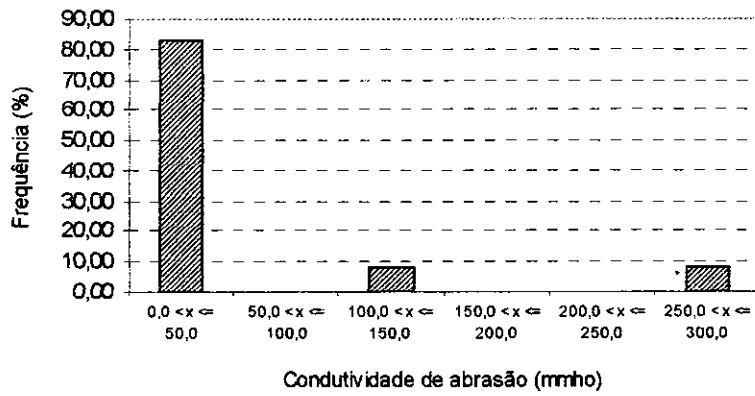


FIGURA 26 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de condutividade de abrasão.

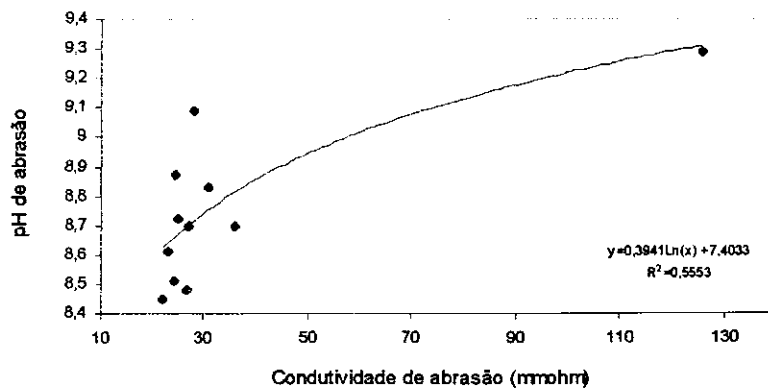


FIGURA 27 – Regressão logarítmica crescente para correlação entre o pH de abrasão e a condutividade de abrasão.

ANEXO II

ENSAIOS DE ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE

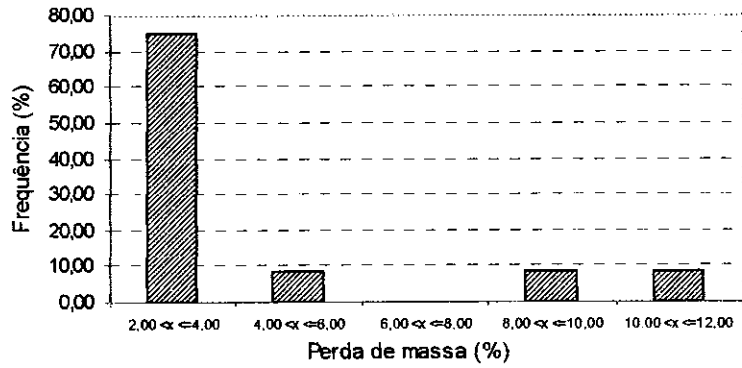


FIGURA 1 – Histograma de distribuição de Frequência os resultados de valores de perda de massa por alteração natural.

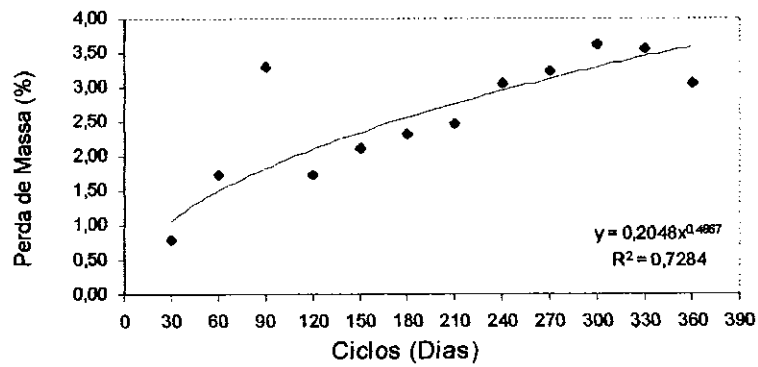


FIGURA 2 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra D-PAV.

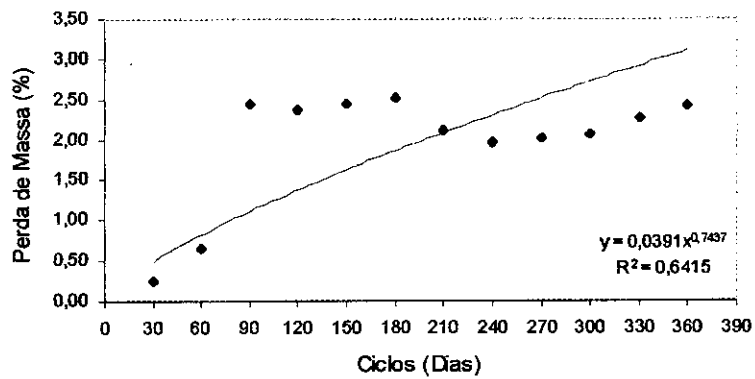


FIGURA 3 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-SM.

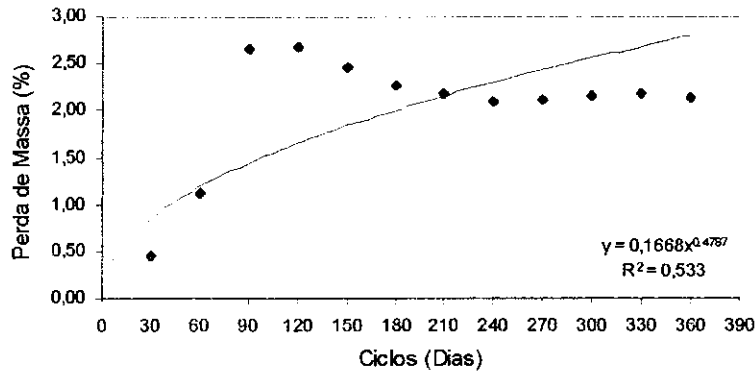


FIGURA 4 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra E-ANT.

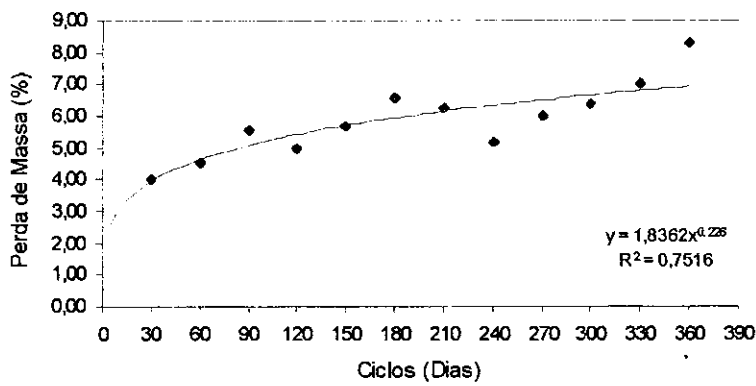


FIGURA 5 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-SAN.

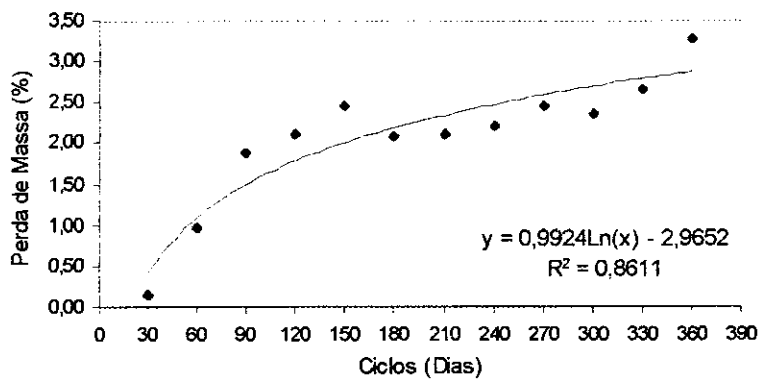


FIGURA 6 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-WS.

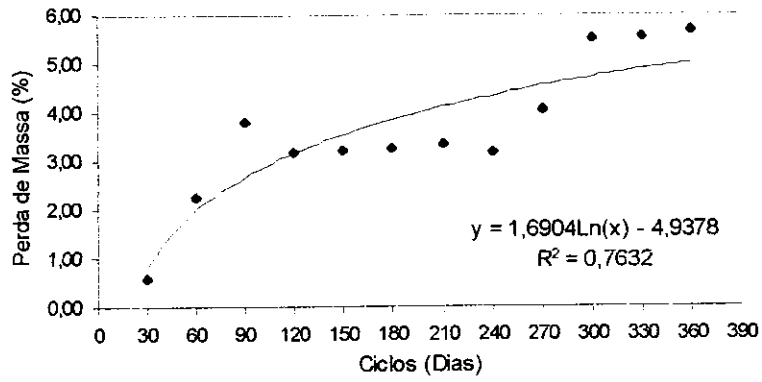


FIGURA 7 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra E-SIQ.

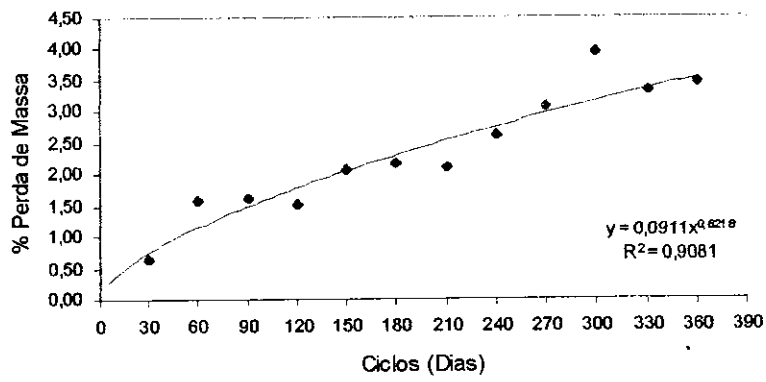


FIGURA 8 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra E-SAD.

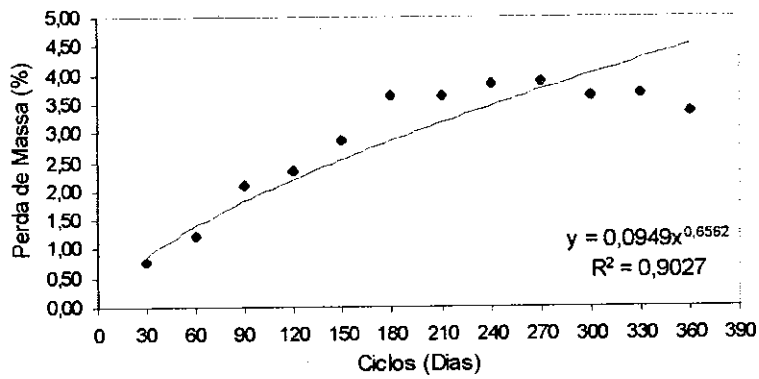


FIGURA 9 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-IND.

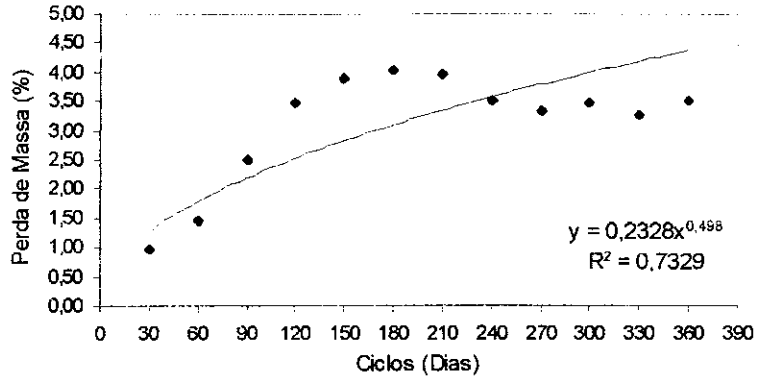


FIGURA 10 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra E-SCE.

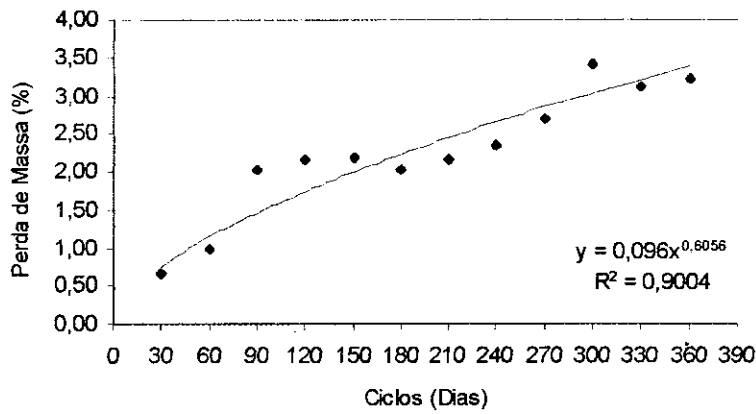


FIGURA 11 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-SCC..

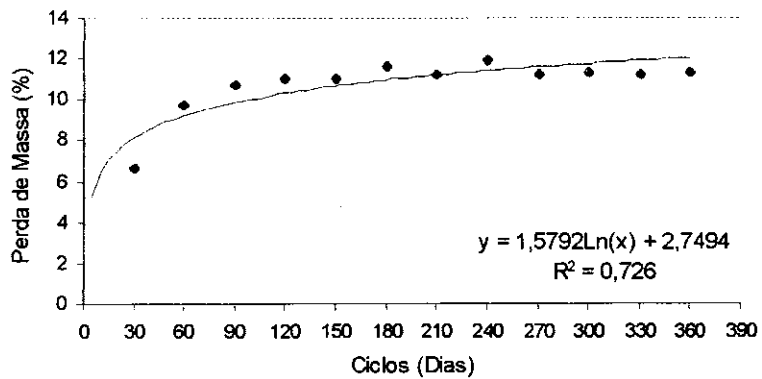


FIGURA 12 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra V-VES.

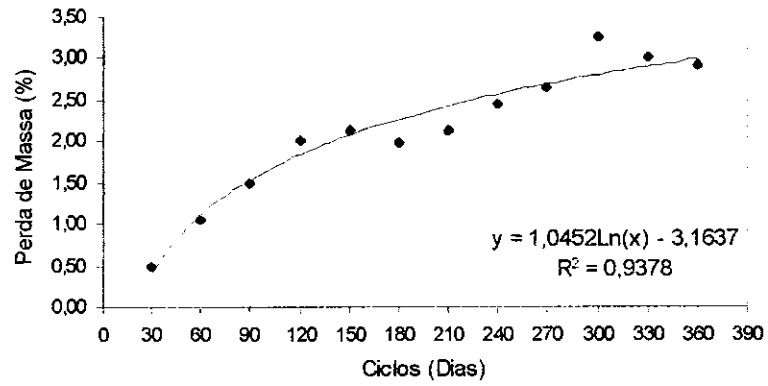


FIGURA 13 – Gráfico perda de massa x ciclos de alteração natural. Amostra C-BP.

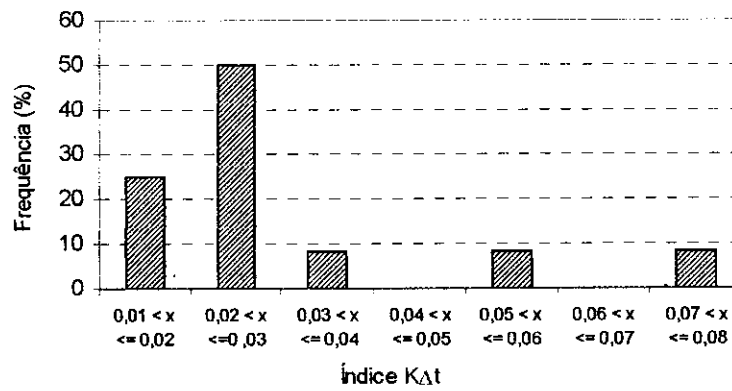


FIGURA 14 - Histograma de distribuição de Frequência de valores do Índice $K\Delta t$ no ensaio de alteração natural.

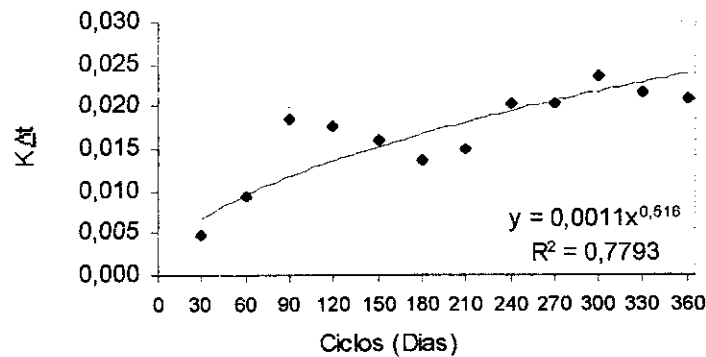


FIGURA 15 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra D-PAV.

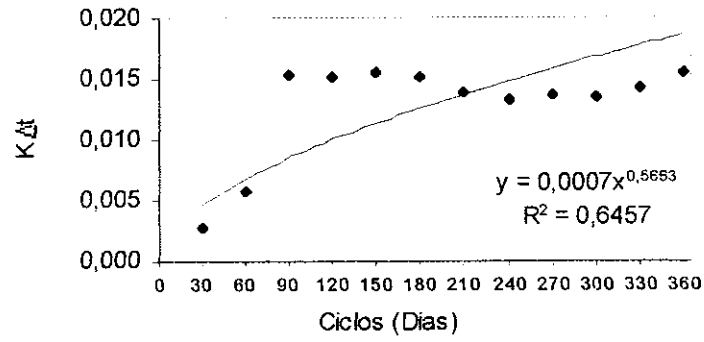


FIGURA 16 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-SM.

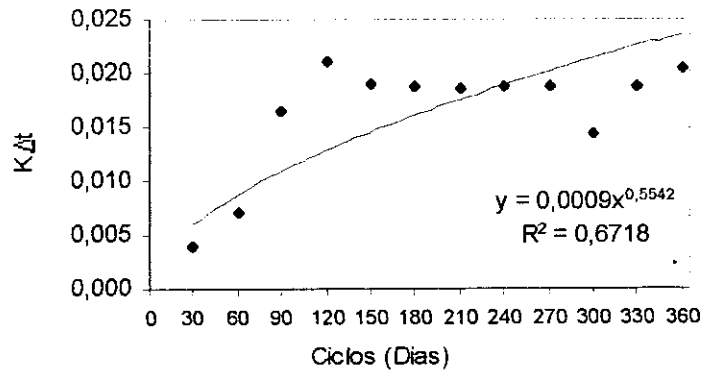


FIGURA 17 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra E-ANT.

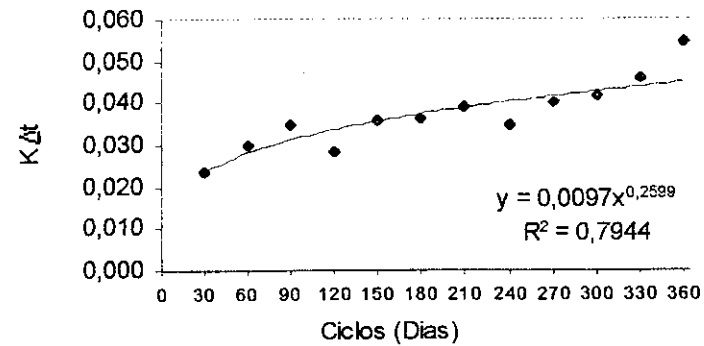


FIGURA 18 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-SAN.

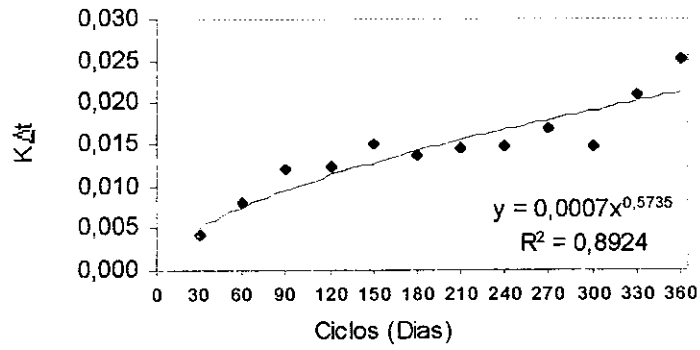


FIGURA 19 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-WS.

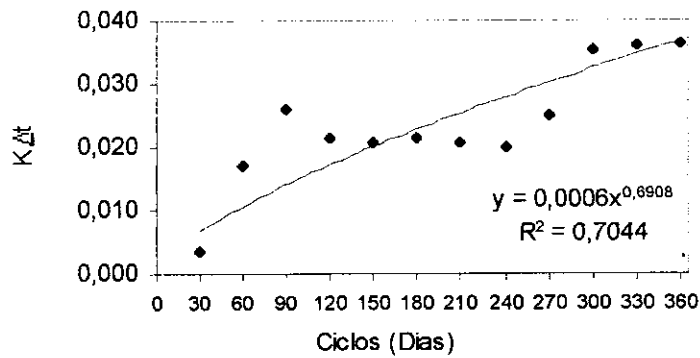


FIGURA 20 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra E-SIQ.

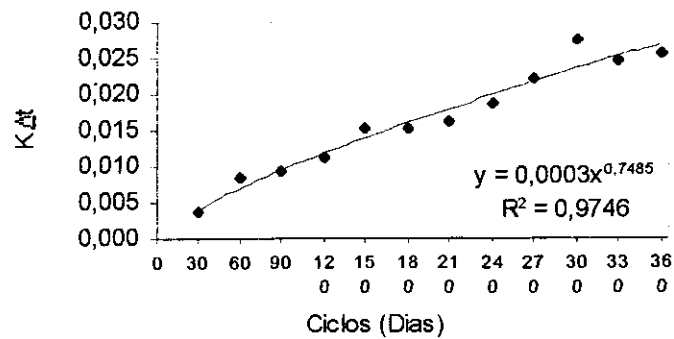


FIGURA 21 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra E-SAD.

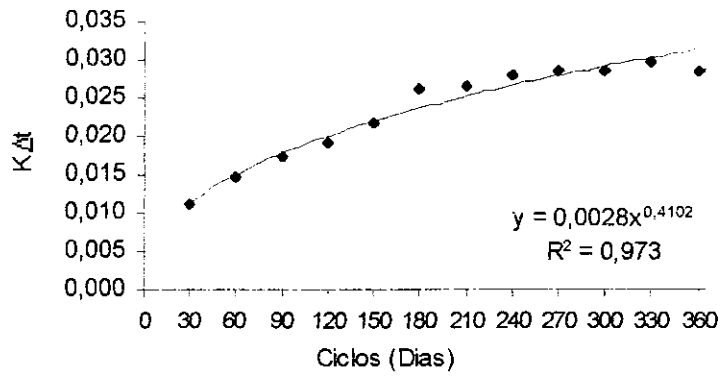


FIGURA 22 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-IND.

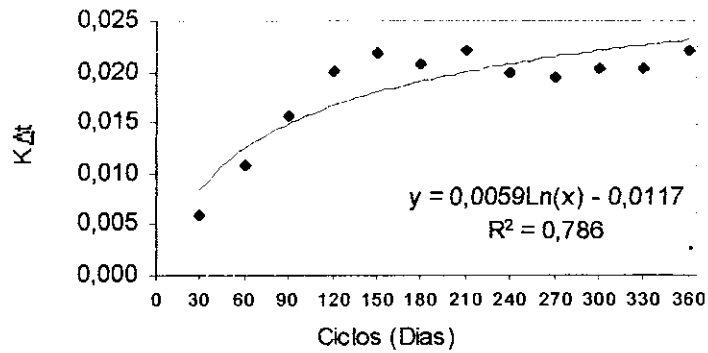


FIGURA 23 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra E-SCE.

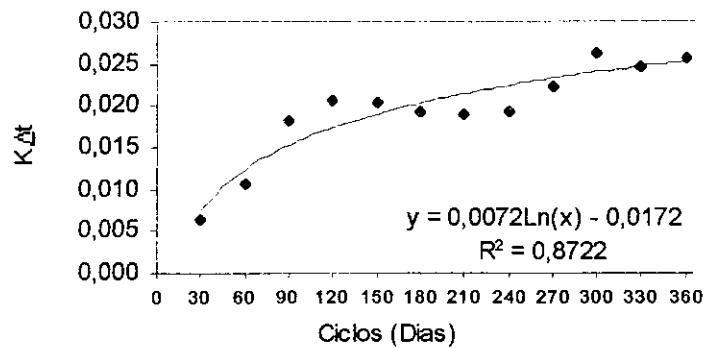


FIGURA 24 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-SCC.

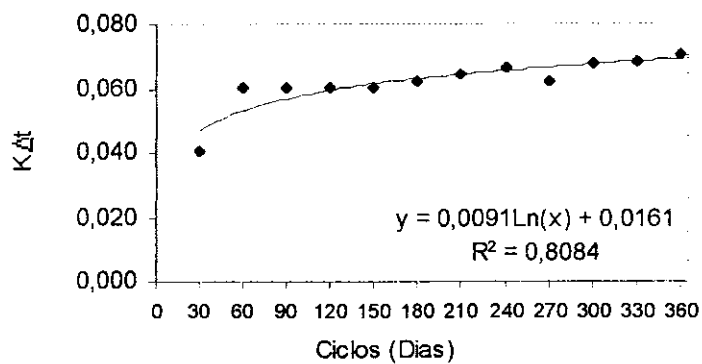


FIGURA 25 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra V-VES.

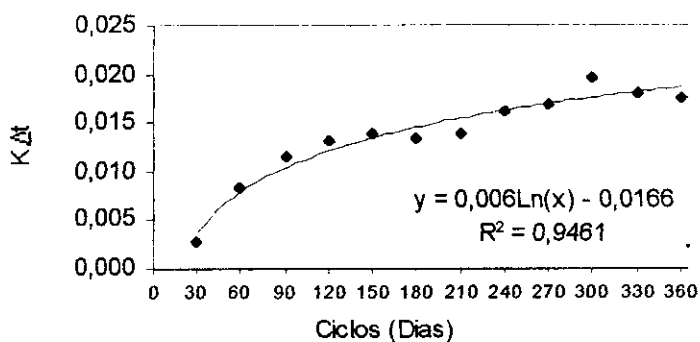


FIGURA 26 - Gráfico do Índice de alterabilidade $K\Delta t$ x ciclos de alteração natural. Amostra C-BP.

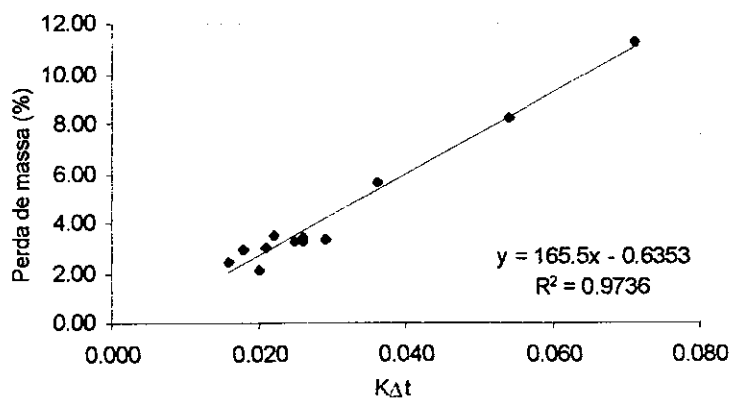


FIGURA 27 – Regressão linear crescente para correlação entre a perda de massa e o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

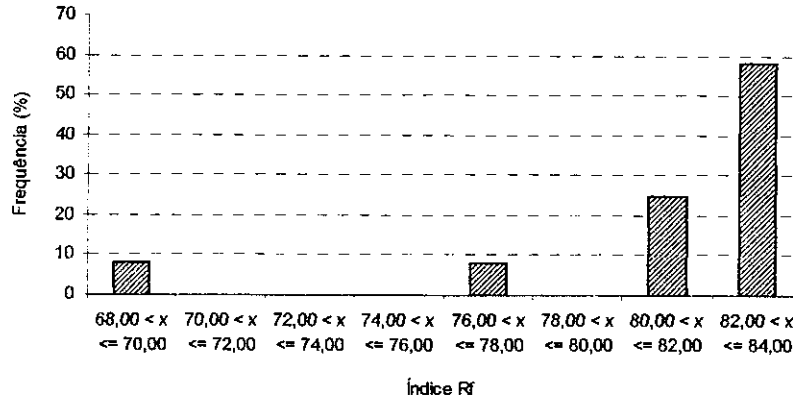


FIGURA 28 - Histograma de distribuição de Frequência de valores do Índice Rf no ensaio de alteração natural.

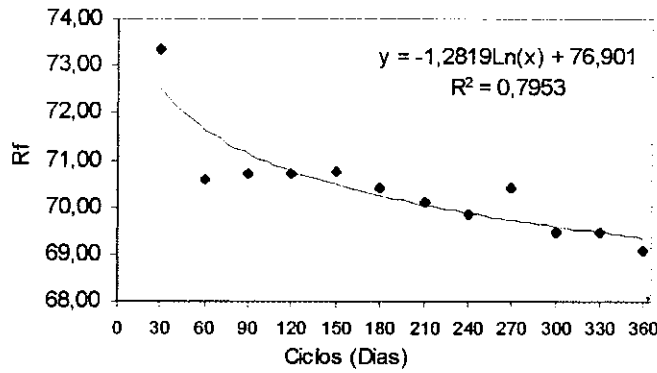


FIGURA 29 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra V-VES.

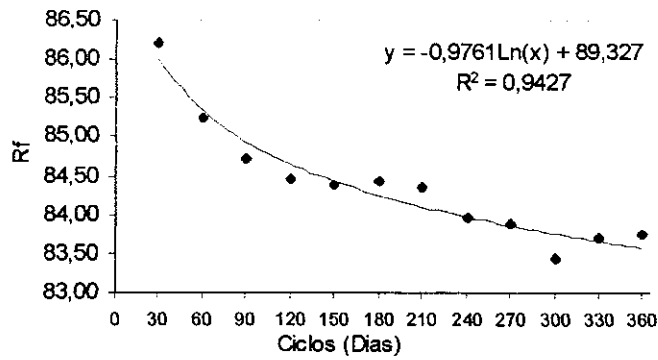


FIGURA 30 - Gráfico do Índice de alterabilidade Rf x ciclos de alteração natural. Amostra C-BP.

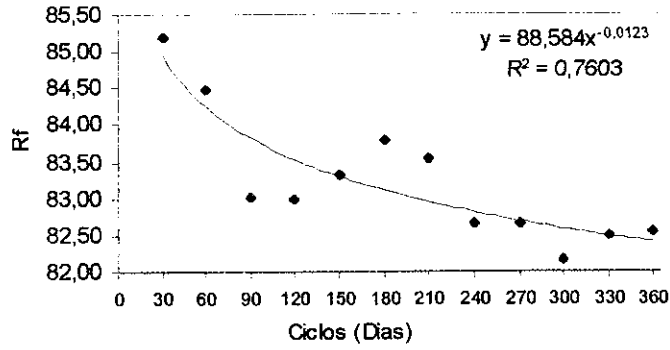


FIGURA 31 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra D-PAV.

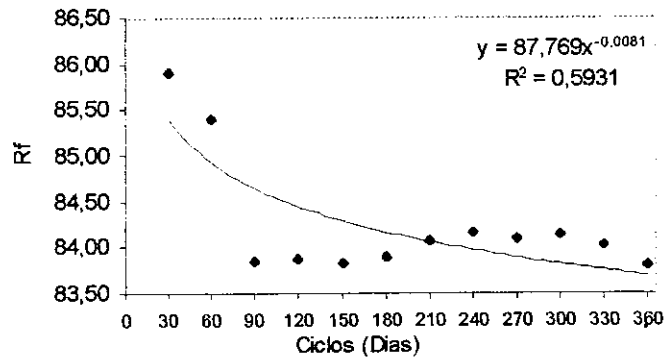


FIGURA 32 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra C-SM.

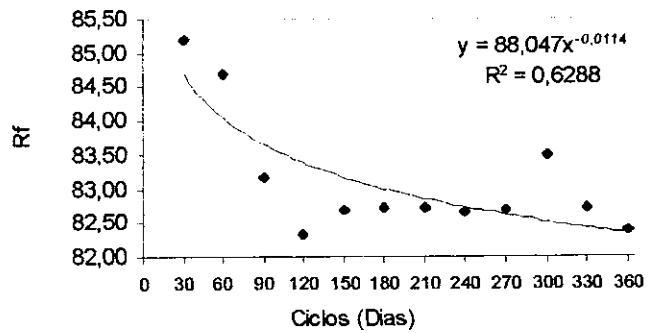


FIGURA 33 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra E-ANT.

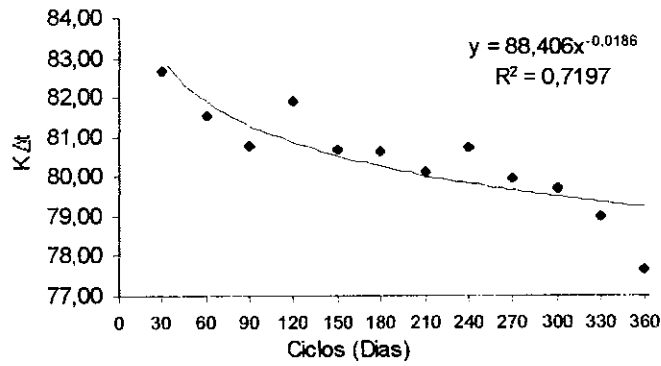


FIGURA 34 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra C-SAN.

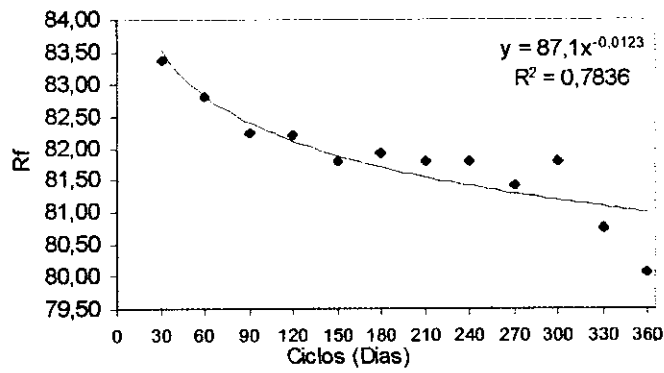


FIGURA 35 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra C-WS.

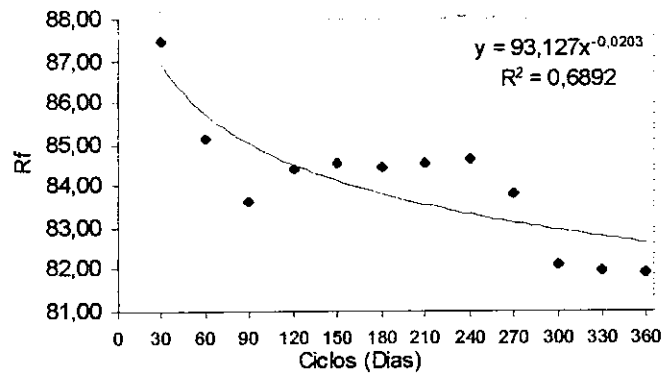


FIGURA 36 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra E-SIQ.

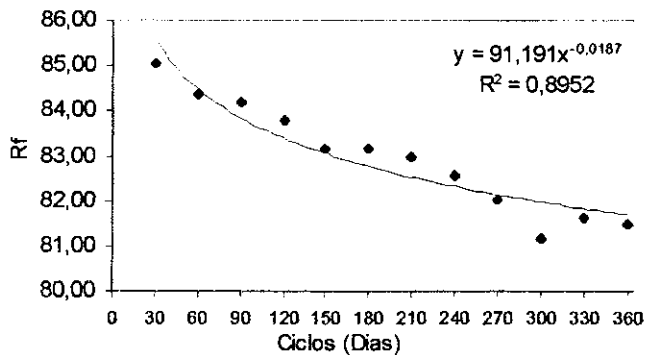


FIGURA 37 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra E-SAD.

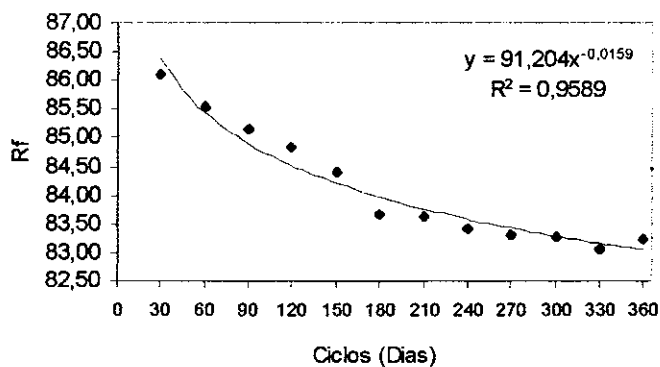


FIGURA 38 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra C-IND.

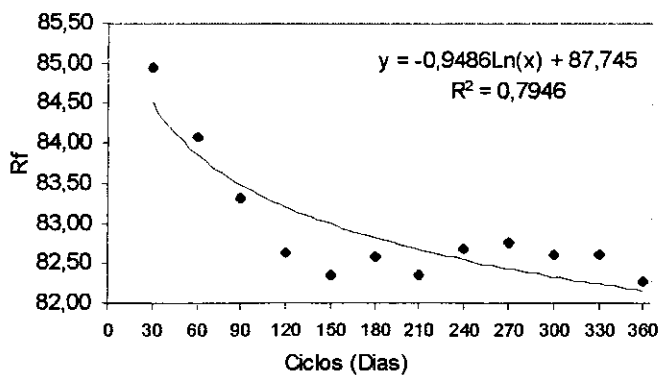


FIGURA 39 - Gráfico do Índice de alterabilidade R_f x ciclos de alteração natural. Amostra E-SCE.

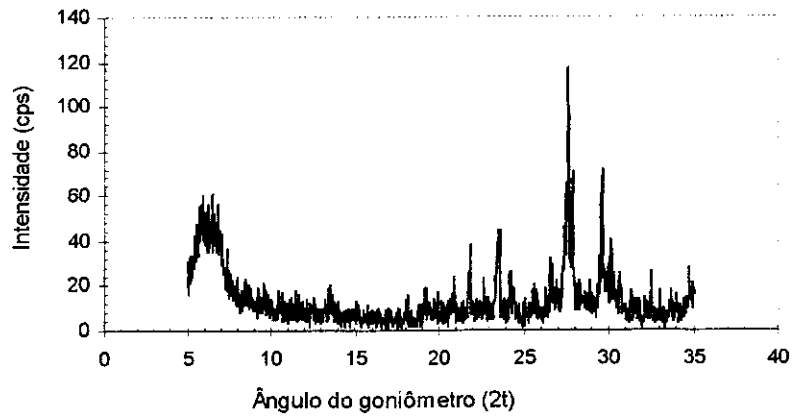


FIGURA 43 – Difratograma da amostra *V-VES* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

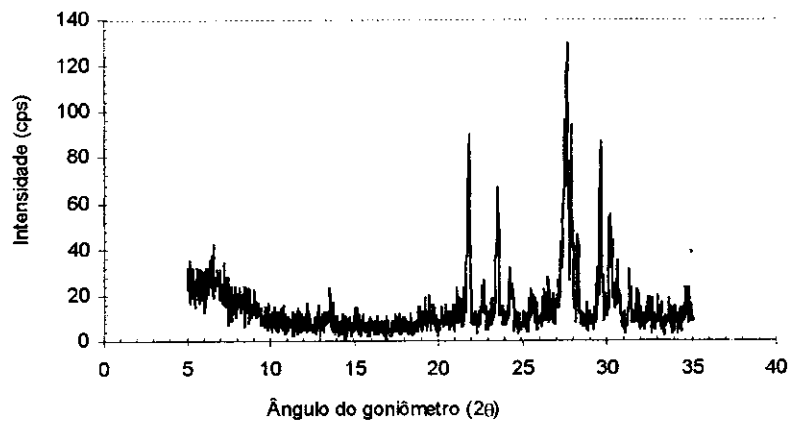


FIGURA 44 – Difratograma da amostra *C-SAN* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

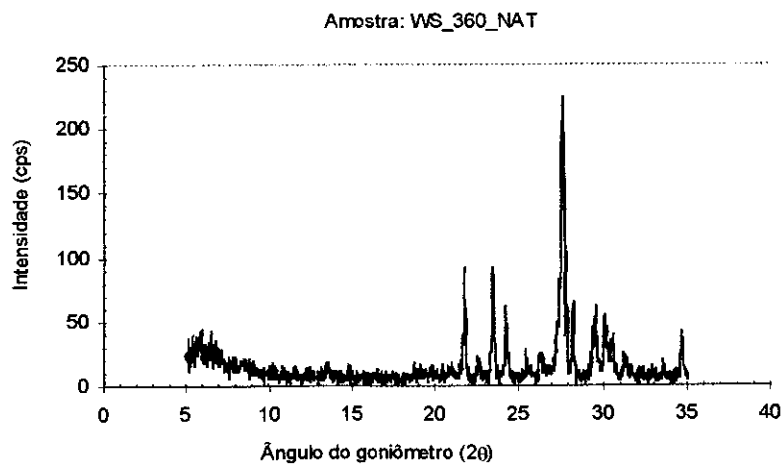


FIGURA 45 – Difratograma da amostra *C-WS* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

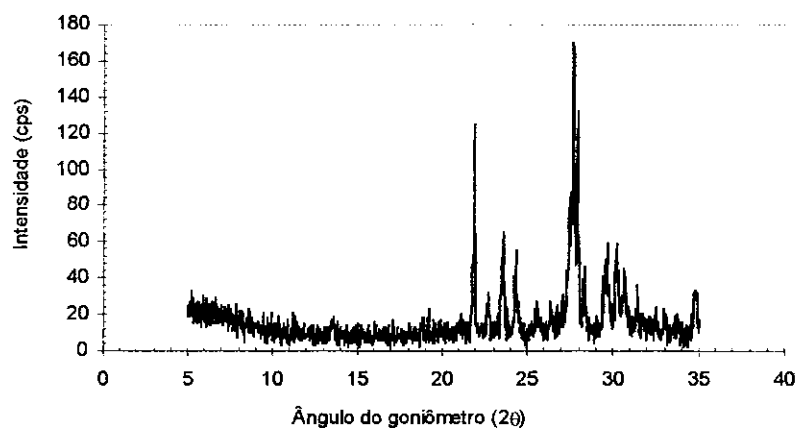


FIGURA 46 – Difratograma da amostra *C-SM* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

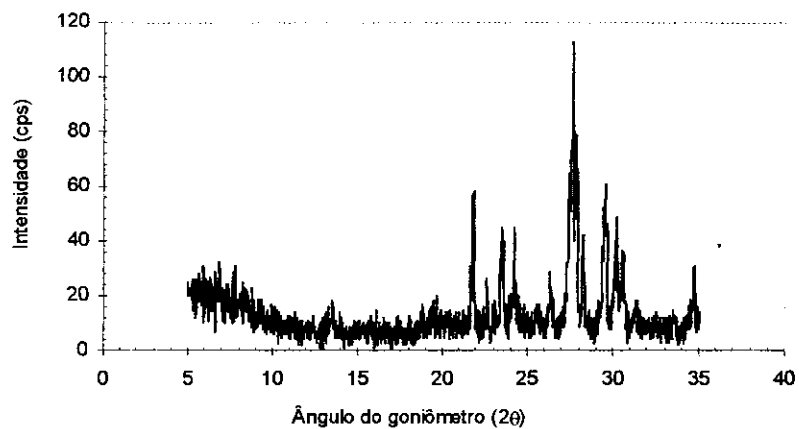


FIGURA 47 – Difratograma da amostra *E-SCE* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

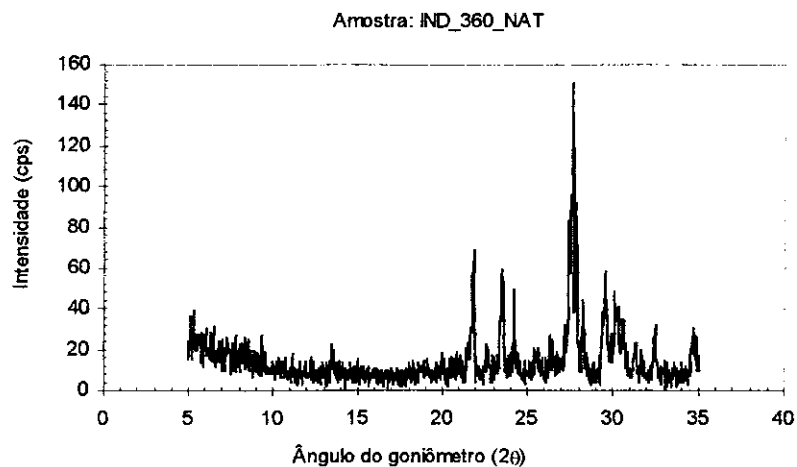


FIGURA 48 – Difratograma da amostra *C-IND* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

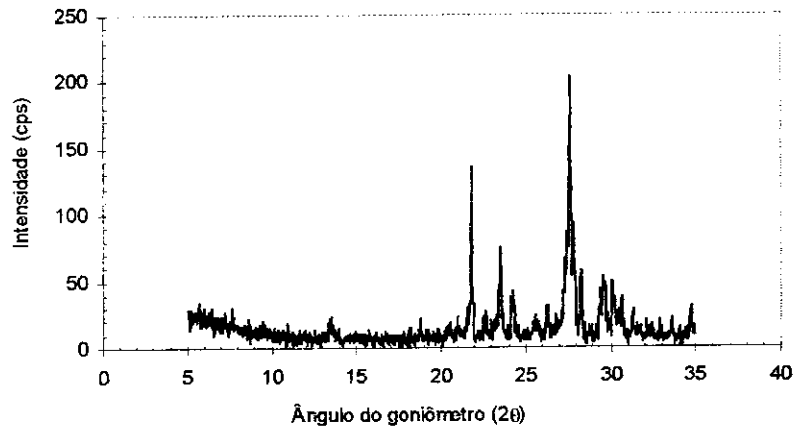


FIGURA 49 – Difratograma da amostra *C-BP* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

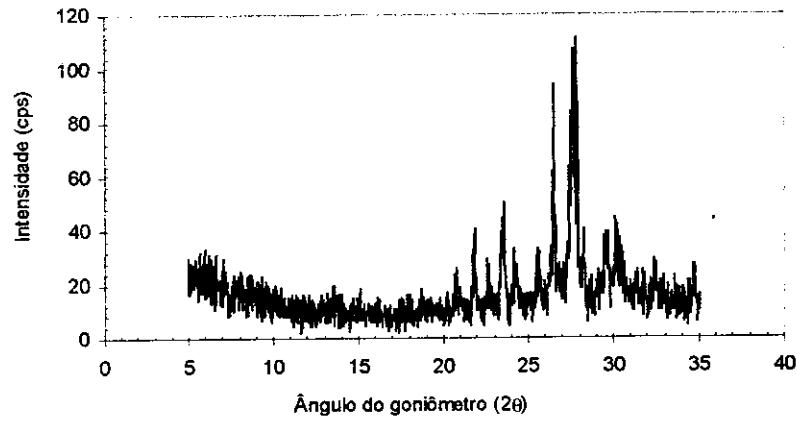


FIGURA 50 – Difratograma da amostra *D-PAV* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

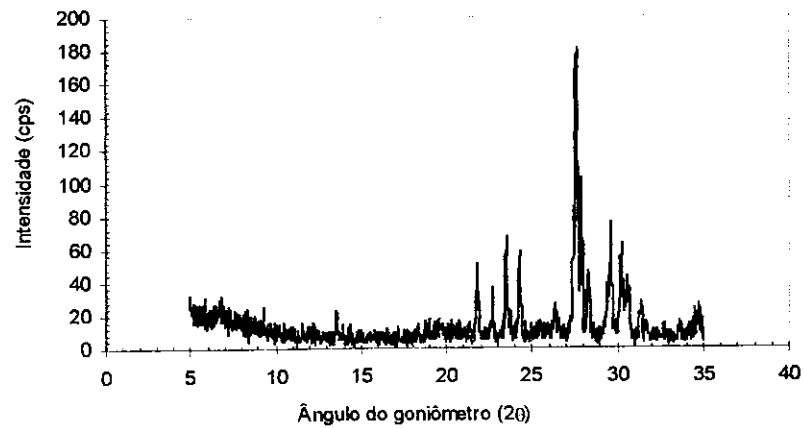


FIGURA 51 – Difratograma da amostra *E-SIQ* no ciclo 360 do ensaio de alteração natural.

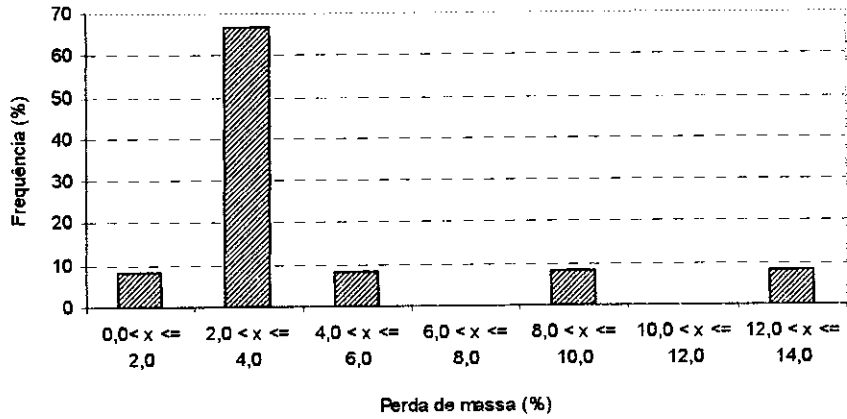


FIGURA 52 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de perda de massa por umedecimento e secagem.

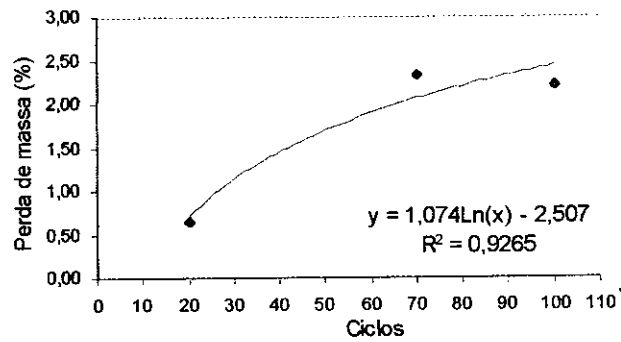


FIGURA 53 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra D-PAV.

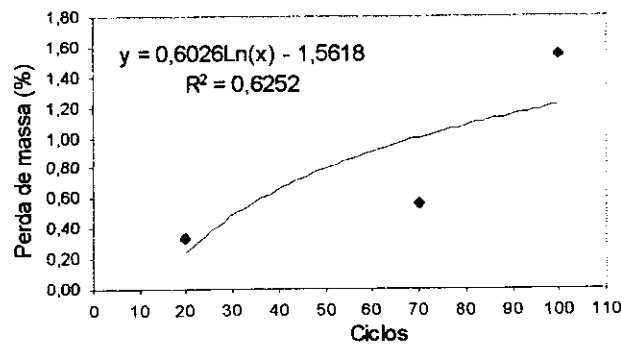


FIGURA 54 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SM.

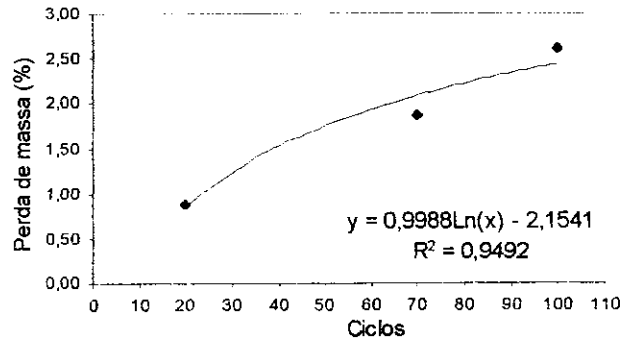


FIGURA 55 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-ANT.

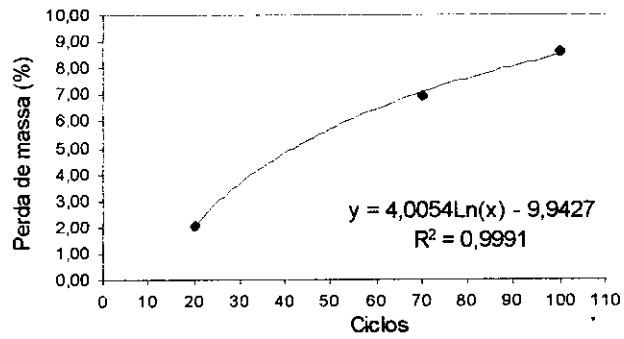


FIGURA 56 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SAN.

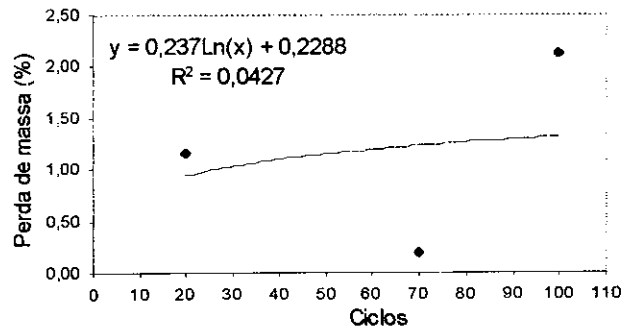


FIGURA 57 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-WS.

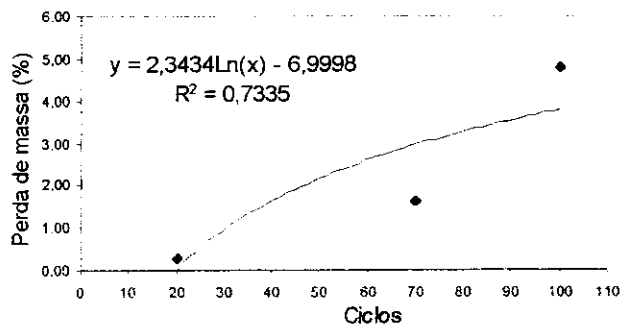


FIGURA 58 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra SIQ.

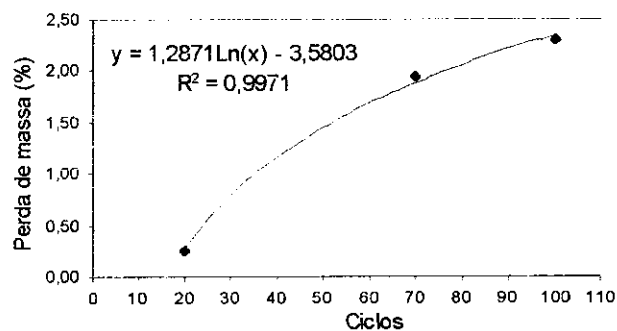


FIGURA 59 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SAD.

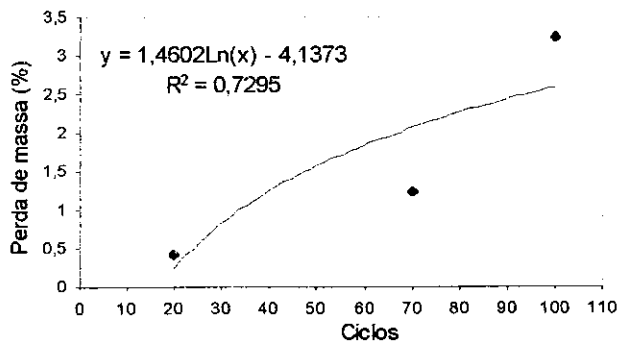


FIGURA 60 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-IND.

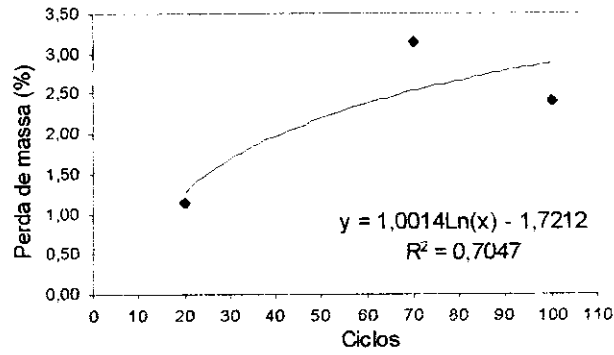


FIGURA 61 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SCE.

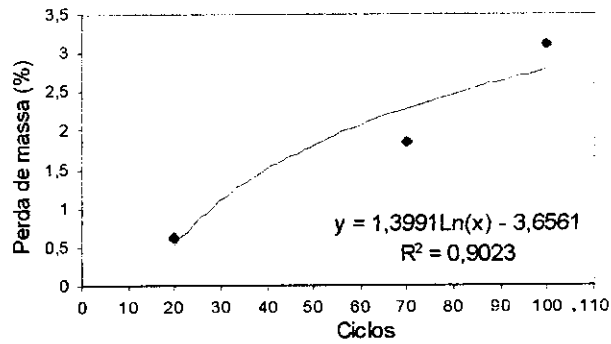


FIGURA 62 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SCC.

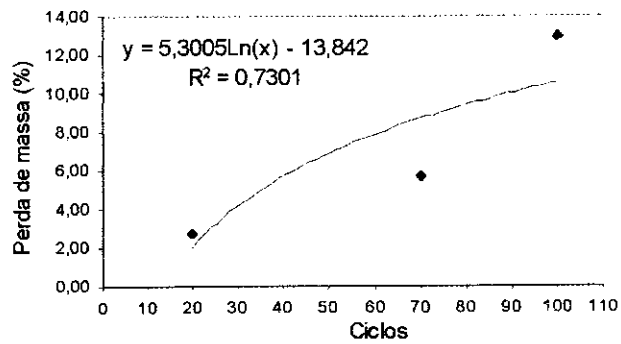


FIGURA 63 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra V-VES.

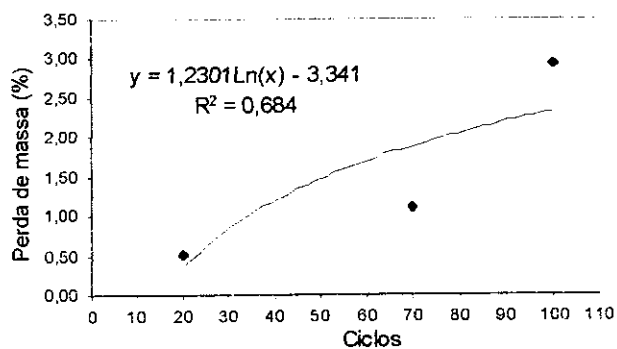


FIGURA 64 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-BP.

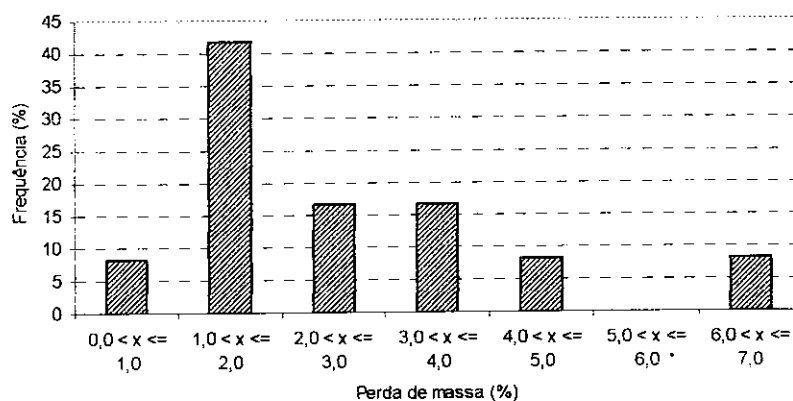


FIGURA 65 – Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores de perda de massa pela lixiviação contínua.

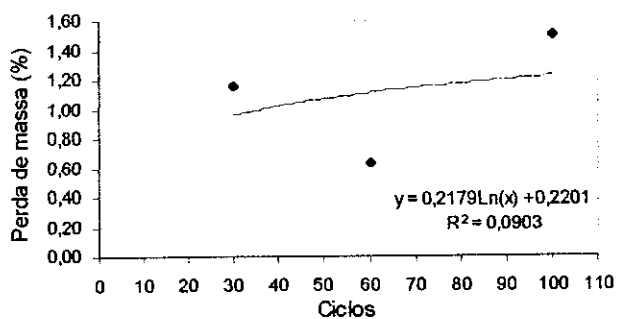


FIGURA 66 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra D-PAV.



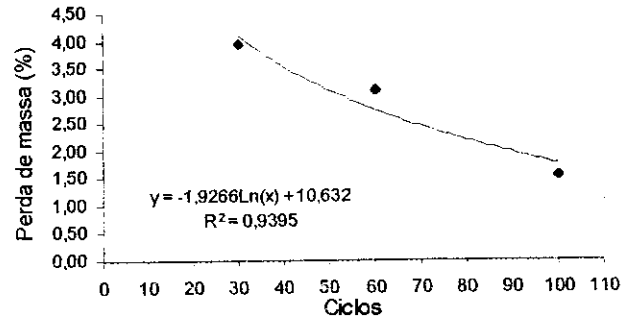


FIGURA 67 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SM.

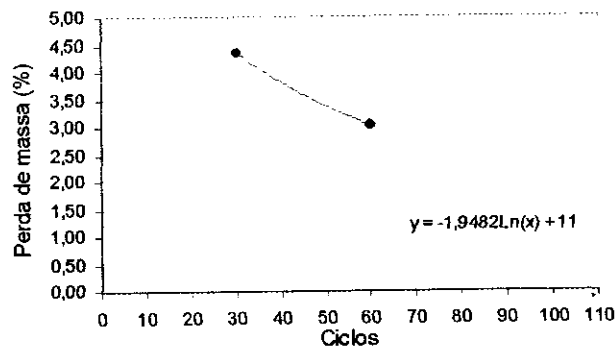


FIGURA 68 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SAN.

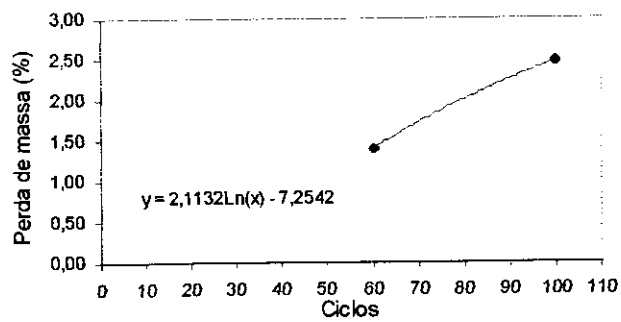


FIGURA 69 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SIQ.

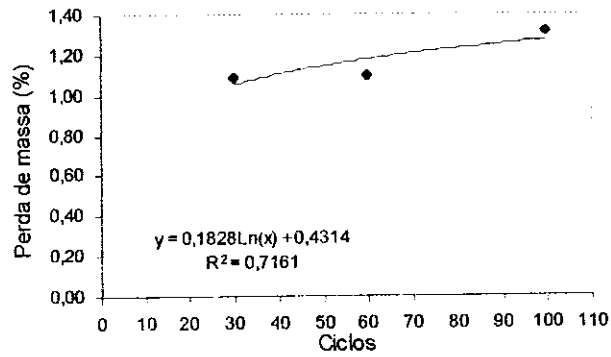


FIGURA 70 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SAD.

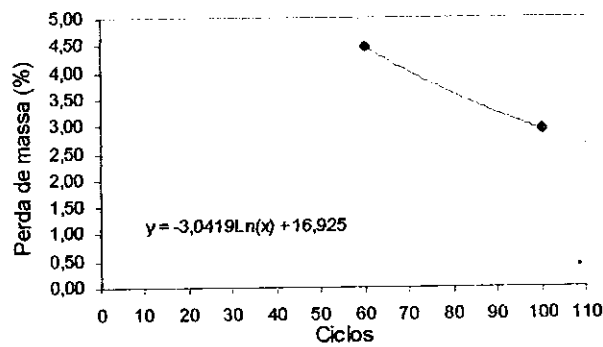


FIGURA 71– Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SCE.

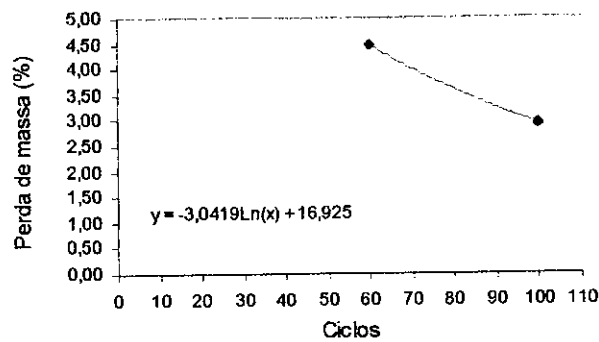


FIGURA 72 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SCC.

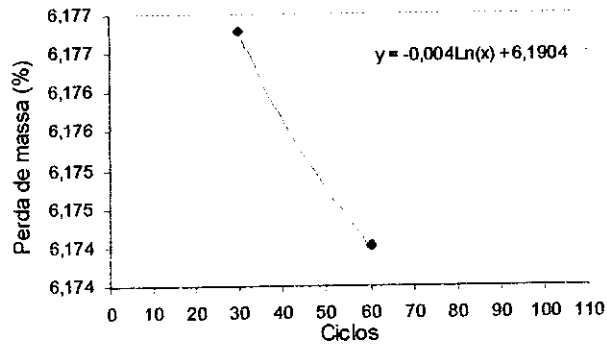


FIGURA 73 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra V-VES.

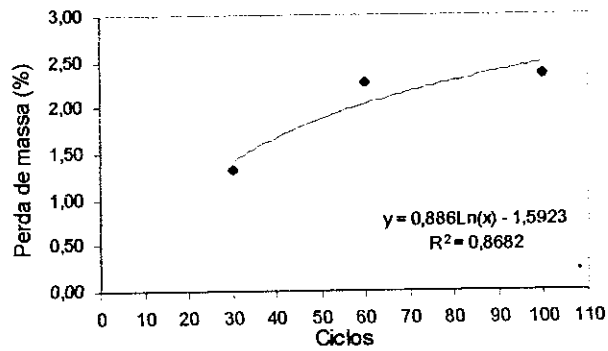


FIGURA 74 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-IND.

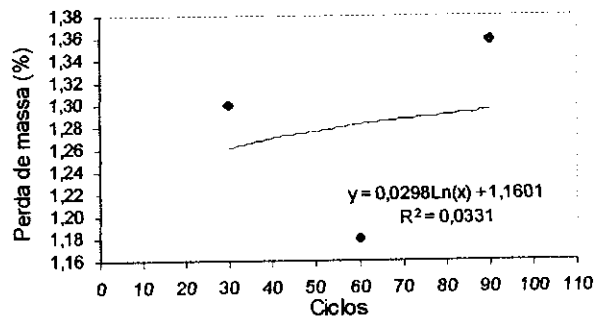


FIGURA 75 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-ANT.

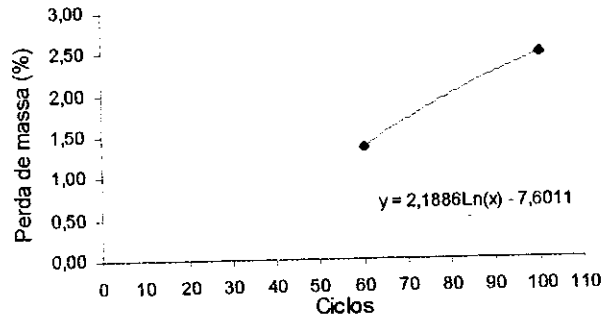


FIGURA 76 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-WS.

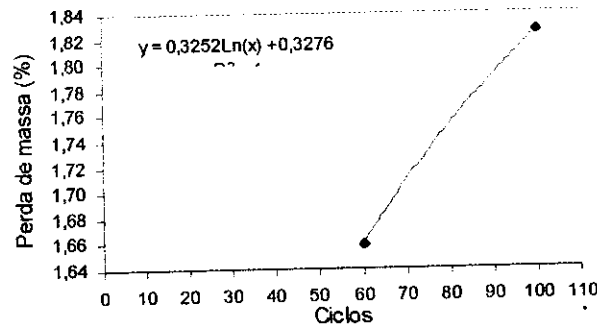


FIGURA 77 – Gráfico da perda de massa x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-BP.

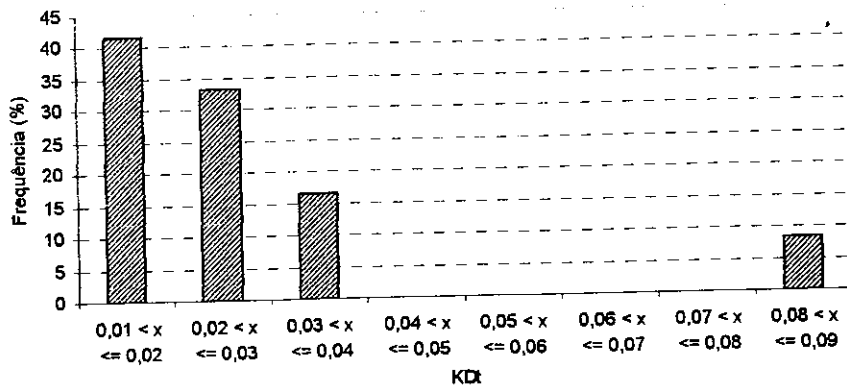


FIGURA 78 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ do ensaio de umedecimento e secagem.

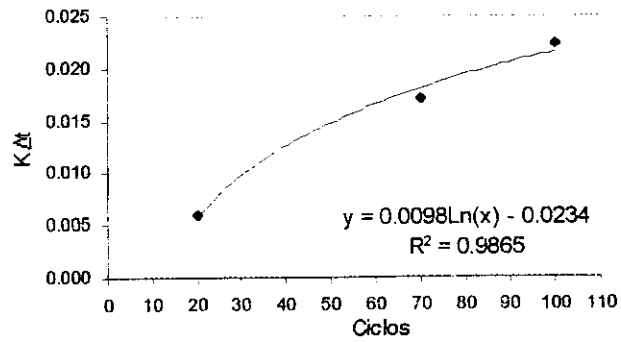


FIGURA 79 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra D-PAV.

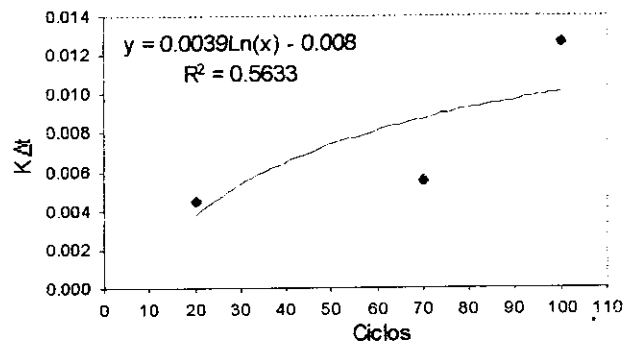


FIGURA 80 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SM.

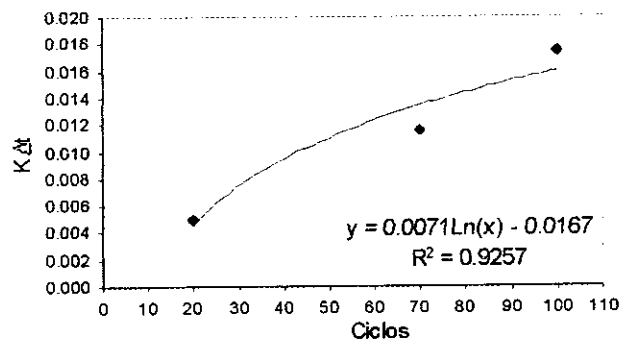


FIGURA 81 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-ANT.

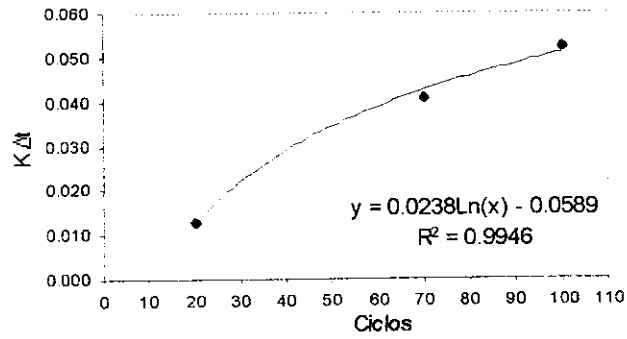


FIGURA 82 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SAN.

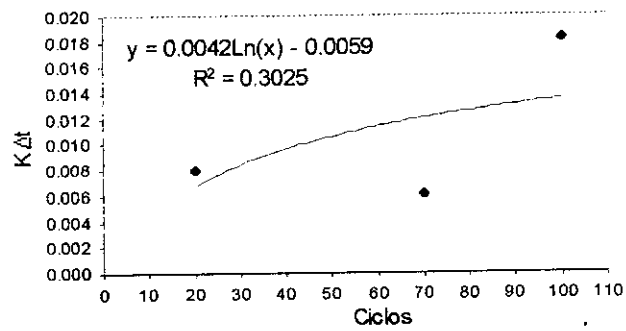


FIGURA 83 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-WS.

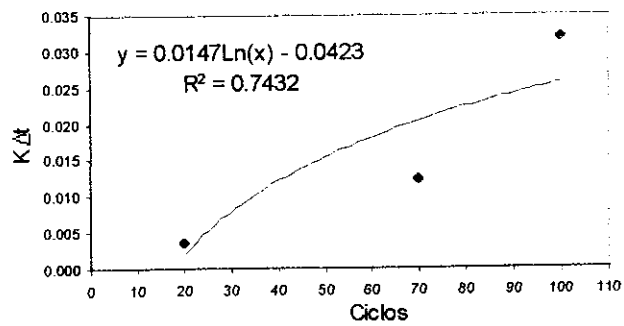


FIGURA 84 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SIQ.

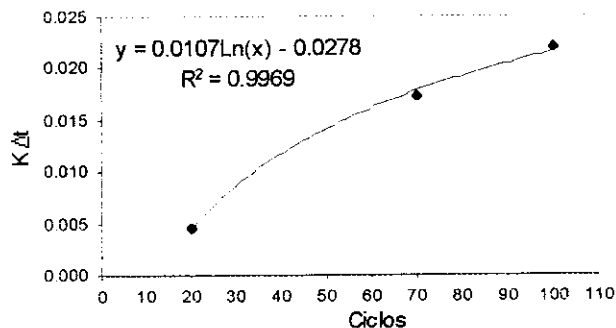


FIGURA 85 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SAD.

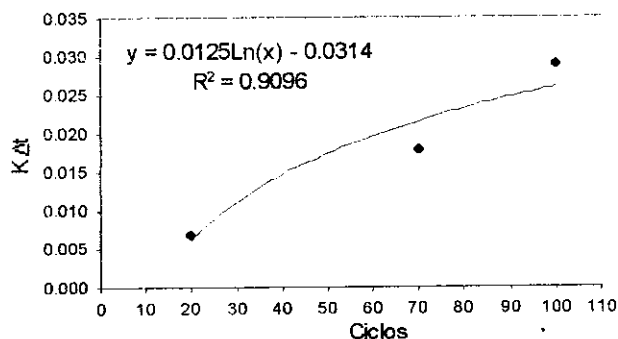


FIGURA 86 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-IND.

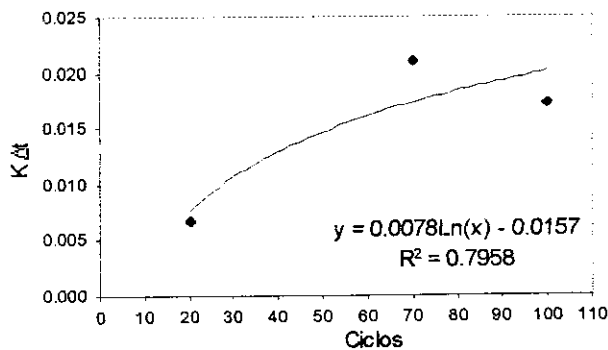


FIGURA 87 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SCE.

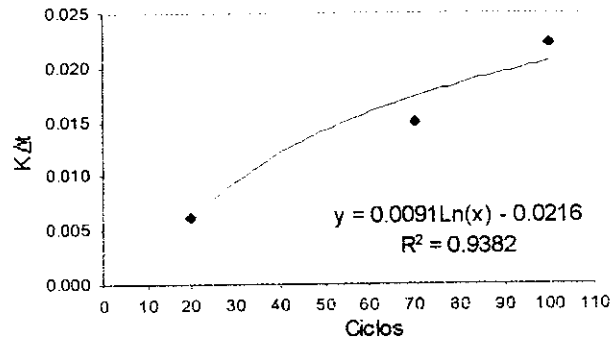


FIGURA 88 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SCC.

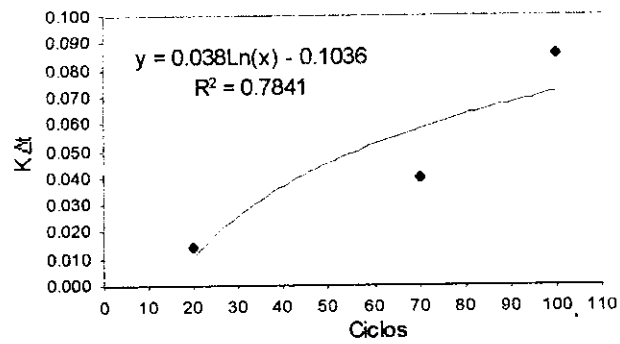


FIGURA 89 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra V-VES.

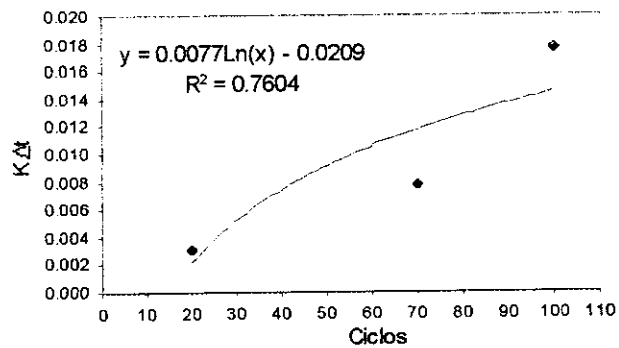


FIGURA 90 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-BP.

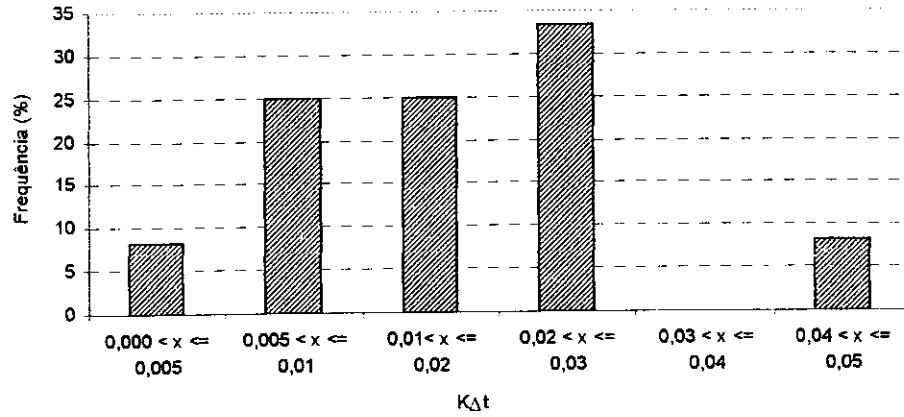


FIGURA 91 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade $K\Delta t$ do ensaio de lixiviação contínua.

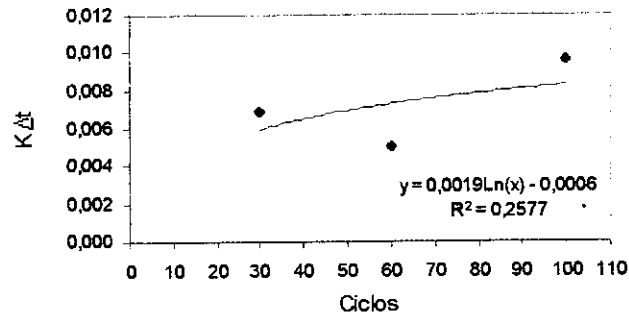


FIGURA 92 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra D-PAV.

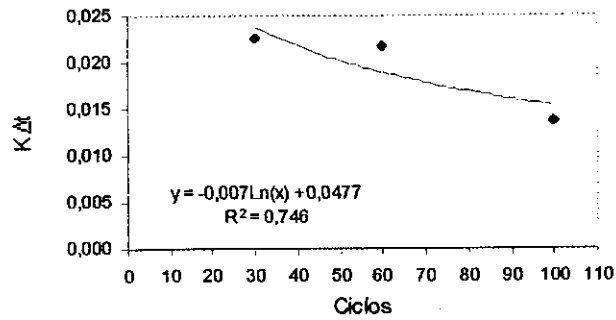


FIGURA 93 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SM.

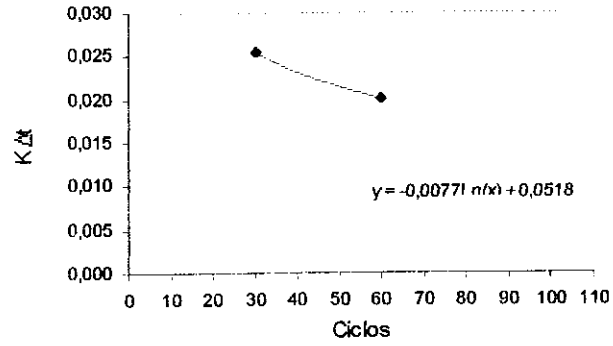


FIGURA 94 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SAN.

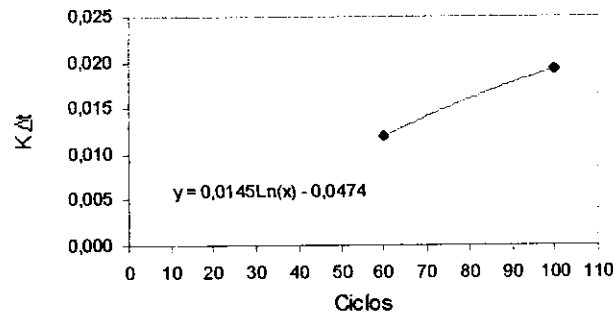


FIGURA 95 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SIQ.

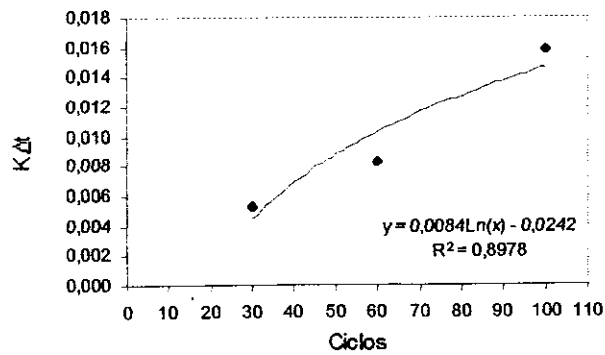


FIGURA 96 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SAD.

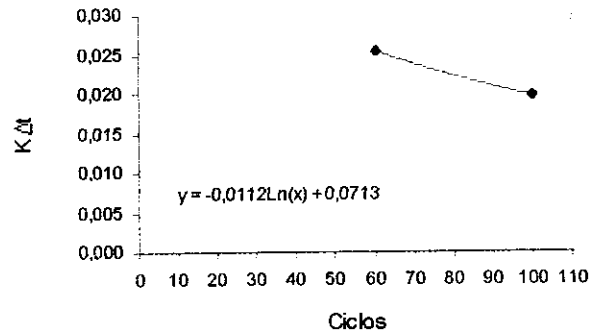


FIGURA 97 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SCE.

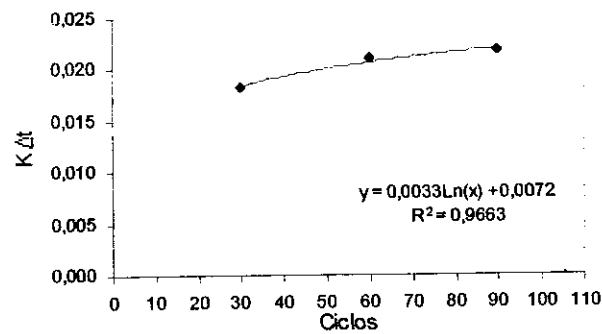


FIGURA 98 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SCC.

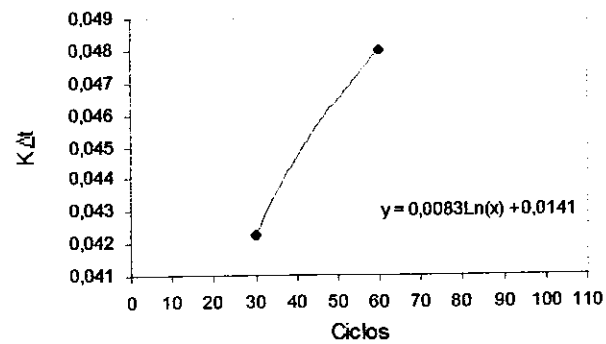


FIGURA 99 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra V-VES.

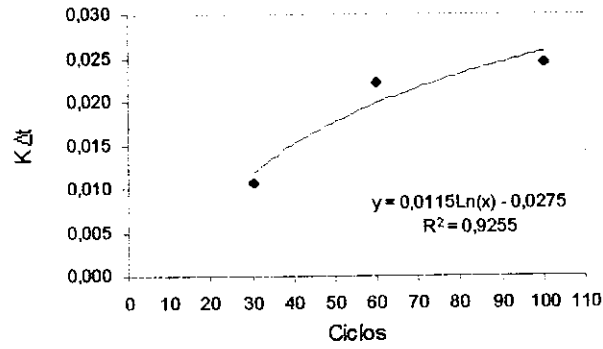


FIGURA 100 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-IND.

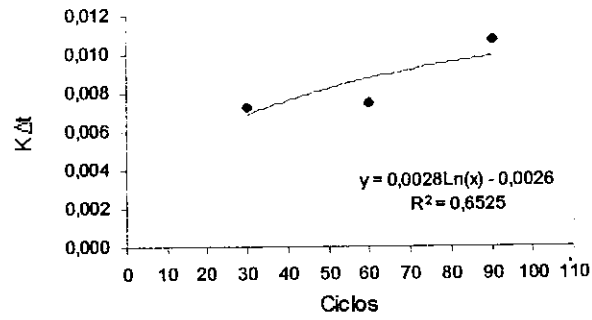


FIGURA 101 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-ANT.

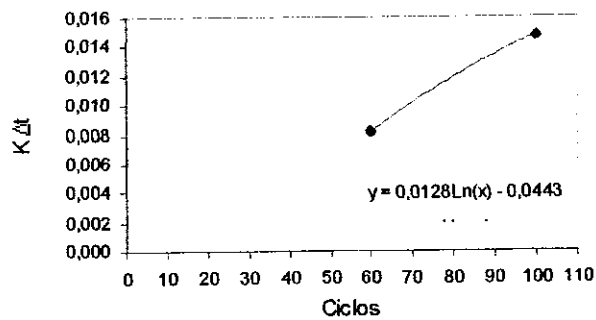


FIGURA 102 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-WS.

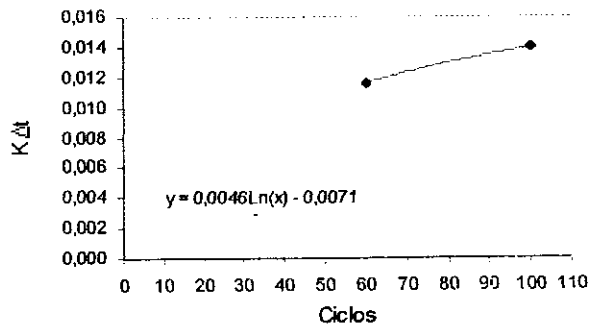


FIGURA 103 – Gráfico do índice $K\Delta t$ x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-BP.

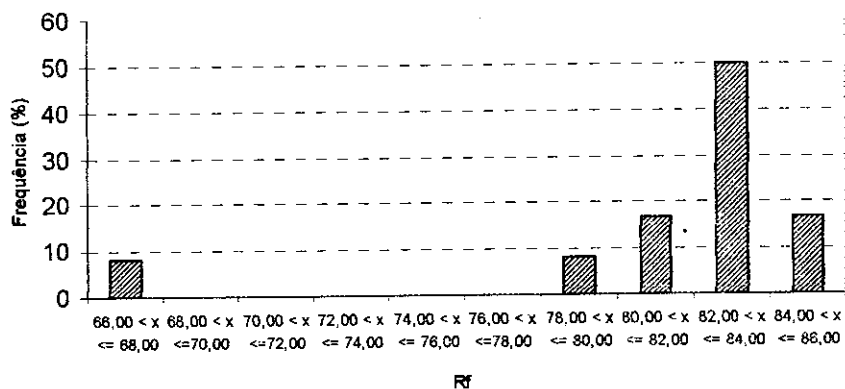


FIGURA 104 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade R_f do ensaio de umedecimento e secagem.

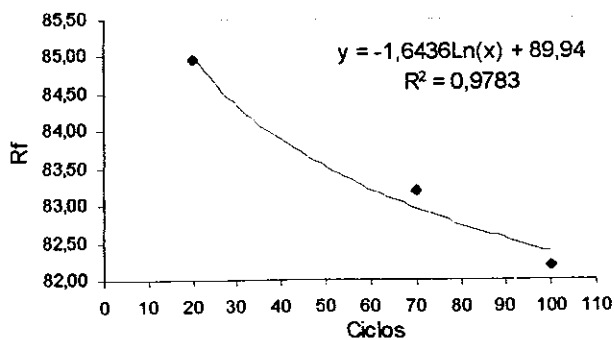


FIGURA 105 – Gráfico do R_f x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra D-PAV.

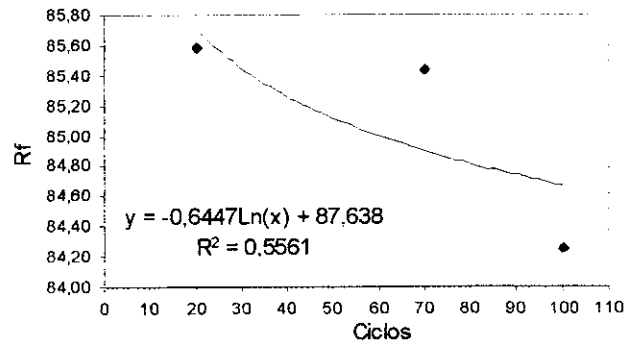


FIGURA 106 – Gráfico do índice R_f x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SM.

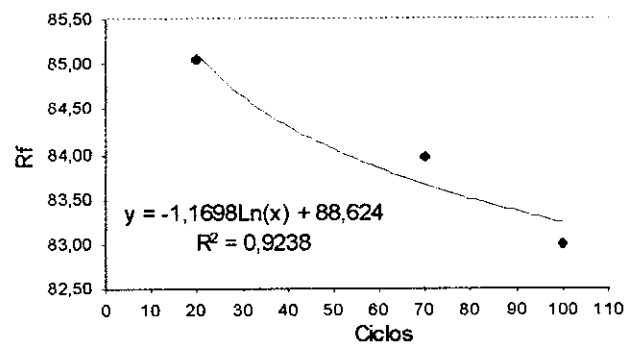


FIGURA 107 – Gráfico do índice R_f x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-ANT.

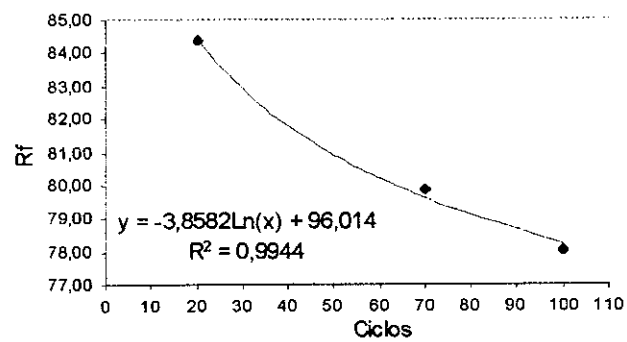


FIGURA 108 – Gráfico do índice R_f x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-SAN.

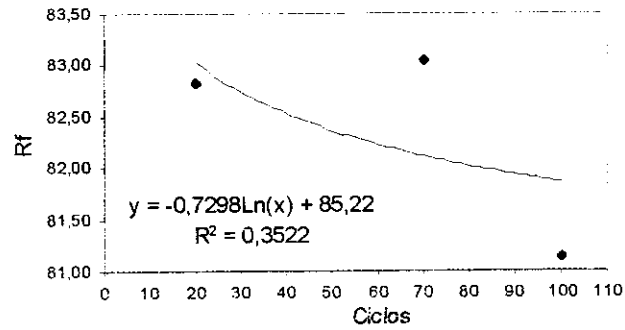


FIGURA 109 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-WS.

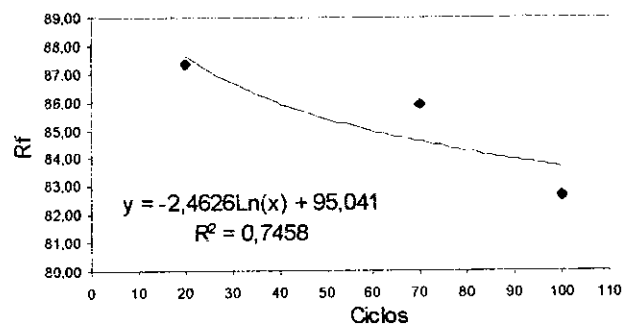


FIGURA 110 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SIQ.

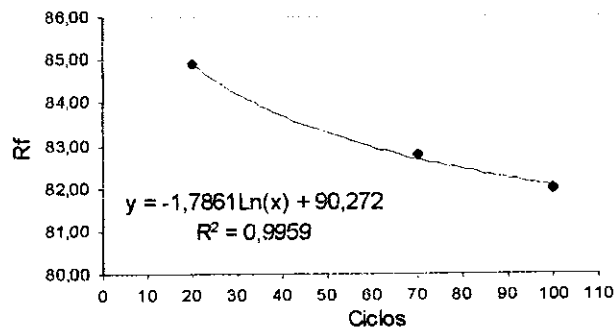


FIGURA 111 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra E-SAD.

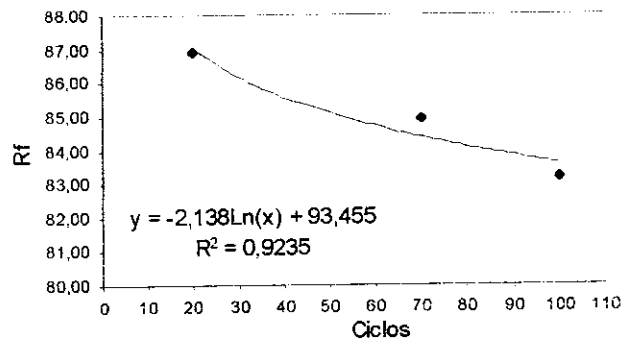


FIGURA 112 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. ostra C-IND.

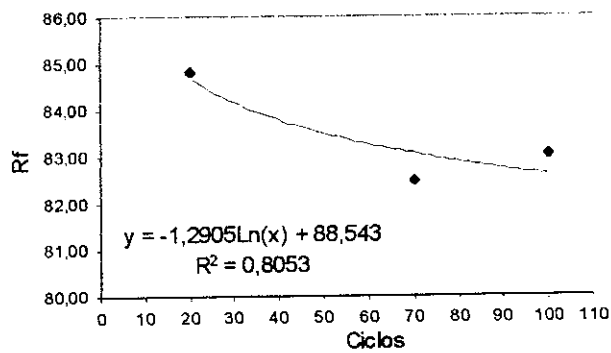


FIGURA 113 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. ostra E-SCE.

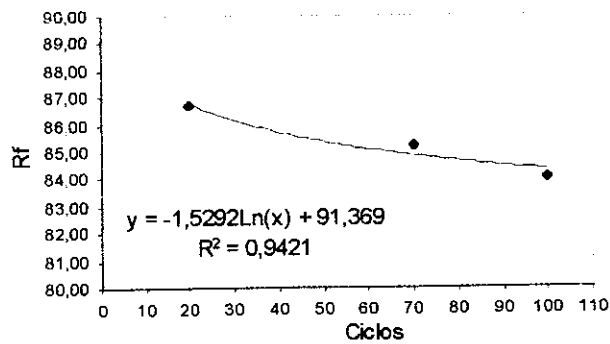


FIGURA 114 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. ostra C-SCC.

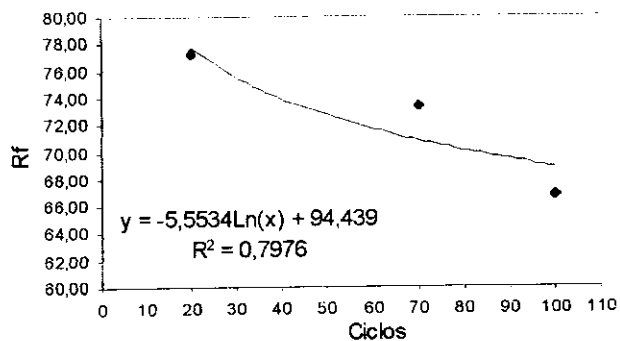


FIGURA 115 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra V-VES.

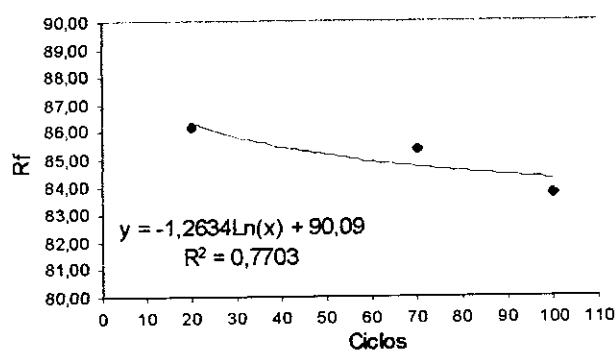


FIGURA 116 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de umedecimento e secagem. Amostra C-BP.

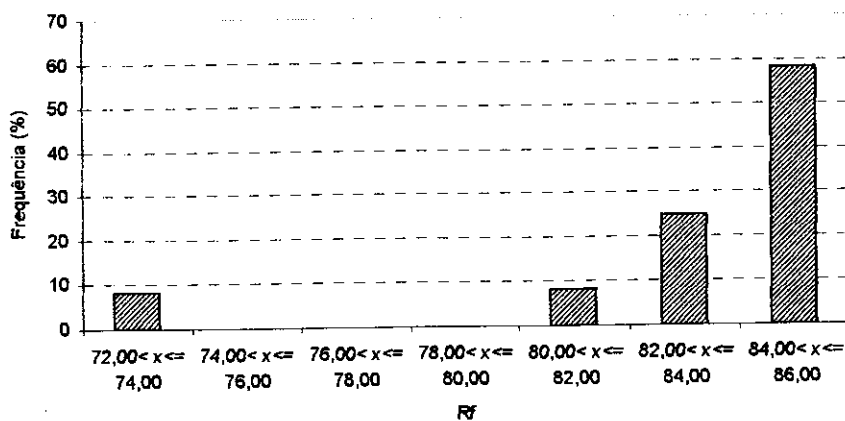
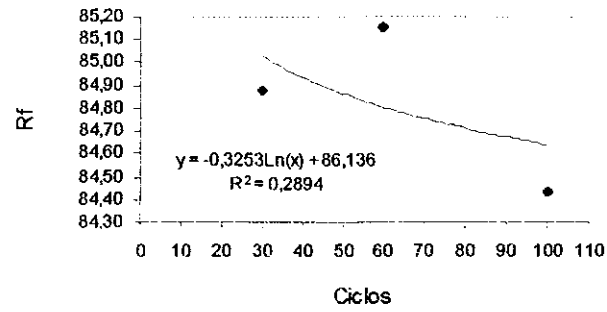
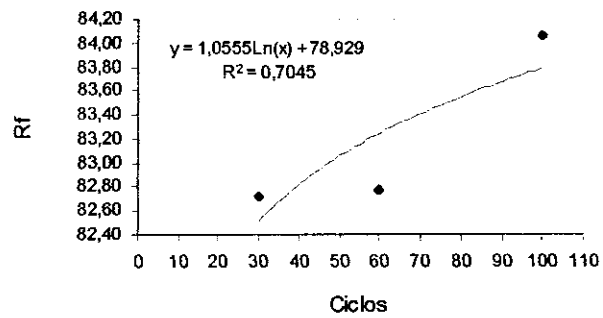


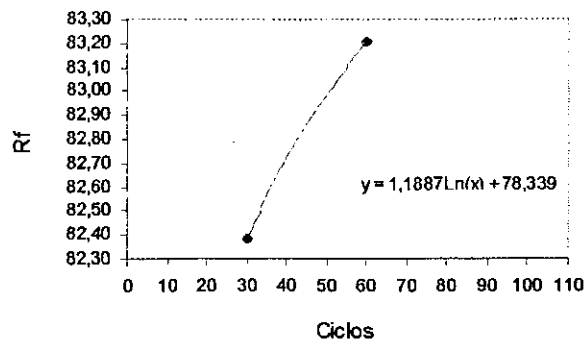
FIGURA 117 - Histograma de distribuição de frequência dos resultados de valores do índice de alterabilidade Rf do ensaio de lixiviação contínua.



3URA 118 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra D-V.



3URA 119 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-V.



3URA 120 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-V.

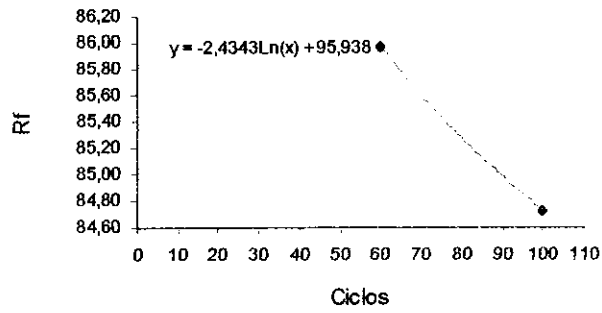


FIGURA 121 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SIQ.

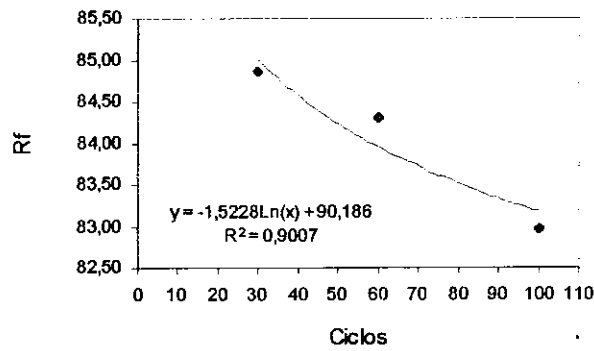


FIGURA 122 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SAD.

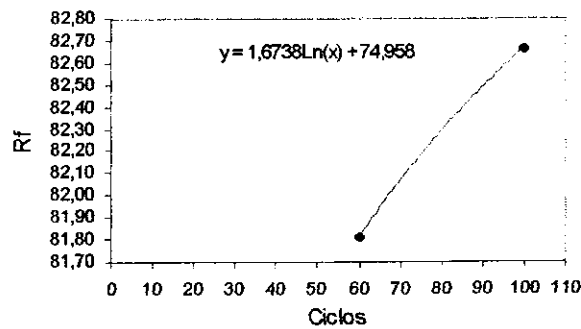


FIGURA 123 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-SCE.

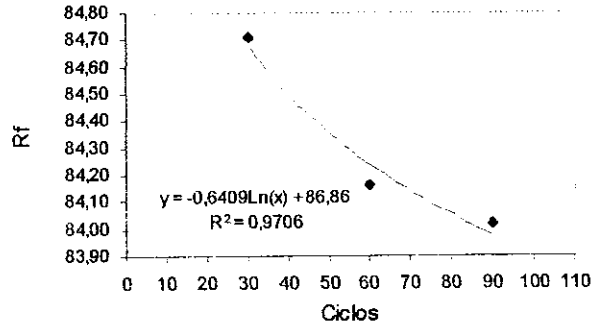


FIGURA 124 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-SCC.

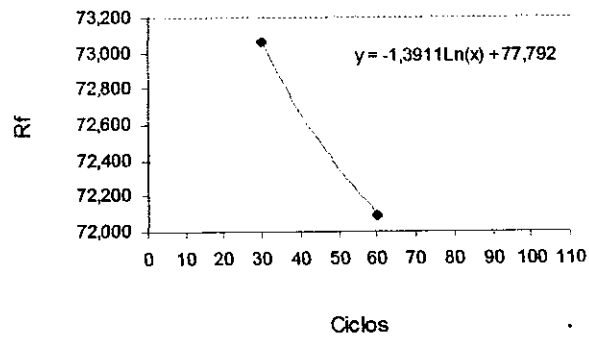


FIGURA 125 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra V-VES.

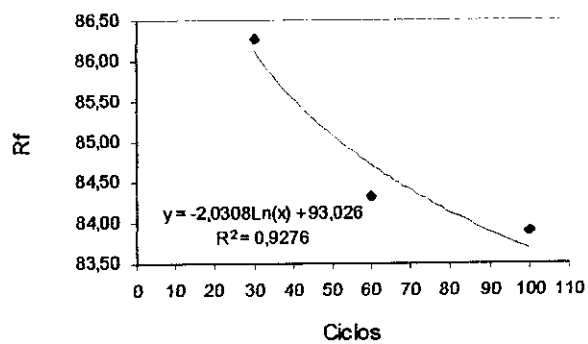


FIGURA 126 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-IND.

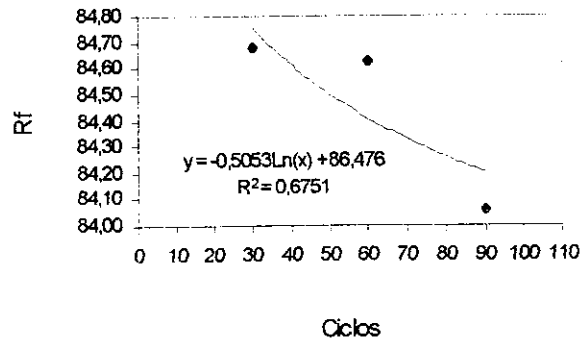


FIGURA 127 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra E-ANT.

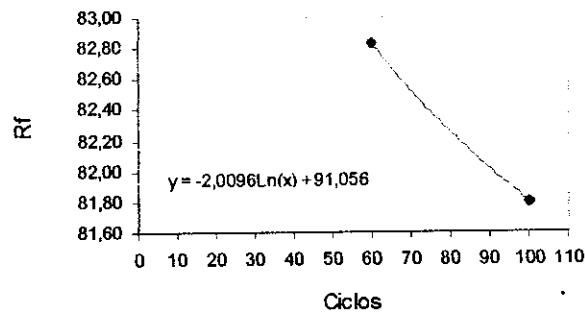


FIGURA 128 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-WS.

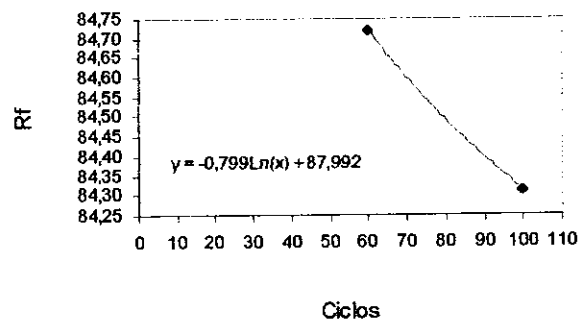


FIGURA 129 – Gráfico do índice Rf x ciclos do ensaio de lixiviação contínua. Amostra C-BP.

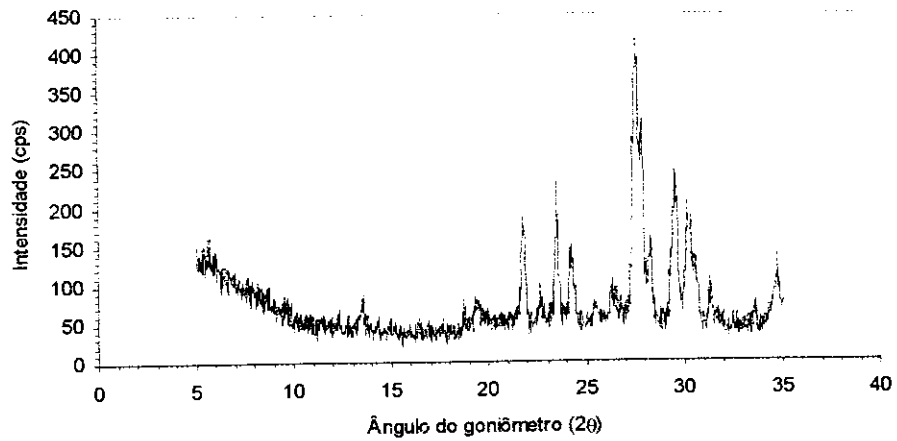


FIGURA 130 – Difratograma da amostra *E-SCE* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

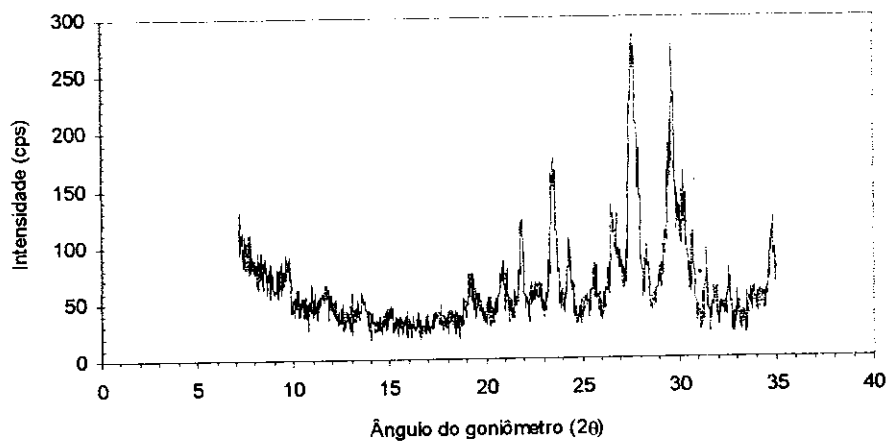


FIGURA 131 – Difratograma da amostra *V-VES* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

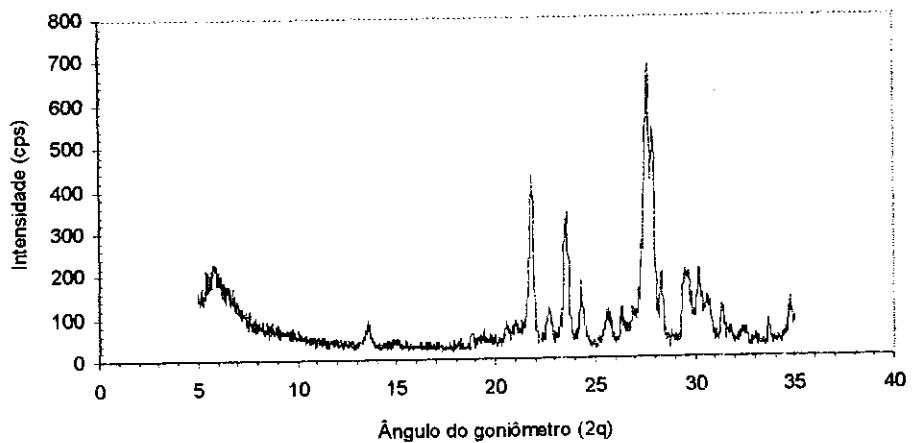


FIGURA 132 – Difratograma da amostra *C-BP* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

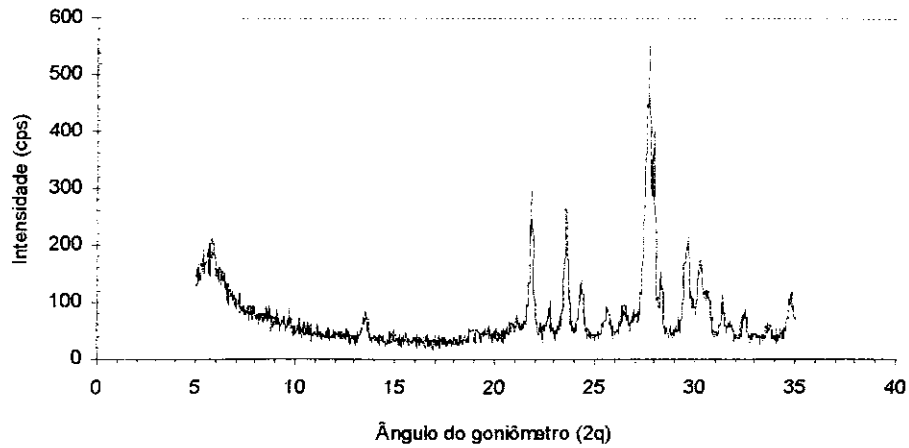


FIGURA 133 – Difratograma da amostra *C-IND* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

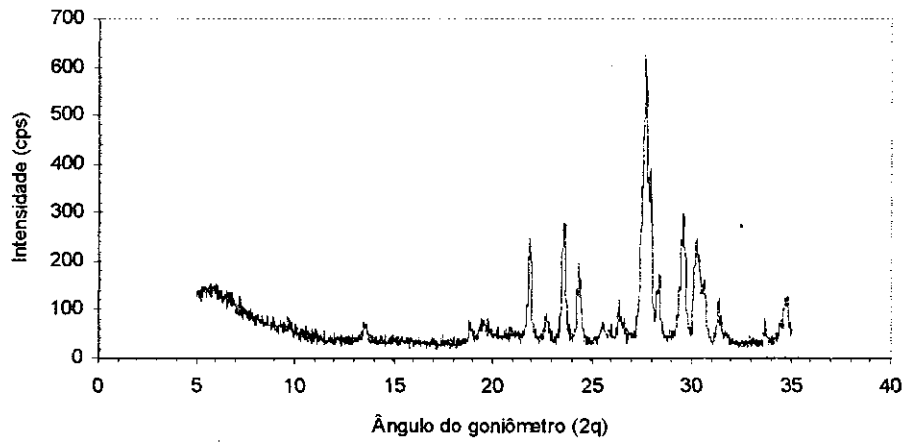


FIGURA 134 – Difratograma da amostra *E-SIQ* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

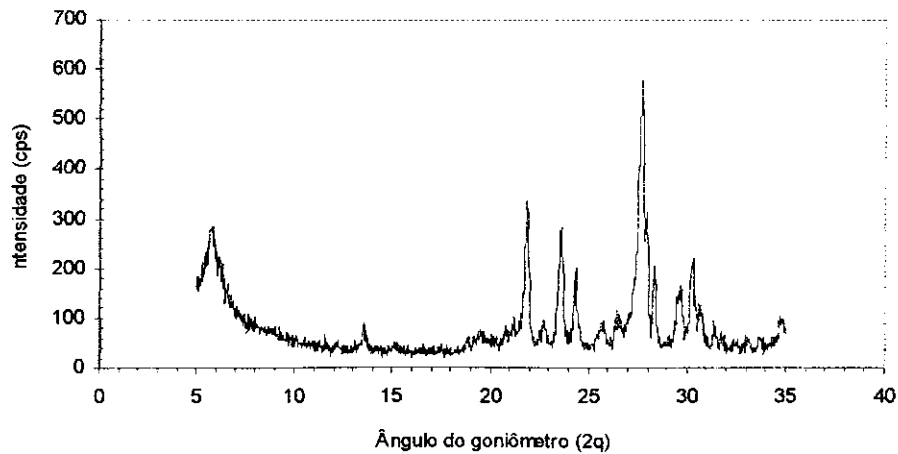


FIGURA 135 – Difratograma da amostra *C-SAN* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

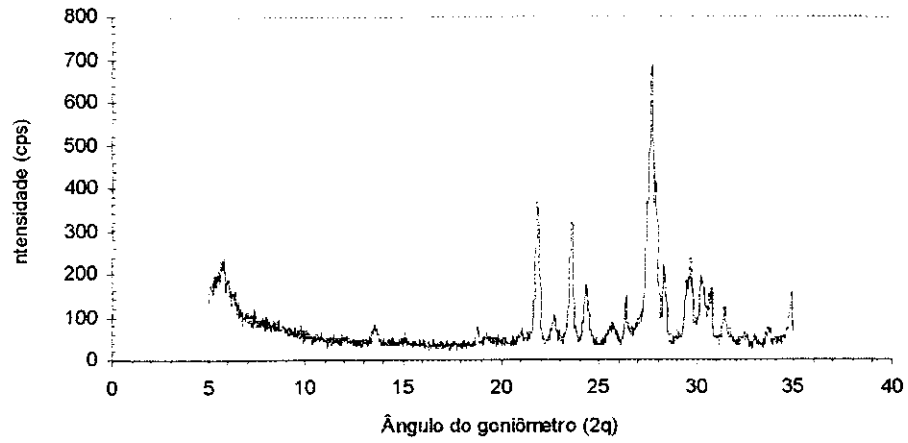


FIGURA 136 – Difratograma da amostra *C-SM* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

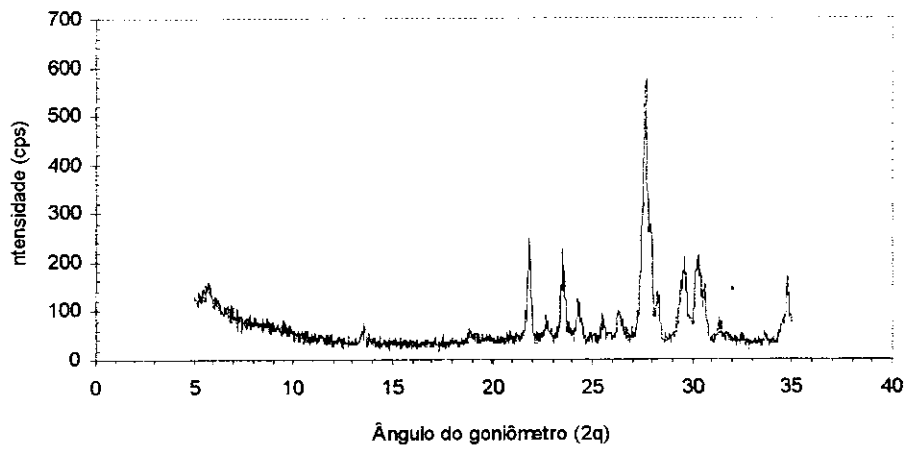


FIGURA 137 – Difratograma da amostra *E-SAD* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

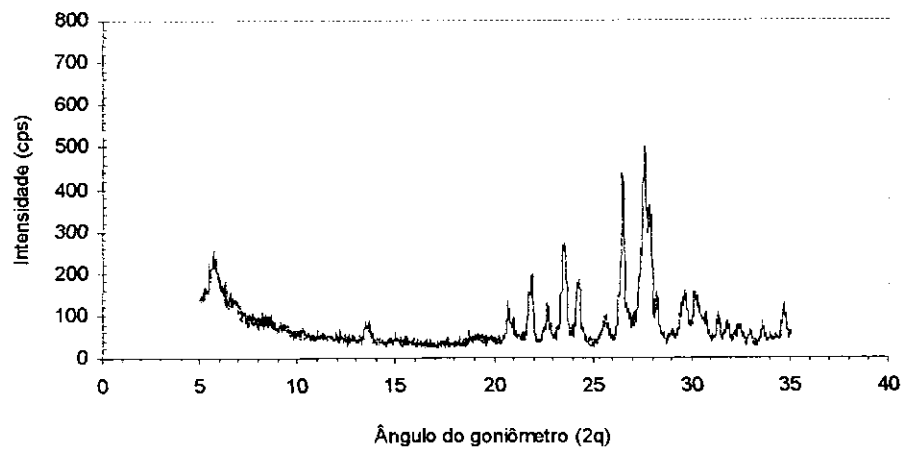


FIGURA 138 – Difratograma da amostra *D-PAV* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

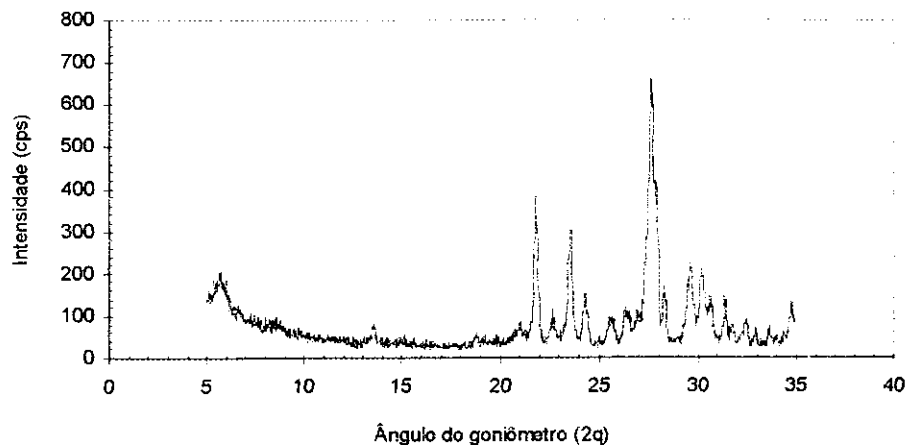


FIGURA 139 – Difratograma da amostra *C-SCC* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

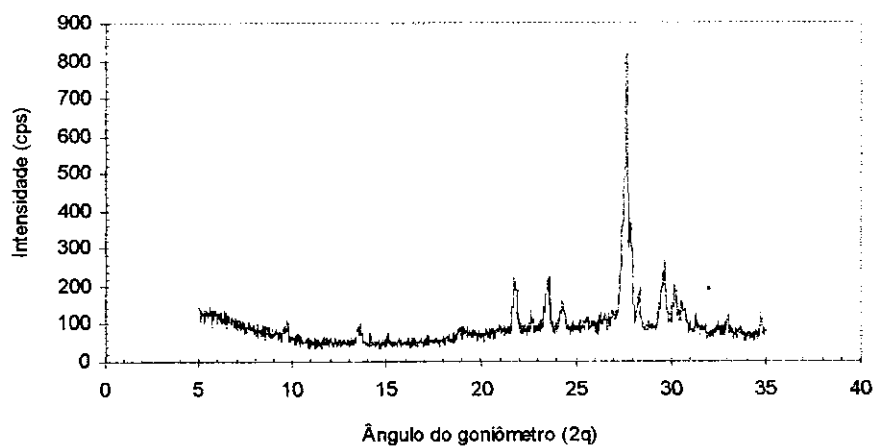


FIGURA 140 – Difratograma da amostra *C-WS* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

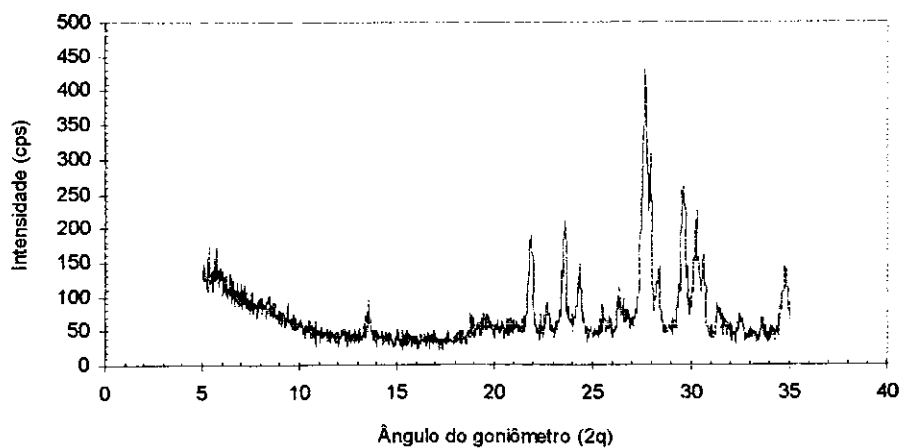


FIGURA 141 – Difratograma da amostra *E-ANT* no ciclo 100 do ensaio de alteração por umedecimento e secagem.

ANEXO III

QUALIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

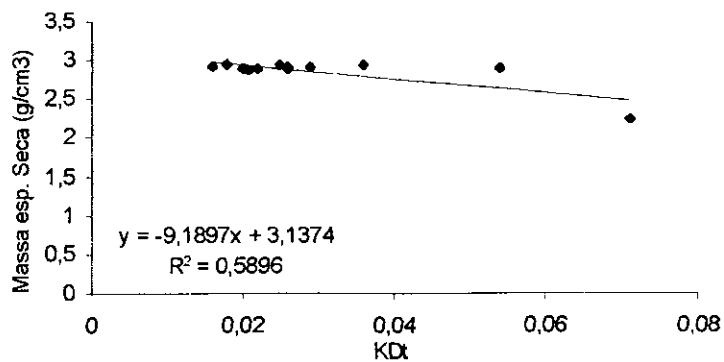


FIGURA 1 – Regressão linear decrescente para correlação entre a massa específica seca aparente com o índice de alterabilidade KΔt.

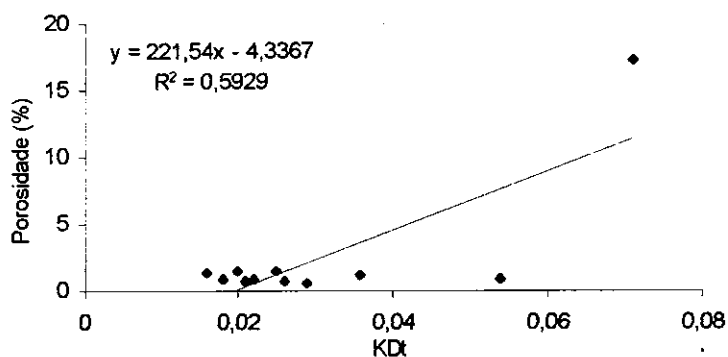


FIGURA 2 – Regressão linear crescente para correlação entre a porosidade aparente com o índice de alterabilidade KΔt.

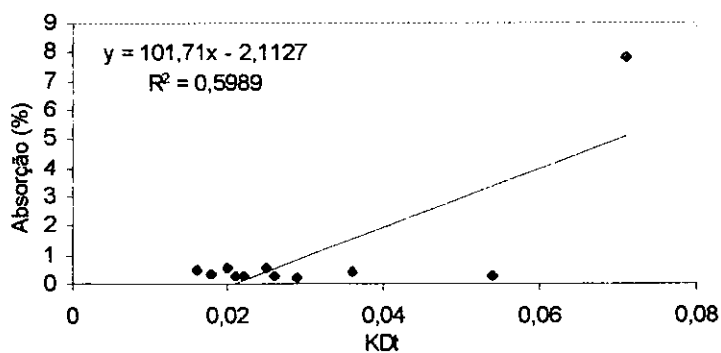


FIGURA 3 – Regressão linear crescente para correlação entre a absorção d'água com o índice de alterabilidade KΔt.

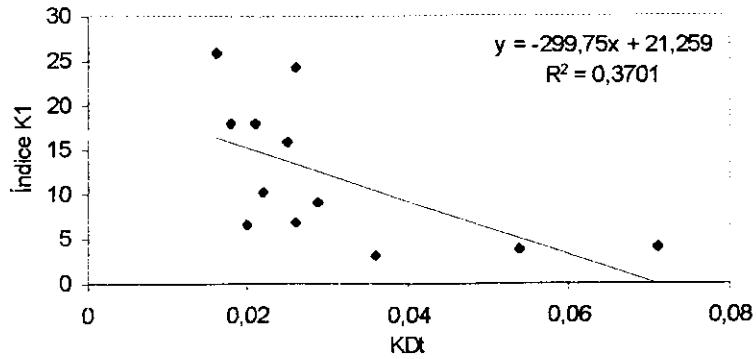


FIGURA 4 – Regressão linear decrescente para correlação entre o índice K1 com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

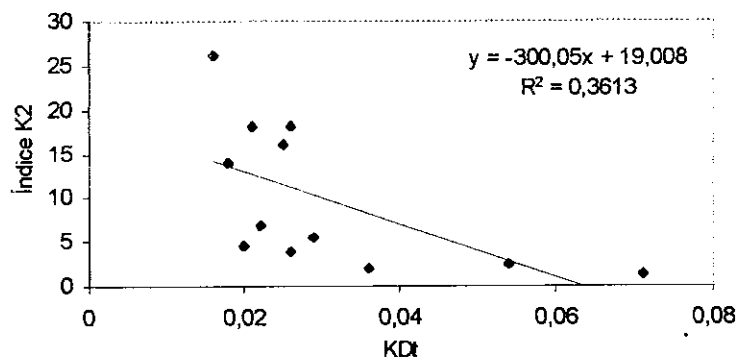


FIGURA 5 – Regressão linear decrescente para correlação entre o índice K2 com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

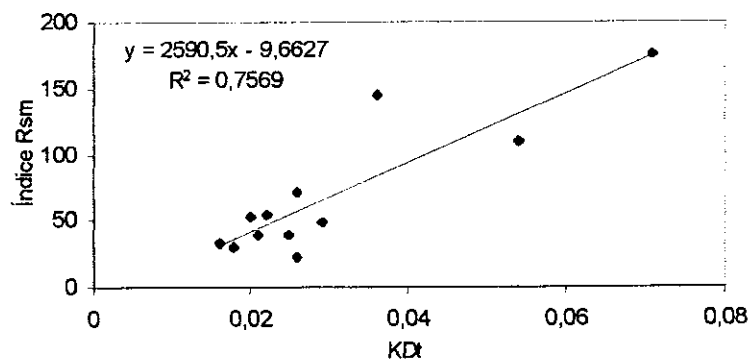


FIGURA 6 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice Rsm com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

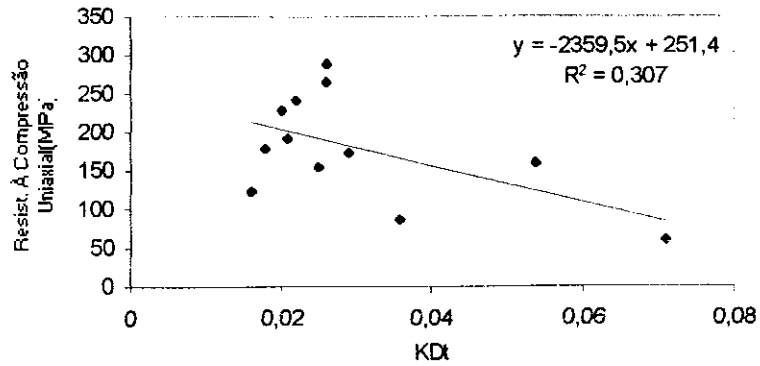


FIGURA 7 – Regressão linear decrescente para correlação entre a Resist. à compressão uniaxial com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

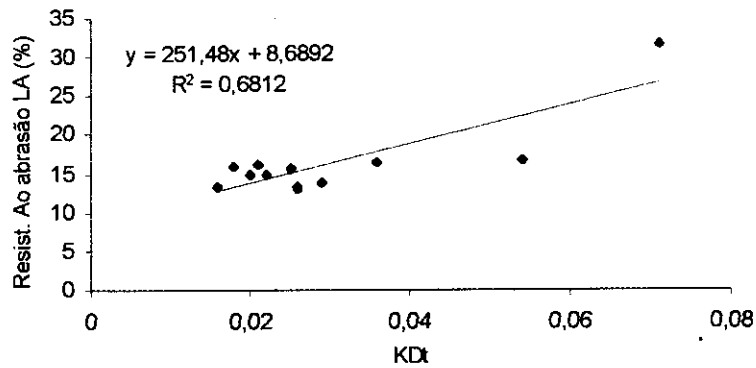


FIGURA 8 – Regressão linear crescente para correlação entre a Resist. ao abrasão Los Angeles com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

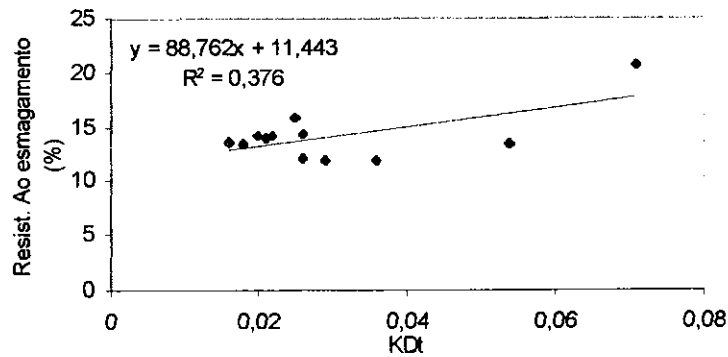


FIGURA 9 – Regressão linear crescente para correlação entre a Resist. ao esmagamento com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

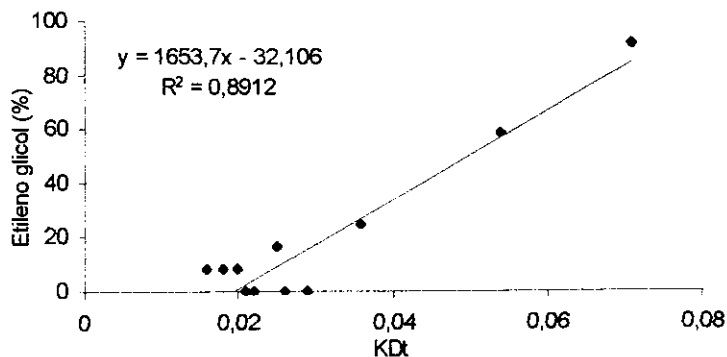


FIGURA 10 – Regressão linear crescente para correlação entre a sanidade em etileno glicol com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

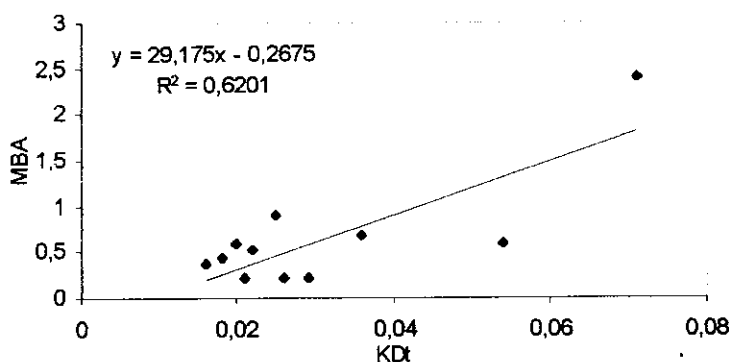


FIGURA 11 – Regressão linear crescente para correlação entre a adsorção de azul de metileno com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

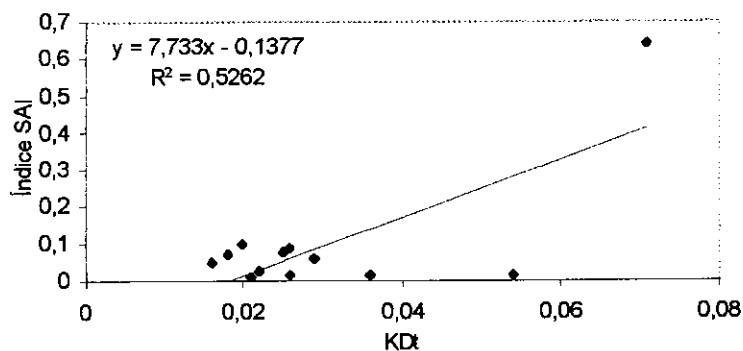


FIGURA 12 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice SAI com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

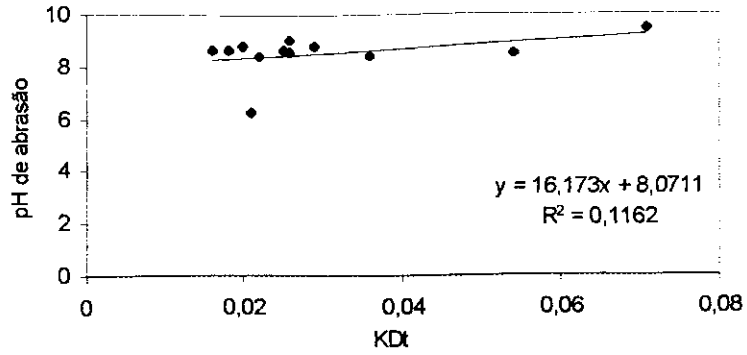


FIGURA 13 – Regressão linear crescente para correlação entre o pH de abrasão com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

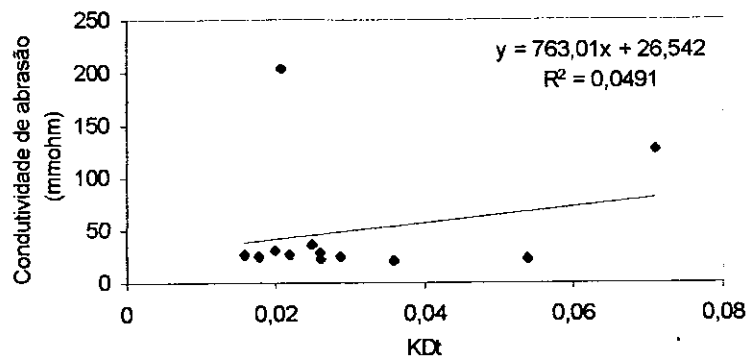


FIGURA 14 – Regressão linear crescente para correlação entre a condutividade de abrasão com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.

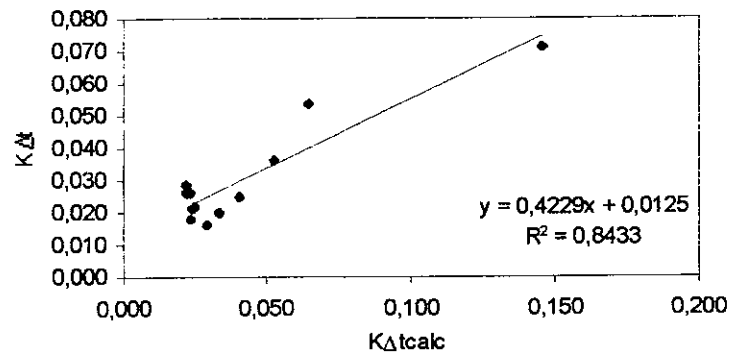


FIGURA 15 – Regressão linear crescente para correlação entre o índice $K\Delta t_{calc}$ com o índice de alterabilidade $K\Delta t$.