UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE ALTERAÇÃO
ACELERADA EM ROCHAS GRANÍTIICAS PARA
REVESTIMENTO**

Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2003

*À Fernanda, minha fonte de inspiração,
Nando, Dalva e José Roberto*

AGRADECIMENTOS

A realização e elaboração de uma tese é um trabalho único, e um tanto solitário, para cujo termo são necessários três suportes básicos: o apoio da família e amigos; intercâmbios e colaborações de instituições e profissionais; e a paixão pelo tema.

Considero-me privilegiada por ter contado com todos os três; e foram tantos os que me apoiaram, forneceram informações e discutiram o assunto que, felizmente, poucas linhas são insuficientes para nomear a todos. Mas, nem por isso, sou menos grata àqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a execução deste estudo e meu crescimento profissional.

Primeiramente, destaco o amigo e orientador, Jorge Kazuo Yamamoto, que sempre apoiou minhas idéias, guiou para que a meta fosse atingida e suportou, sempre positivamente, os momentos finais de cansaço e dúvidas.

Este trabalho, como poderão ver, contém centenas de determinações laboratoriais, que só foram possíveis com a colaboração, perseverança e aprendizado mútuo dos colegas do Laboratório de Petrologia e Tecnologia de Rochas; Fábio Conrado de Queiróz, Eli A. Toledo, Jilson Cardoso, Magno Bueno, Nilson de Paula e Valentim José da Silva Filho, com especial menção ao Eduardo Quitete, pelo acompanhamento e apoio durante todo o trabalho, pela disposição para discussões e editoração das fotos. À Priscila R. M. Leal, minha gratidão pela colaboração nas descrições petrográficas e no trabalhoso ajuste das informações ao foco desta pesquisa.

Aos amigos e colegas Ely B. Frazão, Ivan Mello e Lúcia Dozzi agradeço as conversas, a leitura paciente, as discussões e sugestões que muito contribuíram para o texto final. As referências bibliográficas são produto do trabalho minucioso da amiga e colega Maria Solange O. P. Fierro. Mesmo com as urgências de final de prazo, as sugestões ortográficas e gramaticais de Marlene Santana contribuíram para melhorar clareza do texto.

Ao Dr. Fábio Taioli, agradeço pelas sugestões, por ocasião do exame de qualificação, que muito contribuíram para reorientações da pesquisa.

Os trabalhos de campo foram possíveis graças à colaboração de entidades e pessoas que se dispuseram a apoiar e realizar os contatos necessários para visitas às minas, providenciar facilidades de acesso e outros: registro meu agradecimento a Attílio Travaglia, do Sindirochas (ES); a Francisco W. Hollanda Vidal, do Cetem/MCT (RJ); Maria Angélica Lima, do Nutec (CE); e a Gilberto Rangel, da Mineração Corcovado.

A colaboração das empresas produtoras dos materiais ensaiados foi fundamental para a realização deste estudo, às quais agradeço pela recepção nas minas e pelo fornecimento e envio das (grandes) amostras; Granasa – Granitos Nacionais Ltda; Granistone S.A.; Granitos Brasileiros S.A.; Granitos Pires – Mineração e Comércio Ltda.; Granos – Granitos S.A.; Imarf Granitos S.A.; Marbrasa – Mármore e Granitos do Brasil S.A.; Mineração Corcovado Ltda.; Nemer – Mármore e Granitos S.A.; Rocha Branca – Mineração Comércio e Exportação Ltda; e Somibrás – Sociedade de Mineração Brasileira Ltda.

Ao Laboratório de Corrosão e Tratamento de Superfície, do IPT, pela realização dos ensaios em câmaras climáticas.

Para execução deste trabalho, também foi de grande importância a colaboração de vários colegas, especialmente no atendimento de demandas administrativas, abundantes no exercício profissional, aos quais exprimo minha gratidão, especialmente para Pedro A. Abel Fabiani, Mírian C. B. Oliveira e Vilmondes Ribeiro. À Renata M. de Cavalcante, pelos trabalhos de digitalizações de imagens. À Maria Lúcia F. Gonçalves, que digitou os dados e boa parte do texto, devo minha gratidão ao seu sempre presente auxílio nas atividades profissionais cotidianas e, inclusive, por suportar as crises nos momentos mais tumultuados.

Meu agradecimento para aos colegas e amigos do IGc; Thelma e Marcos, pela cuidadosa elaboração das figuras; à Sonia e Ana Paula, que sempre atenderam prontamente as questões, sempre urgentes, dessa pós-graduanda; e a Marcelo Monteiro da Rocha, no auxílio à trabalhosa impressão final.

Agradeço ao IPT, por meio de Omar Y. Bittar, que colocou à disposição a infraestrutura laboratorial e sempre apoiou todas as etapas deste trabalho, até sua conclusão.

Ao IGc, agradeço pela acolhida, aceite do desafio de apoiar o desenvolvimento desta pesquisa e o apoio fornecido em todas as etapas da pós-graduação.

Finalmente, agradeço à Fapesp, cujo suporte financeiro (Processo 99-06250-0) foi fundamental para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

Agradecimentos	p. ii
Sumário	iv
Listas de Figuras	vii
Listas de Tabelas	xiii
Resumo	xvi
Abstract	xvii

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância Econômica do Setor	4
1.2 Objetivos	8
1.3 Justificativas	9

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1 Seleção dos Materiais e Áreas de Estudo	10
2.2 Levantamento Bibliográfico	11
2.3 Visitas às Minas Seleccionadas	12
2.3.1 Amostragem	13
2.4 Visita a Centros de Beneficiamento	13
2.5 Ensaio e Análises Laboratoriais	15

CAPÍTULO 3

DETERIORAÇÃO DE ROCHAS	19
3.1 Alteração Intempérica de Rochas	23
3.1.1 Modificações intempéricas em minerais e rochas	26
3.1.2 Influência do potencial redox	29
3.1.3 Reações de alteração	29
3.1.3.1 Dissolução	30
3.1.3.2 Oxidação	31
3.1.3.3 Oxidação - hidratação	31
3.1.3.4 Hidrólise	32
3.2 Poluentes Atmosféricos	32
3.3 Causas da Degradação Rochosa	37
3.3.1 Temperatura	39
3.3.2 Ação dos poluentes	40
3.3.3 Ação da cristalização de sais	41
3.4 Alterabilidade e Durabilidade de Rochas	45
3.5 Rochas Graníticas	46
3.5.1 Granitos e sua alteração em ambientes naturais	47

3.5.2 Degradação de granitos em edificações	48
---	----

CAPÍTULO 4

ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ROCHAS SELECIONADAS	51
4.1 Rochas do Estado de São Paulo	51
4.1.1 Capão Bonito	52
4.1.2 Região Metropolitana de São Paulo	54
4.2 Rochas do Estado do Espírito Santo	54
4.3 Rochas do Estado da Bahia.....	58
4.4 Rochas do Estado do Ceará	60

CAPÍTULO 5

TRABALHOS DE LABORATÓRIO	65
5.1 Análises Petrográficas e Mineralógicas.....	65
5.1.1 Ensaios de coloração seletiva de feldspatos.....	67
5.1.2 Análises mineralógicas por difratometria de raios X.....	67
5.2 Ensaios Tecnológicos	68
5.2.1 Densidade, porosidade e absorção	68
5.2.1.1 Breve consideração sobre métodos e procedimentos adotados.....	71
5.2.2 Capilaridade	72
5.2.3 Compressão uniaxial	74
5.2.4 Flexão.....	75
5.2.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais	77
5.3 Ensaios de Alteração Acelerada.....	78
5.3.1 Ensaios em câmaras climáticas.....	80
5.3.1.1 Exposição ao dióxido de enxofre.....	80
5.3.1.2 Exposição à névoa salina.....	82
5.3.2 Resistência ao choque térmico.....	82
5.3.3 Ensaios de alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalinas.....	84

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
6.1 Propriedades Petrográficas e Químicas	88
6.1.1 Características petrográficas	88
6.1.1.1 Vermelho Capão Bonito	94
6.1.1.2 Azul Paulista Frente Nova e Prata Interlagos	97
6.1.1.3 Verde Labrador	99
6.1.1.4 Branco Itaúnas e Branco Caravelas	101
6.1.1.5 Rosa Iracema, Branco Cristal e Branco Savana.....	106
6.1.1.6 Branco Ceará.....	108
6.1.1.7 Casablanca e Falésias	110
6.1.1.8 Giallo Veneciano, Arabesco e Santa Cecília	112
6.1.2 Características químicas.....	118
6.2 Propriedades Físicas (Densidade Aparente e Absorção)	124
6.2.1 Grupos discriminados segundo densidade e absorção.....	130

6.2.1.1	<i>Ladrilho</i>	131
6.2.1.2	<i>Bloco</i>	135
6.2.2	A influência do método de ensaio e forma dos corpos-de-prova	136
6.2.2.1	Variações de propriedades físicas de bloco para ladrilho	141
6.2.3	Capilaridade	146
6.3	Propriedades Mecânicas	150
6.3.1	Compressão	151
6.3.2	Flexão	156
6.3.2.1	Resistência ao choque térmico	160
6.3.3	Relações entre propriedades mecânicas e físicas	170
6.4	Ensaio de Alteração Acelerada	172
6.4.1	Câmaras climáticas	172
6.4.1.1	Exposição ao dióxido de enxofre	177
6.4.1.2	Exposição à névoa salina	181
6.4.2	Imersão parcial em soluções ácida e alcalina	183
6.4.2.1	Imersão parcial em ácido sulfúrico	188
6.4.2.2	Imersão parcial em hidróxido de sódio	194
6.4.2.3	Ensaio de controle	197
 CAPÍTULO 7		
CONSIDERAÇÕES FINAIS		201
 CAPÍTULO 8		
CONCLUSÕES		209
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		212
ANEXO A Fichas de Campo		219
ANEXO B Resultados de determinações de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente (ABNT NBR 12766/92)		228
ANEXO C Resultados de determinações de densidade aparente e coeficiente de absorção de água a pressão atmosférica (prEN WI 036:1998)		236
ANEXO D Resultados de determinações de densidade aparente, porosidade aberta e volume de poros abertos (BS EN 1936:1999)		242
ANEXO E Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial (NBR ABNT 12.767/92)		250
ANEXO F Resultados dos ensaios de resistência à flexão (ASTM C 880/98)		257

LISTAS DE FIGURAS

	p.
Figura 1.1 – Distribuição dos usos de rochas ornamentais.	5
Figura 2.1 – Blocos cúbicos com cerca de 30 cm x 30 cm x 30 cm, para ensaios de laboratório.	13
Figura 2.2 – Blocos montados para serragem em tear de grandes dimensões (à esquerda), e processo de serragem de chapas a partir de bloco de granito (à direita).	14
Figura 2.3 – Máquina de polir, automática, de origem italiana. Conforme progride o processo de polimento (na foto, do fundo para o primeiro plano), são utilizados abrasivos cada vez mais finos.	15
Figura 2.4 – Fluxograma dos ensaios de caracterização petrográfica, física, mecânica e de alteração acelerada.	18
Figura 3.1 – Acrópole, Atenas, Grécia. As estátuas foram de tal forma danificadas, que as originais foram guardadas no interior dos edifícios, em <i>containers</i> de vidro.	19
Figura 3.2 – Escultura de arenito, no castelo Herten (Alemanha), construído em 1702. Foto à esquerda, de 1908, mostrando leve a moderada alteração. À direita, foto de 1969, mostrando destruição quase completa.	20
Figura 3.3 – Estátua de calcário travertino na fachada da Basílica de São Pedro (Vaticano) deteriorada pela ação de poluentes trazidos para a superfície da rocha pelo ar (na forma de gases ou aerossóis) ou pela água (chuva ácida).	20
Figura 3.4 – Inchamento e destacamento de minerais da superfície polida de granito “Santa Cecília”, assentado em piso, com argamassa.	21
Figura 3.5 – Influência do clima nos processos intempéricos.	25
Figura 3.6 – Série de estabilidade mineral no intemperismo (Série de Goldich).	26
Figura 3.7 – Representação esquemática dos processos intempéricos.	27
Figura 3.8 – Limites de estabilidade de determinados minerais primários.	30
Figura 3.9 – Padrão típico diário dos níveis de óxido nítrico, dióxido de nitrogênio e ozônio, em Los Angeles, EUA.	36
Figura 3.10 – Cristalização de sais em função da concentração das soluções e da temperatura.	43
Figura 4.1 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado de São Paulo.	52
Figura 4.2 – Esquadrejamento manual de bloco de granito em Capão Bonito, SP.	53
Figura 4.3 – Lavra semimecanizada – Capão Bonito, SP.	53
Figura 4.4 – Aspecto da lavra de matacões do Azul Paulista Frente Nova, em São Paulo, SP.	55
Figura 4.5 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado do Espírito Santo.	56
Figura 4.6 – Lavra do Giallo Veneciano, em Nova Venécia, ES.	57
Figura 4.7 – Lavra do Arabesco em Nova Venécia, ES.	57
Figura 4.8 – Mina do Santa Cecília, em Ecoporanga, ES.	57
Figura 4.9 – Aspecto da lavra do Verde Labrador, Baixo Guandu, ES. Em parte, ainda explorado a partir de grandes matacões aflorantes em alto topográfico.	58
Figura 4.10 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas	

para este estudo, no Estado da Bahia.	59
Figura 4.11 – Mina do Branco Itaúnas, em Medeiros Neto, BA.	60
Figura 4.12 – Mina do Branco Caravelas, em Medeiros Neto, BA.	60
Figura 4.13 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado do Ceará.	61
Figura 4.14 – Mina do granito Rosa Iracema, em Forquilha, CE.	62
Figura 4.15 – Mina do granito Branco Cristal, em Forquilha, CE.	62
Figura 4.16 – Mina do Branco Ceará, em Santa Quitéria, CE.	63
Figura 4.17 – Mina do Casablanca, em Independência, CE.	64
Figura 4.18 – Mina do Falésias, em Independência, CE.	64
Figura 5.1 – Determinação do peso submerso em dispositivo hidrostático.	69
Figura 5.2 – Corpo-de-prova rompido após aplicação de esforços compressivos.	74
Figura 5.3 – Detalhe de corpos-de-prova com esforços aplicados perpendicular (à esquerda) e paralelamente (à direita) à estruturação da rocha.	75
Figura 5.4 – Detalhe de corpo-de-prova, obtido de rocha polida, rompido após a aplicação de esforços.	76
Figura 5.5 – Ilustração dos aparatos e procedimento de medida da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.	77
Figura 5.6 – Ilustração das medidas de velocidade de propagação de ondas em corpos-de-prova cúbicos.	78
Figura 5.7 – Ilustração das medidas de velocidade de propagação de ondas em corpos-de-prova destinados aos ensaios de resistência à flexão.	78
Figura 5.8 – Câmara climática para exposição ao SO ₂ .	81
Figura 5.9 – Corpos-de-prova com a face não-polida recoberta com tinta óleo, para exposição ao SO ₂ .	81
Figura 5.10 – Câmara climática de exposição à névoa salina.	82
Figura 5.11 – Ilustração esquemática das zonas de imersão e capilar.	85
Figura 6.1 – Resultados da coloração seletiva para feldspatos.	91
Figura 6.2 – Correlações entre contagens em amostra de mão e análise modais para quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino.	93
Figura 6.3 – Distribuição do tamanho de quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino nas diferentes rochas estudadas.	94
Figura 6.4 – Amostra VCB-3. Aspecto geral do granito Vermelho Capão Bonito. Notar cristais tabulares de plagioclásio (pl) com os núcleos alterados e com hidróxidos de ferro associados.	96
Figura 6.5 – Amostra VCB-3. Aspecto de cristal de plagioclásio alterado em argilominerais, hidróxidos de ferro e sericita/muscovita.	96
Figura 6.6 – Amostra AZF. Aspecto geral do granito Azul Paulista Frente Nova. Notar cristais de plagioclásio com núcleos alterados em argilominerais e sericita. Fissuras mais largas cortam feldspatos e quartzo.	97
Figura 6.7 – Amostra PIT. Aspecto geral do granito Prata Interlagos. Detalhe de núcleos de feldspatos alterados, especialmente segundo as linhas de crescimento.	97
Figura 6.8 – Amostra PIT. Aspecto da alteração de plagioclásio em muscovita.	99
Figura 6.9 – Amostra LBD. Aspecto geral do charnockito Verde Labrador. Notar as dimensões milimétricas de feldspatos (KF) e intenso microfissuramento os afetando. Hornblenda (hb), hiperstênio (hy), biotita (bi) e opacos (op), geralmente	

em agregados, se distribuem esparsamente pela rocha.	100
Figura 6.10 – Amostra LBD. Aspecto do forte microfissuramento em feldspatos, que propicia alteração em argilominerais (+ hidróxidos de ferro) ao seu redor, e da alteração de hiperstênio (hy), também em hidróxidos de ferro.	101
Figura 6.11 – Amostras ITN. Aspecto geral do granito Branco Itaúnas. Notar heterogeneidade granulométrica e contatos interlobados, entre os grãos;	103
Figura 6.12 – Amostra ITN-2. Aspecto do microfissuramento intragranular em plagioclásio (Pl) e do preenchimento de espaços intragranulares, em feldspatos, por argilominerais (am).	103
Figura 6.13 – Amostra ITN-1. Aspecto de biotitas substituídas por argilominerais, por provável ação deutérica. Notar microfissuramento intra e transgranular e sericitização de plagioclásio (setas).	104
Figura 6.14 – Amostra CRV. Aspecto geral do granito Branco Caravelas. Notar a heterogeneidade granulométrica.	105
Figura 6.15 – Amostra CRV. Argilominerais, comumente observados pela rocha, ocupando espaços intergranulares (a). Notar microfissuramento intergranular, sem preenchimento e ligeiramente aberto (em azul) (b).	105
Figura 6.16 – Amostra RIC. Aspecto geral do granito Rosa Iracema. Notar homogeneidade granulométrica e biotita em agregados de pequenas lamelas.	107
Figura 6.17 – Amostra BCR. Aspecto geral do granito Branco Cristal. Notar hipidiomorfismo dos feldspatos.	107
Figura 6.18 – Amostra BCR. Aspecto de lamelas de biotita intercrescidas com filossilicato incolor.	108
Figura 6.19 – Amostra BCE. Aspecto geral do granito Branco Ceará. Notar, em (b), a presença de mica litífera ocupando espaços intergranulares ou fissuras em feldspatos.	110
Figura 6.20 – Amostra CSB. Aspecto geral do gnaiss Casablanca.	111
Figura 6.21 – Amostra FLS. Aspecto geral do gnaiss Falésias. Aspecto de banda tonalítica. Notar a presença de fissuras inter e transgranulares, mais largas, preenchidas por filossilicatos e hidróxidos de ferro.	112
Figura 6.22 – Amostra GVN. Aspecto geral do gnaiss Giallo Veneciano. Notar forte microfissuramento e alteração em argilominerais e hidróxidos de ferro, nas paredes dos minerais, próximas a essas fissuras.	114
Figura 6.23 – Amostra GVN. Detalhe da alteração de plagioclásio e de argilominerais ocupando espaços intergranulares.	115
Figura 6.24 – Amostra GVN. Visão geral da alteração e microfissuramento.	115
Figura 6.25 – Amostra ARB. Aspecto geral do gnaiss Arabesco. Notar heterogeneidade granulométrica e cristais tabulares de plagioclásio (porção superior, centro, foto à esquerda).	116
Figura 6.26 – Amostra ARB. Aspecto dos cordões de sillimanita (sill) e de agregados de biotita (bi) e opacos.	116
Figura 6.27 – Amostra ARB. Aspecto de provável cordierita alterada.	117
Figura 6.28 – Amostra SCC. Aspecto geral do gnaiss Santa Cecília. Notar microfissuramento intragranular, especialmente em feldspatos, e turvação e alteração desses.	117
Figura 6.29 – Amostra SCC. Aspecto da alteração de plagioclásio e presença de argilominerais preenchendo espaços intragranulares.	118
Figura 6.30 – Diagramas de dispersão SiO ₂ x elementos maiores.	122

Figura 6.31 – Diagramas de dispersão SiO_2 x Ba, Sr e Rb.	123
Figura 6.32 – Diagramas de dispersão Fe_2O_3 e FeO x TiO_2 .	124
Figura 6.33 – Relação densidade aparente x absorção (CEN, 1998a), para <i>ladrilho</i> : a) 10 cm x 12 cm; b) 10 cm x 10 cm.	133
Figura 6.34 – Relação densidade aparente x absorção (ABNT, 1992a), para <i>ladrilho</i> : a) 10 cm x 15 cm, b) 10 cm x 12 cm e c) 10 cm x 10 cm.	134
Figura 6.35 – Relação densidade aparente x porosidade aberta (BSI, 1999a), para <i>ladrilho</i> : a) 10 cm x 15 cm; b) 10 cm x 12 cm; c) 10 cm x 10 cm.	134
Figura 6.36 – Relação densidade aparente x absorção, para <i>bloco</i> (ABNT, 1992a).	136
Figura 6.37 – Correlações entre densidade aparente e absorção entre <i>bloco</i> e <i>ladrilho</i> de diferentes dimensões, segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a).	138
Figura 6.38 – Relação poros abertos x porosidade aberta (BSI, 1999a), para <i>ladrilho</i> : a) 10 cm x 15 cm; b) 10 cm x 12 cm; c) 10 cm x 10 cm.	139
Figura 6.39 – Diferentes valores obtidos para poros abertos, conforme o tamanho do corpo-de-prova.	140
Figura 6.40 – Correlações entre porosidade aberta e volume de poros abertos para <i>ladrilho</i> , de diferentes dimensões (BSI, 1999a).	141
Figura 6.41 – Distribuição das variações de densidade de <i>ladrilho</i> em relação a <i>bloco</i> .	143
Figura 6.42 – Distribuição das variações de absorção <i>ladrilho</i> em relação a <i>bloco</i> .	143
Figura 6.43 – Frequências das variações de absorção (a) e densidade (b) entre <i>bloco</i> e os diferentes tamanhos de <i>ladrilho</i> (ABNT, 1992a).	145
Figura 6.44 – Correlações entre densidade (<i>bloco</i>) e variações desse parâmetro, para os diferentes tamanhos de <i>ladrilho</i> .	145
Figura 6.45 – Correlações entre absorção e variação de absorção entre <i>bloco</i> e <i>ladrilho</i> , (ABNT, 1992a), para corpos-de-prova com tamanhos: a) 10 cm x 15 cm, b) 10 cm x 12 cm, c) 10 cm x 10 cm.	146
Figura 6.46 – Curvas de absorção por capilaridade para as amostras em estudo.	147
Figura 6.47 – Correlação entre coeficiente de capilaridade e volume de poros abertos (BSI, 1999a).	148
Figura 6.48 – Correlação entre coeficiente de capilaridade e absorção (ABNT, 1992a e CEN, 1998a), e porosidade aberta (BSI, 1999a).	149
Figura 6.49 – Relação entre coeficiente de capilaridade e poros abertos (BSI, 1999a) para corpos-de-prova 10 cm x 10 cm e 10 cm x 12 cm. Detalhamento da Fig. 6.47, exibindo as rochas equivalentes a cada ponto.	150
Figura 6.50 – Resistência à compressão nas condições seca (barras à esquerda) e saturada (barras à direita) e variação (linha).	153
Figura 6.51 – Frequência das variações de compressão entre seco e saturado, relativo à estruturação das rochas estudadas.	155
Figura 6.52 – Correlação entre a resistência à compressão uniaxial, nas condições seca e saturada.	155
Figura 6.53 – Resistência à flexão, na condição seca, antes e após choque térmico, e decaimento relativo.	158
Figura 6.54 – Velocidade de propagação de ondas, na condição seca, antes e após choque térmico, e decaimento relativo.	158
Figura 6.55 – Frequência dos decaimentos da resistência mecânica e de velocidade de propagação de ondas.	162
Figura 6.56 – Correlação entre resistência à flexão na condição seca, antes e após ciclos	

de choque térmico.	163
Figura 6.57 – Correlação entre a velocidade de propagação de ondas, antes e após ciclos de choque térmico.	163
Figura 6.58 – Densidade aparente antes (pontos à esquerda) e após (pontos à direita) choque térmico e respectivas variações.	165
Figura 6.59 – Absorção d'água antes (pontos à esquerda) e após (pontos à direita) choque térmico e respectivas variações.	165
Figura 6.60 – Amostra LBD. Generalizado aumento da coloração acastanhada da rocha, provavelmente resultante do incremento da oxidação preexistente.	167
Figura 6.61 – Amostra ITN-2. Amarelamento da rocha e oxidação de máficos. Foto à direita, detalhe dos minerais oxidados.	168
Figura 6.62 – Amostra CRV. Amarelamento e aparecimento de manchas ferruginosas, milimétricas, esparsas. Foto à direita, detalhe do amarelamento, coincidente com os pontos microscopicamente constituídos de agregados cauliniticos.	168
Figura 6.63 – Amostra SCC. Amarelamento segundo a foliação e oxidação nas regiões quartzo-feldspáticas.	168
Figura 6.64 – Amostra ITN-1 após ensaio de choque térmico. Notar incremento da coloração ferruginosa de argilominerais de preenchimento de microfissuras (a), e oxidação de filossilicatos de alteração de biotita (b).	169
Figura 6.65 – Amostra CRV após ensaio de choque térmico. Aspecto da oxidação nos locais de ocorrência de argilominerais de alteração de mineral original.	170
Figura 6.66 – Amostra SCC após ensaio de choque térmico. Aspecto do incremento da coloração ferruginosa de argilominerais de preenchimento de microfissuras.	170
Figura 6.67 – Amostra LBD. Exposição à névoa salina. Aumento da oxidação preexistente (acima, corpo-de-prova de controle).	173
Figura 6.68 – Amostra ITN-2. Exposição à nevoa salina. Oxidação de granada, máficos e opacos.	173
Figura 6.69 – Amostra CRV. Exposição à nevoa salina. Aumento do amarelamento preexistente (oxidação?) e local oxidação de granada.	173
Figura 6.70 – Amostra CSB. Exposição à névoa salina. Leve coloração ferruginosa surge nos agregados micáceos.	173
Figura 6.71 – Amostra LBD. Exposição ao dióxido de enxofre. Total branqueamento da rocha.	176
Figura 6.72 – Amostra VCB. Exposição ao dióxido de enxofre. Formação de sais em fissuras superficiais e, localmente, sobre biotita	176
Figura 6.73 – Amostra ITN-2. Exposição ao dióxido de enxofre. Pontos amarelados esparsos referentes à oxidação de minerais.	176
Figura 6.74 – Amostra CRV. Exposição ao dióxido de enxofre. “Amarelamento” da rocha.	177
Figura 6.75 – Amostra GVN. Exposição ao dióxido de enxofre. Abundantes eflorescências em agregados máficos e fissuras intergranulares.	177
Figura 6.76 – Amostra BCR. Fratura originada no processo de confecção do corpo-de-prova foi um dos locais preferenciais para cristalização de sais. Esse aspecto também foi observado nas amostras gnáissicas, especialmente as SCC e GVN.	179
Figura 6.77 – Amostra PIT. Despegamento de lamelas de biotita (em azul).	180
Figura 6.78 – Amostra SCC. Microfissuras aparentemente alargadas após exposição ao dióxido de enxofre.	180
Figura 6.79 – Amostra VCB-3. Intensificação da cor de hidróxidos de ferro associados a argilominerais de alteração nos núcleos de feldspatos e de preenchimento de	

microfissuras. Notar cavidade em biotita (em azul, no centro da foto à esquerda).	183
Figura 6.80 – Aspectos dos diferentes comportamentos das rochas após imersão parcial em soluções alcalina e ácida. LBD e ITN-1 não mostraram modificações aparentes, ao final do ensaio de imersão de NaOH; enquanto exibiram intensa mudança de coloração após imersão em H ₂ SO ₄ .	187
Figura 6.81 – Aspectos resultantes da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências), após imersão parcial contínua em solução de ácido sulfúrico. Notar a formação de cavidade e quebra de arestas nas CRV e SCC.	187
Figura 6.82 – Cristalização de sais nas bordas (SCC) e nos cantos (CSB), preferencialmente sobre biotita.	189
Figura 6.83 – Aspecto da quebra de arestas dos corpos-de-prova da amostra CRV, em decorrência da pressão de expansão dos sais em descontinuidades e, provavelmente, nos espaços intergranulares originalmente ocupados por argilominerais de alteração.	190
Figura 6.84 – Diferentes aspectos das eflorescências formadas por imersão parcial em ácido sulfúrico. Amostra AZF: notar despegamento de lamelas de biotita, que ficam aderidas na superfície dos grumos de sais.	191
Figura 6.85 – Amostra ITN-2. Leve oxidação dos argilominerais intersticiais e pequenas perdas de materiais próximos.	194
Figura 6.86 – Amostra CRV. Despegamento dos argilominerais intersticiais, de alteração.	194
Figura 6.87 – Amostra ARB. Despegamento de biotita e “clareamento” dos materiais de preenchimento de microfissuras.	194
Figura 6.88 – Amostra SCC. Despegamentos em cristais de granada.	194
Figura 6.89 – Aspectos da cristalização salina, em crostas, sobre os corpos-de-prova parcialmente imersos em solução alcalina. Os corpos-de-prova à direita foram lavados periodicamente, durante o ensaio, para melhor observação dos possíveis efeitos. Aqueles à esquerda deixaram de ser lavados cerca de 15 dias após o início dos ensaios.	195
Figura 6.90 – Amostra ITN-2. evolução do manchamento amarelo ferruginoso, desde seu aparecimento (dois dias após a imersão), o início de seu retorno à cor original e ao final, já sem aparentar a modificações de cor.	196
Figura 7.1 – Somatória dos graus relativos atribuídos às deteriorações observadas na face polida das rochas estudadas.	203

LISTAS DE TABELAS

	p.
Tabela 1.1 – Cenário mundial da produção e usos das rochas ornamentais.	5
Tabela 1.2 – Principais países produtores e exportadores de rochas ornamentais.	6
Tabela 1.3 – Panorama brasileiro do setor de rochas ornamentais.	7
Tabela 2.1 – Tipos rochosos selecionados e regiões produtoras.	11
Tabela 2.2 – Empreendimentos minerários visitados e materiais amostrados.	12
Tabela 2.3 – Ensaio de caracterização de rochas ornamentais e respectivas normas utilizadas.	16
Tabela 3.1 – Mobilidade relativa de elementos químicos das rochas (Aires-Barros, 1991).	28
Tabela 3.2 – Características dos principais poluentes do ar (Amoroso; Fassina, 1983 e Kupchella; Hyland, 1992).	34
Tabela 3.3 – Efeitos de poluentes em algumas rochas.	37
Tabela 3.4 – Pressão de cristalização de alguns sais.	43
Tabela 5.1 – Classificação do tamanho de grãos adotada nas descrições petrográficas	66
Tabela 5.2 – Procedimentos e parâmetros obtidos nas determinações de índices físicos.	70
Tabela 5.3 - Situações potencialmente degradadoras de rochas ornamentais.	79
Tabela 6.1 – Designações adotadas para as amostras estudadas.	87
Tabela 6.2 – Níveis de correlação considerados nesse trabalho.	88
Tabela 6.3 – Graus de alteração intempérica e de microfissuramento adotados nesse trabalho.	90
Tabela 6.4 – Categorias e descrição de granitos alterados.	90
Tabela 6.5 – Resultados da quantificação de minerais.	92
Tabela 6.6 – Variações de tamanho de grão e tamanho de grão predominante.	93
Tabela 6.7 – Resultados de análises petrográficas das amostras VCB-1, VCB-2 e VCB-3.	95
Tabela 6.8 – Resultados de análises petrográficas das amostras AZF, PIT e LBD.	98
Tabela 6.9 – Resultados de análises petrográficas das amostras ITN-1, ITN-2 e CRV.	102
Tabela 6.10 – Resultados de análises petrográficas das amostras RIC, BCR, BSV.	106
Tabela 6.11 – Resultados de análises petrográficas das amostras BCE, CSB, FLS.	109
Tabela 6.12 – Resultados de análises petrográficas das amostras GVN, ARB e SCC.	113
Tabela 6.13 – Composição química das rochas graníticas em estudo – Elementos maiores (%).	119
Tabela 6.14 – Composição química das rochas graníticas em estudo – Elementos menores e traço (ppm).	120
Tabela 6.15 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova: 10 cm x 15 cm.	125
Tabela 6.16 – Índices físicos segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova 10 cm x 12 cm.	126
Tabela 6.17 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova: 10 cm x 10 cm.	127
Tabela 6.18 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a) – Corpos-de-prova: 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5 cm.	128
Tabela 6.19 – Dados estatísticos de índices físicos obtidos para as amostras ensaiadas.	130

Tabela 6.20 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (ABNT, 1992a e CEN, 1998a) de densidade aparente e absorção para <i>ladrilho</i> .	131
Tabela 6.21 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (BSI, 1999a) de densidade aparente e porosidade aberta para <i>ladrilho</i> .	133
Tabela 6.22 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (ABNT, 1992a) de densidade aparente e absorção.	136
Tabela 6.23 – Rochas com resultados homogêneos nas determinações de propriedades físicas.	137
Tabela 6.24 – Variações máxima e mínima de propriedades físicas (ABNT, 1992a) de <i>bloco</i> para <i>ladrilho</i> .	144
Tabela 6.25 – Valores médios de resistência à compressão uniaxial, seca e saturada, variação de resistência entre as condições seca e saturada e velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais.	152
Tabela 6.26 – Valores máximos, mínimos e mediana obtidos para a resistência à compressão e velocidade de propagação de ondas.	154
Tabela 6.27 – Resistência à flexão, velocidade de propagação de ondas e variações de massa, de resistência à flexão e de propagação de ondas, antes e após choque térmico.	157
Tabela 6.28 – Resistência à flexão, velocidade de propagação de ondas e variações de massa, de resistência à flexão e de propagação de ondas, antes e após choque térmico.	160
Tabela 6.29 – Correlações entre as determinações de resistência à flexão e de velocidade de propagação de ondas nas condições secas e após choque térmico.	163
Tabela 6.30 – Valores médios e variações de densidade aparente e absorção (CEN, 1998a) após ciclos de choque térmico (CT).	164
Tabela 6.31 – Modificações de coloração observadas em amostras submetidas a choque térmico e graduação atribuída.	166
Tabela 6.32 – Aspectos microscópicos das deteriorações visualmente detectadas após ensaio de choque térmico.	169
Tabela 6.33 – Coeficientes de correlação entre valores de resistências à compressão uniaxial e à flexão.	170
Tabela 6.34 – Agrupamento das rochas estudadas segundo especificações da ASTM (1999c).	171
Tabela 6.35 – Principais resultados obtidos pela exposição das amostras em estudo a câmaras de dióxido de enxofre e névoa salina.	174
Tabela 6.36 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de exposição ao dióxido de enxofre.	178
Tabela 6.37 – Principais modificações em amostras selecionadas daquelas submetidas à exposição em câmara de dióxido de enxofre.	180
Tabela 6.38 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de exposição à névoa salina.	182
Tabela 6.39 – Principais modificações microscópicas em amostras submetidas à exposição em câmara de névoa salina.	183
Tabela 6.40 – Principais resultados da alteração por imersão parcial das rochas graníticas em soluções ácida e alcalina.	185
Tabela 6.41 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de imersão parcial em ácido sulfúrico.	188

Tabela 6.42 – Descrição das eflorescências salinas resultantes do ensaio de imersão parcial em ácido sulfúrico e deteriorações observadas.	189
Tabela 6.43 – Tipos de sais que compõem as eflorescências formadas por imersão parcial em ácido sulfúrico.	192
Tabela 6.44 – Principais modificações em amostras selecionadas submetidas à imersão parcial em ácido sulfúrico.	193
Tabela 6.45 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de imersão parcial em hidróxido de sódio.	195
Tabela 6.46 – Sais cristalizados, em crostas, nas amostras submetidas à imersão parcial em solução alcalina.	196
Tabela 6.47 – Variações de velocidade de propagação de ondas após ensaios de imersão parcial.	197
Tabela 6.48 – Variações de massa e de absorção d'água, após ensaios de imersão parcial.	199
Tabela 7.1 – Principais propriedades físicas e mecânicas de rochas com forte e incipiente modificações após ensaios de alteração acelerada.	204

RESUMO

FRASCÁ, M.H.B.O. (2003) *Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento*. São Paulo, 281p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

As rochas para revestimento tendem, naturalmente, a se alterar pela exposição às novas condições ambientais e de uso, o que pode se acelerar ante as agressividades climáticas, a ação de poluentes atmosféricos e a adoção de procedimentos construtivos e de manutenção inadequados. As deteriorações resultantes são de caráter irreversível. A adoção das medidas preventivas adequadas, melhor recurso disponível, é dificultada pela carência de informações técnicas relativas aos tipos de alterações que podem ocorrer, conforme o tipo rochoso e as condições de uso. A caracterização tecnológica de rochas graníticas selecionadas e estudos experimentais de alteração acelerada, simulando situações como as descritas acima, visaram ao estabelecimento de uma metodologia para ensaios laboratoriais que permitam antecipar as deteriorações do material rochoso e, também, agregar a questão da durabilidade dentre os critérios de escolha dessas rochas para uso como revestimento. Os resultados mostraram deteriorações, em diferentes intensidades e formas (oxidação de minerais, eflorescências, escamações e outros), relacionadas às características intrínsecas de cada rocha, atribuindo-se papel condicionante aos minerais previamente alterados e ao microfissuramento. A petrografia revelou-se a ferramenta mais importante nos estudos de alterabilidade. Foi possível verificar que a qualificação tecnológica da rocha contempla dois aspectos complementares: determinação das propriedades de engenharia (parâmetros físicos e mecânicos) e da alterabilidade.

ABSTRACT

Rock for cladding or flooring will be naturally weathered when exposed to the new environmental and use conditions. This alteration may be modified or accelerated in contact to climatic aggressiveness, by the action of atmospheric pollutants and improper constructive and maintenance procedures. Resulting deteriorations are irreversible. Therefore, the only available way is to prevent such alteration using adequate techniques. However, it is made difficult due to the lack of technical information regarding to the types of deterioration that may occur according to rock type and use conditions. Technological characterization of selected granitic rocks and experimental studies on accelerated alteration under simulated environmental and uses situations, similar to those described above were carried out aiming at the establishment of a methodology for laboratorial tests that could anticipate deteriorations of the rocky material. Moreover, they also aimed to add the question of durability as a choice criterion of rocks used for covering. Results showed stone deteriorations, in different intensities and ways (mineral oxidation, efflorescence, scaling and others), related to the intrinsic characteristics of each rock from which previously altered minerals and microcracks played significant role in stone degradation. Petrography was the main technique in the alterability studies. It was also possible to verify that the technological qualification of rocks contemplates two complementary aspects: determination of engineering properties (physical and mechanical parameters) and alterability.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O uso de rocha faz parte da história da civilização desde os seus primórdios, já que foi empregada na construção de obras civis e monumentos (pontes, estradas, aquedutos, palácios, castelos, igrejas, túmulos) sempre que houvesse a disponibilidade dessa matéria-prima em condições mínimas de aproveitamento. Segundo Vicente *et al.* (1996), a rocha é o principal material de construção dos monumentos e edifícios históricos europeus, não somente pela sua abundância, mas pela sua resistência e durabilidade.

No Brasil, tem-se conhecimento do uso de rochas como revestimento, especialmente dos mármore importados da Europa (italianos e portugueses), desde o período colonial, o que se incrementou a partir da segunda metade do século passado.

Os termos rochas ornamentais e para revestimento têm as mais variadas definições e ainda não são consensuais as definições para ele. No projeto de norma 2.02.105.012 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, no prelo) rocha ornamental é definida como “material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento ou afeiçãoamento (bruta, aparelhada, apicoada, esculpida ou polida), utilizado para exercer uma função estética”.

Rocha para revestimento é definida pela ABNT (no prelo) como “rocha natural que, submetida a processos diversos e graus variados de desdobramento e beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos e fachadas, em obras de construção civil”. Essa definição pode ser considerada similar à que consta na ASTM C119 (ASTM, 2001a), que propõe para *dimension stone*: “pedra natural que tenha sido selecionada, aparelhada ou cortada em tamanhos e formas especificados ou indicados, com ou sem uma ou mais superfícies mecanicamente acabados”.

Neste estudo, todos os materiais rochosos selecionados e trabalhados serão tratados como rochas para revestimento, tendo em vista sua aplicação mais comum e o objetivo de investigar suas propriedades e alterações no emprego no revestimento de edificações.

As duas grandes categorias comerciais de rochas para revestimento são a dos

“granitos”, que, nesse sentido, englobam rochas silicáticas (ígneas plutônicas e/ou vulcânicas, charnockitos, gnaisses e migmatitos), e a dos “mármore”, comercialmente entendidos como qualquer rocha carbonática, tanto de origem sedimentar como metamórfica, passível de polimento.

Outros materiais como ardósias e quartzitos, comercializados pelas suas designações corretas ou englobados nas categorias anteriores, também são largamente utilizados como rochas para revestimento.

Essas rochas têm seu mais nobre e valorizado uso como elementos ornamentais (arte estatuária, arte funerária, pias, tampos de mesa e outras peças decorativas) e, mais largamente, como material de construção civil, sendo aplicadas como elementos estruturais (colunas e pilares) e, especialmente, nos revestimentos verticais (paredes e fachadas) e horizontais (pisos), de interiores e exteriores de edificações.

As rochas graníticas, pela sua durabilidade e enorme variedade de cores e padrões texturais e estruturais, são as mais utilizadas nos revestimentos de exteriores, tanto em pisos quanto em fachadas. Os mármore, que no Brasil são, em geral, importados, seguem próximo, sendo largamente empregados no revestimento de interiores.

O padrão estético, estabelecido pela cor, textura e estrutura da rocha, é determinado pelo modo de formação, composição mineral, padrões de orientação ou deformação nela impressos por sua história geológica. Constitui o principal condicionante para o comércio e uso da rocha, que é imposto por modismos e não necessariamente pelas características tecnológicas dos materiais.

O aproveitamento da rocha para fins ornamentais e para revestimento está relacionado a fatores adicionais ao padrão estético, ligados à geologia do material rochoso, aqui referidos como fatores intrínsecos:

- tipologia do jazimento: definida pela intensidade e tipo de alteração da rocha, presença de tensões confinadas, heterogeneidade estrutural e textural, entre outros;
- propriedades petrográficas, físicas e mecânicas: condicionam os usos mais adequados da rocha no revestimento de edificações, pois fornecem parâmetros para a escolha dos materiais perante solicitações tais como: intempéries, desgaste abrasivo pelo tráfego de pedestres, danos relacionados à expansão e contração térmicas, etc.

Outros fatores, muitas vezes de igual importância, mas de caráter extrínseco aos materiais pétreos são:

- técnicas de extração e beneficiamento: devem ser adequadas a cada tipo de material, pois eventuais defeitos decorrentes do emprego inadequado de métodos extrativos ou industriais (serragem, polimento e lustração), poderão modificar características naturais (microfissuras, por exemplo), e vir a favorecer ou acelerar a alteração dos constituintes ao serem expostos a novas condições ambientais;
- técnicas de aplicação e condições de uso e manutenção.

As rochas para revestimento são produtos obtidos do desmonte de materiais rochosos em blocos e de seu subsequente desdobramento em chapas, posteriormente polidas e cortadas em placas e ladrilhos.

A degradação ou deterioração de rochas (segundo Houaiss e Villar, 2001) são termos utilizados para se referir ao estado alterado para pior, ou seja, danificação, decomposição, estrago do material rochoso.

Os processos de deterioração têm sido empiricamente relacionados à interação das características petrográficas, físicas e mecânicas das rochas com os agentes do meio ambiente e os procedimentos de fixação, limpeza e manutenção. Resultam na alteração da superfície exposta da rocha, seja pela modificação de seu aspecto estético (perda de brilho e manchamentos), seja pela sua danificação ou ainda pela perda de resistência mecânica.

Alterações cromáticas e manchamentos de ladrilhos de rocha são freqüentemente associados às interações com reagentes químicos que compõem produtos de limpeza. Degradações da face exposta da rocha, como inchamento, escamação, despegamento de fragmentos minerais e outros, são muitas vezes decorrentes da formação de eflorescências e subeflorescências, a partir de sais provenientes de argamassas, pelo emprego de procedimentos inadequados de assentamento.

Estudos diagnósticos de deteriorações de rochas para revestimento indicam que a maior parte dos problemas está relacionada ao desconhecimento do usuário sobre as interações da rocha com o ambiente externo, tanto pelas condições criadas pelas inúmeras variáveis impostas pelos sistemas empregados no beneficiamento e na aplicação da rocha, como pela poluição e intervenções antrópicas.

1.1 Importância Econômica do Setor

O setor de rochas ornamentais e para revestimento é um dos segmentos com maior e mais constante desenvolvimento da indústria mineral brasileira.

Os principais aspectos econômicos, a seguir relatados, procuram mostrar a importância nacional e internacional desse setor, que, por sua vez, justificam o aprimoramento dos conhecimentos relativos às propriedades tecnológicas dos materiais rochosos e o desenvolvimento de procedimentos para sua qualificação e previsão de durabilidade.

O mercado mundial de rochas ornamentais e para revestimento movimenta, ao ano, próximo de US\$ 40 bilhões, entre vendas nos mercados internos dos países produtores, trocas internacionais e negócios com tecnologia, máquinas e equipamentos (Peiter, 2001)

Mesmo com o impacto negativo dos ataques terroristas de setembro de 2001 nos EUA, e da crise nos segmentos construtivos da Europa e Japão na economia mundial, naquele ano a produção desses materiais cresceu, segundo Montani (2002) cerca de 8%, alcançando 65 milhões de toneladas, dos quais 11,8 milhões de toneladas foram comercializados no mercado internacional (correspondendo a cerca de US\$ 13 bilhões), determinando aumento de cerca de 6%, bem próximo da média dos anos anteriores.

O consumo mundial, por sua vez, atingiu os 700 milhões de m², 25% do qual nos mercados da China, Itália e EUA (Montani, 2002). Tais indicadores sugerem que este setor tem boa capacidade de enfrentamento ante a flutuações relacionadas a problemas econômicos e não-econômicos, ainda que críticos.

A Tabela 1.1 mostra uma compilação dos dados de produção e uso mundiais acerca desses materiais rochosos.

A Figura 1.1 ilustra a distribuição das principais aplicações da produção mundial, que são predominantemente de chapas e ladrilhos para revestimento (70%), arte funerária (16,5%) e trabalhos estruturais (12%).

Tabela 1.1 – Cenário mundial da produção e usos das rochas ornamentais.

CENÁRIO MUNDIAL – ROCHAS ORNAMENTAIS – 2001			
PRODUÇÃO			
	<i>x10³ m³</i>	<i>x10³ t</i>	
Extração bruta	48.450	130.800	
Rejeitos da extração	24.370	65.800	
Produção bruta	24.080	65.000	
Rejeitos do beneficiamento	9.870	26.650	
Produção líquida	14.210	38.350	
APLICAÇÃO			
	<i>x10³ m²</i>	<i>x10³ t</i>	%
pisos e pavimentos	258.970	14.000	36,5
trabalhos especiais	102.870	5.560	14,5
fachadas	60.310	3.260	8,5
paredes internas	49.670	2.690	7,0
escadarias	24.830	1.340	3,5
subtotal – construção civil	496.650	26.850	70,0
arte funerária	117.060	6.350	16,5
trabalhos estruturais	85.140	4.600	12,0
usos diversos	10.650	580	1,5
subtotal – outros usos	212.850	11.530	30,0
TOTAL	709.500	38.380	100,0

Fonte: Montani (2002)

Fonte: Montani (2002)

Figura 1.1 – Distribuição dos usos de rochas ornamentais.

A Tabela 1.2 lista os países líderes do mercado de rochas ornamentais, atualmente encabeçado pela China, que responde por cerca de 18% da produção e 20% da exportação mundiais; seguido pela Itália (cerca de 13% da produção e 15%

das exportações mundiais).

Tabela 1.2 – Principais países produtores e exportadores de rochas ornamentais.

PAÍS	PRODUÇÃO MINERAL (x10 ³ t)	EXPORTAÇÃO (x10 ³ t)
China	11.500 (17,6%)	4.692 (19,5%)
Itália	8.400 (12,9%)	3.550 (14,7%)
Índia	6.000 (9,2%)	2.294 (9,5%)
Espanha	5.500 (8,5%)	1.861 (7,7%)
Irã	4.000 (6,2%)	-
Brasil	2.500 (3,8%)	1.222 (5,1%)
Portugal	2.400 (3,7%)	1.217(5,0%)
Turquia	2.250 (3,5%)	985 (5,0%)

Fonte: Montani (2002)

A Itália, tradicional líder na produção e exportação das rochas ornamentais, foi superada pela China, a partir do ano 2000. Permanece, no entanto, na liderança do desenvolvimento, produção e exportação de equipamentos para o setor.

O Brasil, segundo Montani (2002), em 2001 ocupou o sexto lugar na produção mundial (2.500 milhões de t, que correspondem a 3,8% da produção total) e o quinto lugar nas exportações mundiais (1.222 milhões de t e 5,0% do volume total).

A média de preços das rochas para revestimento, nos mercados interno e externo, indica que a agregação de valor na venda de blocos é equivalente a três vezes o seu custo de produção. Por outro lado, cada metro cúbico de rocha desdobra-se em 30 a 35 m² de chapas, o que permite, considerando os preços médios praticados, obter-se, por m³ industrializado, cerca de R\$ 3.200,00 em produtos semi-acabados no mercado interno, ou US\$ 3,000.00 no mercado externo (Peiter, 2001).

Em 2001, o Brasil participou com 10,3% das exportações mundiais de rochas silicáticas brutas (blocos); 2,1% de rochas processadas simples (pedras de cantaria, pedras de calcetar); 2,3% de rochas processadas especiais (chapas e ladrilhos de granitos e mármore) e 8,2% de ardósias; totalizando 5,0% do volume físico mundial das exportações. A exportação de rochas carbonáticas brutas é muito pequena, menor que 0,1% do volume mundial (Montani, 2002).

A Tabela 1.3 exibe as principais características do setor, no Brasil.

Tabela 1.3 – Panorama brasileiro do setor de rochas ornamentais.

CENÁRIO BRASILEIRO (2001)		
PRODUÇÃO	3.059 x10 ³ t (blocos de mármore e granitos): crescimento de 7,8% relativo a 2000	
PRINCIPAIS ESTADOS PRODUTORES	Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Ceará, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro (em ordem de importância).	
EXPORTAÇÃO granitos brutos (volume e valores)	763 (x10 ³ t)	US\$ 109,7 milhões (diminuição de 6,1% em relação a 2000)
EXPORTAÇÃO mármore bruto	8,5 (x 10 ³ t)	
EXPORTAÇÃO rochas processadas (volume e valores)	263 x10 ³ t, crescimento de 13,9% em relação a 2000	US\$ 153 mi: aumento de 8% em relação a 2000
EXPORTAÇÃO blocos (destino)	Itália (43%), Espanha (19%), EUA (10%), China (8%), Taiwan (7%), Hong Kong (6%)	
EXPORTAÇÃO rochas processadas (destino)	EUA (60%), Espanha (4%), Bélgica (3%). Reino Unido (3%) e México (3%)	
CONSUMO	Blocos: 2.293 x 10 ³ t Produtos acabados: 23,8 milhões de m ²	Crescimento: 13,5%, em relação a 2000

Fonte: DNPM (2002)

Estima-se, no Brasil, a existência de mais de 500 variedades comerciais de rochas ornamentais (Peiter, 2001), incluindo, além dos granitos, mármore, ardósias, quartzitos, e outros, explorados a partir de aproximadamente 1.300 frentes de lavra. O beneficiamento e/ou processamento dessas rochas é feito por cerca de 250 serrarias e 6.500 marmorarias.

O setor brasileiro de mármore e granito movimenta cerca de US\$ 2,1 bilhões/ano (Peiter, 2001), aí incluindo as transações nos mercados interno (80%) e externo, e com máquinas, insumos, equipamentos, materiais de consumo e serviços. Gera ao redor de 105.000 empregos diretos em aproximadamente 10.000 empresas (65% marmorarias).

Em 2001, o setor apresentou crescimento na produção bruta e na exportação de rochas processadas, ensejado também pela instalação de novas unidades de beneficiamento (principalmente no Estado do Espírito Santo) e a aquisição de 63 novos teares (seis deles importados), que eleva para cerca de 2.095 teares instalados no País (DNPM, 2002).

Paralelamente a isto, continua o crescimento do consumo de rochas ornamentais, em especial nos grandes centros urbanos, para revestimento de piso,

paredes e fachadas.

Ainda que decrescente (0,6% em peso e 26,9% em valor), especialmente em razão da desvalorização do real frente ao dólar, as importações de mármore e travertinos italianos, espanhóis e gregos vêm suprir a carência nacional deste tipo de rocha, muito valorizada pelos arquitetos. Para esses, os únicos concorrentes nacionais são os mármore brancos explorados nos estados do Espírito Santo e Paraná, e o calcário denominado Bege Bahia, explorado na região de Ourorândia, BA.

1.2 Objetivos

Os materiais rochosos usados no revestimento de edificações tendem a se modificar e deteriorar, naturalmente, com o tempo. Esse processo pode se acelerar em condições climáticas agressivas, ambientes poluídos ou pela utilização de procedimentos construtivos ou de manutenção inadequados.

Dado que os processos de deterioração, ao se instalarem, são praticamente irreversíveis, é de fundamental importância o conhecimento antecipado das possíveis deteriorações em situações de uso.

Para isso, entretanto, carece-se de informações técnicas relativas aos tipos de deteriorações que tendem a se instalar conforme o tipo rochoso e as condições de uso, para subsidiarem o planejamento e adoção das medidas preventivas.

Muitas questões importantes, relativas a esse assunto, continuam especulativas. Em particular, quanto à contribuição das propriedades petrográficas, físicas e/ou mecânicas para a alteração de rochas para revestimento usadas na construção civil; quanto à possibilidade de estender a análise das propriedades tecnológicas para a previsão de durabilidade da rocha; quanto à influência das possíveis modificações no decorrer do beneficiamento do material rochosos na alterabilidade da rocha, dentre outras.

Os objetivos dos estudos experimentais desenvolvidos, por meio da simulação da ação climática (variações térmicas), da ação de poluentes dispersos na atmosfera e da ação da cristalização de sais (eflorescências), com foco em materiais graníticos, estiveram voltados, por um lado ao estabelecimento de uma metodologia para ensaios laboratoriais que permitam antecipar as deteriorações do material rochoso em situações de uso e, por outro, agregar a questão da durabilidade aos critérios de escolha dessas rochas, quando utilizadas como revestimento, pela indústria de

construção civil.

1.3 Justificativas

Se, por um lado, estão sendo introduzidas novas e mais eficientes técnicas extrativas e industriais para a exploração e beneficiamento de rochas para revestimento, em consonância com seu emprego crescente pela construção civil, por outro, verifica-se que ainda há relativamente pouco conhecimento a respeito desses materiais, especialmente quanto à sua alterabilidade e durabilidade sob as condições a que se expõem, quando em uso.

O desenvolvimento de estudos intempéricos experimentais, a partir da década de 30, foi conduzido principalmente de arquitetos e engenheiros, preocupados com a resistência e durabilidade de rochas para construção, dos concretos e outros.

O estudo dos processos intempéricos, dos mecanismos fundamentais para sua atuação e a determinação das taxas de alteração foram até recentemente considerados desnecessários ou negligenciados, especialmente pelos geólogos, que tendem a considerar evidente o fenômeno de alteração e óbvia a natureza dos diferentes processos envolvidos (Robinson; Williams, 1994).

Permanecem, no entanto, muito escassos os estudos científicos que correlacionem os produtos de alterações aos condicionantes petrográficos e ambientais (especialmente os fatores climáticos e as condições de assentamento e/ou manutenção).

Dessa forma, investigações visando ao desenvolvimento de procedimentos para a previsão da alteração e sobre durabilidade de rochas tornam-se necessárias e atuais, razão pela qual instituições normatizadoras nacionais e internacionais já estão firmemente voltadas à adoção de procedimentos que visem à previsão da durabilidade de materiais rochosos usados na construção civil (Frascá e Frazão, 2002).

O granito foi o material rochoso escolhido como foco do estudo, em razão de seu vasto uso como revestimento, em todo o mundo, e de sua posição de amplo destaque na produção brasileira.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a consecução dos objetivos desta pesquisa, considerou-se o conhecimento das propriedades petrográficas e físicas e da resistência mecânica de rochas graníticas, antes e após sua transformação em chapas e ladrilhos polidos. Estes últimos constituíram o material investigado nos ensaios de alteração acelerada, que procuraram simular situações semelhantes às aquelas que poderão estar sujeitos no seu uso no revestimento de edificações.

Tipos graníticos comerciais, correspondentes a granitos *stricto sensu* e *lato sensu* são objeto do estudo proposto, por serem as rochas mais exploradas e consumidas no Brasil. Além disso, apresentam relativa homogeneidade mineralógica, textural e estrutural; o que permitiu melhor comparação dos resultados laboratoriais entre os diferentes tipos selecionados.

A qualificação e/ou quantificação das alterações mineralógicas e mecânicas ocorridas foram realizadas por meio da petrografia e técnicas analíticas complementares (difratometria de raios X e outras); e de determinações físicas e mecânicas (porosidade e absorção d'água, resistências à compressão e flexão, e velocidade de propagação de ondas).

As atividades desenvolvidas são relatadas a seguir.

2.1 Seleção dos Materiais e Áreas de Estudo

Os critérios para a seleção das rochas graníticas estudadas foram: cor, que em geral reflete a composição mineralógica e/ou grau de alteração intempérica; o histórico de alterações e/ou deteriorações em uso, a partir de informações obtidas a partir de dezenas de atendimentos a consumidores, e de contatos com outros profissionais de diversos estados. Também foram ponderadas a valorização e a tradição no mercado.

As rochas graníticas selecionadas para estudo estão relacionadas na Tabela 2.1 e correspondem a rochas brasileiras de grande aceitação nos mercados interno e externo.

Tabela 2.1 – Tipos rochosos selecionados e regiões produtoras.

COR PREDOMINANTE	NOME COMERCIAL	REGIÃO PRODUTORA (ESTADO)
verde	Verde Labrador	Colatina (ES)
vermelha	Capão Bonito – 1	Capão Bonito (SP)
	Capão Bonito – 2*	Capão Bonito (SP)
	Capão Bonito – 3*	Capão Bonito (SP)
rosa	Rosa Iracema	Sobral (CE)
branco-rosado	Branco Cristal*	Sobral (CE)
	Branco Savana*	Sobral (CE)
cinza	Prata Interlagos	São Paulo (SP)
	Azul Paulista Frente Nova*	São Paulo (SP)
branco-amarelado	Branco Itaúnas (Microponto II)	Medeiros Neto (BA)
	Branco Itaúnas (Microponto III)*	Medeiros Neto (BA)
branco-esverdeado	Branco Caravelas*	Medeiros Neto (BA)
branca	Branco Ceará	Santa Quitéria (CE)
branca com faixas cinzentas amarela com faixas cor de ferrugem	Casablanca	Independência (CE)
	Falésias*	Independência (CE)
“amarela”	Giallo Veneciano	Nova Venécia (ES)
	Arabesco	Nova Venécia (ES)
	Santa Cecília	Ecoporanga (ES)

Nota: * amostras que constituem conjuntos de litotipos de ocorrência geológica e geográfica próxima, por vezes com pequenas variações, especialmente no grau de alteração.

2.2 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico compreendeu a recuperação das informações disponíveis, mais recentes, sobre contexto geológico, dados petrológicos e petrográficos, de modo a se obter um quadro sucinto das características de jazimento dos diferentes tipos de rochas comercializados.

A pesquisa bibliográfica também abrangeu a revisão dos principais trabalhos desenvolvidos nos temas alteração, deterioração, alterabilidade e durabilidade de rochas, principalmente aquelas destinadas ao uso em revestimento de edificações. Contemplou, também, consulta a livros-texto e artigos atuais em diversos periódicos técnico-científicos. Em caráter ilustrativo, foi efetuada uma breve compilação do panorama mercadológico brasileiro atual.

2.3 Visitas às Minas Seleccionadas

Após a escolha dos tipos graníticos que foram estudados, foram planejados os trabalhos de campo para reconhecimento geológico dos corpos rochosos e do método de extração, enfocando as heterogeneidades, principalmente aquelas referentes à atuação intempérica e presença de descontinuidades (presença de fraturamento, dobramentos e outros).

Para visita aos jazimentos nos estados da Bahia e de São Paulo foram contatados, respectivamente, os produtores dos granitos seleccionados, que forneceram as autorizações e informações necessárias durante as visitas.

Nos demais estados foram consultados centros tecnológicos (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial – Nutech, por meio da Divisão de Tecnologia Mineral – Ditem, em Fortaleza, CE) e entidades de classe (Sindicato da Indústria de Rochas Ornamentais, Cal e Calcário do Estado do Espírito Santo – SindiRochas, em Cachoeiro do Itapemirim, ES), que também forneceram informações sobre os produtores dos materiais seleccionados e providenciaram autorização para acesso aos empreendimentos minerários.

Os empreendimentos visitados acham-se listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Empreendimentos minerários visitados e materiais amostrados.

NOME COMERCIAL	EMPRESA
Vermelho Capão Bonito	Somibrás – Sociedade de Mineração Brasileira Ltda. Granitos Brasileiros S.A. Granitos Pires – Mineração e Comércio Ltda.
Prata Interlagos	YKK do Brasil Ltda.
Azul Paulista Frente Nova	Granitos Brasileiros S.A.
Branco Itaúnas Branco Caravelas	Mineração Corcovado Ltda.
Verde Labrador	Marbrasa – Mármore e Granitos do Brasil S.A.
Santa Cecília	Nemer – Mármore e Granitos S.A.
Arabesco	Rocha Branca – Mineração Comércio e Exportação Ltda.
Giallo Veneciano	Granasa – Granitos Nacionais Ltda.
Branco Ceará	Granistone S.A.
Rosa Iracema Branco Cristal Banco Savana	Imarf Granitos S.A.
Casablanca Falésias	Granos – Granitos S.A.

2.3.1 Amostragem

A amostragem dos materiais para a realização dos ensaios e análises pretendidos foi orientada durante os trabalhos de campo. Essas amostras constituíram-se de pequenos blocos cúbicos com cerca de 30 cm x 30 cm x 30 cm (Figura 2.1), na quantidade de duas para cada tipo de rocha.

Figura 2.1 – Blocos cúbicos com cerca de 30 cm x 30 cm x 30 cm, para ensaios de laboratório.

Complementarmente foram necessárias oito placas polidas com dimensões de 40 cm x 40 cm x 2 cm a 3 cm, para os ensaios de alteração e de determinação das propriedades físicas e mecânicas “pós-beneficiamento” e “pós- ensaios de alteração”.

2.4 Visita a Centros de Beneficiamento

A visita a centros de beneficiamento, de uma parte dos tipos litológicos amostrados na etapa de campo, foi fundamental para conhecer as técnicas e equipamentos em uso, para produção de chapas e ladrilhos polidos.

Esta atividade também teve por objetivo tomar conhecimento das solicitações a que as rochas são submetidas e que poderiam conduzir a modificações nas propriedades físicas, em relação àquelas apresentadas por estes materiais *in natura*.

A importância do conhecimento desses parâmetros acha-se ligada à consideração de que os processos e equipamentos de corte e polimento podem imprimir modificações diversas nas propriedades tecnológicas dos produtos (chapas e ladrilhos polidos).

Foram visitadas as unidades de beneficiamento listadas abaixo:

- Marbrasa – Mármore e Granitos do Brasil S.A., em Cachoeiro do Itapemirim, ES;
- Granos Granitos S.A., em Caucaia, CE;
- Imarf Granitos S.A., em Caucaia, CE;
- YKK do Brasil Ltda., em Arujá, SP.

Essas empresas utilizam técnicas modernas e equipamentos geralmente importados da Itália, cujo processo produtivo é realizado conforme descrito a seguir.

Todas as rochas estudadas foram desdobradas em teares automáticos ou semi-automáticos, que permitem a elaboração de chapas com espessura bastante regular, que varia de 1,5 cm a 3,0 cm (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Blocos montados para serragem em tear de grandes dimensões (à esquerda), e processo de serragem de chapas a partir de bloco de granito (à direita).

As chapas obtidas são, então, submetidas a polimento, em equipamentos automáticos, que em cerca de 15 a 20 minutos realizam todo o processo (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Máquina de polir, automática, de origem italiana. Conforme progride o processo de polimento (na foto, do fundo para o primeiro plano), são utilizados abrasivos cada vez mais finos.

A quase totalidade dos materiais estudados, nesta pesquisa, foi submetida a polimentos somente com o uso dos abrasivos cerâmicos, normalmente utilizados nas máquinas automáticas de polir. Aparentemente não foram empregadas resinas sintéticas (polímeros) para melhoria do grau de lustro, o que leva a presumir que os eventuais efeitos das simulações de alteração devam se ater somente às características e a este processo.

2.5 Ensaios e Análises Laboratoriais

A caracterização tecnológica de rochas é realizada por meio de ensaios e análises, cujo principal objetivo é a obtenção de parâmetros petrográficos, químicos, físicos e mecânicos do material *in natura*, que permitem a qualificação da rocha para uso no revestimento de edificações.

Os ensaios procuram representar as diversas solicitações às quais a rocha estará submetida durante todo o processamento até seu uso final, quais sejam, extração, esquadrejamento dos blocos, serragem destes em chapas, polimento, corte em placas e ladrilhos etc.

Ainda são raros os ensaios normalizados em rochas beneficiadas (ladrilhos ou

chapas polidos), que visem a parâmetros de previsão de desempenho e durabilidade de rochas para revestimento de fachadas e pisos. Em geral, propõem-se à determinação de parâmetros físicos e mecânicos para o dimensionamento das placas para revestimento de fachadas e pisos.

Os ensaios e/ou análises realizados visaram à caracterização química, petrográfica, mineralógica e tecnológica dos materiais rochosos selecionados, para o reconhecimento das propriedades naturais, bem como das possíveis alterações impostas pelas solicitações mecânicas durante o desdobramento dos blocos em placas e posterior polimento.

A caracterização química objetivou determinar a composição das rochas, verificar as proporções dos diferentes elementos e subsidiar a interpretação das alterações observadas nos ensaios intempéricos realizados.

Como parâmetros físicos, foram determinados densidade, porosidade, absorção d'água e velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e, como parâmetros mecânicos, as resistências à compressão e à flexão.

Os ensaios se basearam nos procedimentos de ensaios e análises da ABNT, ASTM – *American Society for Testing and Materials*, BSI – *British Standard Institution* e CEN – *European Committee for Standardization*, listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Ensaio de caracterização de rochas ornamentais e respectivas normas utilizadas.

ENSAIO	NORMA
Densidade e porosidade/ absorção	ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a) ASTM C97 (ASTM, 1996) CEN prEN WI 036 (CEN, 1998a)* BS EN 1936 (BSI, 1999a)
Capilaridade	BS EN 1925 (BSI, 1999b)
Compressão Uniaxial	ABNT NBR 12.767 (ABNT, 1992b) ASTM C170 (ASTM, 1990)
Choque Térmico	CEN prEN WI 016 (CEN, 1998b)
Análise Petrográfica	ABNT NBR 12.768 (ABNT, 1992c) BS EN 12407 (BSI, 2000)
Flexão	ASTM C 880 (ASTM, 1998)
Velocidade de Propagação de Ondas	ASTM D 2845 (ASTM, 2000)

* Em consulta na Internet (<http://bsonline.techindex.co.uk>), verificou-se que esse projeto de norma foi publicado, em 2002, pela British Standard Institution: BS EN 13755:2002 – *Natural stone. Test method. Determination of water absorption at atmospheric pressure.*

Ensaio de alteração acelerada foram concebidos para simular condições

semelhantes àquelas em que as rochas estarão expostas após sua aplicação no revestimento de edificações: fatores climáticos (choque térmico), comportamento perante atmosferas poluídas ou quimicamente agressivas (exposição em câmaras climáticas de dióxido de enxofre e névoa salina, respectivamente) e ação da cristalização de sais (imersão parcial em soluções ácida e alcalina).

As modificações diante dessas simulações foram monitoradas visualmente e controladas por ensaios físicos (medida de velocidade de ondas ultra-sônicas longitudinais e absorção de água) e mecânicos (resistência à flexão). Técnicas petrográficas (microscopia óptica e difratometria de raios X) auxiliaram a análise dos resultados.

Os índices físicos e velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais, juntamente com o estudo petrográfico, são parâmetros de controle fundamentais, pois caracterizam e melhor refletem os aspectos intrínsecos das rochas.

Análises estatísticas exploratórias, especialmente regressão linear e determinação de coeficientes de correlação de Pearson (R), procuraram estabelecer as possíveis correlações entre as características intrínsecas das várias rochas estudadas e as alterações nos ensaios intempéricos adotados (aspectos extrínsecos).

A Figura 2.4 sintetiza o conjunto de procedimentos utilizados e seus principais objetivos.

FLUXOGRAMA DE ENSAIOS

1 – caracterização química e determinação do estado de alteração inicial e de feições potencialmente alteráveis

PARÂMETROS:	TÉCNICAS EMPREGADAS:
<ul style="list-style-type: none"> - composição mineralógica - feições petrográficas: microfissuramento, tamanho dos grãos, heterogeneidade textural, minerais alterados - composição química 	<ul style="list-style-type: none"> - petrografia - difratometria de raios X - análises químicas

2 – determinação das propriedades físicas e mecânicas

PARÂMETROS:	TÉCNICAS EMPREGADAS:
<ul style="list-style-type: none"> - absorção de água, porosidade, densidade aparente - resistência à compressão, resistência à flexão - velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais 	<ul style="list-style-type: none"> - determinações de propriedades físicas e de resistências mecânicas baseadas em normas nacionais e internacionais

3 – ensaios de alteração

- secagem em estufa e imersão imediata em água (choque térmico)
- imersão parcial em soluções ácida e alcalina, em condições ambientais
- câmaras climáticas, por exposição ao dióxido de enxofre e névoa salina

4 – caracterização pós-alteração

PARÂMETROS:	TÉCNICAS EMPREGADAS:
<ul style="list-style-type: none"> - feições petrográficas e modificações mineralógicas - velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - variações de peso e absorção de água - variações nas propriedades mecânicas 	<ul style="list-style-type: none"> - ensaios físicos e mecânicos - microscopia óptica - difratometria de raios X

Figura 2.4 – Fluxograma dos ensaios de caracterização petrográfica, física, mecânica e de alteração acelerada.

CAPÍTULO 3

DETERIORAÇÃO DE ROCHAS

A alteração intempérica das rochas se inicia, na natureza, quando estas entram em contato com as condições atmosféricas reinantes na superfície terrestre.

A degradação ou deterioração dessas rochas, ao serem utilizadas na construção civil, ocorre por meio de mudanças nas propriedades desses materiais, em contato com o ambiente natural, no decorrer do tempo (Viles, 1997). Inclui mudanças físicas e químicas, que resultam na diminuição da resistência da rocha e modificações na aparência estética; desde incipientes alterações cromáticas até esfoliações de camadas superficiais.

Nesse estudo, os termos degradação, deterioração e intemperismo serão empregados como sinônimos, para as rochas para revestimento.

A deterioração de materiais rochosos usados no revestimento de edificações, ou em monumentos, é mais pronunciada nos centros urbanos e industriais, pois o ambiente urbano, enriquecido em poluentes de variadas fontes, acelera e modifica os processos de alteração destes materiais (Figuras 3.1 a 3.3), ou seja, altera ou acelera os processos naturais. Devido principalmente à ação dos ventos, os efeitos nocivos das atmosferas urbanas também podem ser observados nas regiões rurais.

Fonte: Keller (1996)

Figura 3.1 – Acrópole, Atenas, Grécia. As estátuas foram de tal forma danificadas, que as originais foram guardadas no interior dos edifícios, em *containers* de vidro.

Fonte: Winkler (1997)

Figura 3.2 – Escultura de arenito, no castelo Herten (Alemanha), construído em 1702. Foto à esquerda, de 1908, mostrando leve a moderada alteração. À direita, foto de 1969, mostrando destruição quase completa.

Fonte: Giacomelli; Perego (s.d.)

Figura 3.3 – Estátua de calcário travertino na fachada da Basílica de São Pedro (Vaticano) deteriorada pela ação de poluentes trazidos para a superfície da rocha pelo ar (na forma de gases ou aerossóis) ou pela água (chuva ácida).

A taxa e o tipo de degradação são determinados pela natureza dos materiais envolvidos e do ambiente ao qual estão expostos. Segundo Viles (1997), a deterioração é um problema notável quando uma ou mais das três condições a seguir são encontradas:

- o processo natural de deterioração é acelerado, pois:

- o ambiente é naturalmente corrosivo, tal qual áreas costeiras e desérticas com abundantes aerossóis salinos; e/ou
 - os materiais são relativamente fracos, já predispostos a degradar e desintegrar.
- a atuação humana acelera a deterioração por causa da poluição atmosférica, manutenção inadequada etc.;
- edifícios e monumentos de grande valor ou significância são afetados.

É importante reconhecer que a deterioração também é um fenômeno natural e, portanto, um “problema” não inteiramente induzido pela atividade humana e que possa ser inteiramente “resolvido” (Viles, 1997).

A deterioração envolve mudanças físicas e químicas da superfície do material, ou da camada superficial onde materiais porosos são incluídos. Isto resulta em numerosos efeitos visíveis e invisíveis, como descoloração, formação de crostas e manchas ferruginosas, escurecimento superficial e produção de cavidades, descamação superficial, buracos e fragmentação (Figura 3.4). Também resultam em custos financeiros ligados à necessidade de reparação dos danos, limpeza e restauração.

Figura 3.4 – Inchamento e destacamento de minerais da superfície polida de granito “Santa Cecília”, assentado em piso, com argamassa.

Aires-Barros (1991) aponta três tipos principais de degradação de rochas para revestimento ou de monumentos:

- químico: considera as reações químicas que se processam na superfície e nas discontinuidades das rochas, com a formação de minerais secundários;

- físico: resulta de fenômenos de expansão e/ou retração diferencial dos minerais, provocados por variações térmicas, abalos físicos de várias origens, e ainda por expansões decorrentes da geração de minerais secundários (hidratação de minerais argilosos expansivos, ação da tensão superficial da água no decurso de processos naturais de saturação e secagem e ação das forças de cristalização de sais);
- biológico: provocado pelo crescimento de microorganismos sobre as rochas.

Feilden (1994) atribuiu à deterioração das construções e seus materiais as seguintes causas:

- externas: relacionadas aos fenômenos climáticos e agentes biológicos/botânicos;
- internas: relacionadas à umidade ou secura excessivas, ar contaminado e negligência;
- humana: incluindo a poluição ambiental, vibrações, vandalismo e outros.

Para Viles (1997), as causas da deterioração estão ligadas tanto aos fatores ambientais como arquitetônicos, esses compreendendo o posicionamento e modo de colocação da rocha, defeitos inerentes (propriedades intrínsecas a algumas rochas, que reduzem a sua durabilidade), projeto e técnicas inadequadas de manutenção.

O tipo litológico (mineralogia, alteração, textura e estrutura), a presença de fraturas e/ou fissuras (porosidade) e o clima (temperatura e intensidade de chuvas, entre outros) podem ser considerados os fatores que mais influenciam a susceptibilidade e taxa do intemperismo físico e químico em rochas para revestimento. Adicionalmente, há a ação dos poluentes atmosféricos, nos ambientes urbanos, e o emprego de processos inadequados para o assentamento e manutenção de rochas.

Amoroso; Fassina (1983) apontam que o grau de alteração depende da alterabilidade dos minerais constituintes, da homogeneidade da rocha e da superfície específica exposta aos agentes degradadores.

Modificações físicas das rochas para revestimento atribuídas às técnicas empregadas na extração e de beneficiamento, podem levar ao aumento do fissuramento, porosidade e outros (Dib *et al.*, 1999), que irão contribuir para a acentuação dos efeitos deletérios dos agentes intempéricos ou da ação antrópica (manutenção e limpeza inadequadas, entre outras) (Frasca; Quitete, 1999).

Desta forma, as principais causas da degradação destes materiais rochosos,

tendo em vista as condições climáticas e técnicas construtivas empregadas no Brasil, conforme Frascá (2002a), são:

- clima tropical (intensas variações de temperatura e umidade);
- agentes de limpeza, os quais atuam através de diversas substâncias químicas, cujos componentes podem causar modificações, especialmente no aspecto estético das rochas;
- poluição ambiental, na qual os diversos elementos dispersos na atmosfera têm grande influência;
- cristalização de sais, principalmente quando as rochas são usadas no revestimento de pisos e assentadas com argamassa.

Com foco nos aspectos anteriormente relatados, apresenta-se uma compilação dos principais conceitos e informações ligados à degradação intempérica de rochas, ou seja, o estado da arte conforme trabalhos anteriores, cujos conceitos e experimentos serão considerados para orientar o presente trabalho.

3.1 Alteração Intempérica de Rochas

Convencionalmente, como citado por Delgado-Rodrigues (1996), os processos intempéricos são divididos em dois tipos: físico e químico, que, na realidade, ocorrem concomitantemente, com a prevalência de um sobre o outro, dependendo das condições atmosféricas.

O intemperismo físico é dado principalmente pelas mudanças de temperatura (e.g. dilatação térmica diferencial dos minerais das rochas), por tensões mecânicas (descompressão e deformações tectônicas), pelas pressões internas causadas por agentes degradadores especiais (congelamento de água em poros ou fissuras, cristalização de sais na superfície da rocha e expansão de minerais por absorção de água) e agentes externos (antrópicos, animais e plantas).

O intemperismo químico ocorre pela ação da água e outros componentes transportados em solução e atua principalmente pelas reações de oxidação e hidrólise.

A alteração de rochas pode ser considerada um processo fundamentalmente químico, no qual os minerais silicáticos originais são afetados pelas soluções inorgânicas e orgânicas de baixa temperatura (Carroll, 1970). As reações químicas entre os minerais silicáticos e as soluções são governadas pelas leis de solução

química e equilíbrio, energia livre e potenciais de redox e controladas por numerosas variáveis. Resultam num ambiente químico estável, para uma região particular da superfície terrestre.

As principais variáveis que controlam a natureza e a taxa dos processos intempéricos têm sido, desde longo tempo, reconhecidas como a composição e estrutura da rocha-mãe, o clima e o tempo de atuação do processo intempérico.

O efeito dos vários agentes e processos intempéricos nas rochas é mostrado por mudanças mineralógicas, químicas e granulométricas, evidenciadas pela parcial ou total decomposição de alguns minerais, oxidação de ferro ferroso a férrico, parcial ou total mobilização de elementos maiores e menores, e outras. As reações são controladas tanto pela solubilidade dos constituintes minerais como pela porosidade da rocha.

A saturação da rocha por soluções aquosas é muito importante, pois nesta condição podem ocorrer reações que resultarão na remoção dos materiais solúveis (e.g., calcita), reações entre minerais sãos e soluções e reações entre os produtos do intemperismo (argilominerais) e demais minerais.

O intemperismo, desta forma, é um ajuste, ou reajuste, de minerais e rochas às condições reinantes na superfície terrestre. A presença de oxigênio leva à oxidação, e a de umidade, à hidratação ou à solução. O reajuste pode ocasionar a expansão do retículo cristalino.

De maneira geral, a despeito do intemperismo físico ser distinto do intemperismo químico, ambos geralmente atuam em conjunto. Este último é auxiliado pela quebra mecânica que leva ao rápido aumento das superfícies minerais, promovendo o pronto acesso de oxigênio e umidade e aceleração do processo, cuja taxa depende predominantemente do clima.

Dependendo do grau de empacotamento cristalino, os processos de reajustamento podem ser vagarosos como os processos geológicos, ou rápidos o suficiente para impor deterioração em menos de uma geração. A atmosfera urbana do último século criou problemas ambientais especiais às superfícies rochosas expostas, pois podem acelerar os processos intempéricos relativamente aos ambientes naturais rurais.

As atuações intempéricas preponderantes nas diversas correlações de intensidade de chuva e temperatura estão esquematizadas na Figura 3.5 (Murck; Skinner, 1999).

Fonte: Murck; Skinner (1999)

Figura 3.5 – Influência do clima nos processos intemperísticos.

A chuva fornece a água que causa o intemperismo químico das rochas. O pH da água da chuva tem um padrão sazonal e regional; quando em equilíbrio com o CO_2 atmosférico, seu pH é 5,6. Nos climas úmidos, conduz à remoção dos cátions solúveis dos minerais, produzindo minerais de estrutura simplificada, em equilíbrio com a temperatura e pressão superficiais.

Na maioria das situações naturais, a água disponível para reagir com os minerais tem pH variando entre 3 e 9.

Segundo Skinner *et al.* (1999), o principal agente do intemperismo químico é uma solução fraca de ácido carbônico, formada conforme a água da chuva dissolve pequenas quantidades de CO_2 atmosférico.

A água da chuva é, por si só, um eletrólito misto (Carroll, 1970) que contém quantidades variadas de cátions e ânions maiores e menores: Si^{4+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , I^- , Br^- , B^{3+} , amônia (NH_3) e vários compostos de nitrogênio. Partículas de poeira podem lhe ser adicionadas, principalmente nas áreas industriais, nos grandes centros urbanos e zonas áridas. As fontes destes constituintes

são os oceanos, lagos salinos ou não, massas de solo, indústrias e emanções vulcânicas.

A movimentação de água na zona de intemperismo é controlada pela gravidade, capilaridade, umidade e calor. A água de capilaridade age como um solvente e é o meio no qual ocorre a troca de íons.

Cada tipo de rocha se altera de acordo com sua composição, textura, e o ambiente químico, o qual está dentro de um conjunto de condições de pH e Eh característico da região em que ocorre.

3.1.1 Modificações intempéricas em minerais e rochas

Goldich (1938), com base em duas premissas, propôs a série de estabilidade mineral no intemperismo (Figura 3.6): (a) mudanças químicas e mineralógicas resultantes estudo do intemperismo de quatro rochas (um gnaiss granítico, dois diabásios e um anfibolito) e (b) princípio da estabilidade: conceito de que as taxas em que ocorrem as perdas dos constituintes químicos, no intemperismo, indicam que os minerais formadores de rochas têm diferentes graus de estabilidade.

Figura 3.6 – Série de estabilidade mineral no intemperismo (Série de Goldich).

Goldich (1938) ressalta a similaridade inversa com a Série de Bowen e que sua proposição indica a estabilidade relativa dos minerais.

As principais modificações intempéricas em silicatos e os minerais e produtos resultantes (Figura 3.7) foram apresentados por Aires-Barros (1991).

Fonte: Aires-Barros (1991), modificado.

Figura 3.7 – Representação esquemática dos processos intempéricos.

De maneira semelhante, Winkler (1997) aponta os minerais originais e os produtos de alteração mais estáveis: feldspatos e silicatos ferromagnesianos hidratam formando argilominerais; micas – após rápida perda de Fe – e quartzo são muito estáveis e permaneceriam na sua forma original; minerais carbonáticos e sulfatos dissolvem.

Sintetizando a alterabilidade dos minerais e das rochas ígneas, Aires-Barros (1991) aponta que as substituições de Si^{4+} , nas entidades tetraédricas, por Al^{3+} , conduzem a uma diminuição da resistência ao intemperismo.

As ligações mais fracas nos principais minerais das rochas silicáticas são:

- nesossilicatos, sorossilicatos e ciclossilicatos (sillimanita, zircão, titanita e minerais dos grupos da olivina, granada e epídoto): as que vinculam os conjuntos tetraédricos entre si. Tais ligações são feitas por cátions como o Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} etc. Quanto maior for o número de coordenação e menor

a carga do cátion, mais débil é a ligação;

- inossilicatos (minerais dos grupos dos piroxênios e anfibólios): as que vinculam as cadeias umas às outras;
- filossilicatos (clorita, argilominerais e minerais do grupo das micas): as que ligam as diferentes folhas tetraédricas;
- tectossilicatos (quartzo e feldspatos): as ligações menos fortes são aquelas entre os cátions K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , etc.

A mobilidade relativa de elementos químicos das rochas é apresentada na Tabela 3.1 (Aires-Barros, 1991).

Tabela 3.1 – Mobilidade relativa de elementos químicos das rochas (Aires-Barros, 1991).

MOBILIDADE RELATIVA	pH		Eh	
	pH > 7	pH < 7	Eh > 0	Eh < 0
muito elevada	Cl, I, Br, S, B, Se, Mo, V, U	Cl, I, Br, S, B	Cl, I, Br, S, B	Cl, I, Br
elevada	Na, Ca, Mg, Sr	Na, Ca, Mg, Sr, Zn, Cd, Hg, Ni, Co	Na, Ca, Mg, Sr, Mo, V, U, Se	Na, Ca, Mg, Sr
média	Mn	Al, Pb, Cu, Cr, V	Co, Ni, Cu, Hg, Zn, Cd	Mn
baixa	K, Si, P, Fe, Pb, Zn, Cd	K, Fe^{3+}	K, Si, P, Pb	K, Si, P, Ni, Zn, Co, Fe
muito baixa	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Si	Al, Cr, Fe, Mn	Al, Cr, Mo, V, U, Se, S, B, Hg, Cu, Cd, Pb

A estas considerações, válidas para a maioria dos minerais formadores de rochas, são acrescentados casos específicos de interesse relevante para esse estudo:

- feldspatos: primeiramente são removidos os cátions K^+ , Na^+ e Ca^{2+} , seguindo o Al^{3+} da coordenação tetraédrica. O Si^{4+} é o último a ser removido (Aires-Barros, 1991). Segundo Wilson (1975), o plagioclásio frequentemente está alterado em sericita, conjuntamente com argilominerais (dos quais a illita é o mais comum), cuja origem não é certamente atribuída ao intemperismo, podendo ser, pelo menos em parte devido à ação hidrotermal ou tardi-magmática. A complexa alteração de feldspatos está ligada à sua composição e estrutura, além da marcante heterogeneidade, zoneamento, intercrescimento, entre outros, dos cristais individuais.

- micas: o K^+ , que liga os conjuntos em triplas camadas, é o primeiro a ser removido, seguido pelo Al^{3+} de coordenação tetraédrica. Restam, assim, “fragmentos” de tetraedros $[SiO_4]^{4-}$ e de $Al(OH)_3$ ou $Mg(OH)_2$.

3.1.2 Influência do potencial redox

Muitos elementos químicos podem ocorrer na crosta terrestre em diferentes estados de oxidação. O caso mais comum é o do ferro que pode aparecer como metal nativo (estado de oxidação 0), como Fe^{2+} e como Fe^{3+} .

Nesse caso, o Fe^{2+} nas estruturas cristalinas é um fator de grande fragilidade, pois é característico dos meios endógenos. Em ambientes exógenos, oxida-se, passando a Fe^{3+} , com concomitante variação do raio iônico, que produz distorção da rede e dá origem à sua instabilidade.

O conceito de oxidação que, originalmente, significava adição de oxigênio a uma substância, hoje implica a perda de elétrons por átomo. A redução é o ganho de elétrons. Designa-se por potencial redox, ou potencial de oxidação-redução, a energia para perda ou aquisição de elétrons nos sistemas reversíveis de oxidação-redução.

A importância do potencial redox nos fenômenos exógenos está relacionada ao fato de muitos elementos aparecerem na crosta em diversos estados de oxidação. O potencial redox, que varia com a concentração das substâncias que entram nas reações, é função do pH e Eh.

Krumbein; Garrels (1952) introduziram o conceito de “barreira geoquímica” para classificação de sedimentos químicos, baseada em valores de Eh, pH e salinidade da solução (Figura 3.8).

3.1.3 Reações de alteração

Quanto às ações químicas da água e do ar, podem ser do tipo: dissolução, redução, oxidação-hidratação, oxidação e hidrólise. As duas últimas são consideradas as mais importantes para a decomposição dos silicatos.

Fonte: Krumbein; Garrels (1952), adaptado.

Figura 3.8 – Limites de estabilidade de determinados minerais primários.

3.1.3.1 Dissolução

Dissolução é a completa dissociação de um mineral em um solvente, como a água. Os sais são os minerais mais comumente afetados.

A substância mineral tende a ser atacada pelo solvente até a saturação ser alcançada, e quanto menos saturada é a solução, mais agressivo é o progresso do seu ataque. A taxa de dissolução geralmente depende da solubilidade do sal, do grau de saturação original do solvente e da movimentação do solvente, de modo a mantê-lo subsaturado. Uma condição de permanente subsaturação é encontrada no contato da rocha em uma edificação com a água das chuvas.

As águas das chuvas, ou aquelas acidificadas com dióxido de carbono ou ácidos orgânicos em solução, podem exercer ação dissolvente sobre uma série numerosa de minerais, particularmente importante no caso das rochas calcárias.

Exemplo da produção do ácido carbônico pela solução de dióxido de carbono:

e de dissolução rocha carbonática por ácido carbônico:

Outros compostos menos solúveis, como a sílica e alumina, também podem sofrer dissolução. As condições de solubilidade destes elementos, segundo Carroll (1970), são:

- sílica: levemente solúvel em qualquer pH; solubilidade abruptamente elevada em pH>9;
- alumina: pH <4 ou pH > 8,5.

3.1.3.2 Oxidação

Os fenômenos de oxidação são particularmente ativos sobre os minerais de ferro e os compostos orgânicos.

Na maior parte das rochas magmáticas, o ferro ocorre sob a forma de compostos ferrosos. Quando as moléculas complexas dos silicatos são destruídas, há a rápida mudança de ferro ferroso para ferro férrico.

Este processo, especialmente intenso nas regiões quentes, tropicais e subtropicais, dá origem aos sesquióxidos de ferro, responsáveis pela coloração avermelhada ou amarelada de muitas formações de origem tropical e subtropical.

3.1.3.3 Oxidação - hidratação

As ações de oxidação e de hidratação, de relevância restrita quando isoladas, tornam-se muito importantes quando associadas.

Os sulfetos de ferro transformam-se, por ação da água e do oxigênio nela dissolvido, em sulfatos, ferrosos ou férricos, e em hidróxido férrico; concomitantemente pode-se originar o ácido sulfúrico.

É a presença deste ácido que explica a maior intensidade das ações intempéricas quando há abundância de pirita, pois acelerará a alteração não só dos sulfetos de ferro, como de sulfetos de outros metais.

3.1.3.4 Hidrólise

As reações de hidrólise mostram-se estreitamente relacionadas com as de hidratação, facilitando mutuamente o trabalho de decomposição das rochas, pois esta última, freqüentemente, é acompanhada por aumento de volume.

De maneira geral, uma parte da água encontra-se sempre dissociada, em função da temperatura, em ânions ((OH)⁻) e em cátions (H⁺). Nas temperaturas normais da superfície da Terra, o grau de dissociação da água pura é bastante reduzido.

Porém, como as águas naturais contêm sempre outras substâncias dissolvidas (dióxido de carbono, ácidos minerais e ácidos orgânicos) que, por sua vez, dão origem a fenômenos de dissociação, a concentração hidrogeniônica dessas é muito superior à da água pura.

Deste fato resulta uma considerável capacidade hidrolítica das águas naturais, ou seja, de provocar fenômenos de hidrólise, pela atuação dos seus íons (OH)⁻ e H⁺, e a decomposição de outras substâncias pela fixação desses.

Esta ação hidrolítica sobre os feldspatos e os feldspatóides se traduz, em uma primeira fase, na formação de ácidos alumino-silícicos e de hidróxidos alcalinos e alcalino-terrosos, resultantes da substituição dos íons destes metais por hidrogênio e da fixação dos íons metálicos libertados pelos íons hidroxilas.

A hidrólise dos silicatos (feldspatos, micas, piroxênios, anfibólios, olivinas etc.) manifesta-se por fenômenos de argilização (caulinitização, montmorilonitização), de cloritização, de saussuritização e de serpentinização que, muitas vezes, se assemelham aos fenômenos congêneres promovidos pelos fluidos deutéricos.

3.2 Poluentes Atmosféricos

A atmosfera é uma mistura de gases que formam uma camada de

aproximadamente 400 km de espessura, ao redor da Terra. A camada inferior (16-19 km) é a parte mais importante em termos meteorológicos e de outros aspectos do ciclo biogeoquímico. Os últimos 600 m constituem praticamente toda a porção atmosférica da ecosfera.

O ar normal contém cerca de 78% de N_2 e 21% de O_2 ; o restante é constituído de argônio, dióxido de carbono e traços de outros gases.

A poluição do ar é a transferência de quantidades nocivas de materiais sintéticos e naturais na atmosfera, como consequência direta ou indireta da atividade humana (Kupchella; Hyland, 1992).

A poluição do ar é um problema complexo, pois os poluentes podem advir de numerosas substâncias químicas, existentes na forma de gases (aproximadamente 90%, em peso, dos poluentes), líquidos (aerossóis) ou particulados. Podem ser lançados diretamente no ar (poluentes primários) ou podem ser criados no ar (poluentes secundários), a partir de outros poluentes sob a influência da radiação eletromagnética do sol.

Poluentes podem erodir estátuas e superfícies pintadas, entre outros. Os custos muito elevados para a redução de tais efluentes indicam que seu controle deve ser realizado através de normas consistentes, internacionais.

A Tabela 3.2 mostra as principais características dos poluentes mais comuns.

Além dos poluentes mencionados, há também a presença de cloretos em ambientes marinhos (Zivica; Bajza, 2001).

Dos elementos poluentes, os potencialmente mais prejudiciais para as rochas para revestimento são:

- óxidos de enxofre:** dos numerosos existentes, o mais notável é o SO_2 , também considerado o poluente mais importante na degradação de rochas (Amoroso; Fassina, 1983).

Tabela 3.2 – Características dos principais poluentes do ar (Amoroso; Fassina, 1983 e Kupchella; Hyland, 1992).

POLUENTE	FONTES	CARACTERÍSTICAS	MECANISMOS DE DISSIPAÇÃO	TEMPO ESTIMADO DE RESIDÊNCIA
dióxido de enxofre - SO₂	combustão do carvão, óleos e outros combustíveis fósseis contendo enxofre; refino de petróleo, fusão de metais e fabricação de papel.	gás incolor, pesado, solúvel em água e com odor irritante.	precipitação e oxidação em partículas de sulfato	20 min – 7 dias
particulados	-	partículas sólidas ou gotas, incluindo vapores venenosos, fumaça, poeira e aerossóis.	-	-
óxido nítrico – NO dióxido de nitrogênio - NO₂	combinação de N e O a altas temperaturas de combustão, rejeito da fabricação de fertilizantes.	NO: gás incolor e levemente solúvel em água NO ₂ : gás marrom-avermelhado, algo solúvel em água.	NO: oxidação atmosférica para NO ₂ NO ₂ : precipitação e oxidação para nitrato	3 – 5 dias
amônia (NH₃)	tratamento de resíduos	-	reação com SO ₂ , formando (NH ₄) ₂ SO ₄ oxidação para nitrato	7 dias
monóxido de carbono - CO	queima de combustíveis, como a gasolina.	gás tóxico, incolor e inodoro, levemente solúvel em água.	incorporação pelo solo e conversão para CO ₂ por micróbios	0,09 – 2,7 anos
dióxido de carbono - CO₂	-	gás incolor, com fraco odor.	dissolve nos oceanos; usado pelas plantas na fotossíntese.	2 – 10 anos
hidrocarbonetos (e outros compostos orgânicos voláteis)	veículos automotores; processos industriais envolvendo solventes.	muitos e variados compostos de hidrogênio e carbono.	oxidação para CO ₂ ; absorção no solo e degradação microbiana; degradação fotoquímica.	1,5 – 2 anos (metano)
ozônio - O₃	produzidos por complexas reações fotoquímicas na atmosfera, envolvendo hidrocarbonetos, NO ₂ e a radiação ultravioleta.	gás azul-claro, moderadamente solúvel em água, instável, de odor adocicado. É um agente oxidante extremamente ativo.	reação fotoquímica (reversão para O ₂) na atmosfera.	2 h – 3 dias
sulfeto de hidrogênio - H₂S	vários processos em vários tipos de indústrias químicas: poços de óleo, refinarias.	gás incolor, com característico odor de “ovo podre”, levemente solúvel em água.	oxidação para SO ₂	0,08 – 2 dias
fluoretos (fluoreto de hidrogênio)	fabricação de fertilizantes e cerâmica, fusão de alumínio.	gás pungente, incolor e solúvel em água.	--	--

O SO_2 pode reagir com o ozônio (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), vapor d'água e outras substâncias na atmosfera para formar o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que é um dos maiores contribuintes para a chuva ácida¹.

As chuvas ácidas afetam os mais diversos materiais de construção (aço, tintas, cimento e outros), inclusive vários tipos de rochas: mármore ou calcários, arenitos e até granitos (Kobayashi *et al.* 1994). Podem provocar mudanças estéticas (perda de brilho e descoloração) e até funcionais (queda da resistência mecânica, fraturamento e quebra) do material rochoso usado no revestimento de fachadas.

- **óxidos de nitrogênio:** o dióxido de nitrogênio (NO_2) (de considerável impacto ambiental) é gerado na atmosfera pela ação da radiação ultravioleta em óxido nítrico (NO) (de ação menos perigosa). Por meio de várias reações com substâncias na atmosfera, o NO_2 é convertido em nitratos inorgânicos, nitrato peroxiacetílico (PAN) e, num equivalente ao ácido sulfúrico, o ácido nítrico (HNO_3).

O NO_2 é produzido na combustão do carvão, óleo, gás natural e de combustíveis para veículos automotores; também quando a temperatura é alta o bastante para causar a combinação do nitrogênio e oxigênio. Os NO_x são parte importante nas precipitações ácidas.

A influência dos nitratos nos processos de deterioração de rochas não é muito evidente (Amoroso; Fassina, 1983), mas pode ser correlacionada à ação como sais solúveis, nas paredes de edifícios.

A amônia (hidróxido de nitrogênio – NH_3) tem efeito indireto na deterioração de rochas, pois faz parte do processo de oxidação do SO_2 em meio aquoso. Devido ao papel relevante da radiação ultravioleta na geração do NO_2 , há até o controle do padrão diário nas concentrações urbanas de NO e NO_2 (Figura 3.9).

¹ As chuvas ácidas, assim consideradas quando apresentam $\text{pH} < 5,6$, referem-se tanto à deposição ácida a seco (designação mais correta) como à úmida (Keller, 1996). São produtos ácidos (sulfúrico e nítrico) resultantes da combinação do vapor d'água com partículas de sulfatos (SO_4) ou nitratos (NO_3), formados a partir de SO_2 e NO_x emitidos na atmosfera. As chuvas urbanas podem ter acidez equivalente a $\text{pH} 4$, e freqüentemente apresentam $\text{pH} = 4,6$. Ressalta-se que a ação do ácido neste pH é cerca de 25 vezes maior que no $\text{pH} 5,6$.

Figura 3.9 – Padrão típico diário dos níveis de óxido nítrico, dióxido de nitrogênio e ozônio, em Los Angeles, EUA.

Fonte: Kupchella; Hyland (1992).

- **monóxido de carbono:** é predominantemente resultante da queima incompleta de combustíveis, predominantemente de automóveis. Outras fontes “naturais” de CO: florestas, incêndios florestais, vulcões etc. Apesar de ser o poluente individual mais conhecido por afetar a saúde humana, é relativamente inócuo no tocante à deterioração de materiais.
- **dióxido de carbono:** é um componente menor (0,03%) da atmosfera normal. É um dos produtos básicos da queima de madeira, carvão, tabaco, folhas, papel e outros materiais contendo carbono. Comparado a outros poluentes do ar, é relativamente não-reativo e não tem efeitos diretos sobre a saúde, sua ação deletéria está na absorção da radiação infravermelha, impedindo parte do calor terrestre seja irradiado prontamente para o espaço e, assim, tendo grande responsabilidade no efeito estufa.
O dióxido de carbono dissolvido na água da chuva pode provocar a dissolução de carbonatos (calcita e dolomita) em calcários, mármore e outros, formando bicarbonatos de Ca e Mg. Também pode lixiviar alguns íons metálicos contidos em silicatos (micas, feldspatos etc.) (Amoroso; Fassina, 1983).
- **particulados ou aerossóis:** são partículas de substâncias sólidas (poeira) ou líquidas (gotículas) que permanecem em suspensão no ar. Aerossóis são definidos como misturas de partículas suficientemente finas, dispersas no ar (Amoroso; Fassina, 1983). Fumaças são suspensões particuladas formadas

por um sólido suspenso em uma fase líquida; resultam da queima incompleta de combustíveis. Os particulados perfazem cerca de 5%, em peso, dos poluentes atmosféricos e são constituídos de sais de sulfato, gotas de ácido sulfúrico, sais de metais (chumbo ou óxidos de ferro), poeira de partículas finamente divididas de carbono ou sílica, névoas e garoas líquidas, e muitas outras substâncias não-catalogadas.

As dimensões das partículas variam de 0,005 µm até cerca de 100 µm. Embora as poeiras naturais constituam metade da massa de material particulado na atmosfera, elas tendem a ter pequeno impacto, pois depositam rapidamente por causa do seu tamanho e peso. A chuva não é muito efetiva para remover partículas <2 µm, que tendem a permanecer em suspensão e, dependendo das condições de turbulência e vento, podem ser transportadas por longa distância.

Todos os poluentes têm caráter ácido. Usualmente reagem em poucos dias sob a influência do oxigênio, luz do sol e temperatura. Juntamente com as partículas de água na atmosfera, podem formar aerossóis, névoa e chuva ácidas, cujo pH, depois de dias ensolarados, pode ser muito baixo, entre 3 e 4,5 (Zivica; Bajza, 2001).

Quando os poluentes ácidos são carregados por meio de chuvas e outros fenômenos atmosféricos, podem-se depositar em edifícios e monumentos e causar a degradação dos materiais.

A Tabela 3.3 sumaria os efeitos de alguns poluentes nos materiais rochosos de construção.

Tabela 3.3 – Efeitos de poluentes em algumas rochas.

POLUENTE	MATERIAIS ATACADOS	DEGRADAÇÕES TÍPICAS
dióxido de carbono	especialmente mármore	deterioração
óxidos de enxofre	calcários, mármore, ardósia, arenitos	lixiviação, perda de coesão, queda da resistência mecânica
partículas sólidas (fuligem, alcatrão)	rochas e materiais de construção em geral	sujeira, manchamentos

Fonte: Kupchella; Hyland (1992)

3.3 Causas da Degradação Rochosa

O clima, um dos agentes mais influentes na degradação das rochas, é definido

pelo conjunto de fatores meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera numa dada região. Os elementos que intervêm na caracterização do clima são a temperatura e a umidade do ar, a precipitação pluviométrica, os ventos e a pressão atmosférica.

As ações físico-químicas das águas e as ações químicas dos componentes da atmosfera são importantes, sobretudo quando atuam em conjunto.

O clima, em todos seus aspectos, é uma das causas fundamentais da degradação das edificações, por meio da falência de seus materiais constituintes, os quais, por sua vez, afetam a estrutura (Feilden, 1994). A resistência dos materiais de construção aos agentes climáticos diminui com a exposição e idade. Mesmo em zonas temperadas, a radiação solar é tida como mais destrutiva que o congelamento. A água, em todas as suas formas, é o agente que provoca as reações químicas e a deterioração gradual dos materiais e, ativamente, também danifica as construções (inundações etc.).

Os dados climáticos fornecem informações relevantes para o entendimento, e possíveis previsões, das deteriorações. Seus principais componentes ativos, que afetam particularmente uma construção, são: radiação solar, mudanças de temperatura sazonais, chuvas, vento e transporte de partículas do solo.

Os fatores ou agentes atmosféricos que atuam diretamente as rochas são assim discriminados por Aires-Barros (1991):

- umidade: na forma de chuva, névoa ou como a própria umidade relativa do ar;
- temperatura do ar: que pode acelerar as reações químicas;
- insolação e resfriamento noturno: que podem provocar a condensação do vapor d'água existente na superfície da rocha ou afetar a taxa de deposição e os fenômenos de evaporação;
- vento e energia cinética: que promovem ação abrasiva sobre as paredes;
- constituintes do ar e poluentes atmosféricos (gasosos e aerossóis): condicionando as taxas de ataque químico.

A atmosfera e seus componentes sólidos, líquidos e gasosos atuam sobre as rochas para revestimento por meio de mecanismos físicos (umedecimento, cristalização de sais e outros fenômenos provocados por variações do estado higrométrico da atmosfera), químicos (desde sulfatação nas rochas carbonáticas a

fenômenos de hidrólise nas rochas granitóides, atuantes na superfície e no interior das rochas) e biológicos (ações químicas e/ou físicas promovidas por microorganismos diversos: bactérias, algas, fungos e líquens, musgo e mesmo arbustos).

3.3.1 Temperatura

A causa das mudanças da temperatura do ar é quase inteiramente decorrente do aquecimento do sol durante o dia, pela radiação das ondas curtas e longas, e pela perda desse calor durante a noite, pela radiação e convecção de ondas longas.

Todos os materiais de construção, inclusive as rochas para revestimento, expandem quando aquecidos e contraem quando resfriados – movimento térmico –, que é a maior causa da degradação de edificações.

A cor e a refletividade do material alteram a absorção de calor, responsável pelo aumento da temperatura; assim, os materiais escuros absorvem (baixo albedo) mais calor que os claros (alto albedo). A extensão do movimento térmico depende do intervalo de temperatura resultante do calor incidente e é modificado pela capacidade térmica da estrutura e pela espessura, condutividade e coeficiente de expansão dos materiais.

O incremento de temperatura relativo ao aquecimento solar é função do ângulo de incidência da radiação incidente e das propriedades térmicas da superfície receptora. Estudos de intervalos de temperatura em superfícies de rochas indicaram que estas alcançam temperaturas muito mais altas que as da atmosfera.

O *stress* induzido aos materiais de construção pelas mudanças de temperatura é dependente dos seguintes fatores (Feilden, 1994):

- magnitude das mudanças dimensionais absolutas do material, que é produto das suas dimensões multiplicadas pelo coeficiente de expansão, diferencial de temperatura e efeitos das mudanças relativas de umidade;
- elasticidade do material ou sua capacidade de quebra ou deformação sob pressão;
- variações de umidade devido à evaporação;
- grau de restrição ao movimento por sua conexão com outros elementos da estrutura do edifício.

3.3.2 Ação dos poluentes

Uma importante propriedade das rochas para revestimento é sua durabilidade, que se refletirá em maior e mais efetiva proteção das estruturas, por sua vez colaborando para o prolongamento do tempo de serviço destas.

A interação da rocha com fenômenos externos torna, porém, a sua durabilidade comprometida, devido às variações de temperatura, ataque ácido de poluentes e outros.

O conhecimento dos mecanismos e da taxa de atuação dos poluentes pode ser muito útil para o uso de medidas preventivas e de proteção do material rochoso e aumento da sua vida útil.

Um parceiro inevitável do ataque químico dos poluentes é a água; pois age: (a) como solvente dos agentes agressivos; (b) meio de transporte desses agentes e dos produtos de reação; (c) em alguns casos, componente dos produtos de reação (ex. gipso) (Zivica; Bajza, 2001).

A consequência prática dos efeitos químicos do ataque ácido é a gradual degradação das propriedades tecnológicas do material rochoso. O processo se inicia com a deterioração da superfície exposta, como inchamento, escamação e despegamento. Com sua progressão do exterior para o interior da rocha, passa a ocorrer gradual perda da resistência pelo aumento da porosidade.

Clifford Price (1989, *apud* Feilden, 1994) afirma que: “poluentes gasosos podem encontrar seu caminho na superfície de um edifício através de duas rotas principais: dissolvidos na chuva que cai sobre ele, ou reagindo diretamente com a construção”. O primeiro é chamado deposição úmida, e o outro, deposição seca:

- deposição úmida: incorporação, nas películas superficiais das paredes rochosas de edificações ou monumentos, de componentes atmosféricos transportados pelas gotículas da chuva e a remoção de substâncias das mesmas superfícies por lavagem e escoamento;
- deposição seca: acúmulo de componentes da atmosfera normal ou poluída sobre a superfície da rocha, na forma de partículas, gases ou aerossóis, transportados por ação eólica.

A deposição úmida, relacionada à precipitação atmosférica, apresenta caráter intermitente, com variações temporais e espaciais. Os poluentes podem ser incorporados nas gotículas no interior das nuvens (*rain-out*) ou removidas pelas chuvas

durante as precipitações (*wash-out*). A deposição seca é um processo mais lento que a deposição úmida, mas tem, caracteristicamente, um caráter contínuo.

O *rain-out* é o mecanismo mais importante e responsável por cerca de 85% do SO_4 e NO_3 das precipitações atmosféricas.

É possível que a degradação atribuída à chuva ácida, juntamente com os minerais secundários daí resultantes, possa também ser causada por meios bioquímicos tanto no interior da rocha como na sua superfície (Jefferson, 1993). Muitos organismos são mais ativos em condições de baixo pH e, assim, a chuva ácida propiciaria um ambiente no qual as bactérias seriam mais ativas e seriam, neste sentido, um agente indireto da deterioração das rochas.

A umidade higroscópica, relacionada à absorção da umidade do ar, é considerada fundamental para a deposição seca de gases ácidos. A adsorção higroscópica depende da umidade do ar, da natureza do material, do diâmetro dos poros e da superfície específica. Spiker *et al.* (1992 *apud* Grossi; Murray, 1999) consideram que a deposição de SO_2 é proporcional à área superficial da rocha umedecida pela água adsorvida.

Sais higroscópicos podem influenciar no teor de umidade de materiais porosos (Grossi; Murray, 1999), pois atraem a umidade do ar e seriam importantes na manutenção do filme de umidade na superfície da rocha. Materiais não, ou muito pouco, higroscópicos podem se tornar muito higroscópicos quando esses sais (incluindo nitratos, cloretos e depósitos anteriores de SO_2) são aprisionados nos seus poros, o que pode aumentar as taxas de absorção e oxidação do SO_2 atmosférico para a formação de sulfato de cálcio.

3.3.3 Ação da cristalização de sais

A cristalização de sais é um dos agentes intempéricos mais poderosos, pois é por meio dela que ocorre a degradação de rochas em ambientes marinhos, climas úmidos e ambientes poluídos. Sua ação em um meio poroso, especialmente rochas sedimentares, causa a perda de coerência entre os grãos.

O mecanismo de degradação é a pressão de cristalização dos sais e depende do grau de saturação e do tamanho do poro (Winkler; Singer, 1972; Theoulakis; Moropoulou, 1997; Benavente *et al.*, 1999).

Em uma edificação, nas proximidades do solo, uma solução salina pode

ascender através da rocha por capilaridade (“efeito Wick”, segundo designação dada por Goudie (1986 *apud* Benavente *et al.*, 2001)), até a altura potencial de ascensão capilar, denominada zona capilar, na qual ocorre a evaporação e conseqüente cristalização dos sais.

A zona capilar, que depende do sistema poroso da rocha, é caracterizada pelas eflorescências (quando sais se cristalizam na superfície da rocha), subeflorescências (quando sais se cristalizam abaixo da superfície exposta da rocha) e pelas perdas de material (Uchida *et al.*, 1999). Zona de imersão, nessa concepção, é a porção de rocha que fica mais próxima ao solo. A cristalização de sais se dá preferencialmente na zona de capilaridade.

Os sais solúveis podem ser originários do próprio solo, da argamassa de assentamento ou mesmo da própria rocha (López-Acevedo *et al.*, 1997). Sua cristalização dentro de poros gera pressões capazes de superar os limites elásticos do material, causando sua quebra. Esse mecanismo pode levar à completa degradação e destruição da rocha.

A concentração de sal pode ocorrer na superfície do material rochoso, onde se cristaliza; e dentro dos capilares próximo à superfície da rocha, onde a ação mecânica de sais, nas fissuras, pode iniciar seu trabalho destrutivo.

Correns (1949 *apud* Winkler; Singer, 1972) sintetizou as informações disponíveis, à época, para descrever o crescimento e dissolução dos cristais sob pressão linear para demonstrar a magnitude dessas pressões durante a formação de veios de minério. O cálculo de Correns baseou-se no princípio de Riecke:

$$P = \frac{RT}{V_s} \cdot \ln \frac{C}{C_s}$$

onde, P = pressão exercida pelo crescimento do cristal (atm); R = constante de gás (0,082 L.atm/mol.K); T = temperatura absoluta (K); V_s = volume molar do sal sólido (L/mol); C/C_s = grau de supersaturação, onde C é a concentração do soluto existente e C_s é a concentração de saturação.

O estado de supersaturação é essencial para todo processo de cristalização, conforme Figura 3.10.

Fonte: Winkler; Singer (1972)

Figura 3.10 – Cristalização de sais em função da concentração das soluções e da temperatura.

Winkler; Singer (1972) descreveram matematicamente todo o processo de cristalização e calcularam a pressão de cristalização de alguns sais (Tabela 3.4), para várias concentrações molares.

Tabela 3.4 – Pressão de cristalização de alguns sais.

Sal	Fórmula	ρ (g/cm ³)	Peso molecular (g/mol)	Volume molar (cm ³ /mol)	Pressão de cristalização (atm)					
					C/Cs = 2		C/Cs = 10		C/Cs = 50	
					0° C	50° C	0° C	50° C	0° C	50° C
Anidrita	CaSO ₄	2,96	136,14	46,00	335	398	1120	1325	1900	2262
Bischofita	MgCl ₂ .6 H ₂ O	1,57	203,31	129,50	119	142	397	470	675	803
Dodecahidrato	MgSO ₄ .12 H ₂ O	1,45	336,00	231,90	67	80	222	264	378	450
Epsomita	MgSO ₄ .7 H ₂ O	1,68	246,48	147,00	105	125	350	415	595	708
Gipso	CaSO ₄ .2 H ₂ O	2,32	127,00	54,80	282	334	938	1110	1595	1900
Halita	NaCl	2,17	58,54	27,85	554	654	1845	2190	3135	3737
Heptahidrita	Na ₂ CO ₃ .7 H ₂ O	1,51	232,10	153,80	100	119	334	365	568	677
Hexahidrita	MgSO ₄ .6 H ₂ O	1,75	228,00	130,10	118	141	395	469	671	800
Kieserita	MgSO ₄ .H ₂ O	2,45	138,39	56,55	272	324	910	1079	1543	1840
Mirabilita	Na ₂ SO ₄ .10 H ₂ O	1,46	322,19	220,00	72	83	234	277	397	473
Natronita	Na ₂ CO ₃ .10 H ₂ O	1,44	286,14	198,70	78	92	259	308	440	524
Taquidrita	2 MgCl ₂ .CaCl ₂ .12 H ₂ O	1,66	514,40	309,50	50	59	166	198	282	336
Tenardita	Na ₂ SO ₄	2,68	142,04	53,0	292	345	970	1150	1650	1965
Termonatrita	Na ₂ CO ₃ . H ₂ O	2,25	124,00	55,0	280	333	935	1109	1590	1891

Nota: ρ = densidade.

Fonte: Winkler; Singer (1972)

A variação do volume molar do sal ao mudar o estado de hidratação pode gerar elevadas pressões em poros e fissuras e, por isso, as características texturais do sistema poroso são fatores determinantes da pressão de cristalização em rochas. Shaffer (1932 *apud* La Iglesia *et al.*, 1997) indicou que o dano causado por sais é maior

em materiais com alta microporosidade do que naqueles com baixa.

La Iglesia *et al.* (1997) apontam que, conforme já apresentado na literatura, os cristais salinos crescem preferencialmente nos poros maiores e a solução salina é retirada dos poros menores. Segundo esses autores, a resistência à tensão (σ_t) é um valor que reflete a resistência coesiva do sólido, governada pela carga máxima por área superficial que pode ser suportada sem fraturar. Quando a pressão de cristalização supera a resistência à tensão, o material é danificado.

Os poros com diâmetros muito menores que $0,1 \mu\text{m}$ são sensíveis à condensação a baixas umidades relativas, como resultado do efeito Kelvin (Camuffo, 1983 *apud* Theoulakis; Moropoulou, 1997), o que possibilita que rochas com poros menores absorvam água rapidamente e a retenha por períodos maiores, conferindo-lhes comportamento distinto daquele de rochas com poros maiores.

Isso significa que rochas com poros maiores podem conter maior quantidade de água que aquelas com poros muito menores, porém, essas podem, por condensação, reter a água por muito mais tempo (Theoulakis; Moropoulou, 1997).

Theoulakis; Moropoulou (1997) acrescentam que, na fase inicial de cristalização, os sais crescem seletivamente nos poros maiores que $10 \mu\text{m}$. Quando em equilíbrio com a solução saturada, cristais maiores crescerão às expensas dos menores. Em geral, ao preencherem totalmente os poros maiores, os cristais continuam a crescer contra os esforços impostos pelas paredes dos poros, expandindo-os e quebrando a rocha.

Nessa situação, segundo Theoulakis; Moropoulou (1997), a cristalização pode continuar segundo dois caminhos alternativos, dependendo da energia livre de formação do cristal (ΔG_{total} e $\Delta G_{\text{interfacial}}$) e do trabalho necessário para a quebra das paredes dos poros (ΔW). Se $\Delta W < \Delta G_{\text{interfacial}}$, a falência mecânica será o processo termodinamicamente preferencial; caso contrário, ocorrerá o preenchimento dos poros menores sucessivamente.

Finalmente, esses autores consideraram – para o caso de degradação por cristalização de sais em biocalcarenitos de monumentos históricos de Rhodes – que as rochas com maiores volumes de poros maiores são mais duráveis que aquelas com maior proporção de poros pequenos; e que a susceptibilidade à degradação é função das propriedades mecânicas e estruturais (resistência à compressão, porosidade e distribuição de tamanho dos poros e área superficial interna total).

Grossi; Murray (1999) consideraram que a quantidade de água absorvida se relaciona à porosidade aberta (quantidade de poros acessíveis) enquanto o teor de umidade higroscópica (adsorção de água e condensação capilar) depende da distribuição do tamanho de poros e conseqüentemente da área superficial específica.

3.4 Alterabilidade e Durabilidade de Rochas

Aires-Barros (1991) define alterabilidade de rochas como um conceito dinâmico, que se refere à aptidão de uma rocha em se alterar, em função do tempo. Esse tempo, considerado na alteração intempérica como geológico, na alterabilidade é considerado um tempo humano, ou seja, os fenômenos ocorrem concomitantemente ao uso, à escala do homem e das suas obras de engenharia.

Desta forma, Aires-Barros (1991) define a alterabilidade (M):

$$M = f(i, e, t)$$

onde: t = tempo; i = fatores intrínsecos, dependentes do tipo de rocha (natureza do material, grau de fissuramento ou porosidade, ou seja, da superfície exposta à alteração); e = fatores extrínsecos, função do meio em que se processa a alteração (temperatura, pH, Eh, quantidade de água, forças bióticas).

Para a avaliação da alterabilidade, podem ser utilizadas várias técnicas, todas elas medindo a variação, no tempo, de uma grandeza intrínseca ou com ela intimamente correlacionada.

O estudo da alterabilidade, tomando este conceito na sua característica fundamental que é a dinâmica temporal, serve-se de técnicas e princípios do estudo da alteração (processo estático, na medida em que avalia um dado estado e não a sua evolução no tempo), adaptados à introdução da variável tempo.

Na norma ASTM C 119 (ASTM, 2001a), durabilidade é definida como a medida da capacidade da rocha ornamental de sustentar e manter as características essenciais e distintivas de estabilidade, resistência à degradação e a aparência. A durabilidade é baseada no período de tempo em que a rocha, em uso, pode manter suas características inatas. Este tempo dependerá do meio ambiente e do uso da rocha em questão (p. ex., em exteriores ou interiores).

Grossi *et al.* (1998) definem durabilidade como a aptidão de materiais rochosos resistirem à ação das intempéries. Assim como Aires-Barros (1991), estes autores

estabelecem que a durabilidade está relacionada a diversos fatores, que podem ser englobados em duas grandes categorias:

- intrínsecas: que dependem dos materiais e correspondem às características petrográficas e físicas destes;
- extrínsecas: relacionadas fundamentalmente ao meio ambiente, tendo em conta não só a intensidade como a frequência das variações externas, ou seja, seu caráter cíclico.

A durabilidade também está condicionada a certas propriedades físicas, entre as quais a porosidade e a configuração do sistema poroso, a superfície específica e as propriedades hídricas, relacionadas com o movimento dos fluidos no material rochoso.

Do ponto de vista da alteração, o sistema poroso é considerado, pela maior parte dos pesquisadores, como a principal característica física das rochas, pois é determinante nas demais propriedades físicas e mecânicas.

3.5 Rochas Graníticas

As informações e observações apresentadas ao longo deste trabalho mostram claramente que as rochas podem-se alterar em tempo real, ao contrário do que muitos consideravam até as décadas de 70 e 80.

Isto se deve ao emprego cada vez maior da rocha na construção e no revestimento de edificações, associado ao desconhecimento das técnicas e/ou materiais mais adequados para sua fixação e das interações com atmosferas urbanas poluídas e o uso de produtos químicos modificadores das condições de estabilidade dos minerais formadores das rochas.

Muitos trabalhos podem ser encontrados na literatura, a respeito da deterioração de rochas calcárias ou areníticas, tanto por terem sido praticamente os únicos materiais rochosos utilizados nos séculos passados – principalmente pela sua maior facilidade de extração e beneficiamento – como pelos seus mecanismos de deterioração mais facilmente interpretados e reproduzidos.

No tocante às rochas graníticas, ainda existem relativamente poucos estudos, a maioria deles ainda não reproduzindo ou investigando detalhadamente os mecanismos petrográficos e geoquímicos das deteriorações mais comuns destas rochas.

Com base na literatura pesquisada e nas informações nelas contidas, verifica-se

que muito já tem sido acrescentado quanto ao papel das atmosferas poluídas na degradação das rochas em monumentos ou no revestimento de edificações. Muitos estudos, que visam o entendimento dos mecanismos de decaimento e sua aplicação na prevenção e conservação destes materiais, estão sendo executados por pesquisadores de todo o mundo.

Neste contexto, a ciência geológica tem importância fundamental, pois nela se incluem os principais conhecimentos e técnicas para o avanço científico no entendimento dos mecanismos de alteração das rochas graníticas.

3.5.1 Granitos e sua alteração em ambientes naturais

Delgado-Rodrigues (1996) coordenou amplo trabalho, intitulado: “Conservação de rochas graníticas com aplicação em monumentos megalíticos”, que aborda grande parte dos tópicos relacionados ao tema dessa pesquisa.

Segundo Delgado-Rodrigues (1996), os granitos são expostos na superfície terrestre pela erosão das camadas superiores da crosta terrestre. Neste processo, os granitos sofrem seu primeiro decaimento, de natureza química (alteração deutérica) ou física (devido aos processos de descompressão e resfriamento). A presença de minerais secundários e o grau de fissuração mais ou menos intenso são consequência direta desta evolução.

Uma vez na superfície, ou próxima desta, os granitos estarão expostos ao intemperismo, sujeitos a todas transformações decorrentes desse processo, dependendo do clima e outras condições atmosféricas reinantes.

O aumento do fissuramento, porosidade e permeabilidade e a formação de minerais secundários são um fenômeno conspícuo e importante em ambientes naturais. Caulinita e halloysita são os minerais secundários mais comuns em granitos, embora esmectitas e/ou illita possam se formar em ambientes pouco drenados.

A composição mineral, os espaços porosos e a textura são os fatores determinantes na evolução do intemperismo. Em especial, os feldspatos são susceptíveis à hidrólise e contrastam mecanicamente com o quartzo, tornando-os elementos chave na alteração da rocha (Delgado-Rodrigues, 1996). A biotita, quando em quantidade, pode influenciar o comportamento global da rocha.

A presença de umidade na superfície das rochas é muito deletéria, pois as gotículas de água têm grande força de aderência, e as substâncias dissolvidas podem

penetrar na rocha até profundidades importantes, por causa da porosidade e permeabilidade da rocha e da quantidade de solução disponível sobre a superfície (Aires-Barros, 1991). Por esta via se desencadeia a hidrólise dos silicatos.

A alternância de ciclos de saturação e secagem permite a continuidade das reações hidrolíticas, podendo conduzir à desagregação das rochas, com a quebra das ligações físicas, traduzidas na esfoliação, lascamento e escamação.

Estudos de caracterização e de alteração acelerada de rochas, no Brasil, ainda são pouco comuns, especialmente aqueles especificamente voltados para granitos. Puderam ser recuperados na literatura os de Figueiredo *et al.* (2001 e 2002) e de Mesquita (2002), ambos, coincidentemente, contemplando rochas aqui também estudadas, procedentes do Estado do Ceará; porém, com enfoque muito distinto.

Figueiredo *et al.* (2001) realizaram a determinação de um índice de alterabilidade para o granito Rosa Iracema, baseado em ensaios cíclicos de aquecimento (a 70 °C), que denominaram de insolação, por 10 minutos, seguido pela imersão em água por 5 minutos. O ensaio foi executado a seco e utilizando água do mar e água deionizada. Os controles de decaimento foram, entre outros: refletância, variação de peso, composição química e pH da água de imersão.

O índice de alterabilidade (K), calculado com base nas perdas de peso e lixiviação química, indicou, ao final do ensaio, a seqüência: $K_{\text{água do mar}} > K_{\text{água deionizada}} > K_{\text{seco}}$.

Mesquita (2002) verificou que as correlações entre os parâmetros físicos, mecânicos e de alterabilidade revelam nitidamente que o comportamento dos granitos explorados na jazida do Branco Ceará é controlado diretamente pela conjugação dos aspectos composicionais, texturais e estruturais das rochas. A alterabilidade foi avaliada por meio de ensaios de lixiviação contínua e de resistência ao ataque químico, sendo as quatro variedades estudadas mais intensamente atacadas por soluções à base de ácidos clorídrico e cítrico. Verificou que a resistência mecânica é uma propriedade vetorial variável com a direção de aplicação dos esforços em função da disposição da anisotropia planar, definida principalmente pelos planos de extração dos blocos, na mina.

3.5.2 Degradação de granitos em edificações

Quando são ou inalterados, os granitos são bastante resistentes e, por isso,

sua extração é uma empreitada difícil e cara. Assim, é freqüente o minerador preferir a extração de material em zonas leve ou moderadamente, ou mesmo altamente, alteradas. Entretanto, esta escolha traz graves conseqüências relativamente ao ambiente a que a rocha estará exposta subseqüentemente, devido à grande quantidade de minerais secundários que a poderão levar a uma rápida degradação (Delgado-Rodrigues, 1996).

Ao se observarem obras civis utilizando granitos ou rochas assemelhadas, dois processos principais de degradação são identificados:

- formação de placas: destacamento de fragmentos da superfície da rocha, com formas aproximadamente regulares, paralelos à superfície original. Placas, plaquetas e escamas diferem no tamanho e são processos de degradação devastadores. É um processo descontínuo, mas, uma vez instalado, as placas e conseqüentemente toda a superfície poderão se perder num curto período de tempo;
- perda de pequenas partículas, similares, na forma e dimensões, aos componentes minerais da rocha, chamado de arenização (ou desagregação). Trata-se de um processo global, afetando toda a rocha, contínuo e progressivo. A arenização algumas vezes está relacionada a ambientes costeiros e, em outras, a ciclos térmicos e de umidade.

Delgado-Rodrigues (1996) também observou que o material publicado a respeito da deterioração de granitos empregados em obras civis não é muito abundante, mas cita alguns estudos que apontam fatores externos como relevantes contribuintes para este processo:

- gipso, correntemente encontrado em atmosferas urbanas e com significativa importância nas deteriorações, pode provir dos poluentes ou de soluções ascendentes das fundações dos edifícios (Casal Porto, 1989 *apud* Delgado-Rodrigues, 1996);
- argamassas usadas em juntas de revestimentos também podem ser fonte de gipso, visto que o Ca não é facilmente disponível em granitos (Cooper *et al.*, 1989 *apud* Delgado-Rodrigues, 1996);
- deterioração de granitos por formação de placas estaria relacionada à cristalização de gipso nas camadas mais externas do rocha (Casal Porto *et al.*, 1989 *apud* Delgado-Rodrigues, 1996).

Outros termos comumente utilizados para caracterizar as degradações de rochas para revestimento, extraídos de López Jimeno (1996) são:

- crosta: extrato superficial de alteração da rocha ou de produtos utilizados em eventuais tratamentos;
- depósito superficial: acumulação de materiais estranhos, de natureza diversa, como pó, algas, lama, excrementos;
- desagregação: perda de coesão, caracterizada pela separação de grânulos ou cristais sob os menores esforços mecânicos;
- despegamento: separação dos estratos superficiais do material seja entre eles ou em relação ao substrato. Para rochas, é preferível crosta, escamação, esfoliação etc.;
- eflorescência: formação, geralmente esbranquiçada, de aspecto cristalino, pulverulento ou filamentoso sobre a superfície do material. No caso de eflorescências salinas, a cristalização pode-se desenvolver no interior do material, freqüentemente provocando o destacamento das partes mais superficiais. O fenômeno tem o nome de subeflorescência ou criptoefflorescência;
- esfoliação: degradação que se manifesta com o despegamento, quase sempre seguido da caída, de um ou mais estratos superficiais, paralelos entre si (lâminas);
- fraturamento ou fissuração: degradação que se manifesta com a formação de aberturas no material, independente do deslocamento recíproco das partes;
- mancha: alteração que se manifesta com pigmentação acidental e localizada da superfície. Está relacionada com a presença de material estranho ao substrato (óxidos, sais de cobre, substâncias orgânicas, ceras etc.);
- inchamento: levantamento superficial e localizado do material, que pode assumir forma e consistência variáveis;
- escamação: degradação que se manifesta pela separação total ou parcial de zonas (escamas) do material original. As escamas têm formas e espessuras irregulares e desenvolvimento tridimensional. Geralmente, são constituídas de material aparentemente intacto e, embaixo delas, podem ser observadas eflorescências.

CAPÍTULO 4

ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ROCHAS SELECIONADAS

Os tipos litológicos aqui estudados, como mencionado anteriormente, foram selecionados, entre outros, pela sua cor e dados a respeito de seu desempenho após aplicação como revestimento de edificações. As principais informações sobre a geologia e geomorfologia dos corpos rochosos a partir dos quais são explorados foram compiladas e apresentadas a seguir. Informações sobre acesso, coordenadas geográficas e outros se encontram nas Fichas de Campo, no ANEXO A.

4.1 Rochas do Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo foram selecionados dois tipos rochosos para este estudo:

- Vermelho Capão Bonito, explorado na região de Capão Bonito (Figura 4.1), escolhido por se tratar de material clássico no mercado produtor e que tem apresentado grande durabilidade e com relatos pontuais de alterações, em geral relacionados a problemas na estocagem (Frasca; Quitete, 1999) ou no seu assentamento;
- Prata Interlagos, também comercializado sob a designação Azul Paulista Frente Nova, explorado na Região Metropolitana de São Paulo (Figura 4.1), em Parelheiros. É um material relativamente novo no mercado, praticamente restrito ao Estado de São Paulo, mas que mostra potencial alterabilidade ante produtos ácidos de limpeza (IPT, 2000; Frasca *et al.*, 2000).

Fonte: IPT (2000), simplificado

Figura 4.1 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado de São Paulo.

4.1.1 Capão Bonito

O município de Capão Bonito está situado no sudeste do Estado, a 220 km da cidade de São Paulo. Neste ocorre a mineração de algumas variações de granitos vermelhos, homogêneos, comercializados sob a designação de Vermelho Capão Bonito.

Esse material é extraído a partir do Granito Capão Bonito, corpo pós-tectônico, diferenciado do embasamento cristalino, presente na área do Complexo Três Córregos (IPT, 1995), dentro do Domínio Açungui. Segundo Chiodi Filho *et al.* (1983), trata-se de rocha isótropa, avermelhada e de granulação grossa, que exhibe características invariáveis por toda extensão do maciço.

Nesta região são comuns campos de matacões, que afloram nos altos

topográficos ou à meia-encosta, em geral, objetos da exploração mineral.

Na maioria das minas, a lavra se dá a partir de matacões, de acordo com procedimento moroso, já obsoleto, mesmo para extração neste tipo de jazimento. Em geral, utiliza-se de marteletes e explosivos para liberar as faces dos blocos, que depois são esquadrejados com o uso de ponteiros (Figura 4.2).

Figura 4.2 –
Esquadrejamento
manual de bloco de
granito em Capão
Bonito, SP.

A prática de lavra semimecanizada, em grandes matacões subaflorantes, já parcialmente abrangendo o maciço granítico (Figura 4.3), é realizada pela empresa Somibrás, por meio do uso de *flame jet* e explosivos, com esquadrejamento dos blocos com marteletes e ponteiros.

Figura 4.3 – Lavra
semimecanizada –
Capão Bonito, SP.

Estas rochas são descritas, petrograficamente, como biotita monzogranitos (IPT, 2000), de cor vermelha a vermelho-amarronzada, homogêneos e de granulação média a grossa. Mostram ligeiras variações nos teores de feldspato potássico (microclínio) e biotita, podendo também ser classificadas de sienogranitos.

Variedades “amarronzadas” mostram-se relativamente mais alteradas intempericamente que as vermelhas. Em geral apresentam hidróxidos de ferro em microfissuras ou impregnando minerais, principalmente os feldspatos.

4.1.2 Região Metropolitana de São Paulo

No município de São Paulo é extraído um granito cinza, homogêneo, designado, conforme o produtor, de Prata Interlagos e Azul Paulista Frente Nova.

São rochas graníticas, intrusivas nos terrenos cristalinos do Domínio Embu. Constituem o Granito Parelheiros, considerado por Vieira (1989 *apud* IPT, 1996) como um corpo autóctone, sin a tardi-tectônico, gerado por anatexia de rochas aluminosas, ou como um corpo híbrido, cálcio-alcálico, de média profundidade, como determinado por Wernick (1984 *apud* IPT, 1996), baseado na tipologia do zircão.

Os Prata Interlagos e Azul Paulista Frente Nova são biotita monzogranitos, de cor cinza-clara amarelada e azulada, respectivamente, e granulação fina a média. Aparentam tratar-se de variedades levemente intemperizadas e inalteradas do mesmo tipo rochoso.

O processo mineiro envolve o aproveitamento de matacões, no qual a rocha é explorada como co-produto da mineração de areia, material presente no manto de alteração rochoso (Figura 4.4).

4.2 Rochas do Estado do Espírito Santo

No Estado do Espírito Santo, atualmente o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil, pois responde por cerca de 50% da produção nacional (Peiter, 2001), há caracteristicamente uma grande variedade de rochas graníticas ou gnáissicas cuja porção comercialmente mais valorizada é a capa intemperizada de cor amarelada.

Figura 4.4 – Aspecto da lavra de matacões do Azul Paulista Frente Nova, em São Paulo, SP.

Esses materiais ocorrem predominantemente na parte norte do Estado, notadamente na região abrangida por Barra do São Francisco, Colatina, Ecoporanga e Nova Venécia. Há muito pouca informação geológica e cartográfica do Estado do Espírito Santo, principalmente relativas a esta porção, com trabalhos de cunho petrológico praticamente ausentes.

Alguns destes tipos rochosos têm apresentado problemas como manchamentos e destacamento de fragmentos minerais da superfície polida (Frasca; Quitete, 1999). Por isto, foram escolhidos para este estudo, independente de antecedentes de alteração, para verificar quais feições petrográficas e/ou mineralógicas estariam favorecendo a alteração dessas rochas.

As rochas amostradas para estudo (Figura 4.5) foram: Arabesco, Santa Cecília e Giallo Veneciano. Esse último, tipo clássico brasileiro, explorado há cerca de 25 anos, com produção quase que exclusivamente voltada para o mercado externo.

O Santa Cecília é um material relativamente novo no mercado (em extração há menos de 10 anos) e com vários relatos de deterioração da superfície polida, após assentamento em piso, com uso de argamassa.

Fonte: Frazão et al. , 1993, simplificado

Figura 4.5 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado do Espírito Santo.

Segundo Almeida; Letwinski (1984), uma das características marcantes desta área é ser constituída quase que exclusivamente de rochas pré-cambrianas e, também, de ser a menos conhecida da região oriental do País, devido a motivos diversos, como a profundidade da alteração intempérica dessas rochas, aliada à escassez de datações radiométricas e de mapeamentos geológicos de detalhe. Esta assertiva parece perdurar até hoje, vista a dificuldade encontrada para resgatar trabalhos geológicos recentes.

Em geral, essas rochas são gnaisses monzo a sienograníticos, com biotita, granada e sillimanita, associação metamórfica indicativa de grau médio a alto. Constituem terrenos migmatítico-granulíticos, de idade Transamazônica, rejuvenescidos durante o ciclo Brasileiro (Schobenhau et al., 1984), no setor setentrional da província Mantiqueira (Almeida; Letwinski, 1984).

São lavras em maciço, com uso de métodos modernos, que permitem alta produtividade, chegando-se à produção acima de 1.000 m³/mês em algumas delas. Para o corte e levante da rocha, utiliza-se de fios diamantados ou *flame jet*. O desdobramento em pranchas é realizado por meio do uso de martelos, explosivos

e/ou ponteiros. As Figuras 4.6 a 4.8 ilustram a situação de lavra das minas visitadas.

Figura 4.6 – Lavra do Giallo Veneciano, em Nova Venécia, ES.

Figura 4.7 – Lavra do Arabesco em Nova Venécia, ES.

Figura 4.8 – Mina do Santa Cecília, em Ecoporanga, ES.

Adicionalmente, foi escolhido outro tipo clássico no mercado produtor, um charnockito, comercializado sob a designação Verde Labrador e explorado na região de Baixo Guandu. Este corpo rochoso está incluído no Complexo Migmatítico-Granulítico de Minas Gerais (Schobenhau *et al.*, 1984).

Normalmente durável, é relatado que pode exibir alteração de cor (clareamento) depois de fixado por argamassa, em fachadas.

A lavra é semimecanizada, com corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento com uso de marteletes e de ponteiros. A exploração dá-se em um alto topográfico, com algum capeamento. Os blocos são lançados por gravidade até cotas mais baixas, de onde são transportados para beneficiamento (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Aspecto da lavra do Verde Labrador, Baixo Guandu, ES. Em parte, ainda explorado a partir de grandes matacões aflorantes em alto topográfico.

4.3 Rochas do Estado da Bahia

Neste Estado foram especialmente escolhidos os granitos Branco Itaúnas e Branco Caravelas, rochas de coloração branca a branca-esverdeada, petrograficamente classificadas de granada gnaisses monzograníticos. O primeiro pode apresentar alteração de cor para amarelo-alaranjado quando em contato com ácidos, em especial o clorídrico, ou quando assentado, em pisos, com argamassa convencional.

Estas rochas são exploradas em Medeiros Neto, região de Teixeira de Freitas, BA (Figura 4.10).

Fonte: Azevedo; Costa (1994), simplificado

Figura 4.10 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado da Bahia.

À semelhança do Espírito Santo, a região aqui amostrada carece de informações geológicas, tanto em escala regional como de detalhe.

É considerada integrante da Província Mantiqueira (Almeida; Letwinski, 1984) e constitui terrenos migmatítico-granulíticos, de idade Transamazônica, rejuvenescidos durante o ciclo Brasileiro (Schobenhau *et al.*, 1984). Barbosa; Dominguez (1996) consideram estes terrenos, também conhecidos como leucogranitos do sul da Bahia, como pertencentes à Província Kinzigítica da Região de Dobramentos Araçuai.

Nas minas visitadas (Figuras 4.11 e 4.12), estavam em prática lavras mecanizadas, com uso de fio diamantado para o corte da rocha e marteletes e explosivos para o desdobramento dos blocos.

Figura 4.11 – Mina do Branco Itaúnas, em Medeiros Neto, BA.

Figura 4.12 – Mina do Branco Caravelas, em Medeiros Neto, BA.

4.4 Rochas do Estado do Ceará

O Estado do Ceará oferece uma grande variedade de rochas ornamentais incluindo vários “granitos brancos”, entre eles o Branco Ceará, um tipo único e que constitui uma das rochas ornamentais brasileiras mais valorizadas nos mercados interno e externo.

Além da escolha desta rocha, também foram selecionados os granitos Branco Cristal Quartz e Branco Savana, de cor branco-rosada; o Rosa Iracema, de cor rosa; o Casablanca, de cor branca com faixas cinzentas e o Falésias, de cor branco-amarelado a amarelo-ferruginoso, com faixas de cor castanho-ferruginosa (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Mapa de localização das pedreiras de rochas ornamentais selecionadas para este estudo, no Estado do Ceará.

Fonte: Roberto (1998), simplificado

Não são comuns patologias relacionadas às rochas amostradas, mas há relatos de mudança de cor do Branco Ceará, após assentamento em piso com argamassa.

Estes materiais rochosos estão inseridos em contextos geológicos distintos, com idade variando do Proterozóico Inferior até ao final do Brasiliano (Roberto, 1998 e Vidal, 1999).

A lavra, em geral, é realizada a partir do maciço rochoso já exposto, pois o capeamento é praticamente inexistente, com o emprego de técnicas modernas de corte e desdobramento.

Em Forquilha, são explorados os granitos Rosa Iracema, Branco Savana e Branco Cristal (também conhecido como Branco Cristal Quartz).

Apesar de serem frentes de lavra geograficamente muito próximas, estas rochas aparentemente apresentam diferenças mineralógicas e texturais. O Branco Savana, provavelmente, é uma variação intempericamente alterada do Rosa Iracema.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram as principais características distintivas dos jazimentos dos Rosa Iracema e Branco Cristal; o primeiro se trata de rocha *in situ*, enquanto o segundo, provavelmente corresponde a blocos provenientes de cotas mais altas.

Figura 4.14 – Mina do granito Rosa Iracema, em Forquilha, CE.

Figura 4.15 – Mina do granito Branco Cristal, em Forquilha, CE.

O Branco Ceará, explorado em Santa Quitéria, também pode ser conhecido por grande variedade de nomes, que às vezes chega a confundir o mercado: Branco Asa Branca, Branco Cotton, Branco Polar, Branco Cristal, entre outros. É um albita granito que constitui o *stock* Morrinhos, alojado no Maciço Granítico-Migmatítico de Santa Quitéria (Brito Neves, 1975 *apud* Mesquita, 2002).

Modernas técnicas de lavra são empregadas para sua extração (Figura 4.16), fio diamantado e marteletes para o corte e massa expansiva para desdobramento. Pás

carregadeiras de grandes dimensões, a exemplo das outras minas no Espírito Santo, Bahia e mesmo Ceará, bem como o acompanhamento das características do maciço com a prática freqüente de sondagens contribuem grandemente para a alta produtividade.

Figura 4.16 – Mina do Branco Ceará, em Santa Quitéria, CE.

O Casablanca, no município de Independência, é um gnaiss monzogranítico, parte integrante dos leptinitos Tróia, de idade Arqueana. Trata-se de seqüência de ortognaisses leucocráticos e anortositos interestratificados com rochas máfico-ultramáficas, que ocuparia a porção central do Maciço de Tróia (Brito Neves, 1975 *apud* Roberto, 1998).

Estão em exploração dois materiais referentes à mesma rocha; um deles equivale à porção sã (Casablanca – Figura 4.17) e o outro à porção intempericamente alterada (Falésias – Figura 4.18). A lavra é realizada por meio de técnicas modernas, já comentadas.

Os corpos ocorrem geograficamente próximos, separados por drenagem, que provavelmente condicionou o fenômeno intempérico só em parte do maciço.

Figura 4.17 – Mina do Casablanca, em Independência, CE.

Figura 4.18 – Mina do Falésias, em Independência, CE.

CAPÍTULO 5

TRABALHOS DE LABORATÓRIO

O principal enfoque da pesquisa desenvolvida foi a concepção e realização de um conjunto de ensaios, análises e determinações laboratoriais visando ao conhecimento dos parâmetros físicos, químicos e mecânicos, que possam ser modificados em situações química ou fisicamente agressivas.

Os trabalhos laboratoriais realizados para alcançar os objetivos propostos abrangeram estudo das propriedades petrográficas, mineralógicas e químicas; determinações de resistências à compressão e flexão e a simulação da ação climática (choque térmico), de poluentes dispersos na atmosfera (câmaras de dióxido de enxofre), de atmosferas agressivas (câmaras de névoa salina) e da ação de eflorescências (imersão parcial em soluções ácida e alcalina).

Determinações de resistência mecânica, de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais, de densidade aparente e de absorção de água, nos corpos-de-prova após os ensaios de alteração foram os parâmetros de controle das alterações e/ou degradações ocorridas.

Tais informações subsidiaram, então, as verificações das hipóteses estabelecidas e fundamentaram as proposições acerca de aspectos condicionantes da alterabilidade de tipos rochosos graníticos.

5.1 Análises Petrográficas e Mineralógicas

As análises petrográficas foram realizadas para determinação da natureza, mineralogia e classificação da rocha. As descrições enfatizaram a presença de minerais e feições de alteração, bem como aqueles potencialmente alteráveis perante as solicitações de beneficiamento e uso, que possam afetar a durabilidade e aparência estética da rocha.

É uma ferramenta muito importante para análise dos dados tecnológicos, esclarecendo freqüentemente as diferentes propriedades físicas e/ou mecânicas de rochas aparentemente semelhantes. Também é essencial para diagnosticar e caracterizar as deteriorações de rochas.

A análise fundamenta-se na observação de seções delgadas das amostras, escolhidas e confeccionadas segundo os critérios descritos a seguir:

- seleção da área representativa do aspecto geral da rocha. Nas rochas gnáissicas foi considerado plano de maior isorientação mineral;
- antes da confecção das seções delgadas, as amostras foram impregnadas a vácuo, com resina epóxi à qual foram acrescentados corantes (tipo Oracet ou Orazol), de forma a destacar as microdescontinuidades presentes na rocha quando examinada por microscopia óptica;
- foram confeccionadas lâminas especiais, a partir de porções selecionadas nos blocos, com dimensões de 20 mm x 40 mm. A espessura de estudo foi de aproximadamente 30 μm ;
- também foram confeccionadas lâminas delgadas a partir de corpos-de-prova que exibiram modificações moderadas a intensas, após os ensaios de alteração acelerada.

Após sua preparação, foram estudadas ao microscópio óptico de luz transmitida, segundo as diretrizes básicas das normas ABNT NBR 12 768 (ABNT, 1992c) e BS EN 12 407 (BSI, 2000).

As técnicas auxiliares geralmente utilizadas para a identificação e quantificação de minerais foram: ensaios de coloração seletiva de feldspatos e difratometria de raios X.

A classificação petrográfica, para as rochas graníticas estudadas, baseou-se em Le Maitre (1989), Streckeisen (1975) e Winkler (1976).

A classificação do tamanho de grãos adotada seguiu os limites usuais de petrografia, conforme Frascá; Sartori (1998) (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Classificação do tamanho de grãos adotada nas descrições petrográficas

GRANULAÇÃO	TAMANHO (mm)
muito grossa	> 30
grossa	5 - 30
média	1 - 5
finha	< 1

As feições consideradas potencialmente qualificadoras, ou seja, aquelas que foram selecionadas como principais determinantes da alterabilidade da rocha foram:

- grau de microfraturamento e possíveis incrementos derivados dos processos de beneficiamento;
- presença de minerais em desequilíbrio, instáveis e/ou alterados;
- heterogeneidade textural e granulométrica;
- tamanho dos grãos.

5.1.1 Ensaios de coloração seletiva de feldspatos

A coloração seletiva foi efetuada em amostras de mão, com o objetivo de melhor visualizar e quantificar feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, constituintes essenciais das rochas graníticas estudadas.

O método adotado baseia-se em Rodrigues; Moraes (1978). Consiste em mergulhar uma face da rocha, previamente lixada, em contato com ácido hidrofúorídrico e, em seguida, com solução de cobaltinitrito de sódio. Os feldspatos reagem prontamente com a solução, adquirindo coloração específica (amarela para feldspatos potássicos e branca para os plagioclásios) e distinguindo-se dos demais, facilitando sua identificação e quantificação.

Dada a granulação geralmente grossa dos minerais constituintes das rochas estudadas, privilegiou-se a quantificação dos minerais em amostras de mão submetidas a ensaio de coloração seletiva para feldspatos, utilizando-se folha de acetato com finas linhas milimetradas.

5.1.2 Análises mineralógicas por difratometria de raios X

A difratometria de raios X foi utilizada para a identificação de minerais de argila ou secundários, resultantes da alteração da rocha tanto *in situ*, como nos ensaios de alteração acelerada; e de sais formados nas eflorescências das rochas submetidas a ensaios de imersão parcial e em câmaras climáticas.

Para os minerais de argila, a análise por difratometria de raios X foi realizada em fração da amostra com granulometria menor que 0,002 mm, disposta em lâmina orientada. Para os demais minerais, foi retirada uma porção da amostra, que, depois de homogeneizada, foi disposta em lâminas e submetida à difração de raios X.

A interpretação dos resultados obtidos foi baseada nas fichas de JCPDS (1974, 1980, 1981) e em Thorez (1976).

5.2 Ensaios Tecnológicos

Os ensaios tecnológicos adotados nesse trabalho foram: determinação de índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água), do coeficiente de capilaridade, de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e de resistências à flexão e compressão.

Os dois primeiros fornecem dados considerados como parâmetros físicos (estado fissural e de alteração), que se esperavam refletidos nos parâmetros mecânicos (flexão e compressão) das rochas em estudo.

O coeficiente de capilaridade foi determinado em todas as amostras visando à obtenção de informações complementares, que pudessem auxiliar no entendimento de diferentes respostas às simulações de alteração em amostras com características físicas e petrográficas semelhantes.

Os procedimentos para a execução desses ensaios acham-se descritos a seguir.

5.2.1 Densidade, porosidade e absorção

As propriedades de densidade, porosidade e absorção d'água, geralmente designadas de *índices físicos*, são consideradas, pela grande maioria dos pesquisadores, como características muito influentes na alterabilidade da rocha, pois seriam fatores determinantes para a resistência e durabilidade da rocha (Winkler, 1997).

Os valores de densidade, porosidade e absorção fornecem indicação do estado fissural e de alteração de rochas, que podem ser utilizados para a avaliação comparativa de um conjunto de rochas.

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total, em porcentagem.

Nas rochas ígneas, em geral, há pouco espaço poroso devido à grande pressão e temperatura de sua formação. Os poros são representados principalmente pelas microfissuras, alterações em minerais (ex. núcleos de feldspatos sericitizados), contatos entre grãos, etc.

Nas rochas metamórficas, de composição granítica, a isorientação mineral – lineações, xistosidade, etc. – constitui planos de descontinuidade que podem contribuir para o incremento da porosidade.

A absorção é a capacidade de assimilação ou incorporação de água pela rocha. Segundo Winkler (1997), capilares menores que $0,1\ \mu\text{m}$ não absorvem água, mas, sob vácuo, a maioria deles é preenchida. A norma ASTM C 97 (ASTM, 1996) considera que a determinação dessas propriedades é útil para indicar as diferenças de absorção entre vários tipos de rochas ornamentais ou fornecer elemento comparativo para rochas do mesmo tipo.

Para essa pesquisa foram efetuadas várias determinações de índices físicos, baseadas em diversos procedimentos de ensaio estabelecidos por diferentes entidades normatizadoras: ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a), ASTM C 97 (ASTM, 1996), CEN prEN WI 036 (CEN, 1998a), BS EN 1936 (BSI, 1999a), que serão doravante referidas pelas citações bibliográficas ou pela sigla da instituição de normalização.

Os procedimentos das normas adotadas estão sumariados na Tabela 5.2.

Registra-se que em todas as determinações, independentemente da norma em execução, após a saturação em água, foram obtidos os pesos saturados e submersos (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Determinação do peso submerso em dispositivo hidrostático.

O objetivo da determinação desses parâmetros, por meio das várias normas disponíveis, foi verificar se os resultados são comparáveis e se a incorporação de água nos corpos-de-prova é mais ou menos eficiente conforme a situação de saturação.

A principal modificação introduzida foi a utilização de corpos-de-prova obtidos de ladrilhos polidos das rochas em estudo e nos tamanhos e formatos destes. A razão disso é que o material objeto desse estudo é a alteração acelerada de rochas para revestimento, ou seja, a rocha já beneficiada e acabada; e, portanto, os parâmetros físicos a serem conhecidos e controlados são aqueles referentes a esses materiais.

Tabela 5.2 – Procedimentos e parâmetros obtidos nas determinações de índices físicos.

NORMA		OBJETIVO	
ABNT 12766	determinação da massa específica aparente (seca e saturada com a superfície seca), porosidade e absorção d'água aparentes de rochas, que se destinam ao uso como materiais de revestimento de edificações.		
ASTM C97	testes para determinação da absorção e massa específica de todos os tipos de rochas ornamentais, exceto ardósia.		
prEN WI 036	método para a determinação da absorção de água a pressão atmosférica		
BS EN 1936	método para a determinação da densidade real, densidade aparente, e da porosidade total e aberta de rochas ornamentais (<i>natural stone</i>).		
CORPOS-DE-PROVA (CPs)			
ABNT 12766	dez para cada amostra, com diâmetro ao redor de 7 cm ou peso ao redor de 250g.		
ASTM C97	pelo menos três para cada amostra. Podem ser cubos, prismas, cilindros, com a menor dimensão não inferior a 50,8 mm e a maior não superior a 76,2 mm.		
prEN WI 036	pelo menos seis CPs representativos da rocha testada, com forma cúbica, cilíndrica ou prismática, obtidos por corte em serra ou perfuratriz.		
BS EN 1936	idem prEN WI 036.		
PROCEDIMENTO			
ABNT 12766	secar em estufa por 24h: m_{seca} (massa seca); imersão em água até o tempo total de 24h, ou proceder à saturação com auxílio de bomba de vácuo por 3h: m_{sat} (massa saturada) e m_{sub} (massa submersa).		
ASTM C97	secar os CPs a (60 ± 2) °C por 48h, em estufa ventilada, até massa constante: m_{seca} ; imersão os CPs em água filtrada ou destilada a (22 ± 2) °C por 48h: m_{sat} e m_{sub} .		
prEN WI 036	secar os CPs a (70 ± 5) °C, em estufa ventilada, até massa constante: m_{seca} ; colocar os CPs em bandeja sob suporte plástico e colocar água, na temperatura ambiente, até a metade da altura dos CPs (t_0). Em $t_0 + (60\pm5)$ min, colocar água até $\frac{3}{4}$ da altura CPs e em $t_0 + (120\pm5)$ min imersão completamente os CPs. Continuar o ensaio por (72 ± 2) h: m_{sat}		
BS EN 1936	secar os CPs a (70 ± 5) °C, em estufa ventilada, até massa constante: m_{seca} ; colocar os CPs sob vácuo, por aproximadamente (24 ± 2) h; introduzir água desmineralizada vagarosamente nos recipientes, manter a pressão durante a colocação da água e por (24 ± 2) h subsequentes depois desse período, deixar os CPs por mais (24 ± 2) h à pressão atmosférica: m_{sat} e m_{sub}		
PARÂMETROS OBTIDOS			
ABNT 12766	massa específica aparente seca (kg/m ³)	$\rho_{sec} = m_{seca} / (m_{sat} - m_{sub})$	Eq. 1
	massa específica aparente saturada (kg/m ³)	$\rho_{sat} = m_{sat} / (m_{sat} - m_{sub})$	Eq. 2
	porosidade aparente (%)	$\eta = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{sat} - m_{sub}) \times 100$	Eq. 3
	absorção d'água aparente (%)	$\alpha = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{seca}) \times 100$	Eq. 4
ASTM C97	massa específica (kg/m ³)	$m_{seca} / (m_{sat} - m_{sub}) \times 1000$	Eq. 5
	absorção, em peso (%)	$(m_{sat} - m_{seca}) / (m_{seca}) \times 100$	Eq. 6
prEN WI 036	coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%)	$A_b = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{seca}) \times 100$	Eq. 7
BS EN 1936	volume de poros abertos (mL)	$V_o = (m_{sat} - m_{seca}) / (\rho_{da}) \times 1000$	Eq. 8
	densidade aparente seca (kg/m ³)	$\rho_b = (m_{seca} / (m_{sat} - m_{sub})) \times \rho_{da}$	Eq. 9
	porosidade aberta (%)	$p_o = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{sat} - m_{sub}) \times 100$	Eq. 10

5.2.1.1 Breve consideração sobre métodos e procedimentos adotados

A compilação apresentada anteriormente evidencia que os métodos normatizados disponíveis exibem diferenças que podem ser consideradas sutis, em vista das heterogeneidades do material em análise (a rocha) e as imprecisões inerentes. Outras fontes de imprecisão, mesmo em condições laboratoriais adequadas, são a homogeneidade de temperatura de secagem de corpos-de-prova e de procedimentos para obtenção do peso submerso, a repetitividade das mensurações, as diferenças de manuseio entre operadores e outros.

A norma NBR 12 766 (ABNT, 1992a) não especifica a temperatura de secagem dos corpos-de-prova e não é precisa quanto à sua imersão, em água. Assim, estabeleceu-se o seguinte procedimento no presente trabalho, que é basicamente aquele utilizado pelo Laboratório de Petrologia e Tecnologia de Rochas, da Divisão de Geologia do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas: secagem em estufa ventilada, a (100 ± 5) °C, por 24 h, e imersão em água deionizada, por um tempo total de 24h, após 3h sob vácuo.

Não foi apresentada a massa específica aparente saturada, pois esse parâmetro não é calculado em nenhuma outra norma, e seu valor pode ser facilmente obtido acrescentando-se o valor porcentual da absorção d'água ao da massa específica aparente seca.

Outra consideração é quanto à nomenclatura, pois, conforme o Sistema Internacional de unidades derivadas (<http://physics.nist.gov/cuu/Units/units.html>), o valor fornecido nas normas NBR 12 766 (ABNT, 1992a) e C 97 (ASTM, 1996) como massa específica é mais corretamente designado de densidade de massa (*mass density*), cuja unidade é kg/m³.

No tocante às normas CEN (1998a) e BSI (1999a), verificou-se que a massa dos corpos-de-prova tornava-se constante após cerca de 72 h em estufa ventilada, a (70 ± 5) °C. Dessa forma, para todas as determinações, segundo essas normas, estabeleceu-se que o peso seco foi aquele obtido depois de decorrido esse tempo.

Tendo em vista tais considerações, os resultados obtidos serão apresentados, neste trabalho, conforme a seguir:

- massa específica aparente – também chamada de densidade aparente, no texto – porosidade aparente e absorção d'água: determinadas segundo ABNT

NBR 12 766 (ABNT, 1992a), pois é similar à ASTM C 97 (ASTM, 1996);

- densidade aparente e absorção: determinadas segundo prEN WI 036 (CEN, 1998a);
- densidade aparente, porosidade aberta e poros abertos: determinadas segundo BS EN 1936 (BSI, 1999a).

5.2.2 Capilaridade

Entre os vários agentes deletérios à rocha, a umidade, que pode ter diferentes origens, é considerada um dos mais importantes (Amoroso; Fassina, 1983). Segundo esses autores, na ausência de água não haveria reação química entre os constituintes da rocha (intemperismo); sais solúveis não seriam transportados e não migrariam, cristalizariam ou recrystalizariam; os poluentes atmosféricos não se dissolveriam nas gotas de chuva e não poderiam permanecer em contato com a rocha por tempo suficiente para reagir com os constituintes minerais. Adicionalmente, a água é considerada um fator essencial para a geração de *stress* interno (Torraca, 1979 *apud* Amoroso; Fassina, 1983).

A porosidade da rocha é responsável pela permeabilidade à água, cujo grau depende da estrutura capilar. Isto torna mais importante conhecer a distribuição do tamanho dos poros na rocha do que a porosidade integral, pois o transporte de água é realizado por meio dos capilares.

A sucção capilar é a pressão de sucção, que aumenta com a diminuição do diâmetro dos poros e é muito maior para poros com diâmetro menor que 1 μm . É causada pela atração da água em direção às paredes dos poros. A razão para essa atração é que os corpos porosos são compostos de carbonatos, silicatos, aluminatos ou óxidos, que contêm átomos de oxigênio, com carga elétrica negativa, ou íons hidroxila. Superfícies porosas, com átomos ou grupos polarizados, que têm forte atração eletrostática para moléculas polares, tais como a água, são denominadas superfícies hidrofílicas.

A determinação do coeficiente de absorção d'água por capilaridade baseou-se na norma BS EN 1925 (BSI, 1999b), a despeito da orientação de que essa norma não é adequada para rochas com porosidade aberta <1%, conforme BS EN 1936 (BSI, 1999a).

De acordo com Prof. Fernando L. González-Messones (comunicação pessoal),

da E. T. S. I. de Madri e membro do TC-248 (*Natural Stone*) da CEN, os resultados obtidos nesse ensaio não podem ser considerados em seus valores absolutos, pois a norma não é apropriada para granitos.

Entretanto, em vista da pouca disponibilidade de técnicas e equipamentos para medida de porosidade e/ou permeabilidade de rochas graníticas, a realização desse ensaio buscou, neste trabalho, verificar as variações relativas entre as rochas estudadas e a análise comparativa dos dados.

Novamente, por se focar a determinação de propriedades físicas e mecânicas de rochas beneficiadas (serradas em chapas e polidas), diferentemente das dimensões especificadas na norma, os corpos-de-prova ensaiados mediram 10 cm x 10 cm x 2 ou 3 cm de espessura.

O procedimento de ensaio consistiu em secar o corpo-de-prova, por 72h, a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ em estufa ventilada, para obtenção do peso seco (m_{seca}). Em seguida, foram colocados em bandejas, sobre suporte plástico, estando a base do corpo-de-prova parcial e constantemente imersa (cerca de 4 ± 1 cm) em água. Após a imersão, os corpos-de-prova foram pesados em tempos preestabelecidos: 30 min, 60 min, 180 min, 480 min, 1440 min, 2880 min e 4320 min, ou mais, conforme o material ensaiado.

Os resultados foram apresentados em gráfico exibindo a massa de água absorvida, em gramas, dividida pela área da base imersa, em metros quadrados, em função da raiz quadrada do tempo de cada determinação, em segundos.

O cálculo do coeficiente de absorção d'água por capilaridade foi realizado por meio de regressão não-linear, dada pela equação (BSI, 1999b):

$$y_i = a (1 - e^{-b\sqrt{t_i}}) \quad \text{Equação 11}$$

onde y_i = massa de água absorvida em relação à área da superfície; a = massa de água máxima relacionada à área da superfície imersa da base (g/m^2); b = coeficiente de penetração de água, relacionado ao comprimento, que é a recíproca da raiz quadrada do tempo (t_i), em s.

Pela linearização da função exponencial, a Equação 11 torna-se, conforme BSI (1999b):

$$y_i = a . b \sqrt{t_i} \quad \text{Equação 12}$$

e

$$C_1 \text{ ou } C_2 = a.b$$

Equação 13

sendo C_1 ou C_2 = coeficientes de absorção d'água por capilaridade ($\text{g/m}^2.\text{s}^{1/2}$), determinados perpendicular e paralelamente aos planos de anisotropia da rocha, expressos com três algarismos significativos.

5.2.3 Compressão uniaxial

Este procedimento determina a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos (Figura 5.2).

Figura 5.2 – Corpo-de-prova rompido após aplicação de esforços compressivos.

Segundo ASTM (1990), a resistência à compressão permite a comparação entre rochas semelhantes e é um indicativo de sua integridade física. Também é utilizada para avaliar a resistência da rocha quando empregada como elemento estrutural.

A determinação da resistência à compressão uniaxial foi realizada segundo a norma NBR ABNT 12 767 (ABNT, 1992b), correlata à ASTM C 170 (ASTM, 1990) em dez corpos-de-prova cúbicos, medindo $(7,5 \pm 0,5)$ cm, que tiveram seus topos e bases retificados em torno mecânico, sendo cinco deles ensaiados na condição seca, após 48 h em estufa ventilada, a 100°C , e cinco na condição saturada, após 156 h imersos em água.

O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio marca Maruto, com taxa de carregamento de aproximadamente $0,6 \text{ MPa/s}$.

Quando se tratava de rocha gnáissica, a tensão de ruptura foi determinada paralela e perpendicularmente à direção da estruturação (Figura 5.3). Diferentemente da norma, devido à grande quantidade de corpos-de-prova a serem preparados,

nessas amostras, o ensaio foi realizado em três corpos-de-prova, para cada condição.

Fonte: Winkler (1997) e ASTM (1990).

Figura 5.3 – Detalhe de corpos-de-prova com esforços aplicados perpendicular (à esquerda) e paralelamente (à direita) à estruturação da rocha.

A resistência à compressão é calculada pela relação entre a carga de ruptura e a área do corpo-de-prova onde é aplicada:

$$C = \frac{P}{A}$$

Equação 14

onde C = resistência à compressão (MPa); P = carga total de ruptura (N); A = área de aplicação da carga (mm²).

O ensaio de compressão uniaxial (σ_c) é considerado um dos índices mais confiáveis para a estimativa da resistência das rochas. A atuação do intemperismo resulta em uma imediata e significativa redução na resistência à compressão.

Beavis (1985 *apud* Gupta; Rao, 2000) atribuíram essa queda na resistência à quebra das ligações entre os grãos minerais e ao desenvolvimento de microfraturas. Apesar da pronta resposta da resistência à compressão para a medida de intemperismo de rochas de um mesmo contexto geológico, esses autores, entretanto, apontam que a presença de microfraturas em rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) é mais bem controlada pela resistência à tração do que à compressão.

5.2.4 Flexão

O ensaio de flexão (ou flexão por carregamento em quatro pontos) simula os esforços flexores em placas de rocha, com espessura predeterminada. Os corpos-de-prova são apoiados em dois cutelos de suporte, com dois cutelos de carregamento (Figura 5.4).

Figura 5.4 – Detalhe de corpo-de-prova, obtido de rocha polida, rompido após a aplicação de esforços.

Este ensaio determina a resistência de placas a se curvar ou flexionar, quando submetidas aos esforços de ventos, cargas ou outros, em edificações. Por isso, é particularmente importante para dimensionamento de materiais rochosos a serem utilizados no revestimento de fachadas, especialmente com o uso de sistemas de ancoragem metálica para a sua fixação.

O ensaio foi baseado na norma ASTM C 880 (ASTM, 1998) e realizado em dez corpos-de-prova, confeccionados a partir de ladrilhos polidos das rochas estudadas, com dimensões de 40 cm x 10 cm x espessura do ladrilho. Nas rochas anisotrópicas foram obtidos doze corpos-de-prova, seis deles cortados perpendicularmente à estruturação e seis, segundo a estruturação.

A determinação da resistência à flexão foi determinada na condição seca, sendo metade dos corpos-de-prova no estado natural e metade após a realização de ensaio de choque térmico, conforme será descrito no item 5.3.2. Foi utilizada a máquina de ensaio Tinius Olsen, modelo H10K-S, com taxa de carregamento de 4,14 MPa/min.

A resistência à flexão é calculada a partir da equação:

$$\sigma_f = \frac{3WL}{4bd^2} \quad \text{Equação 15}$$

onde σ_f = resistência à flexão (MPa); W = carga máxima (N); L = distância entre os cutelos inferiores (mm) ($L = 10d$); b = largura do corpo-de-prova (mm) ($b \leq 1,5d$); d = espessura do corpo-de-prova (mm).

5.2.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (Figura 5.5) permite avaliar, indiretamente, o grau de alteração e de coesão das rochas. Sua vantagem reside em ser um dos poucos ensaios não-destrutivos, disponíveis para verificação de propriedades rochosas.

Figura 5.5 – Ilustração dos aparatos e procedimento de medida da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.

$$V_p = L_p / T_p$$

Equação 16

onde, V_p = velocidade de propagação de pulsos de ondas compressivas (longitudinais) (m/s); L = distância percorrida pelo pulso (m); T = tempo efetivo de caminhamento do pulso (s).

Vários fatores influenciam a velocidade de propagação de ondas, entre as quais: tipo de rocha, densidade, tamanho e forma dos grãos, porosidade, anisotropia, temperatura etc. (Kahraman, 2002).

Por isso, é especialmente útil para comparação das propriedades físicas entre corpos-de-prova de uma mesma amostra ou entre amostras petrograficamente semelhantes. Em geral, os valores relativamente mais altos indicam menor grau de alteração e maior coesão entre os minerais formadores.

A determinação da velocidade de propagação de ondas, baseada na norma ASTM D 2 845 (ASTM, 2000), foi efetuada em todos os corpos-de-prova destinados aos ensaios de compressão e flexão, sempre na condição seca, como ferramenta auxiliar na interpretação dos resultados. O aparelho utilizado foi o Portable Ultrasonic

Non-Destructive Digital Indicating Test – PUNDIT.

Nos corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência à compressão, as medidas foram feitas segundo a direção de aplicação da carga, ou seja, nos topos e bases dos cubos. As rochas anisotrópicas tiveram determinações de acordo e perpendicularmente às direções principais de orientação (Figura 5.6).

Figura 5.6 – Ilustração das medidas de velocidade de propagação de ondas em corpos-de-prova cúbicos.

Nos corpos-de-prova destinados ao ensaio de flexão, a velocidade de propagação de ondas foi determinada segundo o comprimento dos corpos-de-prova, conforme ilustrado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Ilustração das medidas de velocidade de propagação de ondas em corpos-de-prova destinados aos ensaios de resistência à flexão.

5.3 Ensaios de Alteração Acelerada

A alteração e deterioração de rochas em edifícios e monumentos, como já comentado, estão ligadas à interação de fatores intrínsecos e extrínsecos.

Dentre as várias causas e mecanismos de deterioração rochosa apresentados

no Capítulo 3, foram considerados relevantes e objetos de investigação a exposição ao meio ambiente, marinhos e poluídos, as variações térmicas e a ação da cristalização de sais, conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Situações potencialmente degradadoras de rochas ornamentais.

SITUAÇÃO	ENSAIO	OBJETIVO
VARIAÇÕES TÉRMICAS	Exposição de ladrilhos polidos e amostras de rochas <i>in natura</i> a choque térmico.	Verificar eventual queda de resistência da rocha, após ciclos de aquecimento e resfriamento imediato em água.
AÇÃO DE POLUENTES	Exposição de ladrilhos polidos a atmosferas ácidas e salinas, em câmaras climáticas.	Simulação de ambientes urbanos poluídos (umidade e H_2SO_4) e marinhos (névoa salina), potencialmente degradadores de materiais rochosos.
AÇÃO DA CRISTALIZAÇÃO DE SAIS	Imersão parcial em soluções ácida e alcalina.	Simulação da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências) na face polida de ladrilhos de rocha para a observação da sua ocorrência e possíveis efeitos deletérios.

Os ensaios de alteração acelerada, em laboratório, simulando essas situações, visaram a fornecer informações quanto à alterabilidade da rocha em relação aos agentes intempéricos, além da investigação dos mecanismos de degradação para cada caso. As simulações de alteração procuraram verificar – dentro de um grupo de rochas graníticas relativamente homogêneas, quanto à composição mineralógica e química, mas heterogêneas em relação à ambiência geológica – as respostas dessas características intrínsecas quando expostas aos mesmos ambientes potencialmente degradadores.

Estes ensaios foram idealizados a partir da verificação de degradações em situações reais, de cujas causas não foram obtidas informações adequadas na literatura, e tampouco de investigações acerca de sua previsibilidade. Foram, dessa forma, realizados ensaios objetivando conhecer as respostas das rochas selecionadas às ações de poluição, ambientes marinhos e variações bruscas de temperatura, que pudessem subsidiar o conhecimento da durabilidade de rochas no revestimento externo de edificações.

Paralelamente, vistos os inúmeros casos de deteriorações por eflorescências, em pisos de residências e edifícios comerciais, foram realizados ensaios, inéditos, de imersão parcial em soluções ácidas e salinas (alcalinas).

Essas investigações buscam, finalmente, inserir os conceitos de durabilidade

para os materiais em questão. A durabilidade de materiais, e mais recentemente de rochas, para construção civil ou em monumentos históricos é de fundamental importância, pois as agressividades do meio ambiente, como exposto no Capítulo 3, estão cada vez mais acentuadas.

Para a análise dos dados foram utilizadas as recomendações da norma ASTM G 169 (ASTM, 2001b), que visa à aplicação de métodos estatísticos práticos para os problemas reais que surgem nos campos da durabilidade e intemperismo. Esses métodos são úteis para tomada de decisões quando os procedimentos são planejados para testar hipóteses com uma única variável dependente.

Em testes de intemperismo e de durabilidade, a variável dependente é considerada a medida quantitativa de uma propriedade como densidade, massa, resistência à tensão etc. Algumas vezes, dados qualitativos como a hierarquização visual constitui a variável dependente e, nesses casos, métodos estatísticos não paramétricos são mais apropriados.

A variável independente é aquela que contribui para a mudança da variável independente e, essencialmente, está sob controle do experimento. Muitas vezes, uma variável não está sob controle do experimento, chamada variável bloqueadora (por exemplo, temperatura e precipitações em experimentos ao meio ambiente), que é lidada pelo fato de todas as amostras terem sido expostas aos mesmos efeitos.

5.3.1 Ensaios em câmaras climáticas

Foram selecionadas para ensaios as câmaras com exposição a SO₂ e à névoa salina.

5.3.1.1 Exposição ao dióxido de enxofre

O ensaio por exposição ao SO₂ baseia-se nas normas ABNT NBR 8 096 (ABNT, 1983a) e DIN 50 018 (DIN, 1997). Consiste em um determinado número de ciclos, de 24 horas cada, nos quais a câmara (Figura 5.8) é mantida aquecida por 8 horas a (40±3) °C, com umidade relativa 100%, desligada e aberta, para ventilação por 16 horas. Após isso, a água da câmara é renovada e inicia-se novo ciclo.

Figura 5.8 – Câmara climática para exposição ao SO₂.

Grossi; Murray (1999) mencionaram, sem outras argumentações ou citações da literatura, que um período de exposição de 30 dias, nessas condições, simula um ano de exposição em área com precipitação média anual de 800 mm.

A concentração de SO₂, na água da bandeja na porção inferior da câmara, estipulada pela norma é de 0,67%, que corresponde ao volume de 2,0 L de SO₂ a ser adicionado a cada 300 L de volume da câmara.

Foram ensaiados três corpos-de-prova medindo 5 cm x 15 cm x 0,5 cm, por amostra. Para cada tipo, foi reservado um corpo-de-prova padrão para controle.

Um dos corpos-de-prova teve a face não-polida e as laterais recobertas por tinta a óleo (Figura 5.9), para verificação de possível influência da exposição de somente uma face do CP (no caso, a face polida) nos resultados do ensaio.

Figura 5.9 – Corpos-de-prova com a face não-polida recoberta com tinta óleo, para exposição ao SO₂.

As inspeções foram realizadas após 16 horas de abertura da câmara; as modificações foram registradas em planilhas, e os corpos-de-prova fotografados. Não houve lavagem dos corpos-de-prova.

5.3.1.2 Exposição à névoa salina

O ensaio de intemperismo artificial por exposição à névoa salina baseou-se nas normas ABNT NBR 8094 (ABNT, 1983b) e ASTM B 117 (ASTM, 1997).

Nesse ensaio, os corpos-de-prova são colocados em suportes na câmara, de modo a ficar com um ângulo de 15° a 30° com a vertical e permitir livre acesso da névoa a todos eles.

A solução salina é preparada dissolvendo-se 5 ± 1 partes, em massa, de cloreto de sódio em 95 ± 1 partes de água. O pH da solução salina deve ser tal que, quando atomizada, a 35°C , a solução tenha pH entre 6,5 e 7,2.

Os corpos-de-prova ficam permanentemente no interior da câmara (Figura 5.10), sendo retirados somente para inspeções periódicas.

Figura 5.10 – Câmara climática de exposição à névoa salina.

À semelhança do ensaio de exposição ao SO_2 , foram ensaiados três corpos-de-prova por amostra selecionada, cada qual medindo 5 cm x 15 cm x 0,5 cm e um corpo-de-prova padrão foi utilizado como controle. Um deles também teve a face não-polida e laterais recobertas por tinta a óleo.

Em cada inspeção, não ultrapassando o período de 30 minutos, os corpos-de-prova foram lavados para eliminação do sal da superfície. As modificações foram registradas em planilhas, e os corpos-de-prova fotografados.

5.3.2 Resistência ao choque térmico

O ensaio de alteração por choque térmico é baseado nos procedimentos

estabelecidos na versão preliminar da norma prEN WI 016 (CEN, 1998b), em elaboração pela CEN.

Visa verificar o decaimento da rocha após ciclos de aquecimento e resfriamento rápido, ou seja, decorrente de variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes, causa de uma das principais degradações de materiais rochosos na construção civil.

González-Messones (2002) recomenda este ensaio para verificação da possível oxidação, em rochas ígneas, e de desagregação, em mármore e calcários.

Nesta pesquisa, cinco a seis (quando obtidos a partir de rochas gnáissicas) corpos-de-prova, no tamanho e formato daqueles submetidos a ensaio de flexão, foram secos em estufa a 100 °C por 24 h (até peso constante). Em cada um deles foi medida a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (VP_i).

O ensaio propriamente dito consistiu em 20 ciclos, definidos pela colocação dos corpos-de-prova por (18 ± 1) h em estufa a 105 °C, em seguida imediatamente submersos em água, a temperatura ambiente, por $(6 \pm 0,5)$ h.

Após o 20º ciclo, os corpos-de-prova foram secos em estufa, a 100 °C, durante 24 h (até peso constante). As velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais foram novamente medidas (VP_f).

Todos os corpos-de-prova foram, então, submetidos a ensaio de flexão.

O decaimento por choque térmico é verificado pelas expressões:

$$\Delta_{RF} = \frac{RF_f - RF_i}{RF_i} \times 100 \quad \text{Equação 17}$$

onde Δ_{RF} = variação de resistência à flexão (%); RF_f = resistência à flexão após o ensaio (MPa); RF_i = resistência à flexão antes do ensaio (MPa).

$$\Delta_{VP} = \frac{VP_f - VP_i}{VP_i} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

onde Δ_{VP} = variação de velocidade de propagação de ondas (%); VP_f = velocidade de propagação de ondas após o ensaio (m/s); VP_i = de propagação de ondas antes do ensaio (m/s).

$$\Delta_m = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 19}$$

onde Δ_m = variação de massa (%); m_f = massa após o ensaio (g); m_i = massa antes do ensaio (g).

5.3.3 Ensaio de alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalinas

Visando simular a exposição da rocha a ambientes quimicamente agressivos, ácidos e alcalinos, os corpos-de-prova foram colocados em contato com soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4 – 1%), com pH 1 a 1,5, e de hidróxido de sódio (NaOH – 1N), com pH 13,5 a 14.

A escolha do ácido sulfúrico baseou-se nas informações relativas aos poluentes atmosféricos, que reportam o ataque ácido por SO_2 como um dos maiores agentes degradadores de rocha.

O ensaio consiste em deixar os corpos-de-prova parcialmente submersos (até cerca de 1 cm, a partir da base), em recipientes plásticos, de fundo liso e reto, contendo as soluções mencionadas. As faces polidas ficaram expostas ao meio ambiente, para que as eventuais modificações fossem aí registradas. Foi realizado em sala desumidificada, com temperatura de cerca de 25°C.

A duração foi de 30 dias consecutivos, com monitoramento diário e troca de soluções em dias alternados, com o registro das modificações. Após esse período, as soluções foram retiradas, e os corpos-de-prova continuaram no mesmo ambiente por um período de mais 30 dias, com monitoramento periódico, até sua secagem total.

Somente após esse período, os corpos-de-prova foram lavados com água deionizada e secados para verificação das deteriorações ocorridas, por comparação com suas contrapartes. Os sais formados foram identificados por difração de raios X.

Na imersão parcial, as eflorescências se desenvolvem na zona capilar (Benavente *et al.*, 2001), conforme ilustrado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Ilustração esquemática das zonas de imersão e capilar.

O mecanismo consiste na migração da solução, pela rocha, por capilaridade, da zona de imersão para a zona capilar, na qual, por evaporação e supersaturação, ocorre a cristalização dos sais.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados mostrados a seguir, foram analisados e discutidos à luz das informações anteriormente apresentadas, enfocando principalmente as características intrínsecas dos diferentes materiais estudados e as tendências que possam acrescentar conhecimento ao que já foi abordado ou de importância na alterabilidade deles.

No texto, são exibidos os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos principais parâmetros obtidos. Os resultados completos podem ser consultados nos ANEXOS B a F.

Sucintamente, os tópicos e aspectos abordados foram os seguintes:

- caracterização petrográfica e química: são apresentadas as características petrográficas importantes em relação a este estudo, quais sejam: tipo, tamanho e quantidade de minerais formadores de rocha, suas inter-relações e alterações, deformações e fissuramento.

A composição química é utilizada como um elemento qualificador, adicional, para complementar a caracterização da rocha e auxiliar na avaliação dos ensaios de alteração acelerada;

- índices físicos: apresentação e avaliação dos dados obtidos nas determinações de massa específica (densidade) aparente, porosidade e absorção pelos diferentes métodos adotados. Caracterização das propriedades intrínsecas das rochas estudadas;
- propriedades mecânicas: apresentação das resistências à compressão e flexão, obtidas no material *in natura* e beneficiado, respectivamente. Também foram realizados testes em corpos-de-prova dos mesmos materiais, submetidos à saturação em água e a ciclos de aquecimento e resfriamento (choque térmico), cujos resultados são apresentados e discutidos;
- alteração acelerada: os resultados dos diversos ensaios foram comparados entre si, com os dados dos ensaios físicos e mecânicos e com as propriedades petrográficas. Modificações significantes foram verificadas por microscopia óptica.

As amostras submetidas a esses ensaios foram designadas e agrupadas conforme mostrado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Designações adotadas para as amostras estudadas.

GRUPO DE AMOSTRAS	DESIGNAÇÃO	NOME COMERCIAL	COR PREDOMINANTE
1	LBD	Verde Labrador	verde
2	VCB-1	Capão Bonito – 1	vermelha
	VCB-2	Capão Bonito – 2	vermelha
	VCB-3	Capão Bonito – 3	vermelha
3	RIC	Rosa Iracema	rosa
	BCR	Branco Cristal Quartz	branco-rosada
	BSV	Branco Savana	branco-rosada
4	PIT	Prata Interlagos	cinza
	AZF	Azul Paulista Frente Nova	cinza
5	BCE	Branco Ceará	branca
6	ITN-1	Branco Itaúnas (Microponto II)	branco-amarelada
	ITN-2	Branco Itaúnas (Microponto III)	branco-amarelada
	CRV	Branco Caravelas	branco-esverdeada
7	CSB	Casablanca	branca, com faixas cinza
	FLS	Falésias	branco-amarelada, com faixas amarelo-ferrugem
8	GVN	Giallo Veneciano	amarela
	ARB	Arabesco	verde-clara
	SCC	Santa Cecília	amarela

Os oito grupos foram discriminados com base no critério de proximidade geológica e/ou geográfica e cores predominantes.

Este grupamento procura facilitar a apresentação e análise dos dados, ao mesmo tempo em que discrimina comercialmente os diferentes grupos de rochas. A relevância disso é que se procurou, neste trabalho, conjugar as generalizações praticadas pelo mercado com o conhecimento científico e tecnológico, de forma a proporcionar a aplicação mais direta dos resultados obtidos.

A regressão linear e a determinação de coeficientes de correlação (R) – Pearson – foram as técnicas estatísticas utilizadas. Para a análise conjunta dos resultados obtidos nesse trabalho, consideraram-se os níveis de correlação conforme Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Níveis de correlação considerados nesse trabalho.

valor	correlação
$R = 0$	nula
$0 < R < 0,30$	muito fraca
$0,30 < R < 0,50$	fraca
$0,50 < R < 0,70$	média
$0,70 < R < 0,90$	forte
$0,90 < R < 1$	muito forte
$R = 1$	perfeita

6.1 Propriedades Petrográficas e Químicas

A análise petrográfica enfocou, principalmente, a identificação, quantificação e determinação das inter-relações dos minerais essenciais; a observação e descrição das feições julgadas, *a priori*, condicionadoras de degradações nos ensaios de alteração acelerada: fissuramento, granulação, alterações preexistentes, presença de minerais potencialmente instáveis e outras. Considerou-se que estas informações são essenciais para a caracterização petrográfica das rochas e fundamentais para estudos de alterabilidade e diagnósticos de degradação rochosa.

Embora pouco utilizada, especialmente no Brasil, a composição química da rocha é um importante complemento aos dados petrográficos. Devido à sua ainda incipiente utilização na caracterização de rochas ornamentais, não há disponibilidade de orientações quanto ao uso adequado dessas informações visando à alterabilidade. Desta forma, neste trabalho procurou-se estabelecer as tendências das diferentes rochas e sua integração com os resultados dos vários ensaios realizados, destacadamente os de alteração acelerada.

6.1.1 Características petrográficas

A análise petrográfica, nesse estudo, compreendeu os aspectos descritivos: tipo e quantidade dos minerais essenciais, acessórios e de alteração, relações texturais, granulação, com especial enfoque nos padrões de fissuramento e de alteração intempérica.

Por se tratar de uma pesquisa de caráter experimental, em que se utilizaram diferentes tipos de rochas graníticas para verificação de possíveis condicionantes de

alterações, privilegiou-se o estudo comparativo àquele focado nas peculiaridades petrológicas de cada tipo rochosos selecionado.

Um outro enfoque, contribuindo para futuras proposições normativas, foi o de procurar padronizar as descrições de modo a torná-las suficientemente informativas da rocha analisada, ao mesmo tempo em que subsidiem a comparação com as outras rochas em estudo. As recomendações da norma BS EN 12 407 (BSI, 2000) auxiliaram a definição e priorização dos principais aspectos abordados.

Uma grande dificuldade na descrição petrográfica é a padronização da abordagem de dois aspectos fundamentais: grau de alteração intempérica e grau de microfissuramento*. Mesmo quando se efetuam análises modais, que sem dúvida trazem maior precisão que estimativas visuais, permanece um grau de incerteza relativo à padronização do que se está computando na contagem.

Com base na experiência em análises petrográficas com esse enfoque, é aqui proposta a graduação dessas feições em quatro classes, quando avaliada, preferencialmente, em lupa estereoscópica binocular, no aumento aproximado de 50X, conforme Tabela 6.3.

Deve ser ressaltado que essa graduação se refere a rochas que, do ponto de vista da geologia de engenharia e da geotecnia, são consideradas frescas ou levemente alteradas, como pode ser observado na Tabela 6.4, compilada de Gupta; Rao (2000) e Frazão (2002).

A despeito da importância geológica das alterações hidrotermais e metassomáticas, não lhes foram dadas o mesmo destaque que para a alteração intempérica, visto que elas não estão relacionadas às modificações na porosidade ou nas resistências mecânicas aqui investigadas.

* De acordo com Houaiss; Villar (2001): Fissura "GEOL. Qualquer fratura ou fenda pouco alargada em terreno, rocha ou mesmo mineral". Segundo essa mesma fonte: Fissuração "condição do que está rachado ou fendido"; Fissuramento "ação ou efeito de fissurar". Ou seja, o mais correto parece ser o termo fissuração, a despeito do uso já tradicional do termo fissuramento, também aqui empregado.

Tabela 6.3 – Graus de alteração intempérica e de microfissuramento adotados nesse trabalho.

GRAU	ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA	MICROFISSURAMENTO
Incipiente	Cristais praticamente límpidos e sem presença de hidróxidos de ferro, mesmo em fissuras.	fissuras praticamente imperceptíveis.
Fraco	Muito leve turbidez de cristais de plagioclásio, incipientes modificações em minerais máficos e poucos hidróxidos de ferro associados.	microfissuras perceptíveis; predominantemente intragranulares, fechadas e, freqüentemente, sem preenchimento
Moderado	Cristais de plagioclásio estão, especialmente nos núcleos, turvos por argilominerais, freqüentemente com carbonato, sericita e hidróxidos de ferro associados. Biotita está parcialmente alterada, com liberação de hidróxidos de ferro. Outros minerais também podem estar parcialmente alterados, como, por exemplo, sillimanita, em filossilicatos secundários.	microfissuras totalmente perceptíveis; predominantemente intra e intergranulares, preenchidas, mas pouco largas.
Forte	Feldspatos, especialmente plagioclásio, estão parcialmente alterados em argilominerais, com sericita, carbonato e hidróxidos de ferro associados. Demais minerais, exceto quartzo, apresentam-se, em diferentes intensidades, também parcial a totalmente alterados, principalmente em argilominerais e hidróxidos de ferro.	microfissuras totalmente perceptíveis, trans, inter e intragranulares, preenchidas e largas.

Tabela 6.4 – Categorias e descrição de granitos alterados.

Graduações	Descrição da identificação visual
Rocha sã (A_0)	Sem indícios macroscópicos de alteração. Sem descoloração. Grãos têm brilho vítreo. Virtualmente sem fraturas presentes. Quebra-se com dificuldade ao golpe de martelo.
Pouco alterada (A_1)	Alteração incipiente dos minerais; em geral a rocha exibe pouca descoloração. Oxidação incipiente. Minerais estão foscos, mas os grãos estão firmemente ligados. Alguns feldspatos podem estar pulverulentos. Finas fraturas são visíveis, em pequena quantidade.
Moderadamente alterada (A_2)	Levemente oxidadas. Minerais medianamente alterados, geralmente sem brilho. Poucos grãos têm aparência arenosa. Microfissuras alteradas, mas fechadas, são visíveis. Plagioclásio está alterado. Feldspatos podem ser riscados. A rocha pode ser quebrada com um golpe firme de martelo.
Intensamente alterada (A_3)	Descolorida e fortemente oxidada, com cor marrom clara. Minerais estão muito alterados, muitas vezes friáveis e pulverulentos. Microfissuras estão preenchidas por argilominerais. Maioria dos feldspatos está decomposta.
Completamente alterada (A_4)	Completamente descolorida. Pontos de argila branca estão presentes. Minerais estão totalmente friáveis. Microfissuras estão abertas ou preenchidas por argila. Amostras podem ser destorroadas com os dedos.
Solo residual (A_5)	Textura original desaparece. A rocha torna-se granular, virtualmente sem resistência.

Fonte: Gupta; Rao (2000) e Frazão (2002).

A quantificação dos minerais essenciais foi realizada por meio da avaliação visual da distribuição dos minerais na rocha, conforme item 5.1.1, após ensaio de coloração seletiva de feldspatos (Figura 6.1).

Figura 6.1 – Resultados da coloração seletiva para feldspatos.

A análise modal, baseada nas recomendações de Jones (1987), foi feita com o intuito de comparar as porcentagens computadas por esses dois métodos. Contemplou a contagem de 600 a 800 pontos, conforme a granulação da rocha, e cujos resultados são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resultados da quantificação de minerais.

	Q		PI		KF		Gr		Bi		Mu
	CS	AM	CS	AM	CS	AM	CS	AM	CS	AM	AM
LBD	25	13	18	36	57	44	0	6	0	2	
VCB-1	33	32	14	19	50	45			3	5	
VCB-2	28	30	17	16	51	50			4	4	
VCB-3	32	30	16	24	51	41				6	
RIC	34	35	22	27	38	35			5	3	
BSV	30	37	26	27	43	32			1	4	
BCR	31	33	29	42	39	22			1	3	
PIT	27	43	29	26	38	25			5	4	2
AZF	30	30	31	33	37	31			3	5	1
BCE	28	42	36	22	30	30			5	0	6
ITN-1	25	33	25	11	50	50		2	0	4	
ITN-2	25	35	31	28	45	36			0	1	1
CVR	11	23	0	1	87	75	3	1			
CSB - A	15	49	33	31	48	5			5	2	13
CSB - B	9	30	9	15	77	49			5	1	5
FLS - A	26	46	49	20	22	22			3	1	10
FLS - B	3	-	18	-	67	-	-	-	12	-	-
ARB	35	48	22	8	39	39	3	3		2	1
SCC	24	36	18	12	54	44	2	6	3	1	

Nota: CS = contagem em amostra de mão com coloração seletiva de feldspatos; AM = análise modal. Q = quartzo (%); PI = plagioclásio (%); KF = feldspato potássico (%); Gr = granada (%); Bi = biotita (%); Mu = muscovita (%).

Teoricamente, é esperado que as contagens realizadas pelos dois procedimentos apresentem valores próximos ou alguma correlação positiva. Para a verificação disso, foram calculadas as correlações entre os resultados obtidos, conforme apresentados na Figura 6.2.

As correlações obtidas são positivas; muito fraca para quartzo, fraca a média para plagioclásio e média a forte para feldspato alcalino. A distribuição dos grãos na rocha, seus tamanhos relativos e a área de contagem abrangida nesses dois procedimentos parecem ser a explicação mais adequada para as diferenças encontradas. A maior área de amostragem na contagem de minerais em amostras de mão, submetidas a ensaio de coloração seletiva, reflete melhor a composição global da rocha,

Figura 6.2 – Correlações entre contagens em amostra de mão e análise modais para quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino.

A granulação média a grossa das rochas em estudo, as maiores dimensões e a menores variações de tamanhos de feldspato alcalino e plagioclásio, como mostrado na Tabela 6.6 e na Figura 6.3, também colaboraram para que a análise modal, freqüentemente, não fornecesse a composição mineralógica mais representativa da rocha.

Tabela 6.6 – Variações de tamanho de grão e tamanho de grão predominante.

	Q		PI		KF		Bi	
	Δ_{gr}	pred.	Δ_{gr}	pred.	Δ_{gr}	pred.	Δ_{gr}	pred.
LBD	1-18	8	1-18	5	4-23	15	1-3	2
VCB-1	2-5	3	1-4	2	2-18	7	2	-
VCB-2	1-8	6	5	2	5-15	7	1-3	1,5
VCB-3	1-8	3	1-6	2,5	3-18	7	1	1
RIC	1-8	2,5	1-4	2,5	4-16	8	0,5-2,5	1,5
BSV	1-8	5	0,5-3,5	1,5	2-8	5	0,5-3	1
BCR	1-6	2	1-8	5	3-12	5	0,5-2,5	1
PIT	0,5-3,0	1	0,5-5,0	1,5	1-8	3	0,5-1,5	1
AZF	1-5	2,5	0,5-3,5	1,5	1-18	5	1,5-2,5	1,5
BCE	3-11	8	0,5-2,0	1,5	6-11	8	-	-
ITN-1	1-15	5	1-3	3	1-8	7	-	-
ITN-2	3-14	8	1-3	1,5	1-8	7	-	-
CRV	0,1-3,5	0,5	0,2-1,0	0,2	0,3-2,0	0,5	-	-
CSB A	0,5-15	4	1-15	5	1-7	3	2,5	-
CSB B	1	1	1-9	2	1-9	2,5	2,5	-
FLS	0,5-1,5	1	2	2	1,6	2,5	1	-
GVN	0,5-15,0	6	1-10	8	4-30	15	0,5-3,0	-
ARB	1-25	8	1-9	5	15	15	1	-
SCC	0,5-15,0	7	2-10	3	2-7	4	0,5-2,5	1

Nota: Δ_{gr} = variação de tamanho dos grãos (mm); pred. = tamanho grão predominante (mm). Demais símbolos, iguais à Tab. 6.5.

Figura 6.3 – Distribuição do tamanho de quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino nas diferentes rochas estudadas.

O feldspato alcalino tende a apresentar o maior tamanho de grão, o plagioclásio, o menor e o quartzo, a maior variação granulométrica nas rochas estudadas, aspectos que devem influenciar o comportamento das rochas quanto às suas resistências mecânicas e alterabilidade.

Os resultados das análises petrográficas estão mostrados a seguir. A composição mineralógica apresentada nas tabelas síntese é o resultado dos dados obtidos nas contagens em amostra de mão, corrigidos pelos teores dos outros minerais observados nas várias lâminas delgadas confeccionadas.

6.1.1.1 Vermelho Capão Bonito

Na região de Capão Bonito, Estado de São Paulo, no contexto do corpo granítico Capão Bonito, ocorrem granitos vermelhos a vermelho amarronzados, homogêneos e de granulação média a grossa, comercialmente conhecidos como Vermelho Capão Bonito (VCB-1, VCB-2 e VCB-3). Petrograficamente classificam-se como biotita sienogranitos, muitas vezes com teores de plagioclásio limítrofes com o campo dos monzogranitos (Tabela 6.7).

Tabela 6.7 – Resultados de análises petrográficas das amostras VCB-1, VCB-2 e VCB-3.

AMOSTRA		VCB-1	VCB-2	VCB-3
cor	natural	vermelho médio a escuro	vermelho-claro	vermelho-claro amarronzado
	polida	vermelho médio a escuro	vermelho-claro	vermelho-claro amarronzado
estrutura		maciça	maciça	maciça
textura		inequigranular hipidiomórfica	inequigranular hipidiomórfica	inequigranular hipidiomórfica
granulação		média a grossa: em geral entre 3-8 mm; microclínio, até 18 mm	média a predominantemente grossa: 5-15 mm	média a grossa: 2-10 mm; microclínio até 18 mm
mineralogia (%)				
quartzo		30-35	30	30
plagioclásio		15 (oligoclásio)	15 (oligoclásio)	15-20 (oligoclásio)
microclínio		45 (micropertítico)	45-50 (micropertítico)	40-45 (pertítico)
biotita		5-10	5-10	10
acessórios (tr)		opacos, apatita, zircão, fluorita	titanita, opacos, fluorita, apatita, zircão	opacos, apatita, zircão, fluorita, muscovita, biotita verde
secundários		sericita, clorita, carbonato, hidróxidos de ferro, argilominerais	clorita, sericita, carbonato, hidróxidos de ferro, argilominerais	sericita, clorita, carbonato, hidróxidos de ferro, argilominerais
alteração		fraca a moderada	fraca a moderada	fraca a moderada
intempérica		plagioclásio: parcialmente alterado em argilominerais, hidróxidos de ferro e carbonato; biotita: localmente, alterada em clorita; hidróxidos de ferro: também ocorrem em fissuras próximas a biotita; carbonato: em espaços intergranulares ou em biotita.	plagioclásio: turvo por argilominerais e hidróxidos de ferro, a parcialmente alterado em sericita; biotita: parcial a totalmente alterada em clorita.	plagioclásio: intensamente alterado, a partir dos núcleos, em sericita e turvo por argilominerais e hidróxidos de ferro; biotita: parcial a, localmente, totalmente alterada em clorita e hidróxidos de ferro, que também ocupam fissuras próximas.
hidrotermal		-	-	-
fissuramento		fraco a moderado	fraco a moderado	fraco
intragranulares		x (predominante) – quartzo e plagioclásio	x (predominante) – quartzo e feldspatos	x (predominante) – quartzo e feldspatos
intergranulares		x (predominante) – quartzo	x (quartzo)	x (quartzo)
transgranulares		x (quartzo e feldspatos)	x (raras)	x (raras)
preenchimento		carbonato, filossilicatos e hidróxidos de ferro	hidróxidos de ferro, carbonato e filossilicatos	filossilicatos e hidróxidos de ferro
classificação		(Biotita) Sienogranito	(Biotita) Sienogranito	Biotita Sienogranito

Exibem arranjo textural inequigranular hipidiomórfico, caracterizado por cristais anédricos de quartzo e subédricos de microclínio (micropertítico) e plagioclásio, esses freqüentemente tabulares (Figura 6.4).

polarizadores cruzados

Figura 6.4 – Amostra VCB-3. Aspecto geral do granito Vermelho Capão Bonito. Notar cristais tabulares de plagioclásio (pl) com os núcleos alterados e com hidróxidos de ferro associados.

Fraca a moderada alteração intempérica é evidenciada pela alteração de plagioclásio, especialmente nos núcleos e nas micropertitas, em argilominerais, hidróxidos de ferro e sericita/muscovita (Figura 6.5). Segundo identificação mineralógica por difratometria de raios X, em porção retirada dos núcleos de feldspatos alterados, os argilominerais seriam do grupo da illita e clorita (VCB-2).

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

Figura 6.5 – Amostra VCB-3. Aspecto de cristal de plagioclásio alterado em argilominerais, hidróxidos de ferro e sericita/muscovita.

Hidróxidos de ferro presentes nas alterações de plagioclásio podem também ser observados em amostra de mão e fornecem a coloração avermelhada característica.

Algumas feições macroscopicamente distintas entre as amostras não puderam ser reconhecidas ao microscópio, tampouco diferenças nos padrões de alteração intempérica. A VCB-2 é mais grossa e exibe maior homogeneidade granulométrica que as outras duas.

No tocante ao fissuramento, esse varia de fraco a moderado, predominantemente do tipo intra e intergranular, afetando quartzo e feldspatos (plagioclásio, em especial). As fissuras acham-se preenchidas por filossilicatos, carbonato e hidróxidos de ferro.

Fluorita é relativamente comum, ocorrendo em vênulas ou como inclusões em feldspatos.

6.1.1.2 Azul Paulista Frente Nova e Prata Interlagos

Também do Estado de São Paulo, foram estudadas as rochas comercialmente designadas de Azul Paulista Frente Nova (AZF) e Prata Interlagos (PIT), de cor cinza levemente azulado e amarelado, respectivamente, cujas características petrográficas encontram-se sintetizadas na Tabela 6.8.

São biotita monzogranitos, de granulação fina a média e arranjo textural granular hipidiomófico, caracterizado por cristais anédricos de quartzo (geralmente em agregados granoblásticos finos, especialmente na PIT) e subédricos de microclínio e plagioclásio (freqüentemente tabulares) (Figuras 6.6 e 6.7).

polarizadores cruzados

Figura 6.6 – Amostra AZF. Aspecto geral do granito Azul Paulista Frente Nova. Notar cristais de plagioclásio com núcleos alterados em argilominerais e sericita. Fissuras mais largas cortam feldspatos e quartzo.

polarizadores cruzados

Figura 6.7 – Amostra PIT. Aspecto geral do granito Prata Interlagos. Detalhe de núcleos de feldspatos alterados, especialmente segundo as linhas de crescimento.

Tabela 6.8 – Resultados de análises petrográficas das amostras AZF, PIT e LBD.

AMOSTRA		AZF	PIT	LBD
cor	natural	cinza-claro azulado	cinza-claro amarelado	verde-escuro acastanhado
	polida	cinza-médio azulado	cinza-médio amarelado	verde-escuro acastanhado
estrutura		maciça	maciça	maciça
textura		granular hipidiomórfica	granular hipidiomórfica	inequigranular hipidiomórfica
granulação		fin a média: 0,5-5 mm	fin a média: 0,5-3 mm, localmente até 6 mm	fin a grossa, variando de 2-25 mm (predomina ao redor de 10 mm)
mineralogia (%)				
quartzo		30	30	15-20
plagioclásio		25-30 (oligoclásio)	25-30 (oligoclásio)	20 (oligoclásio-andesina)
microclínio		30 (micropertítico)	30	40 (feldspato potássico cripto a micropertítico)
biotita		10	10	5
hiperstênio		-	-	5
granada		-	-	5
opacos		-	-	<5
hornblenda		-	-	5
acessórios		zircão, apatita, turmalina, fluorita (<5)	zircão, apatita, fluorita, turmalina, opacos (<5)	opacos, allanita, apatita, zircão (tr)
secundários		sericita, muscovita, carbonato, argilominerais, clorita, hidróxidos de ferro	clorita, sericita, muscovita, carbonato, argilominerais, hidróxidos de ferro	filossilicatos, carbonato, hidróxidos de ferro
alteração		fraca a moderada	fraca a moderada	moderada
intempérica		núcleos de cristais de plagioclásio: parcial a totalmente alterados em argilominerais, sericita e carbonato, com muscovita e hidróxidos de ferro associados; biotita: localmente, altera-se em clorita.	núcleos de cristais de plagioclásio: alterados em sericita e argilominerais, com muscovita, hidróxidos de ferro e carbonato associados; biotita: parcialmente alterada em clorita.	feldspatos: moderadamente alterados em argilominerais e sericita, com hidróxidos de ferro associados; hiperstênio: fortemente alterado ao longo e próximo de clivagens.
hidrotermal		incipiente	incipiente	-
fissuramento		fraco	fraco	forte
intragranulares		x (predominante)	x (predominante)	x
intergranulares		x	x	-
transgranulares		-	-	x (predominante) – quartzo e feldspatos
preenchimento		localmente, por argilominerais e hidróxidos de ferro	localmente, por argilominerais, hidróxidos de ferro e carbonato	filossilicatos, hidróxidos de ferro e carbonato
classificação		Biotita Monzogranito	Biotita Monzogranito	Charnockito (Hiperstênio Sienogranito) com granada

Cristais de plagioclásio são zonados, e os núcleos estão, invariavelmente, parcial a totalmente alterados em argilominerais, sericita e carbonato, com hidróxidos de ferro associados. A análise por difratometria de raios X, em porções retiradas de núcleos de plagioclásio alterado, indicou argilominerais do grupo da illita.

A despeito da tonalidade amarelada da amostra PIT, atribuível à maior ação intempérica que na amostra AZF, não se observaram, ao microscópio, feições que indicassem “proporcionalmente” tal incremento de alteração. A alteração de biotita em clorita foi a principal modificação detectada.

O fissuramento é incipiente a fraco, intragranular, mais freqüentemente atingindo cristais de plagioclásio, e apresentando preenchimento por argilominerais, hidróxidos de ferro e, raramente, carbonato.

É muito comum a ocorrência de muscovita, recristalizada, associada à biotita, em espaços intergranulares e ou em plagioclásio (Figura 6.8).

Figura 6.8 – Amostra PIT. Aspecto da alteração de plagioclásio em muscovita.

Turmalina verde-azulada e fluorita evidenciam ação hidrotermal tardi-magmática, que pode ser, nesse caso, ao menos em parte, responsável pela sericitização dos núcleos de plagioclásio.

6.1.1.3 Verde Labrador

O Verde Labrador (LBD), rocha charnockítica explorada na região de Baixo Guandu, a oeste do Estado do Espírito Santo, no contexto geológico do Complexo Migmatítico-Granulítico de Minas Gerais, é, petrograficamente, um charnockito com granada (hiperstênio sienogranito com granada) (Tabela 6.8).

Apresenta cor verde-escuro acastanhada e granulação fina a grossa, predominantemente grossa. O arranjo textural inequigranular hipidiomórfico é caracterizado por cristais subédricos a anédricos de feldspatos, milimétricos a

centimétricos, e anédricos de quartzo (Figura 6.9).

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos.

Figura 6.9 – Amostra LBD. Aspecto geral do charnockito Verde Labrador. Notar as dimensões milimétricas de feldspatos (KF) e intenso microfissuramento os afetando. Hornblenda (hb), hiperstênio (hy), biotita (bi) e opacos (op), geralmente em agregados, se distribuem esparsamente pela rocha.

Em geral, os minerais máficos (hiperstênio, hornblenda e biotita) e opacos constituem agregados dispostos esparsamente pela rocha. A granada lhes pode estar associada ou ocorrer em porfiroblastos, subédricos a euédricos.

O fissuramento é intenso, o maior das rochas em estudo, predominantemente transgranular, configurando uma rede de microfissuras entrecortadas, preenchidas por filossilicatos e hidróxidos de ferro. Frequentemente, também é radial a partir de cristais de ortopiroxênio ou hornblenda.

Intemperismo moderado é evidenciado pela alteração de feldspatos, a partir de microfissuras, em argilominerais e sericita, com hidróxidos de ferro associados. Ortopiroxênio se altera, ao longo de clivagens e fissuras em hidróxidos de ferro (Figura 6.10).

A identificação mineralógica por difratometria de raios X indicou somente a presença de argilominerais do grupo da illita, como resultantes da alteração de feldspatos.

Figura 6.10 – Amostra LBD. Aspecto do forte microfissuramento em feldspatos, que propicia alteração em argilominerais (+ hidróxidos de ferro) ao seu redor, e da alteração de hiperstênio (hy), também em hidróxidos de ferro.

Deve-se ressaltar a presença de granada, relativamente incomum em charnockitos. Associação mineral semelhante (hornblenda + granada + ortopiroxênio + plagioclásio + quartzo $\pm$ feldspato potássico $\pm$ biotita $\pm$ opacos) pôde ser encontrada na literatura, em corpos charnockíticos da Séries Highland, no Sri Lanka, os quais Schumacher *et al.* (1990) consideraram derivados de metamorfismo de alto grau (fácies granulito), com pressões entre 7,3 kbar e 9,0 kbar, podendo decrescer até 3,5 kbar para associações sem hornblenda, e temperaturas entre 760°C e 840°C, podendo, da mesma forma decrescer até 600°C.

6.1.1.4 Branco Itaúnas e Branco Caravelas

Na região de Medeiros Neto, BA, no contexto geológico da Província Mantiqueira, são explorados os Branco Itaúnas – Microponto II (ITN-1), Branco Itaúnas – Microponto III (ITN-2) e Branco Caravelas (CRV). Os dois primeiros explorados em frentes de lavra distintas, na mesma mina, e o último em mina localizada a alguns quilômetros daquela, aparentemente, dentro do mesmo contexto geológico. Suas características petrográficas acham-se na Tabela 6.9.

As amostras Branco Itaúnas são gnaisses monzograníticos com granada, macro e microscopicamente muito semelhantes. A ITN-1 acha-se cortada por vênulas quartzo-feldspáticas, de granulação grossa, com abundantes máficos (biotita) associados.

Tabela 6.9 – Resultados de análises petrográficas das amostras ITN-1, ITN-2 e CRV.

AMOSTRA		ITN-1	ITN-2	CRV
cor	natural	branco-esverdeado rosado	branco-esverdeado rosado	branco-esverdeado
	polida	branco-esverdeado rosado	branco-esverdeado rosado	branco-esverdeado
estrutura		Maciça a orientada	maciça a orientada	maciça
textura		granoblástica inequigranular amebóide a interlobada	granoblástica inequigranular interlobada a amebóide	granoblástica inequigranular interlobada a serrilhado / porfiroblástica
granulação		média a grossa: 1-5 mm; quartzo em cordões: até 15 mm	média a grossa: 1-5 mm; quartzo em cordões: até 15 mm	fina a média: 0,1-2,0 mm, com cristais de quartzo entre 1-3 mm porfiroblastos de granada: até 50 mm
mineralogia (%)				
quartzo		25	25-30	20-25
plagioclásio		25-30 (oligoclásio)	25-30 (oligoclásio)	5 (albita-oligoclásio)
microclínio		40-45 (feldspato potássico cripto a micropertítico)	35-40 (feldspato potássico micropertítico)	55-60 (mesopertítico)
biotita		tr	<5	-
granada		5	5	5
sillimanita		-	-	<5
“cordierita”		tr	-	5-10
acessórios (tr)		opacos, titanita (?)	zircão, opacos (sulfetos e óxidos)	opacos, espinélio verde
secundários		muscovita, argilominerais incolores, carbonato	sericita, carbonato, opacos, argilominerais incolores, hidróxidos de ferro	carbonato, argilominerais incolores, muscovita, biotita
alteração		fraca	fraca	fraca a moderada
Intempérica/hidrotermal		feldspatos: turvos por argilominerais e local alteração em sericita e carbonato; argilominerais intergranulares: alteração de mineral primário, não identificado.	plagioclásio: altera-se em carbonato e sericita e outros filossilicatos incolores; granada: bordas e fraturas alteradas em muscovita e/ou sericita e carbonato.	provável cordierita: totalmente alterada em argilominerais incolores; granada: pode estar alterada em muscovita, biotita e carbonato.
fissuramento		moderado	moderado a forte	fraco a moderado
intragranulares		x (quartzo e feldspatos)	x (predominante) – quartzo e feldspatos	x (quartzo (+ granada))
intergranulares		x (raras)	-	-
transgranulares		x (quartzo e feldspatos)	x (quartzo e feldspatos)	-
preenchimento		carbonato ou sericita, freqüentemente sem preenchimento	sericita, filossilicatos incolores, raros hidróxidos de ferro	argilominerais ou sem preenchimento
classificação		Gnaiss Monzogranítico com Granada	gnaiss monzogranítico com granada	Gnaiss microclínio Granítico com Granada e “Cordierita”

Apresentam cor branco-esverdeada, levemente rosada, granulação média a grossa, com quartzo constituindo cordões, que medem até 15 mm. O arranjo textural é granoblástico, inequigranular, com contato entre grãos do tipo interlobado a amebóide,

raramente retilíneos (Figura 6.11). Granada ocorre como microporfiroblastos euédricos, em geral medindo cerca de 1 mm.

polarizadores cruzados
ITN-1

polarizadores cruzados
ITN-2

Figura 6.11 – Amostras ITN. Aspecto geral do granito Branco Itaúnas. Notar heterogeneidade granulométrica e contatos interlobados, entre os grãos;

A fraca alteração é evidenciada por feldspatos turvos por argilominerais, que se formam a partir de microfissuras ou clivagens (Figura 6.12). Também podem estar, localmente, alterados em sericita e carbonato.

polarizadores cruzados

Figura 6.12 – Amostra ITN-2. Aspecto do microfissuramento intragranular em plagioclásio (PI) e do preenchimento de espaços intragranulares, em feldspatos, por argilominerais (am).

Dispersamente, observam-se muscovita e/ou carbonato e/ou argilominerais incolores em espaços intergranulares. A identificação dos argilominerais presentes na rocha, por difratometria de raios X, indicou que se trata de caulinita e, possivelmente, de argilominerais do grupo das esmectitas.

Aparentemente, tais rochas apresentam pequena sobreposição de alteração intempérica com provável alteração deutérica, que seria a responsável pela substituição de supostos cordierita ou aluminossilicatos pelos argilominerais intersticiais. É relativamente comum bordas de plaquetas de biotita substituídas por argilominerais, possivelmente relacionados à ação de fluidos tardi-magmáticos (Figura 6.13).

Figura 6.13 – Amostra ITN-1. Aspecto de biotitas substituídas por argilominerais, por provável ação deutérica. Notar microfissuramento intra e transgranular e sericitização de plagioclásio (setas).

polarizadores cruzados

Microfissuramento, fraco a moderado, intra e intergranular afeta quartzo e feldspatos. Essas rochas exibiram modificação do grau de microfissuramento entre as seções delgadas confeccionadas a partir de blocos e de ladrilhos, mais intenso nesses últimos, nos quais também se observa a presença de hidróxidos de ferro impregnando microfissuras.

Essas observações demonstram como são comuns pequenas variações nos materiais rochosos, que freqüentemente não são detectadas pelos métodos de investigação, por melhor que tenha sido a amostragem do material. Por outro lado, reforçam a argumentação de que determinações isoladas não devem ser tomadas como padrão ou como caracterização de um material rochoso.

O Branco Caravelas tem coloração branco-esverdeada, estrutura maciça e granulação fina. O arranjo textural granoblástico caracteriza-se por grande heterogeneidade granulométrica (Figura 6.14). Os grãos têm contatos interlobados a serrilhados, muito raramente retilíneos.

polarizadores cruzados

Figura 6.14 – Amostra CRV. Aspecto geral do granito Branco Caravelas. Notar a heterogeneidade granulométrica.

Microfissuramento fraco a moderado, intragranular, é observado especialmente em quartzo.

Os minerais estão praticamente inalterados, mas é característica a ocorrência dispersa de argilominerais de cor levemente amarelada – que correspondem aos pontos verde-claro observados em amostra de mão – principalmente em espaços intergranulares, aqui também atribuídos à alteração deutérica de possível cordierita ou aluminossilicatos (Figura 6.15). Cristais submilimétricos de sillimanita ocorrem preferencialmente dispostos nessas áreas.

a) polarizadores cruzados

b) polarizadores paralelos

Figura 6.15 – Amostra CRV. Argilominerais, comumente observados pela rocha, ocupando espaços intergranulares (a). Notar microfissuramento intergranular, sem preenchimento e ligeiramente aberto (em azul) (b).

A identificação mineralógica, por difratometria de raios X, da fração argila, indicou que os argilominerais presentes são essencialmente do grupo da caulinita.

6.1.1.5 Rosa Iracema, Branco Cristal e Branco Savana

Na região de Forquilha (CE), na região de Serra da Barriga, são explorados os Rosa Iracema, Branco Savana e Branco Cristal Quartz, rochas de cor rosa a rosa-acinzentado ou levemente esverdeado, cujas principais propriedades petrográficas estão na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Resultados de análises petrográficas das amostras RIC, BCR, BSV.

AMOSTRA		RIC	BCR	BSV
cor	natural	rosa	rosa-esverdeado	rosa -acinzentado
	polida	rosa	rosa-esverdeado	rosa-acinzentado
estrutura		maciça	maciça	maciça
textura		granular hipidiomórfica	granular hipidiomórfica	granular hipidiomórfica
granulação		média a grossa: 3-10 mm	média a grossa: 1-8 mm	média a grossa: 3-8 mm
mineralogia (%)				
quartzo		35	30	30-35
plagioclásio		20-25 (oligoclásio)	30-35 (oligoclásio-andesina)	25 (oligoclásio-andesina)
microclínio		35 (micropertítico)	35 (micropertítico)	35 (micropertítico)
biotita		5-10	5-10	5-10
acessórios (tr)		allanita, fluorita, apatita, zircão, opacos	zircão, apatita, fluorita	zircão, titanita, apatita, allanita, fluorita
secundários		carbonato, sericita, clorita, filossilicatos, muscovita	carbonato, argilominerais, sericita, muscovita, clorita, hidróxidos de ferro	clorita, sericita, muscovita, argilominerais, hidróxidos de ferro, filossilicatos, carbonato
alteração		fraca a moderada	moderada	fraca a moderada
intempérica		plagioclásio: turvo por argilominerais e com núcleos alterados em sericita. Muscovita ocorre associada; biotita: altera-se em clorita e poucos hidróxidos de ferro.	plagioclásio: turvo por argilominerais e com núcleos alterados em sericita, com muscovita associada; biotita: altera-se em clorita (+filossilicato incolor) e hidróxidos de ferro.	plagioclásio: turvo por argilominerais e com núcleos alterados em sericita. Muscovita ocorre associada; biotita: altera-se em clorita e hidróxidos e/ou óxidos de ferro.
hidrotermal		-	-	-
fissuramento		fraco	fraco a moderado	fraco a moderado
intragranulares		x (quartzo)	x (feldspatos)	x (quartzo e feldspatos)
intergranulares		x	x (quartzo (+feldspatos))	x (predominante) – quartzo (+ feldspatos)
transgranulares		x (predominante) – quartzo e feldspatos	x (raras)	-
preenchimento		carbonato, filossilicatos	carbonato, hidróxidos de ferro (nas proximidades de biotita)	hidróxidos de ferro, filossilicatos incolores
classificação		(Biotita) Monzogranito	(Biotita) Monzogranito	(Biotita) Monzogranito

Tratam-se de (biotita) monzogranitos, de granulação média a grossa e estrutura maciça, compostos por quartzo e feldspatos (plagioclásio e microclínio micropertítico) em arranjo granular hipidiomórfico, equigranular (Figuras 6.16 e 6.17).

polarizadores cruzados

polarizadores cruzados.

Figura 6.16 – Amostra RIC. Aspecto geral do granito Rosa Iracema. Notar homogeneidade granulométrica e biotita em agregados de pequenas lamelas.

Figura 6.17 – Amostra BCR. Aspecto geral do granito Branco Cristal. Notar hipidiomorfismo dos feldspatos.

Fraco microfissuramento intragranular, cortando quartzo e feldspatos, predomina na RIC, geralmente preenchido por carbonato e filossilicatos. As amostras BSV e BCR têm maior microfissuramento que RIC, predominantemente intergranular e, subordinadamente, intragranular, esse observado principalmente em plagioclásio; e presença de hidróxidos de ferro, quase que invariavelmente associados ao material de preenchimento (filossilicatos e/ou carbonato).

O maior grau de fissuramento e a presença de hidróxidos de ferro nas microfissuras constituem as diferenças observadas entre RIC e BSV. Distintivamente dessas duas, BCR exibe granulação levemente menor.

Alteração intempérica fraca a moderada afeta RIC e BSV, caracterizada por plagioclásio, principalmente, turvo por argilominerais e exibindo núcleos parcialmente alterados em sericita; biotita está parcialmente alterada em clorita, com hidróxidos de ferro associados (em maior quantidade na BSV, inclusive com óxidos de ferro associados).

A alteração é pouco mais intensa em BCR, que exibe biotita alterada em clorita e hidróxidos de ferro, que por sua vez está interestratificada com filossilicato incolor, não identificado (Figura 6.18). Identificação mineralógica por difratometria de raios X, da porção alterada em núcleos de plagioclásio, da amostra BCR, indicou que os argilominerais são predominantemente do grupo da illita.

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

Figura 6.18 – Amostra BCR. Aspecto de lamelas de biotita intercrescidas com filossilicato incolor.

Biotita também é observada em agregados milimétricos de pequenas plaquetas, aparentemente produto de substituição de mineral máfico.

Allanita está parcial a totalmente alterada em argilominerais.

Fluorita, em cristais milimétricos, ocorre esparsamente, ocupando espaços intergranulares.

Carbonato e hidróxidos de ferro estão, localmente, ocupando espaços intergranulares em BSV.

6.1.1.6 Branco Ceará

Na região de Santa Quitéria (CE), no *Stock* Morrinhos, é explorado o granito Branco Ceará. Trata-se de uma rocha com denominações comerciais muito diversificadas e uma das poucas rochas ornamentais brasileiras já objeto de vários estudos.

Segundo Mesquita (2002), na jazida do granito Branco Ceará, são explorados quatro tipos de granitos brancos, que se diferenciam por variações texturais e estruturais, que referiu como Clássico, *Cotton*, Tapajós e Super Branco. A amostra aqui estudada, aparentemente, corresponde ao tipo Clássico, conforme resultados petrográficos apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Resultados de análises petrográficas das amostras BCE, CSB, FLS.

AMOSTRA		BCE	CSB		FLS
cor	natural	branca com pontos pretos e esverdeados	branca levemente rosada com faixas preto-esverdeado		branco-amarelada com faixas ferruginosas
	polida	branca com pontos pretos e esverdeados	branca levemente rosada com faixas preto-esverdeado		branco-amarelada com faixas ferruginosas
estrutura		maciça	gnáissica		gnáissica
textura		inequigranular hipidiomórfica, poiquilítica	granoblástica inequigranular interlobada a polygonal / granolepidoblástica		granoblástica inequigranular interlobada a polygonal / granolepidoblástica
granulação		fina a média matriz (albita): 0,5-1,0 mm fenocristais (quartzo e microclínio): 3-10 mm	fina a grossa, variável segundo faixas. predomina média a grossa: 1-10 mm		fina a grossa, variável segundo faixas. predomina média a grossa: 1-5 mm, até 15 mm
mineralogia (%)		A B		A B	
quartzo		30	10	40	15 40
plagioclásio		35 (albita)	10 (oligocl.)	25-30	15 (oligocl.) 25-30
microclínio		30	65 (micropert.)	5-10	45 (micropert.) 5-10
biotita		-	5	5	5 5
muscovita		-	5	15	15 15
mica litinífera		5-10	-	-	- -
topázio		5-10	-	-	- -
granada		-	5	5	5 5
Acessórios (tr)		zircão, fluorita	opacos		opacos
secundários		sericita	epídoto, sericita, argilominerais, clorita		sericita, argilominerais, hidróxidos de ferro, clorita, epídoto
alteração		incipiente	fraca		fraca a moderada
intempérica		microclínio e albita: levemente turvos e localmente pontilhados por sericita; topázio: incipiente alteração para sericita.	granada: altera-se em biotita, segundo fraturas; plagioclásio: núcleos turvos por argilominerais e localmente alterados em sericita.		plagioclásio: turvo por argilominerais e localmente alterado em sericita; granada altera-se em clorita, segundo fraturas; biotita: altera-se em clorita.
hidrotermal		-	-		-
fissuramento		incipiente	fraco		fraco a moderado
intragranulares		x (quartzo)	x (predominante) - quartzo		x - quartzo e feldspatos
intergranulares		-	-		x
transgranulares		-	x (raras) – preenchidas por carbonato		x
preenchimento		sem preenchimento	carbonato, sericita		hidróxidos de ferro e argilominerais castanhos
classificação		Albita Granito	Gnaiss Quartzo Sienítico com faixas de Muscovita Gnaiss Tonalítico		Gnaiss Quartzo Sienítico (A) com faixas de Muscovita Gnaiss Tonalítico (B)

É um albita granito, de cor branca, com pontos pretos e esverdeados, composto por cristais subédricos a euédricos de quartzo, microclínio e plagioclásio (albita) em arranjo granular hipidiomórfico a panidiomórfico fino (geralmente entre 0,5 e 1,0 mm).

Quartzo e microclínio freqüentemente constituem microfenocristais poiquilíticos, contendo inclusões de cristais tabulares de albita (Figura 6.19 a, b).

polarizadores cruzados

a)

polarizadores cruzados

b)

Figura 6.19 – Amostra BCE. Aspecto geral do granito Branco Ceará. Notar, em (b), a presença de mica litinífera ocupando espaços intergranulares ou fissuras em feldspatos.

Mica litinífera e topázio, geralmente associados, ocorrem em quantidades subordinadas.

Alteração intempérica é praticamente ausente, denotada por leve turvamento dos cristais de microclínio e albita, localmente pontilhados de sericita. Topázio exibe alteração incipiente em sericita.

Metassomatismo associado à greisenização seria o processo responsável pela presença de albita, mica litinífera, fluorita e topázio

6.1.1.7 Casablanca e Falésias

Casablanca e Falésias são explorados em Pedra Branca (CE), no contexto dos leptinitos Tróia. Trata-se das variações praticamente inalterada e intempericamente alterada, respectivamente, de rocha gnáissica, com marcante bandamento caracterizado pela alternância faixas ou lentes irregulares, ora essencialmente quartzo-feldspáticas, ora com minerais micáceos associados. No Casablanca essas faixas representam, respectivamente, áreas de cor branca e de cor cinza médio; e, no Falésias, aquelas de cor branco-amarelada e de cor ferrugem.

Por meio de ensaio de coloração seletiva de feldspatos (Fig. 6.1) foi possível observar que as faixas quartzo-feldspáticas são compostas essencialmente por microclínio e subordinadamente quartzo (quartzo sieníticas), e as outras por plagioclásio, quartzo e micas (tonalíticas).

Não obstante a marcante alteração cromática, devido ao intemperismo, o exame microscópico revelou pequenas modificações: presença de clorita nas fraturas em granada e de fissuras mais largas, inter e transgranulares, preenchidas por filossilicatos castanhos e hidróxidos de ferro.

São rochas constituídas por quartzo e feldspatos, em quantidade e tipo variáveis conforme a banda, em arranjo granoblástico inequigranular interlobado a poligonal, tendendo a granolepidoblástico nas bandas enriquecidas em mica (muscovita e biotita) (Figura 6.20 e 6.21).

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

A

polarizadores cruzados

B

Figura 6.20 – Amostra CSB. Aspecto geral do gnaiss Casablanca.

A: bandas tonalíticas, ricas em muscovita e, subordinadamente, biotita; microclínio é praticamente ausente.

B: bandas quartzo sieníticas, inequigranulares, ricas em microclínio e com ausência de micas.

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

Figura 6.21 – Amostra FLS. Aspecto geral do gnaiss Falésias. Aspecto de banda tonalítica. Notar a presença de fissuras inter e transgranulares, mais largas, preenchidas por filossilicatos e hidróxidos de ferro.

A biotita em geral tem cor castanha e, menos freqüentemente, esverdeada. Epídoto ocorre esparsamente pela rocha.

Na CSB, as microfissuras são predominantemente intragranulares, não preenchidas ou com preenchimento de argilominerais incolores. Poucas microfissuras, intragranulares, irregulares e mais largas, acham-se preenchidas por carbonato.

A granada está intensamente microfissurada e substituída por filossilicatos castanhos, ao longo dessas.

Na FLS, adicionalmente, são comumente observadas fissuras transgranulares, largas, preenchidas por filossilicatos castanhos e hidróxidos de ferro (Fig. 6.21).

6.1.1.8 Giallo Veneciano, Arabesco e Santa Cecília

Na região norte do Estado do Espírito Santo, entre as localidades de Nova Venécia, Ecoporanga e Barra do São Francisco, são explorados vários tipos comerciais de gnaisses granatíferos, dentre os quais foram selecionados: Giallo Veneciano, Santa Cecília e Arabesco; o primeiro é uma das rochas ornamentais brasileiras mais exportadas para o mercado europeu e os outros, rochas muito consumidas no mercado interno.

Trata-se de granada-biotita gnaisses monzo a sienograníticos, que podem conter quantidades variáveis de aluminossilicatos (sillimanita, possível cordierita e outros), estrutura gnáissica e geralmente de granulação grossa (Tabela 6.12).

Tabela 6.12 – Resultados de análises petrográficas das amostras GVN, ARB e SCC.

AMOSTRA		GVN	ARB	SCC
cor	natural	rosa-amarelado	cinza-esverdeado levemente rosado	cinza-alaranjado
	polida	rosa-amarelado	cinza-esverdeado levemente rosado	cinza-alaranjado
estrutura		gnáissica	gnáissica	gnáissica
textura		granoblástica inequigranular interlobada/ porfiroclástica	granoblástica inequigranular interlobada	granoblástica interlobada / porfiroblástica
granulação		média a muito grossa: 1- 15 mm; megacristais: até 60 mm (amostra de mão)	média a grossa: 1-6 mm; porfiroclastos (feldspatos): 10-15 mm; quartzo, em cordões: até 25 mm	média a grossa: predomina entre 3-10 mm
mineralogia (%)				
quartzo		25	30	25-30
plagioclásio		15 (oligoclásio)	20 (oligoclásio)	15-20 (oligoclásio)
microclínio		40-45 (micropertítico)	25 (feldspato alcalino micropertítico)	30 (feldspato potássico micropertítico)
biotita		5-10	10	10
granada		5-10	5	5-10
sillimanita		tr	5	5
“cordierita”		-	<5	<5
opacos		<5	<5	-
acessórios (tr)		apatita, zircão, rutilo, biotita verde, espinélio verde	zircão, apatita, titanita, rutilo (?), espinélio verde	zircão, opacos, rutilo (?) alterado, apatita
secundários		hidróxidos de ferro, carbonato, argilominerais, sericita, muscovita, leucoxênio, filossilicatos castanhos	carbonato, sericita, muscovita, argilominerais, hidróxidos de ferro, leucoxênio	sericita, muscovita, hidróxidos de ferro, argilominerais, carbonato
alteração		moderada	fraca a moderada	fraca a moderada
intempérica		feldspatos: intensamente alterados em sericita e carbonato, principalmente a partir de fissuras; opacos: alteram-se em leucoxênio e hidróxidos de ferro; biotita: altera-se em óxidos/hidróxidos de ferro; granada: fraturas alteradas em filossilicatos castanhos.	feldspatos: turvos por argilominerais, a partir de fissuras; plagioclásio: alterado em argilominerais, sericita e carbonato; biotita: muito localmente, altera-se em hidróxidos de ferro.	plagioclásio: em geral está turvo a parcialmente alterado em argilominerais (que localmente constituem “bolsões”), e em carbonato; sillimanita: altera-se em filossilicatos incolores.
hidrotermal		-	-	-
fissuramento		forte	moderado a forte	moderado a forte
intragranulares		x – feldspatos, quartzo e granada	x (predominante) – quartzo e feldspatos	x (predominante) – quartzo e feldspatos
intergranulares		x (raras)	-	-
transgranulares		x (predominante) – feldspatos e quartzo	x	x

AMOSTRA	GVN	ARB	SCC
preenchimento	hidróxidos de ferro, carbonato	hidróxidos/ óxidos de ferro, carbonato, argilominerais	hidróxidos de ferro, filossilicatos secundários, argilominerais, carbonato
classificação	Gnaiss Sienogranítico com Granada	Biotita Gnaiss Monzogranítico Com Granada e Sillimanita	Biotita Gnaiss Monzogranítico Com Granada e Sillimanita

O Giallo Veneciano é um gnaiss sienogranítico com granada, de cor rosa-amarelado, caracterizada por cristais anédricos de quartzo e anédricos a subédricos de feldspatos, em arranjo textural granoblástico inequigranular interlobado (Figura 6.22).

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

Figura 6.22 – Amostra GVN. Aspecto geral do gnaiss Giallo Veneciano. Notar forte microfissuramento e alteração em argilominerais e hidróxidos de ferro, nas paredes dos minerais, próximas a essas fissuras.

Biotita e granada constituem agregados suborientados segundo a estruturação da rocha. Minerais opacos e rutilo comumente ocorrem como inclusões em granada. Sillimanita foi observada muito localizadamente, já parcialmente alterada em argilominerais.

Alteração intempérica moderada a intensa é evidenciada por plagioclásio, principalmente, e, também, microclínio, alterados em argilominerais, sericita e carbonato, especialmente a partir de abundantes microfissuras intragranulares.

Muito localmente, argilominerais castanhos estão ocupando espaços intergranulares e, possivelmente, são produtos de alteração de plagioclásio (Figura 6.23).

O microfissuramento é moderado a intenso, transgranular e, subordinadamente,

intragranular (plagioclásio), e geralmente preenchido por carbonato e hidróxidos de ferro (Figura 6.24).

polarizadores paralelos

Figura 6.23 – Amostra GVN. Detalhe da alteração de plagioclásio e de argilominerais ocupando espaços intergranulares.

polarizadores paralelos

Figura 6.24 – Amostra GVN. Visão geral da alteração e microfissuramento.

Muscovita e biotita verde são neoformados e ocorrem preferencialmente junto ou substituindo biotita.

Arabesco é um biotita gnaiss monzogranítico com granada e sillimanita (Tabela 6.12), de coloração cinza-esverdeado, levemente rosado, e granulação muito heterogênea, variando de média a grossa.

Caracteriza-se pelo arranjo granoblástico de cristais anédricos de quartzo e subédricos a anédricos de feldspato alcalino e plagioclásio, medindo entre 5 mm e 15 mm, segundo agregados lenticulares ou cordões, entre os quais ocorre “matriz” composta de quartzo e plagioclásio, principalmente, em arranjo granoblástico fino (1 mm a 3 mm), eqüigranular (Figura 6.25).

Sillimanita ($\pm$ biotita, $\pm$ granada) constitui agregados nematolepidoblásticos, finos, fortemente isorientados, e preferencialmente associados à matriz (Figura 6.26).

Opacos (+ rutilo) ocorrem associados ou inclusos em granada. Máficos e aluminossilicatos estão praticamente sãos, à exceção de alteração local de sillimanita em argilominerais.

polarizadores cruzados

polarizadores paralelos

Figura 6.25 – Amostra ARB. Aspecto geral do gnaiss Arabesco. Notar heterogeneidade granulométrica e cristais tabulares de plagioclásio (porção superior, centro, foto à esquerda).

polarizadores paralelos

Figura 6.26 – Amostra ARB. Aspecto dos cordões de sillimanita (sill) e de agregados de biotita (bi) e opacos.

Os feldspatos estão turvos ou alterados em argilominerais, a partir de fissuras e clivagens; plagioclásio, adicionalmente, altera-se em sericita ou carbonato.

Provável cordierita é pontualmente observada, quase totalmente alterada em argilominerais, associada à biotita e sillimanita e em intercrescimento simplectítico entre quartzo e plagioclásio (Figura 6.27).

Microfissuramento moderado a intenso, predominantemente intragranular, é observado em quartzo e feldspatos. As microfissuras estão preenchidas por argilominerais e hidróxidos de ferro.

polarizadores cruzados.

polarizadores paralelos

Figura 6.27 – Amostra ARB. Aspecto de provável cordierita alterada.

Santa Cecília é um biotita gnaiss monzogranítico com granada e sillimanita, de cor cinza-alaranjado e granulação média a muito grossa (Tabela 6.12). A estrutura é fortemente gnáissica, caracterizada por cristais anédricos de quartzo e feldspatos em arranjo granoblástico interlobado (Figura 6.28). Os cristais têm dimensões relativamente mais uniforme que GVN e ARB, geralmente variando entre 3 mm e 10 mm.

Polarizadores cruzados

Polarizadores paralelos

Figura 6.28 – Amostra SCC. Aspecto geral do gnaiss Santa Cecília. Notar microfissuramento intragranular, especialmente em feldspatos, e turvação e alteração desses.

Biotita e/ou sillimanita tendem a constituir agregados alongados segundo a orientação da rocha. Granada ocorre em porfiroblastos (<5 mm) esparsos.

Sillimanita altera-se em argilominerais incolores. Plagioclásio acha-se turvo a parcialmente alterado em argilominerais (Figura 6.29) e, menos comumente, em

carbonato, a partir de fissuras e clivagens . Em parte, os argilominerais são produtos da alteração de minúsculos cristais de sillimanita, que se acham inclusos nos cristais de plagioclásio.

Figura 6.29 – Amostra SCC. Aspecto da alteração de plagioclásio e presença de argilominerais preenchendo espaços intragranulares.

polarizadores cruzados

Quartzo e feldspatos exibem intenso microfissuramento, predominantemente intragranular, com preenchimento de argilominerais e hidróxidos de ferro. São freqüentemente observadas microfissuras mais largas que nas GVN e ARB.

A identificação mineralógica por difratometria de raios X, de porções retiradas de núcleos alterados de plagioclásio, indicou a presença de argilominerais do grupo da illita, nas amostras GVN e ARB.

6.1.2 Características químicas

As composições químicas das amostras em estudo, conforme exibido nas Tabelas 6.13 e 6.14, indicaram que o teor de sílica é bastante semelhante (entre 73% e 79%), à exceção de LBD (~69%).

A comparação dos resultados obtidos, para rochas pertencentes aos grupos aqui discriminados, indicou uma grande similaridade química entre elas, refletindo as semelhanças observadas no estudo petrográfico.

Essa observação permite indicar que há consistência petrográfica e química, entre as rochas constituintes do grupo 8, fornecendo maior segurança na comparação dos resultados obtidos nas determinações de propriedades físicas e mecânicas e nos ensaios de alteração acelerada.

Tabela 6.13 – Composição química das rochas graníticas em estudo – Elementos maiores (%).

	LBD	VCB-1	VCB-2	VCB-3	RIC	BCR	BSV	PIT	AZF	BCE	ITN 1	ITN 2	CRV	CSB	FLS	GVN	ARB	SCC
SiO₂	69,39	74,50	76,20	75,29	75,21	77,55	74,91	75,68	75,18	74,89	74,21	75,75	75,24	76,21	74,76	73,20	77,42	79,10
TiO₂	0,410	0,210	0,221	0,232	0,093	0,047	0,082	0,093	0,105	0,009	0,028	0,029	0,050	0,017	0,009	0,305	0,235	0,179
Al₂O₃	14,65	12,84	11,84	12,37	12,60	11,88	13,25	13,31	13,51	14,32	13,72	13,66	14,48	14,53	14,69	13,87	11,83	11,09
Fe₂O₃	0,52	0,37	0,42	0,53	0,24	0,19	0,19	0,15	0,18	0,26	0,11	0,11	0,40	0,21	0,32	0,11	0,01	0,26
FeO	3,79	1,60	2,04	1,75	1,18	0,91	1,37	1,25	1,28	0,29	0,91	0,82	0,55	0,63	0,37	1,72	2,16	1,45
MnO	0,077	0,034	0,041	0,033	0,020	0,018	0,028	0,058	0,047	0,027	0,017	0,014	0,050	0,017	0,018	0,018	0,050	0,038
MgO	0,24	0,17	0,15	0,20	0,04	0,01	0,03	0,12	0,15	-0,01	0,10	0,10	0,16	0,06	0,04	0,29	0,43	0,29
CaO	2,01	0,81	0,76	0,90	0,77	0,68	0,94	0,89	0,80	0,36	1,63	1,37	0,68	1,26	0,58	1,29	1,82	0,94
Na₂O	2,92	2,97	2,86	3,10	3,38	3,83	3,97	3,69	3,67	5,45	3,15	2,97	3,99	5,83	3,80	2,69	2,50	2,32
K₂O	5,65	5,74	4,96	4,87	5,25	4,10	4,80	4,51	4,72	3,36	4,59	5,09	4,01	1,11	5,49	5,87	3,11	4,07
P₂O₅	0,13	0,05	0,04	0,06	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,01	0,04	0,06	0,28	0,03	0,03	0,28	0,14	0,15
S	0,011	0,012	0,009	0,008	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,001	-0,001	-0,001	0,002	0,009	0,001
P.F. 1	0,05	0,46	0,51	0,51	0,26	0,38	0,42	0,42	0,33	0,35	0,15	0,08	0,32	0,26	0,23	0,32	0,02	0,14
TOTAL 1	99,84	99,75	100,05	99,85	99,06	99,61	100,01	100,23	100,02	99,33	98,65	100,06	100,19	100,16	100,33	99,96	99,73	100,02
P.F. 2	0,47	0,64	0,74	0,71	0,39	0,48	0,57	0,56	0,47	0,38	0,25	0,17	0,38	0,33	0,27	0,51	0,26	0,30
TOTAL 2	100,26	99,93	100,28	100,05	99,19	99,71	100,16	100,37	100,16	99,36	98,75	100,15	100,25	100,23	100,37	100,15	99,97	100,18

Nota: P.F. = perda ao fogo.

P.F. 2 = perda ao fogo ajustada para a diferença de oxigênio entre FeO e Fe₂O₃. TOTAL 2 = total incluindo P.F. 2.

[illegible]

Algumas diferenças puderam ser notadas entre CRV e ITN-1 e ITN-2, e entre CSB e FLS, essas por motivo discutido mais adiante.

Para ilustrar e melhor visualizar as características químicas dessas rochas, foram elaborados diagramas de dispersão SiO_2 x elementos maiores (Figura 6.30), com objetivo estritamente descritivo dos diferentes tipos de rochas.

A legenda utilizada nas figuras desse Capítulo é a mostrada a seguir:

●	Grupo 1 (Verde Labrador)
●	Grupo 2 (Vermelho Capão Bonito)
●	Grupo 3 (Rosa Iracema, Branco Cristal, Branco Savana)
●	Grupo 4 (Prata Interlagos, Azul Paulista Frente Nova)
○	Grupo 5 (Branco Ceará)
●	Grupo 6 (Branco Itaúnas, Branco Caravelas)
●	Grupo 7 (Casablanca, Falésias)
●	Grupo 8 (Giallo Veneciano, Arabesco, Santa Cecília)

Os diagramas da Fig. 6.30 forneceram as seguintes informações, relativas ao comportamento dos elementos maiores e o teor de SiO_2 :

- Al_2O_3 : há correlação negativa, mais claramente para as amostras ARB, SCC, BCR e VCB-2;
- TiO_2 : VCBs, GVN, ARB e SCC se discriminam pelos teores relativamente maiores (> 0,20%);
- CaO : ARB, ITNs, GVN e CSB destacam-se pelos teores maiores que os demais (> 1,20%);
- MgO : SCC, GVN e ARB, discriminam-se pelos maiores teores (> 0,20%);
- K_2O : FLS discrimina-se pelo baixo teor;
- Na_2O : BCE e CSB discriminam-se pelos maiores teores;
- P_2O_5 : CRV, GVN, SCC e ARB discriminam-se pelos maiores valores (> 0,10%).

A análise desses resultados indica que os valores obtidos para CSB e FLS não são representativos da rocha total. Dadas as pequenas quantidades (cerca de 1 g) usualmente utilizadas para análise química, aparentemente os resultados da CSB são representativos das bandas tonalíticas e os da FLS, das bandas quartzo sieníticas.

Figura 6.30 – Diagramas de dispersão SiO₂ x elementos maiores.

O LBD não foi incluído nesse conjunto, pois quimicamente tem algumas características distintas das outras rochas estudadas, quais sejam:

- teor de SiO_2 relativamente menor;
- maiores teores de FeO (3,79%), CaO (2,01%), TiO_2 (0,41%), Sr (224ppm), Ba (2.486ppm), esse muitas vezes superior aos demais;
- Fe_2O_3 também é relativamente alto, mas se iguala ao de VCB-3 e é próximo de VCB-2 e CRV;
- quanto ao MgO, o teor é intermediário aos de GVN, ARB e SCC e os demais.

A Figura 6.31 exibe os diagramas de dispersão SiO_2 x Ba, Sr e Rb, nos quais se destacam os ITN, pelos maiores teores de Ba e Sr; e o BCE, pelo de Rb. Infere-se que, por se tratarem de rochas, respectivamente, ricas em feldspato potássico e em albita, esses elementos tenham relação com os feldspatos predominantes.

Figura 6.31 – Diagramas de dispersão SiO_2 x Ba, Sr e Rb.

Dada a preocupação com os possíveis condicionantes químicos da oxidação de natureza intempérica observada em algumas amostras, foram elaborados alguns gráficos exploratórios considerando o elemento Fe (Figura 6.32).

Figura 6.32 – Diagramas de dispersão Fe₂O₃ e FeO x TiO₂.

A tendência de correlação positiva FeO x TiO₂ sugere que esses devem ocorrer associados (constituindo minerais como ilmenita, por exemplo, ou associados aos máficos) e destaca os grupos 2 e 8.

Relativamente ao Fe₂O₃, aqui interpretado como o Fe já oxidado, provavelmente presente em óxidos/hidróxidos de ferro (hematita, goethita e outros) resultantes do intemperismo, destacam-se o grupo 2 e as amostras CRV e FLS. O grupo 8, constituído de rochas variavelmente intemperizadas, não apresentou o mesmo comportamento que o grupo 2. Os teores de Fe₂O₃ foram relativamente baixos, com ARB praticamente exibindo inexistência de Fe³⁺.

6.2 Propriedades Físicas (Densidade Aparente e Absorção)

As densidade, porosidade e absorção d'água aparentes forneceram a caracterização das propriedades físicas das rochas em estudo.

As Tabelas 6.15 a 6.18 exibem os valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação obtidos para as amostras estudadas. Os símbolos de densidade aparente, porosidade e absorção correspondem àqueles definidos na Tab. 5.2, reproduzidos a seguir:

- ρ_{sec} = massa específica aparente seca (kg/m³);
- η = porosidade aparente (%);
- α = absorção d'água aparente (%);
- A_b = coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%);
- V_o = volume de poros abertos (mL);
- ρ_b = densidade aparente seca (kg/m³);
- p_o = porosidade aberta (%).

Tabela 6.15 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova: 10 cm x 15 cm.

AMOSTRA (espessura do ladrilho)	ABNT (1992a)			BSI (1999a)		
	ρ_{sec} (kg/m ³)	η (%)	α (%)	ρ_b (kg/m ³)	p_o (%)	v_o (mL)
LBD (3 cm)	2.662±6 (0,23)	0,64±0,01 (2,20)	0,24±0,01 (2,16)	2.657±6 (0,21)	0,68±0,03 (4,67)	2,8±0,2 (5,51)
VCB-1 (3 cm)	2.635±3 (0,13)	0,48±0,03 (6,42)	0,18±0,01 (6,47)	2.633±4 (0,14)v	0,43±0,05 (11,84)	2,0±0,2 (10,58)
VCB-2 (3 cm)	2.631±2 (0,09)	0,41±0,02 (5,74)	0,15±0,01 (5,77)	2.629±1 (0,06)	0,34±0,02 (5,42)	1,5±0,1 (3,75)
VCB-3 (3 cm)	2.639±5 (0,18)	0,45±0,01 (1,92)	0,17±0,00 (2,00)	2.635±5 (0,19)	0,48±0,02 (4,11)	2,2±0,1 (4,14)
RIC (2 cm)	2.622±7 (0,26)	0,46±0,01 (1,88)	0,17±0,00 (1,93)	2.613±1 (0,04)	0,48±0,03 (5,40)	1,5±0,1 (5,50)
BCR (2 cm)	2.610±1 (0,02)	0,87±0,01 (1,64)	0,33±0,01 (1,65)	2.605±1 (0,03)	0,65±0,03 (4,01)	2,2±0,1 (3,77)
BSV (2 cm)	2.616±2 (0,09)	0,68±0,03 (4,39)	0,26±0,01 (4,44)	2.611±2 (0,08)	0,69±0,01 (1,98)	2,0±0,0 (2,26)
PIT (2 cm)	2.624±0 (0,01)	0,78±0,01 (1,10)	0,30±0,00 (1,11)	2.618±0 (0,01)	0,63±0,02 (2,49)	2,0±0,1 (2,94)
AZF (3 cm)	2.629±2 (0,07)	0,64±0,01 (2,20)	0,24±0,01 (2,27)	2.624±1 (0,05)	0,55±0,01 (2,53)	2,5±0,1 (2,28)
BCE (3 cm)	2.615±1 (0,04)	0,61±0,02 (3,62)	0,23±0,01 (3,61)	2.613±4 (0,15)	0,65±0,02 (3,46)	3,0±0,1 (3,99)
ITN-1 (2 cm)	2.611±3 (0,10)	0,92±0,03 (3,57)	0,35±0,01 (3,66)	2.606±3 (0,10)	0,90±0,03 (3,05)	2,7±0,1 (3,36)
ITN-2 (2 cm)	2.610±4 (0,15)	0,91±0,10 (11,07)	0,35±0,04 (11,10)	2.606±3 (0,13)	0,95±0,06 (5,80)	3,0±0,2 (5,96)
CRV (2 cm)	2.621±1 (0,03)	0,86±0,03 (3,43)	0,33±0,01 (3,44)	2.615±2 (0,06)	0,77±0,03 (3,51)	2,2±0,1 (3,89)
CSB (3 cm)	2.632±6 (0,22)	0,62±0,06 (10,27)	0,23±0,02 (10,32)	2.627±6 (0,24)	0,61±0,02 (2,83)	1,9±0,1 (2,96)
FLS (3 cm)	2.624±15 (0,55)	0,68±0,03 (3,80)	0,26±0,01 (4,18)	2.619±15 (0,57)	0,67±0,03 (4,84)	1,9±0,1 (4,81)
GVN (3 cm)	2.644±9 (0,35)	0,89±0,04 (4,73)	0,34±0,02 (4,56)	2.652±19 (0,70)	0,83±0,05 (6,06)	3,7±0,3 (7,17)
ARB (2 cm)	2.648±6 (0,24)	0,75±0,02 (2,58)	0,28±0,01 (2,77)	2.642±6 (0,23)	0,72±0,03 (3,70)	2,2±0,1 (3,40)
SCC (3 cm)	2.643±9 (0,35)	0,75±0,08 (10,08)	0,28±0,03 (10,11)	2.636±11 (0,40)	0,72±0,10 (14,16)	3,2±0,5 (14,25)

Tabela 6.16 – Índices físicos segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova 10 cm x 12 cm.

AMOSTRA (espessura do ladrilho)	ABNT (1992a)			CEN (1998a)		BSI (1999a)		
	ρ_{sec} (kg/m ³)	η (%)	α (%)	ρ_b (kg/m ³)	A_b (%)	ρ_b (kg/m ³)	p_o (%)	v_o (mL)
LBD (3 cm)	2.658±2 (0,09)	0,70±0,03 (3,60)	0,26±0,01 (3,58)	2.659±3 (0,11)	0,19±0,01 (6,44)	2.655±3 (0,12)	0,58±0,02 (3,05)	1,9±0,0 (2,33)
VCB-1 (3 cm)	2.636±3 (0,13)	0,58±0,03 (4,67)	0,22±0,01 (4,73)	2.637±3 (0,11)	0,20±0,01 (4,53)	2.631±3 (0,13)	0,55±0,02 (4,29)	2,0±0,1 (3,54)
VCB-2 (3 cm)	2.632±2 (0,08)	0,31±0,03 (9,31)	0,12±0,01 (9,35)	2.634±2 (0,07)	0,15±0,01 (4,05)	2.627±2 (0,08)	0,41±0,02 (4,45)	1,4±0,1 (5,89)
VCB-3 (3 cm)	2.639±2 (0,07)	0,54±0,01 (2,44)	0,20±0,01 (2,48)	2.640±2 (0,07)	0,13±0,00 (0,10)	2.636±2 (0,06)	0,41±0,01 (3,14)	1,4±0,0 (3,24)
RIC (2 cm)	2.617±3 (0,12)	0,54±0,04 (7,04)	0,21±0,01 (7,14)	2.617±3 (0,12)	0,23±0,02 (6,84)	2.613±3 (0,10)	0,55±0,01 (2,30)	1,5±0,0 (3,02)
BCR (2 cm)	2.615±2 (0,07)	0,54±0,02 (3,24)	0,20±0,01 (3,31)	2.614±2 (0,08)	0,23±0,02 (6,45)	2.608±1 (0,04)	0,63±0,02 (2,58)	1,7±0,0 (2,66)
BSV (2 cm)	2.620±2 (0,06)	0,62±0,03 (5,29)	0,24±0,01 (5,33)	2.620±2 (0,08)	0,24±0,03 (3,68)	2.614±2 (0,08)	0,74±0,03 (4,58)	1,9±0,1 (3,72)
PIT (2 cm)	2.628±1 (0,02)	0,52±0,03 (6,66)	0,20±0,01 (6,68)	2.627±1 (0,02)	0,19±0,01 (3,54)	2.622±1 (0,03)	0,59±0,02 (2,55)	1,5±0,0 (2,94)
PIT (3 cm)	2.623±1 (0,03)	0,78±0,01 (1,63)	0,30±0,00 (1,65)	2.623±1 (0,03)	0,29±0,01 (3,60)	2.619±1 (0,03)	0,64±0,01 (1,63)	2,2±0,2 (8,59)
AZF (3 cm)	2.629±1 (0,04)	0,63±0,02 (2,58)	0,24±0,01 (2,59)	2.630±1 (0,02)	0,26±0,01 (2,95)	2.626±1 (0,03)	0,53±0,01 (2,30)	2,0±0,0 (2,26)
BCE (3 cm)	2.613±2 (0,08)	0,80±0,03 (3,92)	0,30±0,01 (4,00)	2.614±3 (0,10)	0,30±0,01 (4,93)	2.610±2 (0,09)	0,65±0,04 (5,81)	2,5±0,2 (7,10)
ITN-1 (2 cm)	2.612±6 (0,24)	0,77±0,04 (5,00)	0,30±0,01 (5,02)	2.610±6 (0,23)	0,36±0,03 (7,26)	2.606±6 (0,22)	0,95±0,06 (6,77)	2,4±0,1 (5,39)
ITN-2 (2 cm)	2.614±3 (0,13)	0,86±0,05 (6,39)	0,33±0,02 (6,50)	2.613±3 (0,11)	0,34±0,02 (4,81)	2.609±3 (0,13)	0,96±0,04 (4,42)	2,4±0,1 (4,67)
CRV (2 cm)	2.623±1 (0,04)	0,69±0,02 (2,46)	0,26±0,01 (2,45)	2.619±6 (0,24)	0,27±0,01 (2,85)	2.615±2 (0,07)	0,77±0,05 (7,06)	1,7±0,1 (7,20)
CSB (3 cm)	2.606±26 (0,98)	0,76±0,03 (4,12)	0,29±0,01 (4,28)	2.615±14 (0,53)	0,24±0,01 (3,60)	2.595±14 (0,53)	0,57±0,05 (7,78)	2,2±0,2 (6,74)
FLS (3 cm)	2.612±13 (0,51)	1,08±0,05 (4,93)	0,41±0,02 (4,79)	2.614±14 (0,52)	0,34±0,01 (2,99)	2.609±14 (0,52)	0,87±0,03 (3,96)	3,2±0,1 (4,12)
GVN (3 cm)	2.636±5 (0,19)	0,80±0,04 (5,61)	0,30±0,02 (5,71)	2.636±5 (0,19)	0,29±0,01 (3,33)	2.632±5 (0,19)	0,72±0,02 (3,04)	2,6±0,1 (3,10)
ARB (2 cm)	2.660±9 (0,33)	0,59±0,02 (2,89)	0,22±0,01 (2,76)	2.658±9 (0,34)	0,25±0,01 (3,88)	2.655±8 (0,31)	0,65±0,03 (3,95)	1,6±0,1 (3,95)
SCC (3 cm)	2.637±6 (0,21)	0,70±0,02 (2,57)	0,27±0,01 (2,56)	2.637±5 (0,18)	0,27±0,01 (3,61)	2.632±5 (0,21)	0,65±0,05 (7,54)	2,3±0,1 (6,39)

Tabela 6.17 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a) – Corpos-de-prova: 10 cm x 10 cm.

AMOSTRA (espessura do ladrilho)	ABNT (1992a)			CEN (1998a)		BSI (1999a)		
	ρ_{sec} (kg/m ³)	η (%)	α (%)	ρ_b (kg/m ³)	A_b (%)	ρ_b (kg/m ³)	p_o (%)	v_o (mL)
LBD (3 cm)	2.660±4 (0,17)	0,70±0,01 (1,51)	0,26±0,00 (1,39)	2.663±4 (0,16)	0,16±0,01 (4,02)	2.658±4 (0,16)	0,43±0,02 (5,72)	1,2±0,1 (6,36)
VCB-1 (3 cm)	2.637±2 (0,07)	0,41±0,05 (11,34)	0,16±0,02 (11,34)	2.636±2 (0,07)	0,21±0,02 (8,32)	2.633±2 (0,08)	0,43±0,04 (9,73)	1,3±0,1 (8,51)
VCB-2 (3 cm)	2.634±5 (0,19)	0,32±0,06 (19,40)	0,12±0,02 (19,45)	2.631±4 (0,17)	0,19±0,02 (8,97)	2.630±5 (0,20)	0,36±0,06 (16,02)	1,0±0,2 (16,09)
VCB-3 (3 cm)	2.641±3 (0,12)	0,53±0,02 (4,21)	0,20±0,01 (4,26)	2.642±3 (0,12)	0,13±0,01 (10,09)	2.638±3 (0,11)	0,34±0,02 (6,07)	1,0±0,1 (5,77)
RIC (2 cm)	2.618±2 (0,08)	0,68±0,02 (3,31)	0,26±0,01 (3,32)	2.620±2 (0,08)	0,21±0,01 (4,87)	2.614±2 (0,08)	0,50±0,02 (3,27)	1,1±0,0 (3,66)
BCR (2 cm)	2.614±1 (0,03)	0,65±0,03 (3,95)	0,25±0,01 (3,96)	2.614±1 (0,05)	0,24±0,00 (0,71)	2.609±1 (0,05)	0,61±0,02 (3,52)	1,4±0,1 (4,06)
BSV (2 cm)	2.622±1 (0,05)	0,73±0,02 (2,70)	0,28±0,01 (2,71)	2.623±2 (0,06)	0,26±0,00 (0,71)	2.616±1 (0,04)	0,74±0,03 (3,54)	1,6±0,1 (3,95)
PIT (2 cm)	2.626±1 (0,06)	0,77±0,03 (3,99)	0,29±0,01 (3,97)	2.628±1 (0,05)	0,20±0,01 (4,81)	2.624±2 (0,06)	0,48±0,03 (6,20)	1,0±0,1 (7,40)
AZF (3 cm)	2.629±1 (0,05)	0,73±0,01 (0,92)	0,28±0,00 (0,96)	2.632±2 (0,06)	0,20±0,01 (3,78)	2.627±1 (0,06)	0,47±0,02 (3,57)	1,5±0,0 (3,02)
BCE (3 cm)	2.612±1 (0,03)	0,85±0,02 (2,66)	0,32±0,01 (2,66)	2.614±1 (0,03)	0,24±0,01 (5,89)	2.610±1 (0,03)	0,60±0,04 (6,16)	2,0±0,1 (5,38)
ITN-1 (2 cm)	2.610±5 (0,18)	1,01±0,09 (9,26)	0,39±0,04 (9,41)	2.610±5 (0,17)	0,40±0,04 (9,95)	2.605±5 (0,17)	0,96±0,11 (11,64)	2,1±0,2 (10,26)
ITN-2 (2 cm)	2.614±4 (0,16)	0,88±0,04 (4,08)	0,34±0,01 (4,16)	2.613±4 (0,16)	0,35±0,02 (6,97)	2.608±3 (0,13)	0,88±0,05 (5,34)	1,9±0,1 (5,53)
CRV (2 cm)	2.621±1 (0,05)	0,79±0,03 (3,51)	0,30±0,01 (3,51)	2.623±2 (0,07)	0,27±0,01 (4,67)	2.617±2 (0,08)	0,71±0,02 (2,93)	1,3±0,1 (3,87)
CSB (3 cm)	2.612±21 (0,80)	0,72±0,05 (6,78)	0,28±0,02 (6,62)	2.614±21 (0,80)	0,21±0,01 (7,05)	2.609±21 (0,81)	0,54±0,04 (7,93)	1,7±0,1 (7,88)
FLS (3 cm)	2.610±13 (0,51)	0,92±0,07 (7,10)	0,35±0,02 (6,90)	2.612±13 (0,51)	0,32±0,02 (7,77)	2.606±14 (0,54)	0,87±0,06 (7,03)	2,7±0,2 (7,83)
GVN (3 cm)	2.639±7 (0,28)	0,87±0,02 (2,24)	0,33±0,01 (2,48)	2.641±8 (0,28)	0,25±0,01 (2,95)	2.636±7 (0,28)	0,70±0,02 (3,21)	2,1±0,1 (2,42)
ARB (2 cm)	2.656±8 (0,29)	0,69±0,04 (6,23)	0,26±0,02 (6,04)	2.657±7 (0,27)	0,25±0,01 (5,17)	2.651±8 (0,31)	0,65±0,03 (4,31)	1,3±0,1 (3,87)
SCC (3 cm)	2.641±9 (0,33)	0,79±0,05 (6,56)	0,30±0,02 (6,79)	2.644±9 (0,34)	0,23±0,01 (5,93)	2.636±8 (0,31)	0,66±0,05 (7,67)	2,0±0,1 (6,95)

Tabela 6.18 – Índices físicos determinados segundo ABNT (1992a) – Corpos-de-prova: 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5 cm.

AMOSTRA	ABNT (1992a)		
	ρ_{sec} (kg/m ³)	η (%)	α (%)
LBD	2.677±6 (0,23)	0,24±0,03 (10,61)	0,09±0,01 (10,72)
VCB-1	2.641±1 (0,05)	0,26±0,02 (7,36)	0,10±0,01 (7,37)
VCB-2	2.637±2 (0,07)	0,26±0,01 (3,86)	0,10±0,00 (3,85)
VCB-3	2.633±2 (0,07)	0,37±0,02 (5,42)	0,14±0,01 (5,45)
RIC	2.626±1 (0,05)	0,40±0,02 (5,32)	0,15±0,01 (5,35)
BCR	2.618±2 (0,07)	0,37±0,02 (6,11)	0,14±0,01 (6,14)
BSV	2.623±1 (0,05)	0,56±0,03 (6,20)	0,21±0,01 (6,25)
PIT	2.634±1 (0,03)	0,27±0,02 (6,93)	0,10±0,01 (6,94)
AZF	2.625±2 (0,06)	0,44±0,02 (4,58)	0,17±0,01 (4,63)
BCE	2.619±3 (0,10)	0,47±0,02 (4,16)	0,18±0,01 (4,19)
ITN-1	2.612±6 (0,16)	0,91±0,06 (6,88)	0,35±0,03 (6,90)
ITN-2	2.614±4 (0,22)	1,00±0,07 (7,08)	0,38±0,03 (7,28)
CRV	2.628±1 (0,03)	0,56±0,03 (6,26)	0,21±0,01 (6,28)
CSB	2.636±16 (0,60)	0,44±0,03 (5,85)	0,17±0,01 (6,13)
FLS	2.616±22 (0,83)	0,61±0,08 (13,92)	0,23±0,03 (14,46)
GVN	2.644±8 (0,31)	0,66±0,06 (9,21)	0,25±0,02 (9,30)
ARB	2.654±7 (0,26)	0,55±0,04 (7,80)	0,21±0,02 (7,85)
SCC	2.635±3 (0,13)	0,78±0,05 (6,01)	0,29±0,02 (6,01)

Os parâmetros foram obtidos em corpos-de-prova de placas polidas, destinados aos vários ensaios de alteração acelerada; e, também, naqueles confeccionados para determinação da resistência à compressão, por sua vez retirados material *in natura* (blocos enviados para ensaios). Isso ensejou a verificação de modificações entre o material beneficiado e o *in natura* e da influência do tamanho e forma dos corpos-de-prova nos valores obtidos.

Para a realização dos ensaios foram seguidos os procedimentos recomendados

por ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a), utilizando-se, então, corpos-de-prova com as seguintes dimensões:

- ladrilhos polidos, aqui denominados *ladrilho*: 10 cm x 10 cm, 10 cm x 12 cm, 10 cm x 15 cm, com espessura de 2 cm ou 3 cm (conforme aquela da placa polida),
- blocos *in natura*, aqui denominados *bloco*: cubos com 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5 cm.

Como pôde ser observado, para o tamanho 10 cm x 15 cm, não foram determinadas densidade aparente e absorção segundo (CEN, 1998a) (Tab. 6.16). Isto se explica por terem sido os primeiros corpos-de-prova a serem ensaiados e não se havia, até então, deparado, como será extensivamente discutido adiante, com as variações de valores conforme o método e tamanho do corpo-de-prova.

Quando se introduziu a determinação segundo (CEN, 1998a), esses corpos-de-prova já haviam sido cortados para os ensaios de alteração em câmaras climáticas, o que inviabilizou o estudo comparativo.

Algumas estatísticas (valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação; máximos, mínimos e mediana) das determinações realizadas para as 18 amostras estudadas encontram-se na Tabela 6.19.

Os valores médios determinados exibiram variação entre 2.632 kg/m³ (ABNT – *bloco*) e 2.621 kg/m³ (BSI – 10 cm x 12 cm), para densidade; entre 0,28% (ABNT – 10 cm x 10 cm) e 0,19% (ABNT – *bloco*), para absorção; e entre 0,73% (ABNT – 10 cm x 10 cm) e 0,51% (ABNT – *bloco*), para porosidade.

O maior valor obtido para a absorção d'água foi 0,41% (ABNT – *ladrilho* – 10 cm x 12 cm), e o menor, 0,09% (ABNT – *bloco*). A porosidade máxima foi 1,08% (ABNT – 10 cm x 12 cm) e a mínima, 0,24% (ABNT – *bloco*).

Os coeficientes de variação, bastante reduzidos, para os valores de densidade, são relativamente altos para absorção e porosidade: 44% para *bloco* e entre 23% e 30% para ladrilhos, apontando para a variabilidade das propriedades intrínsecas desses materiais e ressaltando uma questão, aparentemente, fundamental quanto à alterabilidade; a capacidade de absorção da rocha e sua quantificação.

Tabela 6.19 – Dados estatísticos de índices físicos obtidos para as amostras ensaiadas.

Método/ Parâmetro		Área CP (cm)	$\bar{x}$	s	C.V.	mínimo	mediana	máximo
ABNT	ρ_{sec}	BLOCO	2.632	16	0,6	2.612	2.631	2.677
	η		0,51	0,22	43	0,24	0,45	1,00
	α		0,19	0,08	44	0,09	0,17	0,38
ABNT	ρ_{sec}	10 x 15	2.629	15	0,6	2.610	2.627	2.662
		10 x 12	2.627	15	0,6	2.606	2.623	2.660
		10 x 10	2.628	16	0,6	2.610	2.624	2.660
	η	10 x 15	0,69	0,17	24	0,41	0,68	0,92
		10 x 12	0,67	0,17	25	0,31	0,69	1,08
		10 x 10	0,73	0,17	24	0,32	0,73	1,01
	α	10 x 15	0,26	0,06	24	0,15	0,26	0,35
		10 x 12	0,26	0,06	25	0,12	0,26	0,41
		10 x 10	0,28	0,07	24	0,12	0,28	0,39
	ρ_b	10 x 15	2.625	16	0,6	2.605	2.621	2.657
		10 x 12	2.621	16	0,6	2.595	2.619	2.655
		10 x 10	2.624	16	0,6	2.605	2.621	2.658
BSI	p_o	10 x 15	0,65	0,16	24	0,34	0,66	0,95
		10 x 12	0,65	0,15	23	0,41	0,64	0,96
		10 x 10	0,61	0,18	30	0,34	0,61	0,96
	V_o	10 x 15	2,3	0,6	26	1,5	2,2	3,7
		10 x 12	2,0	0,5	24	1,4	2,0	3,2
		10 x 10	1,6	0,5	30	1,0	1,4	2,7
CEN	ρ_{sec}	10 x 12	2.627	15	0,6	2.610	2.623	2.659
		10 x 10	2.629	16	0,6	2.610	2.625	2.663
	A_b	10 x 12	0,25	0,06	25	0,13	0,25	0,36
		10 x 10	0,24	0,06	27	0,13	0,24	0,40

Nota: ρ_{sec} = massa específica aparente seca (kg/m³); η = porosidade aparente (%); α = absorção d'água aparente (%); A_b = coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%); V_o = volume de poros abertos (mL); ρ_b = densidade aparente seca (kg/m³); p_o = porosidade aberta (%); $\bar{x}$ = média; s = desvio-padrão; C.V. = coeficiente de variação.

6.2.1 Grupos discriminados segundo densidade e absorção

Em geral, os resultados mostraram-se consistentes, como indicado pelos desvios padrão e coeficientes de variação. As diferenças nos valores obtidos para parâmetros semelhantes, como será discutido adiante, se relacionaram especialmente aos métodos ensaio e tamanhos e formas dos corpos-de-prova.

É relevante ressaltar que, a despeito dessas variações, a hierarquia, definida

pela relação densidade aparente, absorção d'água e porosidade aberta, é basicamente a mesma, não se supondo, então, interferência na integração dos dados.

Podem ser extraídas inúmeras informações que de tão rico conjunto de dados. Entretanto, dado o escopo deste trabalho, será sempre destacada a questão da absorção d'água, e sua determinação, na discussão dos resultados.

As rochas graníticas em estudo tendem a exibir correlação negativa entre densidade e porosidade e absorção, ou seja, aquelas com menor densidade, em geral, apresentam maior absorção d'água. Tal tendência pode ser explicada pelo fato de densidades menores estarem relacionadas a um volume maior de vazios (poros, fissuras etc.) no material, o que, por sua vez, potencialmente permite maior incorporação de água; resultando, assim, em valores menores.

Considerando o conjunto de dados obtidos, é possível distinguir tendências na distribuição dos grupos em relação à absorção e densidade que serão tratados separadamente, a seguir, quanto ao tipo de amostra; *ladrilho* e *bloco*.

6.2.1.1 Ladrilho

A Tabela 6.20 mostra a distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios de densidade e absorção (ABNT, 1992a e CEN, 1998a) para ladrilhos polidos, independentemente do tamanho. Os intervalos foram definidos arbitrariamente, baseando-se na análise dos valores máximos, intermediários e mínimos, em 2.615 kg/m³, 2.630 kg/m³ e 2.645 kg/m³ para densidade aparente e em 0,15% e 0,30% para absorção d'água.

Tabela 6.20 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (ABNT, 1992a e CEN, 1998a) de densidade aparente e absorção para *ladrilho*.

	ρ_{sec} (kg/m ³)	α (%)		
		<0,15	0,15-0,30	>0,30
A	<2.615	--	(CSB), (BCR), (CVR)	ITN-1, ITN-2, FLS, BCE, (BCR)
B	2.615-2.630	--	PIT, AZF, RIC, BSV (BCE), BCR, CSB, (CRV)	(CVR)
C	2.630-2.645	VCB-3, (VCB-2)	VCB-1, (VCB-3), SCC, VCB-2, (BCE), GVN	(GVN)
D	>2.645	--	ARB, LBD	--

Nota: mesmos símbolos da Tab. 6.19.

Designações entre parênteses indicam rochas que, subordinadamente, apresentaram valores diferentes do predominante.

As determinações, segundo ABNT (1992a) e CEN (1998a), indicaram que a grande maioria das rochas estudadas apresenta densidade aparente entre 2.615 kg/m³ e 2.645 kg/m³, e absorção entre 0,15% e 0,30%.

Com absorção entre 0,15% e 0,30% e densidade aparente entre 2.615 kg/m³ e 2.630 kg/m³, concentram-se os grupos 3 e 4 e as amostras CSB e CRV, e entre 2.630 kg/m³ e 2.645 kg/m³, acham-se as VCB, SCC e GVN. As amostras ITN e BCE, em geral, têm absorção >0,30% e densidade <2.615 kg/m³ e os ARB e LBD, por sua vez, exibem absorção entre 0,15 e 0,30% e densidade >2.645 kg/m³.

Com comportamento errático, ora com densidade menor e/ou absorção maior citam-se as amostras CSB, CVR, BCR e GVN. Da mesma forma, com tendência à menor absorção, estão os VCB-3 e VCB-2.

A discriminação das rochas, segundo a densidade, parece ser primordialmente relacionada à composição mineralógica. No tocante à absorção, presume-se a influência da alteração e fissuramento.

As rochas menos densas (A – Tab. 6.20) são compostas essencialmente de feldspatos, com relativamente poucos máficos ou anisotropia ou intemperismo relativamente elevado (FLS).

As rochas com densidade entre 2.615 kg/m³ e 2.630 kg/m³ (B) têm maior quantidade de quartzo e de máficos (biotita, principalmente) que as anteriores (A).

A crescente quantidade de máficos (biotita, principalmente) e de granada contribui para a diferenciação das rochas com densidade entre 2.630 kg/m³ e 2.645 kg/m³ e >2.645 kg/m³. A amostra LBD, um charnockito, caracteriza-se como a rocha mais densa deste estudo.

Deve ser mencionado que as CSB e FLS são rochas mais ricas em micas, distribuídas segundo bandas irregularmente dispostas conforme a estruturação. Essa heterogeneidade se reflete no coeficiente de correlação da densidade aparente e absorção, independentemente da forma do corpo-de-prova e do método de ensaio utilizado, pois dificulta obtenção de corpos-de-prova semelhantes. Como são amostras representativas da rocha inalterada e intempericamente alterada, a menor densidade da FLS reflete o aumento da porosidade e possíveis mudanças mineralógicas e/ou físicas.

Adotando-se os mesmos intervalos de densidade aparente dos resultados das normas ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a) e prEN WI 036 (CEN, 1998a), e

estabelecendo os valores de 0,40% e 0,80% para porosidade aberta (BSI, 1999a), é notável o deslocamento de um grupo de rochas (Tabela 6.21) do intervalo de porosidade entre 0,40% e 0,80% (aproximadamente equivalente à faixa entre 0,15% e 0,30%) para a faixa $<2.615 \text{ kg/m}^3$; quais sejam as RIC, BCR, BSV, BCE e CSB. As demais rochas, na sua maioria, acham-se nos mesmos intervalos determinados na Tab. 6.20.

Tabela 6.21 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (BSI, 1999a) de densidade aparente e porosidade aberta para *ladrilho*.

$\rho_b \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$P_o \text{ (}\%\text{)}$		
	$<0,40$	$0,40\text{-}0,80$	$>0,80$
<2.615	--	RIC, BSV, BCR, BCE, CSB, (CVR)	ITN-1, ITN-2, FLS
$2.615\text{-}2.630$	VCB-2	PIT, AZF, CRV, (CSB), (FLS)	
$2.630\text{-}2.645$	(VCB-3)	VCB-1, VCB-3, SCC, GVN, (ARB)	
$>2.645 \text{ kg/m}^3$	--	ARB, LBD	(GVN)

Nota: mesmos símbolos da Tab. 6.19.

Designações entre parênteses indicam rochas que, subordinadamente, apresentaram valores diferentes do predominante.

As Figuras 6.33 a 6.35 exibem as relações entre densidade aparente e absorção ou porosidade aberta e os coeficientes de correlação, de acordo com os vários métodos e tamanhos estabelecidos neste trabalho, e mostram a distribuição dos grupos discriminados nos intervalos estabelecidos nas Tab. 6.20 e 6.21.

Figura 6.33 – Relação densidade aparente x absorção (CEN,1998a), para *ladrilho*: a) 10 cm x 12 cm; b) 10 cm x 10 cm.

a)

b)

c)

Figura 6.34 – Relação densidade aparente x absorção (ABNT, 1992a), para *ladrilho*: a) 10 cm x 15 cm, b) 10 cm x 12 cm e c) 10 cm x 10 cm.

a)

b)

c)

Figura 6.35 – Relação densidade aparente x porosidade aberta (BSI, 1999a), para *ladrilho*: a) 10 cm x 15 cm; b) 10 cm x 12 cm; c) 10 cm x 10 cm.

A tendência geral de menores valores de absorção e porosidade aberta para rochas com densidades maiores discrimina dois conjuntos; um contemplando os grupos 2 a 7 e outro, os grupos 1 e 8. A amostra LBD (gr. 1) é uma rocha charnockítica e já pôde ser observado que tem características que a discrimina das demais rochas estudadas. O grupo 8 também se diferencia em alguns aspectos principais: estrutura fortemente gnáissica, granulação mais grossa, presença conspícua de granada e grau de alteração.

Entre os grupos 2 a 7 é possível verificar a tendência de ITN e BCE apresentarem maiores valores de absorção e menores de densidade e dos VCB, menores absorção e maiores densidade. Os valores de CRV são próximos, mas diferentes das ITN.

Coefficientes de correlação determinados para todas as amostras (“todas”, nos gráficos anteriores) e somente para os grupos 2 a 7 (próximo à reta de regressão) indicaram:

- muito fraca a média correlação negativa ($0,16 < R < 0,57$), para “todas”, sendo as melhores encontradas para CEN (1998a) nos tamanhos 10 cm x 12 cm e 10 cm x 15 cm;
- média a forte correlação negativa ($0,59 < R < 0,80$) entre densidade e absorção ou porosidade para as rochas dos grupos 2 a 7, geralmente com $R > 0,75$ para corpos-de-prova com tamanhos 10 cm x 10 cm e 10 cm x 15 cm.

6.2.1.2 Bloco

Os grupos discriminados para *bloco*, segundo os intervalos de densidade e absorção adotados para *ladrilho*, conforme ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a) (Tabela 6.22 e Figura 6.36), tendem a uma distribuição semelhante àquela encontrada para *ladrilho*, mas com valores menores de absorção d’água e pouco maiores de densidade.

Tabela 6.22 – Distribuição das rochas estudadas segundo intervalos de resultados médios (ABNT, 1992a) de densidade aparente e absorção.

ρ_{sec} (kg/m ³)	α (%)		
	<0,15	0,15-0,30	>0,30
<2.615	--	-	ITN-1, ITN-2
2.615-2.630	RIC, BCR	FLS, BCE, AZF, CRV, BSV	--
2.630-2.645	VCB-1, VCB-2, VCB-3, PIT	CSB, SCC, GVN	--
>2.645	LBD	ARB	--

Nota: mesmos símbolos da Tab. 6.19.

Figura 6.36 – Relação densidade aparente x absorção, para *bloco* (ABNT, 1992a).

Os grupos 1 e 8 (Fig. 6.36) também são claramente discriminados, esse último pela absorção relativamente maior. O LBD se isola dos demais devido à alta densidade e baixa absorção. No lado oposto a LBD, as amostras ITN também se discriminam pela densidade relativamente menor e alta absorção.

6.2.2 A influência do método de ensaio e forma dos corpos-de-prova

Numa análise global das propriedades físicas determinadas, é possível generalizar a distribuição das rochas estudadas segundo faixas de densidade e absorção arbitrariamente estabelecidas, conforme abordado no item anterior.

Para algumas rochas, entretanto, é verificada grande heterogeneidade nos valores obtidos para densidade (CSB, RIC, BSV, BCR) ou absorção (BCE, VCB-1, VCB-2, GVN, CRV); enquanto para outras, aparentemente, há homogeneidade (Tabela 6.23).

Tabela 6.23 – Rochas com resultados homogêneos nas determinações de propriedades físicas.

amostras	propriedades físicas	
ITN-1, ITN-2	$\rho < 2.615 \text{ kg/m}^3$	$\alpha > 0,30\%$
PIT, AZF	$2.615 \text{ kg/m}^3 < \rho < 2.630 \text{ kg/m}^3$	
SCC	$2.630 \text{ kg/m}^3 < \rho < 2.645 \text{ kg/m}^3$	$0,15\% < \alpha < 0,30\%$
ARB, LBD	$\rho > 2.645 \text{ kg/m}^3$	

Nota: mesmos símbolos da Tab. 6.19.

Com o grande inconveniente de dificultar uma correlação imediata ou, numa análise superficial, aparentar erros, os diversos resultados obtidos para os vários métodos e formas de corpos-de-prova reiteram um dos pontos fundamentais do material em estudo: a heterogeneidade.

A heterogeneidade, característica inerente aos materiais rochosos, reflete o arranjo tridimensional dos minerais, segundo os processos geológicos de formação, que, posteriormente, podem ser rearranjados ou modificados, conforme atuação de novos processos geológicos.

Por mais cuidadosa e criteriosa que seja a escolha e preparação de corpos-de-prova, há sempre uma “incerteza geológica”, fornecida pela quantidade e distribuição relativa dos minerais, descontinuidades, alteração etc.

Por isso, como princípio, não se deve deixar de considerar os diferentes resultados obtidos também ligados às propriedades petrográficas do corpo-de-prova em questão.

As correlações exploratórias realizadas para *bloco* e para *ladrilho* de mesmas dimensões, entre valores densidade e absorção determinados segundo as três normas utilizadas ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a), são exibidas na Figura 6.37 e permitem as seguintes considerações:

- todos os métodos mostram correlação fraca a média entre densidade e absorção. As melhores correlações, $R = 0,53$ (10 cm x 12 cm) e $R = 0,57$ (10 cm x 10 cm), foram obtidas pelo método CEN (1998a).

Figura 6.37 – Correlações entre densidade aparente e absorção entre *bloco* e *ladrilho* de diferentes dimensões, segundo ABNT (1992a), CEN (1998a) e BSI (1999a).

- ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a), principalmente, permite uma boa diferenciação entre os valores obtidos para *bloco* e *ladrilho*, e não exibe variação muito grande desses valores (correlações semelhantes) quando obtidos para ladrilhos de diferentes tamanhos. Sistemáticamente forneceu os maiores valores de absorção e porosidade aparente, que pode se relacionar à temperatura de secagem ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) dos corpos-de-prova;
- o tamanho 10 cm x 10 cm, além de sempre exibir a melhor correlação para *ladrilho*, permite excelente discriminação, quanto à absorção, conforme o métodos utilizados (Fig. 6.37c). Sua observação indica a seqüência decrescente das correlações entre densidade aparente e absorção para *ladrilho*: BSI > CEN > ABNT; que, na ordem inversa, significa que as maiores variações de valores de absorção foram fornecidas por ABNT > CEN > BSI.

A norma BS EN 1336 (BSI, 1999a) introduziu a determinação do volume de poros abertos, ou seja, a quantificação do volume de água incorporada nos corpos-de-prova, que refletiria o mais próximo da realidade, a capacidade de absorção da rocha.

A Figura 6.38 também mostra a clara influência dos vários formatos estabelecidos para os ladrilhos polidos, bem como da sua espessura, no volume de

poros abertos determinados para as rochas estudadas.

Figura 6.38 – Relação poros abertos x porosidade aberta (BSI, 1999a), para *ladrilho*: a) 10 cm x 15 cm; b) 10 cm x 12 cm; c) 10 cm x 10 cm.

Notar o deslocamento do conjunto de amostras para menores valores de poros abertos de a) para c).

Dentre as várias considerações que podem ser feitas a partir da observação da distribuição das rochas na Fig. 6.38, destacam-se:

- poros abertos x porosidade aberta permite a nítida distinção dos diferentes volumes dos corpos-de-prova;
- o volume de poros abertos e, conseqüentemente, a capacidade relativa de absorção de água pela rocha, como ressaltado pela amostra PIT, ensaiada com espessura de 2 cm e 3 cm, tende a ser maior para espessuras maiores;
- a maior parte das amostras guardou, relativamente, a mesma hierarquização, independente da área ou volume dos corpos-de-prova;
- os valores de poros abertos e porosidade aberta mostraram média a forte correlação ($R > 0,65$), em especial para aqueles obtidos para corpos-de-prova com 10 cm x 10 cm.

A proporcionalidade entre o volume de poros abertos e a área dos corpos-de-prova pode ser vista na Figura 6.39, à exceção de CSB e FLS (grupo 7).

Figura 6.39 – Diferentes valores obtidos para poros abertos, conforme o tamanho do corpo-de-prova.

As rochas do grupo 7 pertencem à mesma unidade geológica, porém representam litotipos com diferentes graus de alteração intempérica – FLS > CSB – cujos resultados indicariam os efeitos degradadores do intemperismo nas propriedades físicas de rochas, a despeito das incipientes modificações exibidas no exame petrográfico. Também devem ser consideradas a forte anisotropia das rochas e a irregular distribuição de bandas quartzo-feldspáticas, ora ricas em feldspato potássico, ora ricas em plagioclásio, na heterogeneidade dos resultados.

Algumas rochas destacam-se das outras, aqui consideradas como pertencentes ao mesmo grupo (vide Tab. 6.1), por exibirem menor volume de poros abertos, nos tamanhos 10 cm x 10 cm e 10 cm x 12 cm: RIC (<BCR <BSV); ARB (<SCC <GVN); CRV (<ITN-1 <ITN-2).

As amostras LBD e GVN mostram grande deslocamento relativo de poros abertos, cujos valores migram de 1,2 mL, com 10 cm x 10 cm, para 2,8 mL, com 10 cm x 15 cm e de 2,1 mL para 3,7 mL, respectivamente.

Há forte correlação positiva ($R = 0,78$) entre porosidade aberta e poros abertos (Figura 6.40), que também revela a influência dos diferentes tamanhos dos corpos-de-

prova no volume de poros abertos, ou seja, quanto maior o volume do corpo-de-prova, maior o volume de poros abertos.

Figura 6.40 – Correlações entre porosidade aberta e volume de poros abertos para *ladrilho*, de diferentes dimensões (BSI, 1999a).

Observação importante para a padronização do tamanho do corpo-de-prova, de modo a que fique isento das variações verificadas. O tamanho ótimo seria aquele em que se inicia a estabilização, entretanto tal dimensão não deverá ser adequada para as determinações, visto que no tamanho 10 cm x 15 cm, o corpo-de-prova, já tem volume e peso inadequados para os equipamentos usuais.

Com base nas várias análises estatísticas exploratórias, é possível indicar o tamanho 10 cm x 10 cm para corpos-de-prova de *ladrilho*, visto que novamente exibem a melhor correlação, como o mais adequado, tanto do ponto estatístico, como laboratorial, para a determinação de índices físicos de rochas beneficiadas.

6.2.2.1 Variações de propriedades físicas de bloco para ladrilho

A possibilidade de mudanças nas propriedades físicas e mecânicas da rocha para revestimento, a partir daquelas que se apresentam no maciço rochoso – antes dos trabalhos de lavra – em decorrência das solicitações ao longo dos processos de extração, transporte, beneficiamento e colocação, é reconhecida por pesquisadores desse tema.

Como abordado por Amoroso; Fassina (1983), tanto os efeitos dos diferentes processos de beneficiamento, nas características físicas e estruturais dos materiais rochosos, nunca foram extensivamente estudados, como os poucos trabalhos, até então realizados, não revelaram diferenças relevantes nesses materiais.

Frascá (2002b) investigou preliminarmente as possíveis modificações na densidade aparente, absorção d'água e porosidade, segundo ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a), de rochas para revestimento, de composição granítica, exploradas no Estado de São Paulo.

O estudo evidenciou modificações aleatórias nessas propriedades, a despeito da exaustiva repetição de ensaios para excluir possibilidade de erros. Concluiu-se que esse resultado se relacionava, preponderantemente, ao tamanho dos corpos-de-prova utilizados para essas determinações: 7 cm x 4,5 cm x 3 cm e 15 cm x 2 cm x 3 cm, para aqueles representativos das rochas beneficiadas (*ladrilho*) e cubos com 4 cm ou 5 cm de arestas, para as rochas *in natura* (*bloco*).

Nessa oportunidade também foi investigada a influência do polimento, em uma das faces, nos resultados de densidade e absorção, nas determinações efetuadas segundo ABNT (1992a). A influência do polimento revelou-se pouco significativa nas determinações efetuadas, cerca de 1,5%, em média, segundo o método utilizado.

Neste trabalho, com a finalidade de dar continuidade a essa investigação, para a determinação dos parâmetros de densidade e absorção representativos da rocha *in natura* foram confeccionados corpos-de-prova com arestas de 7,5 cm. Os resultados das determinações, segundo ABNT NBR 12 766 (ABNT, 1992a), já foram apresentados nas Tab. 6.15 a 6.18.

As variações nos valores de densidade e absorção d'água entre os corpos-de-prova de *bloco* e de *ladrilho*, são exibidas nas Figuras 6.41 e 6.42. Os valores máximo, mínimo e mediana das variações de densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água entre *bloco* e *ladrilho* acham-se na Tabela 6.24.

Figura 6.41 – Distribuição das variações de densidade de *ladrilho* em relação a *bloco*.

Figura 6.42 – Distribuição das variações de absorção *ladrilho* em relação a *bloco*.

Tabela 6.24 – Variações máxima e mínima de propriedades físicas (ABNT, 1992a) de *bloco* para *ladrilho*.

Valores	$\Delta_{bl-10x15}$			$\Delta_{bl-10x12}$			$\Delta_{bl-10x10}$		
	ρ_{sec}	η	α	ρ_{sec}	η	α	ρ_{sec}	η	α
mínimo	-0,56%	-9%	-9%	-1,13%	-15%	-15%	-0,90%	-12%	-12%
mediana	-0,14%	36%	36%	-0,13%	39%	39%	-0,14%	47%	48%
máximo	0,34%	187%	188%	0,23%	190%	192%	0,28%	191%	193%

Nota: ρ_{sec} = massa específica aparente seca (kg/m^3); η = porosidade aparente (%); α = absorção d'água aparente (%); $\Delta_{bl-10x15}$ = variação entre *bloco* e ladrilho (10 cm x 15 cm); $\Delta_{bl-10x12}$ = variação entre *bloco* e ladrilho (10 cm x 12 cm); $\Delta_{bl-10x10}$ = variação entre *bloco* e ladrilho (10 cm x 10 cm)

Os valores máximos e mínimos obtidos para os diferentes tamanhos de corpos-de-prova dos ladrilhos se mostraram bastante semelhantes, mas há grande irregularidade da sua distribuição, conforme a rocha e o tamanho do corpo-de-prova (Fig. 6.41 e 6.42).

Para o parâmetro densidade aparente, as variações foram muito reduzidas: aumento máximo de 0,34% e diminuição máxima de 1,13%, avaliadas como não-significativas. As amostras CSB e LBD exibiram as maiores modificações de densidade aparente (negativas), destacando-se das demais.

Dado que os valores de porosidade aparente e de absorção d'água são proporcionais, nota-se que as variações de um e de outro são praticamente iguais. Esses parâmetros mostraram, para algumas rochas, variações significativas de *bloco* para *ladrilho*, podendo atingir 190%. Isto sugere que a rocha beneficiada pode exibir absorção (e porosidade) quase duas vezes superiores àquelas *in natura*.

No entanto, essas variações são muito heterogêneas, pois em outras amostras, a absorção permaneceu estável ou até diminuiu. A amostra LBD apresentou o maior aumento relativo de absorção, seguido por PIT e BCR, e as ITN-1, ITN-2 e SCC permaneceram estáveis, rochas originalmente com absorção relativamente alta.

Em geral, as variações de absorção predominaram entre 0% e 40% e de densidade entre 0% e -0,4% (Figura 6.43).

Figura 6.43 – Frequências das variações de absorção (a) e densidade (b) entre *bloco* e os diferentes tamanhos de *ladrilho* (ABNT, 1992a).

Foram obtidas fracas correlações, negativas, entre densidade aparente (*bloco*) e variação de densidade *bloco-ladrilho* (Figura 6.44).

Figura 6.44 – Correlações entre densidade (*bloco*) e variações desse parâmetro, para os diferentes tamanhos de *ladrilho*.

Entre absorção d'água (*bloco*) e variações para os diferentes tamanhos de ladrilhos (Figura 6.45) há média a forte correlação negativa, novamente indicando que as menores variações tenderam a ocorrer para as rochas originalmente com maiores valores de porosidade e absorção d'água.

Figura 6.45 – Correlações entre absorção e variação de absorção entre *bloco* e *ladrilho*, (ABNT, 1992a), para corpos-de-prova com tamanhos: a) 10 cm x 15 cm, b) 10 cm x 12 cm, c) 10 cm x 10 cm.

6.2.3 Capilaridade

A determinação do coeficiente de capilaridade é relativamente recente no campo das rochas para revestimento, especialmente para as graníticas, pois como apontado na norma BS EN 1925 (BSI, 1999b) em que foram baseados os ensaios aqui realizados, ela não é recomendada para rochas com porosidade aberta menor que 1%.

Entretanto, como é considerada a propriedade reguladora da incorporação de água pela rocha e um dos parâmetros mais importantes nos estudos de deterioração de rochas, experimentalmente optou-se pela sua determinação, em ladrilhos polidos, visando a análise comparativa com os resultados dos ensaios de alteração acelerada.

Os valores dos coeficientes de capilaridade (C) e as curvas de absorção (g/m^2) x a raiz quadrada do tempo (s) acham-se na Figura 6.46. Notar que C é o coeficiente de capilaridade relativo a rochas isotrópicas e C_1 aquele obtido para rochas gnáissicas, perpendicularmente à estruturação.

Figura 6.46 – Curvas de absorção por capilaridade para as amostras em estudo.

A observação das curvas de capilaridade indica três padrões principais, quanto ao tempo de saturação de água:

- rochas que rapidamente absorveram água e estabilizaram: RIC, BCR e BSV (gr.3); ITN-1 e ITN-2; LBD (gr.1); CSB e FLS (gr.7);
- rochas que absorveram água mais lentamente, atingindo a estabilização praticamente ao final do ensaio: VCB-1, VCB-2, VCB-3 (gr. 2), BCE (gr. 5) e SCC;
- rochas com comportamento intermediário: PIT, AZF (gr. 4), CRV, GVN e ARB.

No tocante à quantidade de água absorvida, o comportamento, em geral, não foi coincidente com os grupos discriminados quanto às curvas de absorção. A maioria dos corpos-de-prova apresentou absorção entre 100 g/m^2 e 150 g/m^2 . As amostras ITN-1, FLS e GVN mostraram absorção maior que 200 g/m^2 ; as amostras BCE, ITN-2, CSB e SCC, entre 150 e 200 g/m^2 ; e as ARB e VCB-3, próximo ou abaixo de 100 g/m^2 .

Os coeficientes de capilaridade e os valores de absorção, porosidade aberta e volume de poros abertos, já anteriormente citados (Figuras 6.47 e 6.48), evidenciaram média a forte correlação positiva.

Figura 6.47 – Correlação entre coeficiente de capilaridade e volume de poros abertos (BSI, 1999a).

Figura 6.48 – Correlação entre coeficiente de capilaridade e absorção (ABNT, 1992a e CEN, 1998a), e porosidade aberta (BSI, 1999a).

Novamente se depara com a dependência geométrica do corpo-de-prova com as determinações dos parâmetros físicos. Os resultados para aqueles com dimensões 10 cm x 15 cm, em especial, têm mostrado correlações mais fracas e irregulares que para os outros tamanhos, não se encontrando uma justificativa satisfatória para isso. Erros sistemáticos referentes à dificuldade de manuseio dos corpos-de-prova, relativamente grandes para os equipamentos usuais nessas determinações, podem ser apontados como o principal motivo.

Os valores de absorção d'água para ladrilhos 10 cm x 12 cm, segundo ABNT (1992a) e CEN (1998a), apresentaram as melhores correlações com os coeficientes de capilaridade, esses obtidos em ladrilhos 10 cm x 10 cm.

Quanto às determinações do coeficiente de capilaridade e poros abertos para *ladrilho*, de dimensões 10 cm x 10 cm e 10 cm x 12 cm (Fig. 6. 48), as correlações foram muito fortes, próximas a 0,95.

As rochas dos Grupos 1, 2, 3 e 4 e a amostra ARB têm, relativamente, os menores valores de capilaridade e poros abertos, enquanto as dos grupos 5, 6, 7 e 8, os maiores (Figura 6.49).

Figura 6.49 – Relação entre coeficiente de capilaridade e poros abertos (BSI, 1999a) para corpos-de-prova 10 cm x 10 cm e 10 cm x 12 cm. Detalhamento da Fig. 6.47, exibindo as rochas equivalentes a cada ponto.

Essas fortes correlações permitem indicar que o volume de poros abertos é diretamente proporcional ao coeficiente de capilaridade das rochas graníticas em estudo, o que, por sua vez, possibilita a extrapolação desse diretamente dos valores obtidos para poros abertos.

6.3 Propriedades Mecânicas

Cardani; Meda (1999) atribuem a muitos dos erros cometidos na preservação de rochas em edifícios históricos o desconhecimento da influência das propriedades físicas e mecânicas na sua durabilidade, sobretudo em ambiente urbano-industrial. Consideram as resistências mecânicas como as propriedades mais importantes, pois são às forças de tensão que as rochas para revestimento estão sujeitas *in situ*, devido à ação de cargas e das condições ambientais.

Cardani; Meda (1999) ponderam a dificuldade de execução de ensaios diretos de tensão, especialmente na aplicação da carga, que sempre induz a um comportamento não-homogêneo, levando a resultados incorretos. Os ensaios normalizados permitem evitar essa situação por meio da determinação indireta da resistência à tensão da rocha. Apontam as resistência à compressão e à flexão como as técnicas mais freqüentemente utilizadas.

Em concordância com a argumentação de Cardani; Meda (1999), já se havia previamente selecionado, para a caracterização das propriedades mecânicas as resistências à compressão e à flexão, respectivamente determinadas nas condições

seca e saturada, e seca e após ciclos de choque térmico.

Por meio desses ensaios, são também potencialmente obtidas informações sobre as anisotropias e heterogeneidades causadas por microdescontinuidades e diferentes inter-relações dos minerais formadores dos materiais rochosos enfocados. Possíveis modificações na hierarquia dos resultados desses ensaios, realizados a partir de corpos-de-prova de *bloco* e *ladrilho*, poderiam refletir a maior ou menor resistência às solicitações de lavra e beneficiamento dessas rochas.

6.3.1 Compressão

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado para a determinação da resistência à tensão das rochas, ou seja, qual a capacidade de suportarem força por área. A norma ASTM C 170 (ASTM, 1990) recomenda a realização deste ensaio nas condições seca e saturada. Nas rochas isotrópicas, como mencionado no Capítulo 5, foram realizadas determinações em cinco corpos-de-prova, em cada condição. Nas rochas gnáissicas, as resistências à compressão foram determinadas em três corpos-de-prova, para cada condição: seca e saturada; e paralela e perpendicularmente à estrutura.

Diversos estudos mostram que a presença da água na rocha provoca vários efeitos nas propriedades mecânicas, dos quais a redução da resistência à tensão provavelmente seja o mais efetivo.

A água tende a reduzir a energia superficial e a resistência dos cristais, resultando na diminuição da resistência mecânica da rocha e no aumento da sua deformabilidade (Turk; Dearman, 1985 *apud* Gupta; Rao, 2000). Gupta; Rao (2000) sugerem que esse decaimento é relativo ao aumento da pressão de água nos poros, sendo mais efetivo nas rochas intempericamente alteradas, devido ao esperado aumento da porosidade.

Os resultados determinação de resistência à compressão uniaxial acham-se na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 – Valores médios de resistência à compressão uniaxial, seca e saturada, variação de resistência entre as condições seca e saturada e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

amostra	σ_c		Δ_{σ_c}	VP _{nat}
	seca	saturada		
LBD	112,9±17,3 (15,3)	101,2±17,3 (17,1)	-10	5.467±55 (1,0)
VCB-1	122,5±12,0 (9,8)	114,7±9,4 (8,2)	-6	5.407±67 (1,2)
VCB-2	141,5±10,8 (7,7)	112,4±14,8 (13,2)	-21	5.445±159 (2,9)
VCB-3	130,4±9,0 (6,9)	116,7±17,8 (15,3)	-10	5.309±103 (1,9)
RIC	136,2±17,6 (12,9)	125,2±18,5 (14,8)	-8	4.372±67 (1,5)
BCR	141,0±20,4 (14,5)	119,6±17,6 (14,7)	-15	4.485±134 (3,0)
BSV	137,3±10,8 (7,9)	121,5±15,9 (13,1)	-12	3.924±209 (5,3)
PIT	171,5±26,6 (15,5)	143,4±14,7 (10,3)	-16	5.236±28 (0,5)
AZF	137,6±18,6 (13,5)	119,0±6,4 (5,4)	-14	4.842±88 (1,8)
BCE	157,0±8,0 (5,1)	162,5±21,5 (13,3)	3	4.658±187 (4,0)
ITN-1	113,5±8,1 (7,1)	89,1±19,4 (21,8)	-22	4.292±167 (3,9)
ITN-2	113,5±16,2 (14,3)	92,2±8,8 (9,5)	-19	3.806±222 (5,8)
CRV	170,2±26,1 (15,3)	141,0±8,6 (6,1)	-17	4.889±46 (0,9)
CSB //	149,2±14,2 (10,8)	122,6±7,2 (5,9)	-18	3.914±122 (3,1)
CSB ⊥	142,9±15,4 (9,5)	111,2±8,2 (7,3)	-22	3.671±135 (3,7)
FLS //	149,9±1,7 (24,7)	120,6±9,1 (7,6)	-20	4.058±517 (12,7)
FLS ⊥	132,8±32,9 (1,1)	127,0±30,4 (24,0)	-4	3.558±560 (15,7)
GVN //	122,8±5,3 (4,4)	103,6±13,6 (13,2)	-16	4.603±70 (1,5)
GVN ⊥	127,1±9,9 (7,8)	100,5±12,6 (12,5)	-21	4.590±75 (1,6)
ARB //	81,0±22,1 (27,3)	83,7±10,4 (12,4)	3	4.323±252 (5,8)
ARB ⊥	117,9±6,9 (5,9)	88,8±3,0 (3,4)	-25	4.356±290 (6,7)
SCC //	120,9±14,4 (11,9)	95,5±12,8 (13,4)	-21	3.459±535 (15,5)
SCC ⊥	123,9±11,3 (9,1)	105,7±16,8 (15,9)	-15	3.757±53 (1,4)

Nota: // = carga aplicada paralelamente à estrutura da rocha; ⊥ = carga aplicada perpendicularmente à estrutura da rocha.

σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); Δ_{σ_c} = variação da resistência à compressão entre as condições seca e saturada (MPa); VP_{nat} = velocidade de propagação de ondas no estado natural (m/s).

Embora valores médios de resistência à compressão, para um dado tipo de rocha, tenha pequena aplicação direta em engenharia, eles permitem verificar a necessidade de detalhamento das investigações e testes subseqüentes (Johnson; De Graff, 1988).

Esses autores consideram que a redução da resistência à compressão é um dos mais óbvios e importantes aspectos causados pelo intemperismo, especialmente químico, ou pela alteração da rocha intacta. Também influenciam os valores de resistência à compressão o tamanho dos grãos e anisotropias; esperando-se maiores resistências para rochas da granulação fina e isotrópicas.

As resistências à compressão das diferentes rochas graníticas mostraram que os grupos estabelecidos no início do trabalho, com base na situação geológica, proximidade geográfica e similaridade petrográfica, exibem parâmetros equivalentes (Figura 6.50). Exceção à CRV, que exhibe resistência mecânica muito superior às ITN. Também em desacordo com o esperado, PIT, correspondente naturalmente intemperizado da AZF, apresenta maiores valores de compressão que este.

Figura 6.50 – Resistência à compressão nas condições seda (barras à esquerda) e saturada (barras à direita) e variação (linha).

As resistências relativamente elevadas de CSB e FLS devem-se à estruturação muito heterogênea dessas rochas, que praticamente impossibilitou a obtenção de corpos-de-prova representativos das diferenças estruturais e mineralógicas observadas

em amostra de mão.

A observação da Fig. 6.50 mostra que as variações são relativas ao próprio material, aparentemente desconsiderando a estruturação da rocha. Todas as rochas exibiram variação negativa de resistência à compressão quando ensaiadas saturadas em água, à exceção de BCE e ARB// (+3%, cada). Com as maiores variações, destacam-se as ITN-1, ARB $\perp$, CSB $\perp$, GVN $\perp$, SCC// e FLS//.

As maiores resistências à compressão na condição seca ($\sigma_{c \text{ sec}} > 150$ MPa) foram apresentadas por PIT, CRV e BCE (gr. 5), que, por sua vez, também exibiram as maiores resistências quando saturadas. Deve ser ressaltado que BCE praticamente não apresentou modificação entre as condições seca e saturada.

As rochas dos grupos 2, 3, 5, 7 e 8 (exceto ARB) e a amostra AZF têm $\sigma_{c \text{ sec}}$ entre 120 MPa e 150 MPa, constituindo um grupo intermediário.

Com $\sigma_{c \text{ sec}} < 120$ MPa, acham-se as ITN, LBD e ARB, esse último apresentando os menores valores entre as amostras estudadas, com aplicação da carga paralelamente à estruturação.

As rochas isotrópicas mostraram variações entre 113 MPa e 171 MPa, na condição seca, e entre 89 MPa e 162 MPa (Tabela 6.26), na condição saturada; as gnáissicas apresentaram valores de compressão uniaxial, respectivamente, entre 81 MPa e 150 MPa e entre 84 MPa e 127 MPa. Isto evidencia valores relativamente maiores para as rochas isotrópicas, em todas as condições, que se refletem nas variações de resistência mecânica, mas que, neste caso, não constituiu uma regra.

Tabela 6.26 – Valores máximos, mínimos e mediana obtidos para a resistência à compressão e velocidade de propagação de ondas.

	$\sigma_{c \text{ sec}}$		$\sigma_{c \text{ sat}}$		Δ_{σ_c}		VP_{nat}	
	A	B	A	B	A	B	A	B
mínimo	113	81	89	84	-22	-25	3.806	3.558
mediana	137	126	119	105	-14	-19	4.842	3.800
máximo	171	150	162	127	3	3	5.467	4.596

Nota: A = rochas isotrópicas; B = rochas gnáissicas.

$\sigma_{c \text{ sec}}$ = resistência à compressão uniaxial na condição seca (MPa); $\sigma_{c \text{ sat}}$ = resistência à compressão uniaxial na condição saturada (MPa). Demais símbolos iguais aos da Tab. 6.35.

A maioria das rochas isotrópicas (Figura 6.51) tem variação entre -15% e

-20%. Naquelas gnáissicas, as variações tendem a valores entre -20% e -25%, com predomínio da determinação de resistências segundo as direções normal e paralela à gnaissificação, respectivamente.

Figura 6.51 – Frequência das variações de compressão entre seco e saturado, relativo à estruturação das rochas estudadas.

As correlações entre a resistência à compressão, seca e saturada, e velocidade de propagação de ondas, foram muito fracas. Também não se verificou tendências entre essas e as variações de resistência à compressão entre as condições seca e saturada.

Forte correlação positiva ($R = 0,86$) foi obtida entre as resistências à compressão seca e saturada, como pode ser observado na Figura 6.52.

Figura 6.52 – Correlação entre a resistência à compressão uniaxial, nas condições seca e saturada.

Kessler *et al.* (1940) realizaram um dos estudos pioneiros de caracterização de rochas graníticas, para determinação de propriedades que poderiam ser de “interesse para seleção de materiais para usos específicos”. Foram executados ensaios de resistência à compressão e determinação da densidade, porosidade e absorção em cerca de 116 amostras.

Os ensaios de compressão foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos e a resistência média, na condição seca, foi de 168 MPa, com valores máximo e mínimo de 413 MPa e 69 MPa, respectivamente. A maioria exibiu diminuição da resistência à compressão na condição saturada, que, em média, foi 12% menor que na condição seca. Notaram que não houve modificação significativa nos valores obtidos para rochas anisótropas, nas determinações com aplicação de carga paralela e perpendicularmente à estruturação.

Desconsiderando os valores anômalos (VCB-1, RIC, BCE, FLS $\perp$, ARB $\parallel$), a diminuição média da resistência à compressão das rochas estudadas, na condição saturada em relação à seca, é de (17 ± 4) %, com um alto coeficiente de variação (24 %).

6.3.2 Flexão

O ensaio de flexão foi realizado para a obtenção da resistência nominal das rochas selecionadas para este estudo. Visando a avaliação da resistência dessas rochas perante solicitações cotidianas de variações de temperatura, por vezes bastante bruscas, metade dos corpos-de-prova foi submetida a ciclos de choque térmico.

Como controle das possíveis modificações decorrentes desse ensaio, foram realizadas inspeções visuais, determinação dos pesos de todos os corpos-de-prova e das velocidades de propagação de ondas, antes e após o ensaio.

Os resultados obtidos acham-se na Tabela 6.27 e ilustrados nas Figuras 6.53 e 6.54.

Tabela 6.27 – Resistência à flexão, velocidade de propagação de ondas e variações de massa, de resistência à flexão e de propagação de ondas, antes e após choque térmico.

amostra	$\sigma_{f\text{ nat}}$	$\sigma_{f\text{ CT}}$	Δ_{σ_f}	VP _{nat}	VP _{CT}	Δ_{VP}	Δ_{massa}
LBD	7,65±0,99 (12,9)	4,70±0,57 (12,1)	-39	5.118±404 (7,9)	2.561±169 (6,6)	-52	0,04
VCB-3	13,00±0,43 (3,3)	9,63±1,03 (10,7)	-26	5.570±21 (0,4)	4.315±154 (3,6)	-23	0,04
RIC	11,50±0,81 (7,1)	8,52±0,60 (7,1)	-26	4.694±30 (0,6)	3.654±54 (1,5)	-22	0,02
BCR	11,07±1,99 (18,0)	10,35±1,93 (18,7)	-7	4.105±191 (4,7)	3.643±171 (4,7)	-11	0,03
BSV	10,11±0,42 (4,1)	8,70±0,85 (9,8)	-14	3.895±74 (1,9)	3.548±88 (2,5)	-9	0,03
PIT	15,32±1,12 (7,30)	12,49±1,06 (8,49)	-18	4.989±111 (2,2)	3.992±71 (1,8)	-20	0,03
AZF	14,78±1,65 (11,1)	11,86±1,55 (13,1)	-20	4.833±115 (2,4)	3.751±216 (5,8)	-22	0,04
BCE	16,88±0,51 (3,0)	13,87±0,71 (5,2)	-18	5.155±50 (1,0)	4.289±25 (0,6)	-16	0,02
ITN-1	7,70±0,42 (5,4)	6,92±0,80 (11,5)	-10	3.895±67 (1,7)	3.080±44 (1,4)	-21	0,04
ITN-2	9,63±1,84 (19,1)	8,91±0,88 (9,8)	-7	4.119±211 (5,1)	3.506±180 (5,1)	-15	0,04
CRV	16,50±2,12 (12,9)	14,47±0,53 (3,7)	-12	5.033±97 (1,9)	4.404±80 (1,8)	-12	0,03
CSB ⊥	7,92±0,83 (10,5)	4,75±1,39 (29,3)	-40	3.418±238 (7,0)	3.185±233 (7,3)	-7	0,03
CSB //	5,62±0,67 (12,0)	3,42±1,10 (32,1)	-39	3.646±155 (4,3)	3.396±192 (5,6)	-7	
FLS ⊥	8,38±0,55 (6,6)	7,57±0,92 (12,1)	-10	3.038±156 (5,1)	2.757±127 (4,6)	-9	0,03
FLS //	3,72±0,33 (8,9)	2,68±0,54 (20,2)	-28	3.768±195 (5,2)	3.529±140 (4,0)	-6	
GVN ⊥	10,97±0,32 (2,9)	9,04±1,01 (11,2)	-18	4.833±166 (3,4)	3.553±84 (2,4)	-26	0,01
GVN //	6,99±0,24 (3,4)	5,69±0,05 (0,9)	-19	4.721±96 (2,0)	3.749±62 (1,7)	-21	
ARB ⊥	10,70±1,25 (11,6)	10,20±0,59 (5,8)	-5	4.257±79 (1,9)	3.511±128 (3,6)	-18	0,04
ARB //	7,32±0,91 (12,5)	4,64±0,62 (13,3)	-37	4.651±81 (1,7)	4.012±92 (2,3)	-14	
SCC ⊥	11,50±0,39 (3,4)	7,23±0,15 (2,0)	-37	5.065±94 (1,9)	3.706±125 (3,4)	-27	0,03
SCC //	8,06±1,07 (13,3)	4,12±2,11 (51,2)	-49	5.205±86 (1,7)	4.007±74 (1,8)	-23	

Nota: // = carga aplicada paralelamente à estrutura da rocha; ⊥ = carga aplicada perpendicularmente à estrutura da rocha.

$\sigma_{f\text{ nat}}$ = resistência à flexão no estado natural (MPa); $\sigma_{f\text{ CT}}$ = resistência à flexão após ensaio de choque térmico (MPa);

Δ_{σ_f} = decaimento da resistência à flexão após choque térmico (%); VP_{nat} = velocidade de propagação de ondas no estado

natural; VP_{CT} = velocidade de propagação de ondas após ensaio de choque térmico; Δ_{VP} = variação da velocidade de

propagação de ondas após ensaio de choque térmico (%); Δ_m = variação de massa (%).

Figura 6.53 – Resistência à flexão, na condição seca, antes e após choque térmico, e decaimento relativo.

Figura 6.54 – Velocidade de propagação de ondas, na condição seca, antes e após choque térmico, e decaimento relativo.

A observação da Fig. 6.53 e Tab. 6.27 permite estabelecer a distribuição das rochas estudadas em três grupos, quanto à resistência à flexão, tomando-se a mediana como valor de referência:

- $\sigma_{f\,nat} > 12$ MPa: BCE, CRV, PIT, AZF e VCB-3, que podem ser consideradas de resistência elevada;
- $8 \text{ MPa} < \sigma_{f\,nat} < 12$ MPa: RIC, BSV, BCR, ITN-2, GVN $\perp$, ARB $\perp$, SCC $\perp$, de resistência intermediária;
- $\sigma_{f\,nat} < 8$ MPa (resistência baixa):
 - $8 \text{ MPa} < \sigma_{f\,nat} < 6$ MPa: LBD, ITN-1, CSB $\perp$, FLS $\perp$, GVN $\parallel$, ARB $\parallel$ e SCC $\parallel$ e SCC $\perp$;
 - $\sigma_{f\,nat} < 6$ MPa: CSB $\parallel$ e FLS $\parallel$.

Este último grupo tende a incluir as rochas gnáissicas, cuja determinação de resistência à flexão se deu quando a tensão foi aplicada segundo a estruturação. As exceções são: CSB e FLS, que apresentaram esses valores quando ensaiadas perpendicularmente à estruturação, e LBD, única rocha isotrópica do grupo estudado com RF < 8 MPa.

Deve ser mencionado que CSB $\parallel$ e FLS $\parallel$ exibiram os menores valores de resistência à flexão, cerca de 6 MPa e 3 MPa, respectivamente, o que é novamente atribuído à sua estrutura fortemente bandada e também à presença de microfissuras largas, muitas vezes sem preenchimento, dispostas subparalelamente à estruturação das bandas com minerais micáceos, como observado no exame petrográfico.

Quanto à LBD, considera-se a influência do tamanho relativamente grande dos minerais formadores, do intenso microfissuramento e da alteração intempérica da amostra ensaiada.

Diferentemente das determinações de resistência à compressão, os corpos-de-prova aqui ensaiados representaram, mais adequadamente suas características litológicas. Além disso, os resultados refletem apropriadamente sua influência na resistência mecânica pós-beneficiamento, que deve ser obrigatoriamente observada na escolha do padrão estético a ser comercializado.

As rochas isotrópicas tenderam a apresentar maior resistência à flexão que as rochas gnáissicas (Tabela 6.28), mesmo quando ensaiadas perpendicularmente à estruturação; comportamento repetido em relação à velocidade de propagação de ondas e ao decaimento.

Tabela 6.28 – Resistência à flexão, velocidade de propagação de ondas e variações de massa, de resistência à flexão e de propagação de ondas, antes e após choque térmico.

	$\sigma_{f\text{ nat}}$		$\sigma_{f\text{ CT}}$		$\Delta\sigma_f$		VP_{nat}		VP_{CT}		Δ_{VP}	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
mínimo	7,65	3,72	4,70	2,68	-7	-5	3.895	3.038	2.561	2.757	-9	-6
mediana	11,50	7,99	9,63	5,22	-18	-32	4.833	4.454	3.654	3.541	-20	-16
máximo	16,88	11,50	14,47	10,20	-39	-49	5.570	5.205	4.404	4.012	-52	-27

Nota: **A** = rochas isotrópicas; **B** = rochas gnáissicas. Símbolos: iguais aos da Tab. 6.27.

6.3.2.1 Resistência ao choque térmico

Na literatura pesquisada, como para o restante das determinações neste estudo, foram encontrados muito poucos trabalhos acerca de determinações laboratoriais para verificação de degradações em rocha pela influência direta das flutuações de temperatura. Mas um deles (Warke; Smith, 1998) mostrou informações bastante abrangentes e diretamente aplicadas ao estudo em questão.

Warke; Smith (1998) realizaram simulação de intemperismo pelo aquecimento direto (por insolação) e indireto (em estufa) de rochas selecionadas, demonstraram e quantificaram as várias temperaturas características dos diferentes tipos rochosos (arenito, calcário, granito e basalto) sob aquecimento direto e indireto, com particular ênfase no papel do albedo.

Apontam que, no aquecimento indireto (em estufa), a temperatura da rocha é determinada pela temperatura do ar ao redor das amostras e não pelas propriedades térmicas das rochas, como o albedo, condutividade térmica e calor específico. Nas condições naturais, a rocha é aquecida indiretamente pelo ar e diretamente pela radiação solar, sob direta influência das propriedades térmicas. À noite, a temperatura do ar seria o único fator de controle, de modo que as simulações em estufa devem representar somente as condições noturnas.

Dessa forma, quaisquer diferenças entre os padrões e taxas de decaimento das rochas aqui ensaiadas devem refletir outras propriedades físicas, que afetam a movimentação de água e resistência mecânica. Conseqüentemente, os resultados podem não corresponder àqueles observados em condições naturais. Por outro lado, o aquecimento indireto pode contribuir para deteriorações mais severas.

Nesta pesquisa, dado seu caráter experimental, procurou-se estabelecer

procedimentos laboratoriais que possibilitem antecipar a durabilidade de determinado material rochoso, comparativamente com outros. Portanto, deve-se levar em conta que, caracteristicamente, esses são mais agressivos que os ambientes naturais tendo em vista a obtenção de resultados em tempos e condições compatíveis com as expectativas de respostas pelos usuários e que, também, permitam reprodutibilidade e repetitividade.

Por outro lado, os tipos rochosos em estudo guardam grandes similaridades mineralógicas, exceto LBD, que relativamente tem baixo albedo.

A realização de 20 ciclos de aquecimento (100 °C) e resfriamento imediato em água, na temperatura ambiente, efetivamente promoveu a queda da resistência mecânica das rochas, comparativamente aos corpos-de-prova ensaiados ao natural, como pôde ser observado nas Tab. 6.27 e Fig. 6. 53 e 6.54.

Após choque térmico, os grupos anteriormente referidos quanto à resistência à flexão mostraram as modificações relacionadas abaixo:

- $\sigma_{fCT} > 12$ MPa: BCE e CRV permaneceram com os maiores valores absolutos e PIT e AZF, valores próximos, mas superiores, a 12 MPa;
- $8 \text{ MPa} < \sigma_{fCT} < 12$ MPa: VCB-3 (anteriormente no grupo resistência elevada), RIC, BSV, BCR, ITN-2, GVN $\perp$ e ARB $\perp$;
- $\sigma_{fCT} < 8$ MPa:
 - $8 \text{ MPa} < \sigma_{fCT} < 6$ MPa: ITN-1, FLS $\perp$ e SCC $\perp$ (anteriormente no grupo resistência intermediária);
 - $\sigma_{fCT} < 6$ MPa: CSB// e FLS//; LBD, CSB $\perp$, GVN//, ARB// e SCC// (anteriormente no grupo $8 \text{ MPa} < \sigma_{fCT} < 6$ MPa).

Os valores de decaimento variaram entre cerca de -5% e -50% (Figura 6.55).

Figura 6.55 – Frequência dos decaimentos da resistência mecânica e de velocidade de propagação de ondas.

As variações foram, em média, menores nas rochas isotrópicas, com predominância entre -10% e -20%, quanto à flexão, e entre -10% e -30%, quanto à propagação de ondas.

Uma parte das rochas gnáissicas, com determinação da resistência à flexão perpendicularmente à estruturação, mostrou decaimento entre 0% e -10% (representadas por FLS e ARB) e outra parte entre -40% e -50% (CSB e SCC).

As características petrográficas e texturais (tamanho dos grãos e grau de fissuramento, especialmente) certamente contribuíram para o decaimento de LBD, em relação à resistência mecânica, antes e após choque térmico, e, especialmente, quanto à velocidade de propagação de ondas.

O decaimento médio na resistência à flexão e na velocidade de propagação de ondas ($(-18 \pm 10) \%$) foram bastante semelhantes, porém dificilmente generalizáveis, visto os coeficientes de variação de 57 % e 56 %, respectivamente.

Os coeficientes de correlação determinados para resistência à flexão e velocidade de propagação de ondas, nas condições secas e após choque térmico (Tabela 6.29) indicaram correlação muito forte ($R = 0,95$) entre os resultados de resistência à flexão antes e após choque térmico, o que não se reproduziu para as velocidades de propagação de onda e entre essas e resistência à flexão.

Tabela 6.29 – Correlações entre as determinações de resistência à flexão e de velocidade de propagação de ondas nas condições secas e após choque térmico.

	$\sigma_{f\ nat}$	$\sigma_{f\ CT}$	VP _{nat}
$\sigma_{f\ CT}$	0,95	-	-
VP _{nat}	0,56	0,37	-
VP _{pós-CT}	0,59	0,50	0,62

Nota: símbolos iguais ao da Tab. 6.27.

As Figuras 6.56 e 6.57 ilustram a distribuição das amostras em estudo conforme os valores de resistência à flexão e de velocidade de propagação de ondas, antes e após ensaios de choque térmico.

Figura 6.56 – Correlação entre resistência à flexão na condição seca, antes e após ciclos de choque térmico.

Figura 6.57 – Correlação entre a velocidade de propagação de ondas, antes e após ciclos de choque térmico.

Como pode ser observado, a distribuição dos resultados de velocidade de propagação de ondas não corresponde àqueles determinados nos ensaios de flexão, denotada especialmente pela a mudança de hierarquia das rochas gnáissicas.

Este comportamento indica que, embora a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais seja, de fato, uma ferramenta importante para a seleção dos corpos-de-prova para ensaios e para controle de resultados de ensaios de alteração, não é efetiva para hierarquizar os materiais do ponto de vista de resistência mecânica propriamente dita.

Para verificação de possíveis modificações nas propriedades físicas foram determinadas a densidade aparente e a absorção d'água, segundo CEN (1998a), em corpos-de-prova com 10 cm x 12 cm, confeccionados a partir daqueles submetidos a ensaio de choque térmico.

Diferentemente do esperado, pois foram notáveis as modificações visuais e mecânicas das amostras submetidas a esse ensaio, os índices físicos não exibiram variações compatíveis com os decaimentos da resistência à flexão e de velocidade de propagação de ondas (Tabela 6.30).

Tabela 6.30 – Valores médios e variações de densidade aparente e absorção (CEN, 1998a) após ciclos de choque térmico (CT).

AMOSTRA	ρ_{sec}		$\Delta_{\rho_{\text{sec}}}$	A_b		Δ_{A_b}
	antes-CT	pós-CT		antes-CT	pós-CT	
LBD	2.659	2.659	-0,01	0,19	0,19	-2
VCB-3	2.640	2.636	-0,15	0,13	0,13	-7
RIC	2.617	2.614	-0,10	0,23	0,16	-29
BCR	2.614	2.609	-0,19	0,23	0,24	6
BSV	2.620	2.618	-0,08	0,24	0,27	10
PIT	2.627	2.625	-0,09	0,19	0,22	17
AZF	2.630	2.627	-0,10	0,26	0,22	-13
BCE	2.614	2.612	-0,08	0,30	0,22	-26
ITN-1	2.610	2.612	0,09	0,36	0,30	-16
ITN-2	2.613	2.613	-0,02	0,34	0,29	-14
CRV	2.619	2.622	0,11	0,27	0,24	-9
CSB	2.615	2.626	0,43	0,24	0,21	-12
FLS	2.614	2.619	0,19	0,34	0,33	-3
GVN	2.636	2.642	0,20	0,29	0,25	-14
ARB	2.658	2.649	-0,33	0,25	0,27	9
SCC	2.637	2.635	-0,06	0,27	0,29	5

Notas:

- ρ_{sec} = densidade aparente (kg/m^3); $\Delta_{\rho_{\text{sec}}}$ = variação da densidade aparente (%); A_b = coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%); Δ_{A_b} = variação do coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%).
- Variações foram calculadas utilizando-se uma casa decimal adicional (uma para densidade e três, para absorção) de modo a se obter valores mais próximos das possíveis modificações.
- Em vermelho e azul estão ressaltados, respectivamente, valores maiores e menores após choque térmico.

Os valores de densidade aparente e absorção após ensaio de choque térmico tenderam a ser inferiores àqueles obtidos para corpos-de-prova *in natura*, ou seja, houve diminuição da densidade e da absorção, o que, entretanto, não foi generalizado, pois alguns exibiram valores maiores de densidade e absorção (Figuras 6.58 e 6.59).

Figura 6.58 – Densidade aparente antes (pontos à esquerda) e após (pontos à direita) choque térmico e respectivas variações.

Figura 6.59 – Absorção d'água antes (pontos à esquerda) e após (pontos à direita) choque térmico e respectivas variações.

A resistência à flexão e a velocidade de propagação de ondas mostraram evidente decaimento após o ensaio de choque térmico que, em princípio, reflete o aumento do fissuramento, decorrente do aquecimento e resfriamento cíclicos.

A grande variabilidade dos resultados obtidos e, ademais, a “melhoria” da absorção, leva a supor que incorporação de água se tornou menos eficiente após vários ciclos de aquecimento e umedecimento, provavelmente devido à mudança da morfologia e/ou da conexão dos poros, e não à ausência de degradação do material nesse processo.

Um importante resultado dos ensaios de alteração por choque térmico foi a mudança de coloração, por oxidação, de algumas rochas, geralmente provocando o amarelamento, por vezes com tonalidades esverdeadas, bem como o aparecimento de pontos ou pequenas manchas ferruginosos.

De modo a diferenciar e hierarquizar as rochas quanto à intensidade relativa de modificações observadas, atribuiu-se:

- **Grau 1:** rochas consideradas visualmente inalteradas;
- **Grau 2:** rochas com modificação moderada;
- **Grau 3:** rochas com conspícua modificação.

As principais modificações acham-se descritas na Tabela 6.31.

Tabela 6.31 – Modificações de coloração observadas em amostras submetidas a choque térmico e graduação atribuída.

AMOSTRA	MODIFICAÇÕES APÓS CHOQUE TÉRMICO	GRAU
LBD	Todos os corpos-de-prova apresentaram modificação de cor (Figura 6.60). Tornaram-se acastanhados, provavelmente devido à oxidação de máficos.	3
VCB	Leve perda de brilho na superfície polida de todos os corpos-de-prova.	1
RIC	Praticamente inalterados. Clareamento incipiente dos corpos-de-prova fornecendo a impressão visual de esmaecimento da cor.	1
BSV	Praticamente inalterados. Tornaram-se relativamente mais brancas, perdendo o tom acinzentado.	1
BCR	Praticamente inalterados. Tornaram-se relativamente mais brancas, perdendo o tom acinzentado.	1
GVN	Intensificação do amarelamento preexistente e oxidação ao redor de granada e agregados máficos.	2
PIT	Amarelamento da rocha e intensificação da tonalidade de pontos ferruginosos preexistentes. Essa “oxidação” é pervasiva, também observada no interior do corpo-de-prova, quando quebrado.	2
AZF	Clareamento de todos os corpos-de-prova, acompanhado de leve amarelamento (menos intenso que no PIT). Perda de brilho da superfície polida.	1

AMOSTRA	MODIFICAÇÕES APÓS CHOQUE TÉRMICO	GRAU
BCE	Sem modificações aparentes.	1
ITN-1	Oxidação ao redor de minerais e/ou agregados máficos. O fenômeno é pervasivo, podendo também ser observado no interior da rocha (CP-11), quando quebrada.	3
ITN-2	Desenvolvimento generalizado de coloração amarelo-esverdeada em todos os corpos-de-prova, porém pouco intenso. Intenso amarelamento acompanhado de oxidação ou incremento da oxidação de máficos (Figura 6.61).	3
CRV	Intenso amarelamento em todos os corpos-de-prova e aparecimento de manchas ferruginosas esparsas, devido a provável oxidação de máficos (Figura 6.62).	3
CSB	Leve coloração esverdeada nas porções quartzo-feldspáticas e coloração verde-amarelada próximo às bandas micáceas.	1
FLS	Forte coloração amarelo-alaranjada em todos os corpos-de-prova.	3
ARB	Leve amarelamento e pontuais manchas ferruginosas.	1
SCC	Amarelamento segundo a foliação e oxidação nas regiões quartzo-feldspáticas. Possível destacamento de fragmentos de granadas (Figura 6.63).	2

As modificações visuais mais relevantes estão ilustradas nas Figuras 6.60 a 6.63.

Figura 6.60 – Amostra LBD. Generalizado aumento da coloração acastanhada da rocha, provavelmente resultante do incremento da oxidação preexistente.

Figura 6.61 – Amostra ITN-2. Amarelamento da rocha e oxidação de máficos. Foto à direita, detalhe dos minerais oxidados.

Figura 6.62 – Amostra CRV. Amarelamento e aparecimento de manchas ferruginosas, milimétricas, esparsas. Foto à direita, detalhe do amarelamento, coincidente com os pontos microscopicamente constituídos de agregados caulíníticos.

Figura 6.63 – Amostra SCC. Amarelamento segundo a foliação e oxidação nas regiões quartzo-feldspáticas.

Algumas amostras foram selecionadas para verificação microscópica das modificações visualmente detectadas, que foram essencialmente oxidações pontuais ou generalizadas das rochas. A Tabela 6.32 sintetiza as principais feições microscópicas associadas às deteriorações.

Tabela 6.32 – Aspectos microscópicos das deteriorações visualmente detectadas após ensaio de choque térmico.

amostra	deteriorações observadas ao microscópio óptico
LBD	– Incremento da oxidação em fissuras e oxidação de minerais (ortopiroxênio, principalmente).
PIT	– oxidação em fissuras.
ITN-1	– oxidação dos “agregados” biotita e argilominerais; – oxidação de sulfetos (Figura 6.64).
CRV	– oxidação dos argilominerais de alteração em espaços intergranulares (Figura 6.65).
CSB	– aparecimento de fissuras abertas, ou aumento da abertura, concordantes, perpendiculares ou oblíquas à estruturação; – leve incremento de hidróxidos de ferro em fissuras.
ARB	– aparente aumento da oxidação.
SCC	– aumento de hidróxidos de ferro em microfissuras (Figura 6.66).

Nota: o termo oxidação aqui se refere à intensificação da tonalidade ferruginosa dos hidróxidos de ferro de preenchimento de microfissuras ou ao aparecimento de hidróxidos de ferro ou correlatos em minerais anteriormente inalterados.

Figura 6.64 – Amostra ITN-1 após ensaio de choque térmico. Notar incremento da coloração ferruginosa de argilominerais de preenchimento de microfissuras (a), e oxidação de filossilicatos de alteração de biotita (b).

polarizadores paralelos

polarizadores paralelos

Figura 6.65 – Amostra CRV após ensaio de choque térmico. Aspecto da oxidação nos locais de ocorrência de argilominerais de alteração de mineral original.

Figura 6.66 – Amostra SCC após ensaio de choque térmico. Aspecto do incremento da coloração ferruginosa de argilominerais de preenchimento de microfissuras.

6.3.3 Relações entre propriedades mecânicas e físicas

A análise das relações entre as duas propriedades mecânicas enfocadas (compressão uniaxial e flexão) considerou os coeficientes de correlação para todas as amostras e outros conjuntos de valores, quais sejam, somente amostras isotrópicas, amostras isotrópicas e gnáissicas, somente gnáissicas etc. (Tabela 6.33).

Tabela 6.33 – Coeficientes de correlação entre valores de resistências à compressão uniaxial e à flexão.

$\sigma_{f \text{ nat}}$ (MPa)		$\sigma_{f \text{ CT}}$ (MPa)	
$\sigma_{c \text{ sec}}$ (MPa)	0,87 (A)	$\sigma_{c \text{ sat}}$ (MPa)	0,81 (A)
	0,75 (B)		0,65 (B)
	0,48 (C)		0,55 (C)
	-0,85 (D)		-0,59 (D)
	-0,70 (E)		-0,63 (E)
	-0,35 (F)		-0,32 (F)

Nota: A = rochas isotrópicas; B = rochas isotrópicas e com determinação de resistência perpendicular à estruturação; C = todas amostras; D = rochas com determinação de resistência perpendicularmente à estruturação; E = rochas com determinação de resistência paralelamente à estruturação; F = rochas gnáissicas. Demais símbolos, iguais às Tab. 6.35 e 6.26.

As resistências à compressão e flexão mostraram correlação positiva, nas condições seca, saturada e após choque térmico, quando considerados os conjuntos A

e B (Tab. 6.33), o que sugere que as rochas isotrópicas, especialmente na condição seca, tendem a apresentar características compatíveis tanto *in natura* (compressão uniaxial: *bloco*), como após beneficiamento (flexão: *ladrilho*); que se mantém nas condições saturada e após choque térmico.

Considerando as resistências à compressão e à flexão das rochas gnáissicas, nas diferentes condições de ensaio (seca, saturada e após choque térmico) e com aplicação de tensão paralela e perpendicularmente à estruturação, verificaram-se correlações negativas. Essa informação, ainda que se pondere a insuficiência de dados estatisticamente significantes e o fato de que as rochas gnáissicas em análise foram objeto, em diferentes graus, da ação intempérica, é sugestiva de que as rochas anisótropas com maiores resistências à compressão tenderam a apresentar menores resistências à flexão.

A título de conhecimento, as rochas estudadas foram agrupadas, segundo os valores limites, indicados na ASTM C 615 (ASTM 1999c), para capacidade de absorção e resistências à compressão uniaxial e flexão (Tabela 6.34).

Tabela 6.34 – Agrupamento das rochas estudadas segundo especificações da ASTM (1999c).

	$\sigma_c > 8,27 \text{ MPa}$	$\sigma_c < 8,27 \text{ MPa}$	$\sigma_f > 131 \text{ MPa}$	$\sigma_f < 131 \text{ MPa}$
$\alpha > 0,40\%$	-	-	-	-
$\alpha < 0,40\%$	VCB-3, RIC, BCR, BSV, PIT, AZF, BCE, ITN-2, CRV, FLS $\perp$, GVN $\perp$, ARB $\perp$ e SCC $\perp$	LBD, ITN-1, CSB $\perp$, CSB $\parallel$, GVN $\parallel$, ARB $\parallel$ e SCC $\parallel$	Condição seca: VCB-2 (VCB-1, VCB-2), RIC, BCR, BSV, PIT, AZF, BCE, CRV, CSB $\perp$, CSB $\parallel$, FLS $\perp$ e FLS $\parallel$	LBD, ITN-1, ITN-2, GVN ($\perp$ e $\parallel$), ARB ($\perp$ e $\parallel$), SCC ($\perp$ e $\parallel$). Condição saturada: PIT, BCE, CRV
				demais

Nota: absorção (α) determinada segundo ABNT (1992a), para *bloco*; σ_c = resistência à compressão (MPa), σ_f = resistência à flexão (MPa).

As resistências mecânicas de muitas rochas se encontram abaixo dos valores limite sugeridos por ASTM C 615 (ASTM, 1999c); 8,27 MPa para flexão e 131 MPa para compressão.

No caso dos ensaios de resistência à flexão, as restrições se referem, principalmente, à menor resistência da rocha quando se aplicam esforços perpendicularmente à estruturação. Isso alerta para a utilização de medidas de segurança (apoios, baixa solicitação de esforços e outros) em projetos visando o uso

da rocha nessa condição.

Quanto à compressão uniaxial, há um número relativamente grande de amostras com resistência abaixo do valor especificado por ASTM C 615 (ASTM,1999c), principalmente nas determinações na condição saturada. Rochas graníticas isotrópicas, coesas e praticamente inalteradas em geral exibem $\sigma_c > 131$ MPa, como mostram os dados tecnológicos desse trabalho e de vários catálogos de rochas ornamentais (Frazão *et al.*; 1993, Frascá *et al.*, 2002 e Azevedo; Costa, 1994), que invariavelmente exibiram os valores de σ_c na condição seca.

Frazão; Farjallat (1996) realizaram o tratamento estatístico de mais de uma centena de rochas silicáticas brasileiras (incluindo granitos, gnaisses, dioritos etc.) e consideraram $\sigma_c = 100$ MPa como o valor mínimo, para o uso desses tipos rochosos. O fato de o Brasil ter uma grande variedade de rochas graníticas e ser um dos maiores produtores e exportadores dos denominados “granitos amarelos” – entendidos como rochas graníticas, isotrópicas ou gnáissicas, com coloração amarelada fornecida pela ação do intemperismo, e, portanto, teoricamente menos resistentes – talvez explique o valor estabelecido por Frazão; Farjallat (1996), valor também próximo daqueles aqui obtidos .

Por outro lado, isso também é indicativo de que estes materiais não estão contemplados na norma ASTM C 615 (ASTM,1999c).

6.4 Ensaios de Alteração Acelerada

6.4.1 Câmaras climáticas

Os ensaios de alteração em câmaras climáticas visaram à exposição das rochas em estudo a simulações de ambientes marinhos (névoa salina) e ambientes urbanos poluídos. São situações muito mais agressivas que as reais para permitir a rápida resposta do material nesses ambientes.

Ressalta-se que não foram localizados trabalhos, na literatura, que estabeleçam correlação entre a deterioração da rocha em condições aceleradas com a manifestação desta no decorrer do tempo de uso, mesmo em condições assemelhadas.

Ao serem exibidas modificações na cor ou degradações na face exposta, no caso, a face polida, avaliadas tanto por inspeção tátil como visual, verifica-se que a rocha é potencialmente instável nas condições estipuladas.

As rochas foram colocadas em câmaras de névoa salina e dióxido de enxofre pelo tempo necessário para que pudessem ser observadas modificações, devido à indisponibilidade de informações sistematizadas quanto ao monitoramento de rochas submetidas a intemperismo artificial.

Os principais resultados verificados ao final das exposições estão sumariados na Tabela 6.35, em colunas paralelas, para melhor comparação das modificações resultantes desses dois ambientes, cujos padrões mais representativos estão ilustrados nas Figuras 6.67 a 6.75.

Figura 6.67 – Amostra LBD. Exposição à névoa salina. Aumento da oxidação preexistente (acima, corpo-de-prova de controle).

Figura 6.68 – Amostra ITN-2. Exposição à névoa salina. Oxidação de granada, máficos e opacos.

Figura 6.69 – Amostra CRV. Exposição à névoa salina. Aumento do amarelamento preexistente (oxidação?) e local oxidação de granada.

Figura 6.70 – Amostra CSB. Exposição à névoa salina. Leve coloração ferruginosa surge nos agregados micáceos.

Tabela 6.35 – Principais resultados obtidos pela exposição das amostras em estudo a câmaras de dióxido de enxofre e névoa salina.

ROCHA	CÂMARAS CLIMÁTICAS			
	NÉVOA SALINA	GRAU	DIÓXIDO DE ENXOFRE	GRAU
LBD	<ul style="list-style-type: none"> – aumento da oxidação preexistente (Figura 6.67); – aspereza ao tato, na face polida, decorrente do inchamento de biotita; – local despegamento de biotita, com formação de pequenas cavidades. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – notável modificação de cor (branqueamento) da rocha (Figura 6.71); – atenuação da oxidação preexistente; – formação de sais em espaços intergranulares. 	3
VCB	<ul style="list-style-type: none"> – VCB-1, 2 e 3 mostraram-se ásperas, na face polida, pelo inchamento de biotita; – presença de sal em fissuras superficiais, ressaltando-as; – ordem aproximada de modificações: VCB-2 > VCB-3 > VCB-1. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – eflorescências em máficos (biotita) (Figura 6.72); – inchamento (expansão) de biotita provocando aspereza na face exposta; – ordem aproximada de modificações: VCB-2 > VCB-1 > VCB-3 (CP vedado) 	2
RIC	<ul style="list-style-type: none"> – aspereza, ao tato, na face polida; – local despegamento de biotita e formação de cavidades. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – pontos esparsos com sais, mas sem aspereza ao tato; – local escamação, em núcleos de plagioclásio. 	2
BSV	n.e.	-	n.e.	-
BCR	<ul style="list-style-type: none"> – sem mudanças aparentes; – leve aspereza ao tato e possível despegamento de biotitas. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – minerais máficos tornaram-se mais claros, com coloração esverdeada; – formação de sais sobre biotita (e outros máficos?) e em fissuras superficiais. 	2
PIT	<ul style="list-style-type: none"> – perda de brilho torna opaca a face exposta à névoa salina; – leve aspereza ao tato e destacamento de biotitas. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – sutil clareamento dos pontos amarelados já existentes na rocha; – formação de sais em fissuras superficiais e sobre biotita. 	1
AZF	<ul style="list-style-type: none"> – perda de brilho torna a face exposta opaca; – leve aspereza ao tato e destacamento de biotitas; – aparecimento de pequenos pontos amarelo-esverdeados “sob” feldspatos, fornecendo a impressão visual de sutil amarelamento. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – perda acentuada de brilho, tornando opaca a face exposta; – clareamento da biotita, e conseqüente impressão visual de clareamento da rocha; – formação de sais em microfissuras superficiais. 	2
BCE	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – eflorescências sobre máficos; – sutil clareamento da rocha, especialmente dos minerais verdes da matriz. 	1
ITN-1	n.e.	-	n.e.	-
ITN-2	<ul style="list-style-type: none"> – oxidação de granada e de máficos + minerais opacos (Figura 6.68); – fissuras superficiais preenchidas por sais. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – alteração de minerais máficos (para coloração amarelo ouro) (Figura 6.73); – locais pontuações ferruginosas; – leve aspereza ao tato. 	3

continua...

continuação...

ROCHA	CÂMARAS CLIMÁTICAS			
	NÉVOA SALINA	GRAU	DIÓXIDO DE ENXOFRE	GRAU
CRV	<ul style="list-style-type: none"> – acentuada oxidação da matriz (aumento do amarelamento preexistente) (Figura 6.69); – locais oxidações de granada e máficos 	2	<ul style="list-style-type: none"> – clareamento da rocha; – mudança de coloração da biotita para tonalidade esverdeada; – perda de brilho da face exposta; – formação de sais em fissuras superficiais e, localmente, subsuperficiais (Figura 6.74); – inchamento e escamação no CP1. 	3
CSB	<ul style="list-style-type: none"> – perda de material nas bordas; – destacamentos e inchamentos nos cordões micáceos; – aspereza ao tato, mais intensa no CP vedado; – localmente, observam-se pontos amarelados (oxidados) (Figura 6.70). 	3	<ul style="list-style-type: none"> – biotita parece ter se tornado mais acastanhada; – formação de sais em fissuras superficiais. 	1
FLS	n.e.	-	n.e.	-
GVN	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – abundantes eflorescências em agregados máficos e fissuras intergranulares (Figura 6.75); – face exposta tornou-se áspera, com início de protuberâncias. 	3
ARB	<ul style="list-style-type: none"> – feldspatos estão pouco mais rosados que os do corpo-de-prova padrão; – micas parecem intumescidas, mas não há aspereza ao tato. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – rocha apresentou leve mudança de coloração, adquirindo tonalidade rosa-amarelada, verificada, em especial, em agregados feldspáticos ocelares; – fissuras transversais à estruturação estão ressaltadas pela presença de sais; – poucos sais formados sobre biotita; – houve inchamento notável no CP 1 e discreto nos CPs 2 e 3. 	2
SCC	<ul style="list-style-type: none"> – amarelamento e ressaltamento dos cordões micáceos. 	3	<ul style="list-style-type: none"> – formação de sais em fissuras; – aspereza ao tato; – inchamento ao longo de fissuras concordantes com a estruturação da rocha; – CP 1: inchamento e escamação de minerais, em especial na área central; – sutil clareamento nas áreas quartzo-feldspáticas. 	3

Nota: grau 1 = rochas visualmente inalteradas; grau 2 = rochas com modificações moderadas; grau 3 = rochas que exibiram maiores modificações.
n.e. = rocha não ensaiada.

Figura 6.71 – Amostra LBD. Exposição ao dióxido de enxofre. Total branqueamento da rocha.

VCB-1

VCB-2

VCB-3

Figura 6.72 – Amostra VCB. Exposição ao dióxido de enxofre. Formação de sais em fissuras superficiais e, localmente, sobre biotita

Nota: à direita, corpo-de-prova de controle.

Figura 6.73 – Amostra ITN-2. Exposição ao dióxido de enxofre. Pontos amarelados esparsos referentes à oxidação de minerais.

Figura 6.74 – Amostra CRV. Exposição ao dióxido de enxofre. “Amarelamento” da rocha.

Figura 6.75 – Amostra GVN. Exposição ao dióxido de enxofre. Abundantes eflorescências em agregados máficos e fissuras intergranulares.

6.4.1.1 Exposição ao dióxido de enxofre

Os corpos-de-prova dos materiais selecionados foram expostos ao dióxido de enxofre e submetidos a 32 ciclos, que se referem a 8 horas diárias de exposição ao dióxido de enxofre e a 16 horas de exposição às condições ambientais, totalizando 768 horas de ensaio.

Os monitoramentos foram planejados para ocorrerem na seguinte seqüência: o primeiro após 24 h de exposição; do segundo ao quinto, a intervalos de cerca de 48h (de dois em dois ciclos); e daí em diante a cerca de 136 h de intervalo (a cada cinco ciclos). Foram realizados 11 monitoramentos, aproximadamente nesses intervalos, que tiveram que ser ajustados em virtude do calendário (finais de semana, feriados, etc.).

A Tabela 6.36 sintetiza a cronologia das modificações relevantes observadas nos monitoramentos.

É um ensaio de alteração mais agressivo que o de exposição à névoa salina. O pH da solução é cerca de 2, no interior da câmara, e entre 1 e 2 na “névoa” interna.

A despeito disso, alguns materiais ensaiados não exibiram modificações visuais notáveis e outros exibiram moderada (Branco Caravelas) ou intensa (Verde Labrador) mudança de cor.

Em outras amostras, a exposição ao dióxido de enxofre causou intensa deterioração da face polida devido à cristalização de sais (eflorescências) e inchamentos (SCC, GVN, ARB).

Tabela 6.36 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de exposição ao dióxido de enxofre.

ciclo	amostra	modificações observadas
2º ciclo	SCC	Aparente lixiviação da oxidação preexistente.
	ARB	Muito poucos sais em biotita e granada.
	PIT/AZF	Possíveis sais subsuperficiais.
	BCR	Possíveis sais em biotita.
	CRV	Oxidação de minerais e manchas amareladas esparsas.
4º ciclo	CSB	Possíveis sais em biotita. Aparente clareamento.
	VCB	Pontos esparsos com sais.
	LBD	Clareamento de feldspatos.
	GVN	Sais em fissuras e agregados de máficos+granada+feldspatos.
	SCC	Sais em microfissuras paralelas à estruturação. Inchamentos localizados.
6º ciclo	ARB	Sais em microfissuras paralelas à estruturação e em biotita.
	PIT/AZF	PIT: sais em biotita. AZF: poucas modificações.
	LBD	Sais em fissuras e amarelamento.
	GVN	Sais em feldspatos e máficos. Aparente concentração do amarelamento segundo faixas.
	ITN-2	Amarelamento próximo a máficos.
8º ciclo	SCC	Impressão visual de clareamento.
	PIT/AZF	PIT: sais em biotita e feldspatos. AZF: poucos sais em biotita.
	RIC	Sais em biotita.
	ITN-2	Formação de material alaranjado próximo a máficos.
	SCC	Aumento da quantidade de sais em fissuras subparalelas à estruturação e em agregados quartzo-feldspáticos.
11º ciclo	ARB	Aumento da quantidade de sais em fissuras subparalelas à estruturação e em agregados de biotita e granada.
	CRV	Sais em fissuras e em feldspatos, granada e próximo a biotita.
	LBD	Rocha tem coloração cinza chumbo.
	SCC	Leve inchamento em agregados feldspáticos ocelares.
	BCR	Sais recobrem biotita em todos os corpos-de-prova.
15º ciclo	CRV	Sais espalhados por toda a face exposta, especialmente segundo fissuras subparalelas.
	GVN	Possíveis inchamentos.
	-	Todas amostras mantêm as mesmas modificações, em vagaroso progresso.
	SCC	Inchamento incipiente.
	CRV	Inchamentos esparsos (CP1) e aumento da concentração de sais em fissuras subsuperficiais.
18º ciclo	LBD	Continua branqueamento da rocha.
	VCB	Sais em feldspatos.
	ITN-2	Incipiente clareamento da rocha.
	CRV	Inchamentos e local escamação nas proximidades da borda do CP1.
	ARB	Inchamento em áreas granolepidoblásticas.
20º ciclo	BCR	Leve inchamento em fraturas.
	GVN	Inchamentos são mais freqüentes no corpo-de-prova vedado.
27º ciclo	VCB	VCB-3: inchamento de biotitas.

A identificação dos sais, por difratometria de raios X, realizada em amostras selecionadas (VCB-1, VCB-2, RIC, BCR e GVN) indicou invariavelmente que as eflorescências são compostas de gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Grossi; Murray (1999) também as encontraram na exposição de rochas carbonáticas ao dióxido de enxofre, em

câmaras climáticas.

Segundo Gobbi *et al.* (1998), estudos sobre os efeitos de poluentes em rochas mostraram que o principal produto das reações de degradação é o gipso, resultando da interação entre SO_2 ou SO_4^{2-} e o CaCO_3 da rocha (visto que as rochas carbonáticas são as únicas extensivamente estudadas). Também indicaram que estudos experimentais, levados a cabo por vários pesquisadores, em câmaras de dióxido de enxofre provaram que a sulfatação de rochas se dá por dois mecanismos: formação direta de gipso; ou formação de sulfito de cálcio hemidratado, como um estágio intermediário, seguido da oxidação em sulfato de cálcio dihidratado.

O estudo realizado mostrou que o gipso foi o produto da interação do SO_2 com as rochas graníticas estudadas, mas a ocorrência de sulfito de cálcio não foi detectada ou mais detalhadamente investigada.

As modificações e resultados relevantes decorrentes da exposição ao dióxido de enxofre são assim sintetizadas:

- formação de eflorescências e subeflorescências em biotita (ou máficos) e feldspatos, respectivamente, que provocaram inchamento, escamação e despegamento local de fragmentos minerais. As fissuras também constituíram locais preferenciais de cristalização de sais (Figura 6.76);

Figura 6.76 – Amostra BCR. Fratura originada no processo de confecção do corpo-de-prova foi um dos locais preferenciais para cristalização de sais. Esse aspecto também foi observado nas amostras gnáissicas, especialmente as SCC e GVN.

- oxidação de minerais máficos;
- conspícuo branqueamento da face exposta da amostra LBD (charnockito).

De modo a verificar microscopicamente os diferentes resultados, foram confeccionadas lâminas petrográficas de amostras selecionadas, cujas descrições encontram-se na Tabela 6.37.

Tabela 6.37 – Principais modificações em amostras selecionadas daquelas submetidas à exposição em câmara de dióxido de enxofre.

amostra	deterioração	observação ao microscópio óptico
LBD	– branqueamento da rocha.	<ul style="list-style-type: none"> – aparente lixiviação de hidróxidos de ferro, de preenchimento das microfissuras; – algumas fissuras acham-se, agora, sem preenchimento (solubilização de carbonato (?)); – cavidades pontuais em máfico alterado, possivelmente piroxênio.
PIT	<ul style="list-style-type: none"> – sutil clareamento de pontos amarelados preexistentes; – eflorescências em fissuras superficiais e biotita. 	<ul style="list-style-type: none"> – pequenas cavidades em feldspatos ou segundo lamelas de biotita, resultantes da perda de material (Figura 6.77); – não foram observadas outras modificações, por microscopia óptica.
ITN-2	<ul style="list-style-type: none"> – oxidação de granada, de máficos e minerais opacos; – fissuras superficiais com eflorescências. 	<ul style="list-style-type: none"> – aparente intensificação do microfissuramento preexistente; – provável lixiviação de hidróxidos de ferro, pois o material de preenchimento das microfissuras está mais límpido
GVN	<ul style="list-style-type: none"> – eflorescências; – início de protuberâncias. 	<ul style="list-style-type: none"> – carbonatos, comumente associados à alteração de feldspatos, não são mais observados, provavelmente dando origem ao gipso; – alteração de biotita evidenciada por lamelas levemente descoloridas.
SCC	– amarelamento e ressaltamento dos cordões micáceos.	<ul style="list-style-type: none"> – aumento da turvação de feldspatos; – aparente aumento da impregnação de filossilicatos de alteração por hidróxidos de ferro; – alargamento de fissuras, especialmente próximas aos filetes ricos em sillimanita (Figura 6.78); – locais despegamentos de granada.

polarizadores paralelos.

polarizadores paralelos.

Figura 6.77 – Amostra PIT. Despegamento de lamelas de biotita (em azul).

Figura 6.78 – Amostra SCC. Microfissuras aparentemente alargadas após exposição ao dióxido de enxofre.

A observada ausência de carbonatos, especialmente na SCC, existentes nas

lâminas delgadas as rochas *in natura*, como produtos da alteração de feldspatos e material de preenchimento de microfissuras, permite supor que, ao menos em parte, o gipso cristalizado na rocha, pela exposição ao dióxido de enxofre, seja decorrente da reação desse dois componentes:

6.4.1.2 Exposição à névoa salina

Os corpos-de-prova dos materiais selecionados foram expostos à névoa salina durante o período de 44 dias (1 056 horas).

Inicialmente, os monitoramentos foram realizados em períodos de 48 horas que, com o decorrer do ensaio, passaram para cerca de 72 horas e finalmente para 168 horas. Também foram realizados 11 monitoramentos, com intervalos modificados em virtude do calendário.

Ao serem introduzidas nas câmaras, as amostras ficaram quase totalmente recobertas por sais, mais notados ao longo de microfissuras superficiais, intra, trans e intergranulares. Após lavagem, para inspeção visual, nos monitoramentos, os sais desapareciam totalmente, reaparecendo após o retorno dos corpos-de-prova para a câmara.

A Tabela 6.38 exhibe, cronologicamente, as modificações relevantes verificadas nos monitoramentos.

Grande parte dos corpos-de-prova não exibiu modificações visualmente observáveis, mas alguns mostraram notável oxidação dos minerais (LBD, BCR) ou mesmo perda de material (bordas da CSB).

Houve, também, o aparecimento ou aumento de irregularidades na face exposta de corpos-de-prova das amostras BCR, PIT e AZF em decorrência de provável despegamento de plaquetas de biotita, dos agregados preexistentes, sem, entretanto, causar danos perceptíveis numa observação rápida.

No Vermelho Capão Bonito, houve inchamento (expansão) dos agregados biotíticos, principalmente nos corpos-de-prova da VCB-3.

Tabela 6.38 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de exposição à névoa salina.

Ciclo	Amostra	Modificações Observadas
2º ciclo	VCB, GVN	Provável presença de sais em fissuras em feldspatos.
	CSB	Amarelamento de biotita.
	CRV	Leve oxidação de máficos.
6º ciclo	ITN-2	Oxidação de máficos e aparecimento de material alaranjado próximos a esses.
	ARB	Sais, aparentemente subsuperficiais.
	CSB	Sais, preferencialmente em biotita
8º ciclo	RIC, BCE	Aparentemente ainda inalteradas.
	DEMAIS	Sais em fissuras.
	PIT/AZF	Sugestivo amarelamento.
14º ciclo	ITN-2	Leve oxidação em granada.
	PIT	Oxidação e inchamento de biotita.
	CSB	Acastanhamento e inchamento das micas.
23º ciclo	PIT/AZF, BCR	Destacamento de biotita.
26º ciclo	VCB	Nota-se algum despegamento de biotita.
	LBD	Intensificação da oxidação da rocha.
	ITN-2	Oxidação de máficos e granada.
	RIC	Destacamento de biotita, quartzo e/ou feldspatos.
39º ciclo	LBD, ITN-2	Aumento da oxidação.
42º ciclo	SCC/ARB	Fissuras intra e transgranulares ressaltadas por sais.
	AZF/PIT	Destacamento de biotita (AZF>PIT).
	CSB	Destacamento de material, nas bordas.
44º ciclo	SCC	Amarelamento e ressaltamento de cordões de biotita.
	ARB	Coloração levemente mais rosada.
	AZF/PIT	Sutil amarelamento e destacamento de biotita.
	BCR	Destacamento de biotita (mais intenso na vedada).
	CRV	Aumento da oxidação.
	CSB	Destacamento de material, oxidação de biotita e inchamento.
	VCB	Nítido inchamento de biotita.
	RIC	Aumento de cavidades nos agregados de biotita.

Sintetizando, a exposição das rochas graníticas, selecionadas para este estudo, à nevoa salina resultou em dois tipos principais de deterioração ocorridos em intensidades diferentes, conforme o tipo de rocha:

- inchamento de biotita, e locais despegamentos;
- oxidação de minerais ou intensificação da coloração de hidróxidos de ferro preexistentes.

Na Tabela 6.39 são apresentadas as principais modificações microscópicas observadas em lâminas delgadas de amostras selecionadas.

Tabela 6.39 – Principais modificações microscópicas em amostras submetidas à exposição em câmara de névoa salina.

amostra	deterioração	observação ao microscópio óptico
VCB-3	– aspereza na face polida;	– cavidades pontuais em biotita;
	– sal em fissuras superficiais.	– intensificação da coloração avermelhada de hidróxidos de ferro, que preenchem microfissuras ou associados à alteração de plagioclásio, por provável incremento da oxidação (Figura 6.79).
PIT	– opacidade da face exposta;	– não foram observadas modificações perceptíveis ao microscópio óptico.
	– leve aspereza ao tato;	
	– despegamento de biotita.

polarizadores paralelos.

polarizadores paralelos.

Figura 6.79 – Amostra VCB-3. Intensificação da cor de hidróxidos de ferro associados a argilominerais de alteração nos núcleos de feldspatos e de preenchimento de microfissuras. Notar cavidade em biotita (em azul, no centro da foto à esquerda).

6.4.2 Imersão parcial em soluções ácida e alcalina

A imersão parcial das rochas graníticas em soluções quimicamente agressivas objetivou a verificação da estabilidade química, especialmente por meio de possíveis modificações de cor, e da resistência à ação da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências).

Várias simulações já foram desenvolvidas para estabelecer a degradação de rochas por cristalização de sais. A despeito das diferenças entre tamanho da amostra, tipo de solução, concentração da solução, temperatura, umidade relativa e outros, Benavente *et al.* (2001) comentam que a maioria dos ensaios tem sido realizada por imersão total da amostra na solução estabelecida, que é ciclicamente imersa em soluções saturadas e seca em estufa.

Benavente *et al.* (2001), então, realizaram testes experimentais de degradação por cristalização salina, pela imersão parcial de amostras de calcário, em solução de sulfato de sódio (14 %), com ciclos de aquecimento (a 40 °C e 80 % de umidade relativa) e resfriamento (a 10 °C e 70 % de umidade relativa), de modo a propiciar reações de dissolução e recristalização.

Embora guarde similaridades com os testes aqui realizados, devem-se ressaltar as diferenças entre os métodos e soluções químicas aqui empregados, quais sejam: imersão contínua, somente com troca periódica de reagentes, também incluindo a verificação da influência do pH na degradação de rochas graníticas.

Ensaio com características mais próximas ao aqui realizado foi o de La Iglesia *et al.* (1997), mas como na quase totalidade das citações já feitas, enfocou rochas carbonáticas parcialmente imersas em soluções salinas: Na_2SO_4 , K_2SO_4 e MgSO_4 , a 0,5 mol, em várias combinações. Segundo esses autores, amostras parcialmente imersas em soluções, por um período contínuo e com volume catiônico constante, permitem a ascensão capilar, concentração por evaporação e cristalização de sais em uma estreita faixa do corpo-de-prova. Isso simularia situação em que as fundações e partes baixas de paredes de construções estariam na zona de ascensão capilar da água do solo e, conseqüentemente, expostas ao intemperismo salino.

Nesse estudo, ao menos em parte, os ensaios também simulam deteriorações, por eflorescências, de pisos térreos de edificações, assentados com argamassas (comum fonte de sulfato).

A contínua contribuição de soluções saturadas, a concentração e evaporação na área emersa, principalmente bordas e laterais dos corpos-de-prova, permitem a cristalização em poros menores e a geração de pressão suficiente para quebrar e destacar material rochoso.

De modo a permitir a comparação dos resultados obtidos nas duas situações de simulação, com NaOH a 1N (pH praticamente 14) e H_2SO_4 a 1% (pH próximo de 1), os principais resultados verificados após essas simulações acham-se na Tabela 6.40.

Tabela 6.40 – Principais resultados da alteração por imersão parcial das rochas graníticas em soluções ácida e alcalina.

ROCHA	IMERSÃO PARCIAL			
	NaOH	GRAU	H ₂ SO ₄	GRAU
LBD	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes (Figura 6.80a); – despegamentos pontuais (quartzo). 	2	<ul style="list-style-type: none"> – branqueamento da face imersa na solução, das laterais e $\pm 0,5$ cm, a partir das bordas. Nessas áreas houve despegamento de biotita, que carregou quartzo e/ou feldspatos próximos (Figura 6.80a); – área central dos corpos-de-prova praticamente inalteradas. 	3
VCB	<ul style="list-style-type: none"> – VCB-3: sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – VCB-3: núcleos praticamente inalterados; – bordas (e laterais): despegamento de biotita e alteração (?) de feldspatos. 	2
RIC	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – núcleos inalterados; – bordas e laterais com algum clareamento e despegamento de biotita. 	2
BSV	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – bordas e laterais modificadas (clareamento), com despegamento de biotitas. 	2
BCR	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – clareamento de bordas e laterais; – despegamento de biotita. 	2
PIT (2 e 3 cm)	<ul style="list-style-type: none"> – leve amarelamento (intensificação do já existente); – bordas estão ligeiramente ásperas; – corpos-de-prova com 3 cm estão mais amarelados que os com 2 cm. Nos corpos-de-prova com 3 cm: amarelamento decorre da “remobilização” de material (compostos químicos) de pontos já alterados, que passa a impregnar fissuras em quartzo e feldspatos, o que não foi observado nos corpos-de-prova com 2 cm. 	3	<ul style="list-style-type: none"> – descoloração de biotita: laterais e face emersa (até ± 4 cm das bordas) – áreas centrais mais preservadas; – despegamento de minerais (biotita e quartzo/feldspato) é comum nas arestas e nas regiões próximas (Figura – corpos-de-prova com 2 cm: localmente há despegamento de material em núcleos alterados de plagioclásio; também exibem descoloração mais intensa da biotita (que praticamente só se modificou próximo às arestas). 	3
AZF	<ul style="list-style-type: none"> – amarelamento próximo às bordas. 	2	<ul style="list-style-type: none"> – leve descoloração próxima às bordas e nas laterais; – escamações próximas às arestas; <p>Nota: modificações foram menos intensas que na PIT.</p>	2
BCE	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes. 	1	<ul style="list-style-type: none"> – sem modificações aparentes (a rocha parece ter ficado mais cinzenta). 	1

Nota: grau 1 = rochas visualmente inalteradas; grau 2 = rochas com modificações moderadas; grau 3 = rochas que exibiram maiores modificações.

* = imersão perpendicularmente aos planos de estruturação.

continua...

continuação.

ROCHA	IMERSÃO PARCIAL			
	NaOH	GRAU	H ₂ SO ₄	GRAU
ITN-1	– sem modificações aparentes. Inicialmente apresentou intenso manchamento amarelo ferruginoso, que desapareceu ao final do ensaio (Figura 6.80b).	2	– generalizada modificação de cor, para tonalidade ferrugem (Figura 6.80b); – algum inchamento e despegamento de biotita nas bordas e próximo a agregados de minerais máficos.	3
ITN-2	– sem modificações aparentes (idem ITN-1); – nota-se pontual oxidação de máficos.	2	– generalizada modificação de cor, para tonalidade ferrugem; – algum inchamento e destacamento nas bordas.	3
CRV	– leve amarelamento da rocha, que melhor se evidencia nas áreas quartzo-feldspáticas – locais pontuações ferruginosas.	3	– total branqueamento das bordas, com inchamento e despegamento pervasivos (Figura 6.81a); – bordas: perdas de material com até 1,0 cm x 0,5 cm; – cavidades na face emersa, em geral, são milimétricas, com até 1 mm de profundidade; localmente chegam a 0,5 cm de “diâmetro”, com ± 2 mm profundidade.	3
CSB*	– sem modificações aparentes (sutil amarelamento nas fissuras).	1	– inchamento (expansão) das biotitas e escamação nas bordas.	1
FLS*	– sem modificações aparentes.	1	– sem modificações aparentes.	1
GVN*	– sem modificações aparentes, exceto por alguns destacamentos próximos às bordas.	2	– clareamento (descoloração) nas laterais, face imersa e bordas (até cerca de 2 cm em direção ao centro); – áreas centrais, da face emersa, inalteradas; – alguma escamação e despegamentos (biotita); – nota-se pigmentação amarelada em fissuras superfície; – não houve inchamento como nas câmaras.	2
ARB*	– sem modificações aparentes.	1	– descoloração de minerais nas bordas (± 1-2 cm) e laterais (menos intenso que na SCC); – nota-se inchamento segundo fissuras concordantes e oblíquas à estruturação, com escamação ao longo destas (não só nas bordas como na SCC) (Figura 6.81b); – face emersa tornou-se bastante áspera ao tato.	2
SCC*	– apesar de não se notar aspereza ao tato, visualmente observam-se inchamentos (ou “craquelamento”).	2	– descoloração de minerais nas bordas e laterais (Figura 6.81c); – inchamento em fissuras ou descontinuidades, segundo estruturação; – escamação relativamente intensa, nas bordas e granadas.	3

As degradações mais típicas observadas nas rochas graníticas em estudo, por imersão parcial em ácido sulfúrico, acham-se ilustradas nas Figuras 6.80 e 6.81.

Figura 6.80 – Aspectos dos diferentes comportamentos das rochas após imersão parcial em soluções alcalina e ácida. LBD e ITN-1 não mostraram modificações aparentes, ao final do ensaio de imersão de NaOH; enquanto exibiram intensa mudança de coloração após imersão em H₂SO₄.

Figura 6.81 – Aspectos resultantes da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências), após imersão parcial contínua em solução de ácido sulfúrico. Notar a formação de cavidade e quebra de arestas nas CRV e SCC.

6.4.2.1 Imersão parcial em ácido sulfúrico

A seqüência das modificações observadas está sumariada na Tabela 6.41.

Tabela 6.41 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de imersão parcial em ácido sulfúrico.

tempo de ensaio	amostra	modificações
2º dia	-	Absorção total do reagente, exceto VCB e RIC.
4º dia	GVN, ARB, SCC	Fissuras “brancas” por possíveis sais.
5º dia	LBD	Clareamento da porção imersa.
	ITN	Aparente oxidação de máficos.
	CRV, ARB, SCC	Fissuras aparentemente exibindo inchamento.
12º dia	-	Todos os corpos-de-prova mostram eflorescências, especialmente nas bordas, quinas e laterais. Destacam-se: CRV, PIT, BCR, BSV, GVN, ARB, SCC.
14º dia	-	Demais amostras passam a exibir conspícuas eflorescências.
30º dia	BCE	Não exibiu eflorescências.

Notas:

- mudança de ambiente de exposição, a partir do 9º dia. A sala passou a ser desumidificada.
- até o 12º dia os corpos-de-prova foram lavados a cada troca de reagentes. A partir de então, somente um deles.

O mecanismo de degradação, conforme a seqüência de eventos descrita anteriormente, seria:

- ascensão da solução, por capilaridade, em todos os corpos-de-prova, com taxas diferentes, de acordo com aquelas observadas no ensaio de capilaridade;
- umedecimento, em todas as amostras, das bordas para o centro,
- concentração das soluções por evaporação, o que se tornou muito mais efetivo ao se desumidificar a sala de ensaio;
- ao se atingir a supersaturação, iniciou-se a cristalização de sais, formando eflorescências e prováveis subeflorescências, preferencialmente sobre biotita e máficos e também segundo os lineamentos ou descontinuidades;
- esses fenômenos ocorreram, em ordem de preferência: nos cantos, nas bordas e laterais dos corpos-de-prova (Figura 6.82). Não foram observadas eflorescências na área central da face emersa;

Figura 6.82 – Cristalização de sais nas bordas (SCC) e nos cantos (CSB), preferencialmente sobre biotita.

- até o final da permanência dos corpos-prova em imersão, não se observaram inchamentos ou escamação;
- as degradações nas rochas foram observadas, conforme descrito na Tab. 6.41, após o período de secagem, ou seja, após os corpos-de-prova permanecerem em sala desumidificada até sua total secagem.

Na Tabela 6.42 são descritos os aspectos das eflorescências formadas e as deteriorações observadas após secagem dos corpos-de-prova.

Tabela 6.42 – Descrição das eflorescências salinas resultantes do ensaio de imersão parcial em ácido sulfúrico e deteriorações observadas.

	eflorescências				deteriorações
	aspecto	quantidade	cor	locais	
LBD	indistinto	abundante	verde-escuro	arestas e laterais	escamação nas bordas (biotita e feldspatos (?))
VCB-3	grumos em biotita	moderada	verde-claro a verde-musgo	arestas e laterais	escamação nas bordas (biotita e feldspatos (?))
RIC	grumos	pouca	branco	bordas	alguma escamação nas bordas
BSV	indistinto	pouca a moderada	branco-esverdeado a verde (sobre biotita. fibrosos)	bordas (1 a 2 cm)	alguma escamação nas bordas
BCR	indistinto	pouca a moderada	branco-esverdeado a verde (sobre biotita. fibrosos)	bordas (1 a 2 cm)	alguma escamação nas bordas
PIT e AZF (3 cm)	indistinto	moderada a abundante	verde-amarelado (AZF) e branco esverdeado (PIT)	arestas e bordas (± 1 cm)	alguma escamação em biotita, nas bordas
PIT (2 cm)	indistinto	moderada	branco-esverdeado	arestas em direção ao centro	mais intensa que no corpo-de-prova com 3 cm.
BCE	indistinto	praticamente ausentes	transparentes	bordas	sem modificações aparentes
ITN-1 / ITN-2	indistinto	muito pouca	transparentes a esverdeados	bordas	ITN-1: escamação nas bordas (predomina em biotita). rocha ficou amarelada (manchamento)

	eflorescências				deteriorações
	aspecto	quantidade	cor	locais	
CRV	grumos em toda a face emersa	moderada	branco	bordas em direção ao centro	inchamento e descamação na face polida, bordas e laterais. Fissuramento nas laterais (Figura 6.83).
CSB	grumos	pouca a moderada	branca a branco-esverdeado. fibrosos	arestas e laterais	escamação nas bordas (preferencialmente em biotita)
FLS	grumos	pouca a moderada	branco a branco-esverdeado. fibrosos	arestas e laterais (grumos na área central, ao fim do ensaio)	idem CSB, em menor intensidade
GVN	indistinto	pouca	branco ou verde-claro (biotita)	laterais e bordas (± 1 cm)	possível escamação nas bordas
ARB	grumos	moderada	verde-claro	bordas (± 2 cm)	inchamentos locais e escamação das bordas (biotita, granada e em menor proporção, feldspatos)
SCC	grumos	pouca a moderada	verde-claro a branco	bordas para o centro (± 2 a 3 cm)	inchamento e escamação nas bordas.

Nota: biotita foi freqüentemente despedaada durante a cristalização dos sais.

Figura 6.83 – Aspecto da quebra de arestas dos corpos-de-prova da amostra CRV, em decorrência da pressão de expansão dos sais em discontinuidades e, provavelmente, nos espaços intergranulares originalmente ocupados por argilominerais de alteração.

A Figura 6.84 ilustra os aspectos das eflorescências formadas durante o ensaio de imersão parcial em ácido sulfúrico.

Figura 6.84 – Diferentes aspectos das efflorescências formadas por imersão parcial em ácido sulfúrico. Amostra AZF: notar despegamento de lamelas de biotita, que ficam aderidas na superfície dos grumos de sais.

Uma porção representativa dos sais formados foi submetida à difração de raios X. A Tabela 6.43 mostra os resultados obtidos com porcentagens semiquantificadas pelas áreas relativas dos picos de difração. Os principais produtos foram sulfatos resultantes da reação entre H_2SO_4 e os minerais constituintes.

Tabela 6.43 – Tipos de sais que compõem as eflorescências formadas por imersão parcial em ácido sulfúrico.

amostra	sais (%)				
	Al	Vo	Ki	Me	Po
LBD	5-10	10-15			80
VCB-3	100				
RIC	45-50	20-25	25-30		
BSV	45	20-25	30-35		
BCR	30-35	50	15-20		
PIT	15-20	45	35-40		
AZF		55-60	40-45		
BCE	90-95	5-10			
ITN-2	10	15-20	70-75		
ITN-1 (verde)	50-55			45-50	
ITN-1 (escuro)				100	
CRV	100				
CSB (parte branca)	45	30-35	20-25		
CSB (parte cinzenta)	30	45-50	20-25		
FLS	60-65	35-40			
GVN (branco)	50-55	45-50			
GVN (verde)	65-70	30-35			
ARB	25-30	65-70	5		
SCC	25-30	70-75			

Nota:

- Al = alunogen ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$); Vo = voltaita ($\text{K}_2\text{Fe}_5^{2+}\text{Fe}_4^{3+}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$); Ki = kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$); Me = melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); Po = poitevinita ($(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn})\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- As porcentagens apresentadas são relativas aos sais cristalizados em cada amostra.

A formação desses sais pode ser inferida pela comparação entre as composições químicas dos sais e a composição mineralógica dos principais minerais formadores, integrada com as observações listadas anteriormente:

- alunogen: pela interação com silicatos de alumínio, especialmente argilominerais de alteração (caulinita – $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ou illita – $\text{K}_{1-1,5}\text{Al}_4(\text{Si}_{7-6,5}\text{Al}_{1-1,5}\text{O}_{20}(\text{OH})_4)$);
- kieserita e voltaita: formados por reações variadas com biotita ($(\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) e possíveis produtos de sua alteração intempérica;
- melanterita: detectado unicamente nas ITN, provavelmente resultante da reação do ácido sulfúrico com sulfetos presentes nessas rochas;
- poitevinita: identificado na LBD. Pode ser resultante da reação do ácido com minerais máficos e opacos.

Na Tabela 6.44 são apresentadas as principais modificações microscópicas observadas em lâminas delgadas de amostras selecionadas.

Tabela 6.44 – Principais modificações em amostras selecionadas submetidas à imersão parcial em ácido sulfúrico.

Amostra	deterioração	observação ao microscópio óptico
LBD	<ul style="list-style-type: none"> – branqueamento da face imersa; – despegamento de biotita. 	<ul style="list-style-type: none"> – provável lixiviação de hidróxidos de ferro de preenchimento de microfissuras; – despegamento de quartzo e feldspatos.
BSV	<ul style="list-style-type: none"> – bordas e laterais com clareamento e despegamento de biotita. 	<ul style="list-style-type: none"> – lixiviação (?) ou oxidação (?) de biotita, que passa a apresentar lamelas descoloridas; – cavidades em biotita, segundo as lamelas; – aparente diminuição de hidróxidos de ferro em fissuras.
PIT	<ul style="list-style-type: none"> – descoloração de biotita; – despegamento de biotita e quartzo/feldspato. 	<ul style="list-style-type: none"> – lixiviação (?) ou oxidação (?) de biotita, que passa a apresentar lamelas descoloridas; – cavidades em biotita, segundo as lamelas.
ITN-2	<ul style="list-style-type: none"> – generalizado surgimento de tonalidade ferrugem; – inchamento e despegamento nas bordas. 	<ul style="list-style-type: none"> – intensificação da turvação de feldspatos; – aparecimento de hidróxidos de ferro em fissuras e os agregados de alteração (Figura 6.85)
CRV	<ul style="list-style-type: none"> – total branqueamento das bordas, com inchamento e despegamento pervasivos. 	<ul style="list-style-type: none"> – perda (despegamento) dos minerais de alteração presentes nos espaços intergranulares (Figura 6.86).
CSB	<ul style="list-style-type: none"> – inchamento de biotitas e escamação nas bordas. 	<ul style="list-style-type: none"> – forte descoloração de lamelas de biotita; – despegamento de parte de lamelas de biotita.
GVN	<ul style="list-style-type: none"> – clareamento nas laterais, face imersa e bordas; – escamação e despegamentos (biotita). 	<ul style="list-style-type: none"> – minerais acham-se mais límpidos, por provável lixiviação de ferro associados às microfissuras – carbonato de alteração não foi removido
ARB	<ul style="list-style-type: none"> – descoloração de minerais nas bordas e laterais; – inchamento segundo fissuras. 	<ul style="list-style-type: none"> – minerais acham-se mais límpidos, por provável lixiviação de ferro associados às microfissuras – despegamento segundo filetes de sillimanita (Figura 6.87); – aparente lixiviação de ferro segundo lamelas em biotita e local despegamento
SCC	<ul style="list-style-type: none"> – descoloração de minerais; – inchamento em fissuras ou descontinuidades; – escamação nas bordas e granadas. 	<ul style="list-style-type: none"> – impressão visual de que os cristais estão mais límpidos, sugerindo lixiviação dos hidróxidos de ferro das fissuras; – despegamento de granada, segundo fraturas, e de biotita (Figura 6.88); – alteração de biotita (perda de ferro).

polarizadores paralelos.

Figura 6.85 – Amostra ITN-2. Leve oxidação dos argilominerais intersticiais e pequenas perdas de materiais próximos.

polarizadores paralelos.

Figura 6.86 – Amostra CRV. Despegamento dos argilominerais intersticiais, de alteração.

polarizadores paralelos

Figura 6.87 – Amostra ARB. Despegamento de biotita e “clareamento” dos materiais de preenchimento de microfissuras.

polarizadores paralelos

Figura 6.88 – Amostra SCC. Despegamentos em cristais de granada.

6.4.2.2 Imersão parcial em hidróxido de sódio

A seqüência das modificações observadas está sumariada na Tabela 6.45

A imersão em hidróxido de sódio praticamente não resultou em degradação das áreas emersas da rocha. Os sais se cristalizaram como crostas sobre a rocha (Figura 6.89) e, ao serem removidos, após o período de secagem (30 dias em sala desumificada), não se verificaram modificações notáveis.

Tabela 6.45 – Principais modificações verificadas nos monitoramentos do ensaio de imersão parcial em hidróxido de sódio.

tempo de ensaio	modificações
2º dia	Amostras ainda sem sais: LBD, RIC, PIT (3 cm), BCR, BSV e ARB. ITN tem pouco sais, mas apresenta modificação de cor: ITN-1 (manchamento no centro), ITN-2 (auréola amarelada).
3º dia	Houve solubilização dos sais. ITNs continuam a manchar.
5º dia	GVN: máficos esbranquiçados. CRV: oxidação de máficos. PIT: leve amarelamento. ITN: manchamento ferruginoso está mais escuro.
6º dia	Mudança para sala desumidificada. Início da cristalização de sais
8º dia	Formação de sais, como crostas (aspecto de flocos de algodão), nas laterais dos corpos-de-prova com 3 cm. Naqueles com 2 cm há tendência a se cristalizarem também na face emersa.
14º dia	Continuidade da cristalização de sais. Início do clareamento das ITN.
26º dia	ITNs sem manchamento, com retorno à cor original.

Figura 6.89 – Aspectos da cristalização salina, em crostas, sobre os corpos-de-prova parcialmente imersos em solução alcalina. Os corpos-de-prova à direita foram lavados periodicamente, durante o ensaio, para melhor observação dos possíveis efeitos. Aqueles à esquerda deixaram de ser lavados cerca de 15 dias após o início dos ensaios.

Ressalta-se o comportamento anômalo das amostras ITN-1 e ITN-2 que, logo no início do ensaio, apresentaram intenso manchamento amarelo ferruginoso na área central da face emersa (Figura 6.90). Entretanto, surpreendentemente, cerca de 14 dias após seu aparecimento, começou a ocorrer a atenuação da coloração ferruginosa, com total desaparecimento cerca de 10 dias depois (30 dias do início do ensaio).

corpos-de-prova após 4 dias de imersão

corpos-de-prova após 15 dias de imersão

corpos-de-prova após 30 dias de imersão

Figura 6.90 – Amostra ITN-2. Evolução do manchamento amarelo ferruginoso, desde seu aparecimento (dois dias após a imersão), o início de seu retorno à cor original e ao final, já sem aparentar a modificações de cor.

Os sais formados foram termonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e aphtitalita ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$), conforme Tabela 6.46. Como não foram observadas deteriorações nas rochas, considerou-se que os tipos de sais formados são preferencialmente relativos à interação do reagente (NaOH) com o meio ambiente.

Tabela 6.46 – Sais cristalizados, em crostas, nas amostras submetidas à imersão parcial em solução alcalina.

Amostra	Sais*	
	Tn	Ap
LBD	100	-
VCB-3	100	-
RIC	50	50
BSV	60-65	35-40
BCR	100	-
PIT	100	-
AZF	100	-
BCE	100	-
ITN-1	>95	<5
ITN-2	90-95	5-10
CVR	100	-
CSB	100	-
FLS	80	20
GVN	90-95	5-10
ARB	45	55
SCC	85-90	10-15

Nota: Tn = termonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$); Ap = aphtitalita ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$).

* porcentagens estimadas pelas áreas principais dos picos de difração.

6.4.2.3 Ensaios de controle

A verificação de modificações resultantes de ensaio de alteração acelerada foi feita visualmente e também por determinações de parâmetros físicos e/ou mecânicos. Dadas as dimensões definidas para os corpos-de-prova destinados aos ensaios de imersão parcial, não puderam ser realizados ensaios mecânicos. As degradações foram, então, controladas por determinações de massa e absorção d'água, e de velocidade de propagação de ondas antes e após os ensaios (Tabela 6.47).

Tabela 6.47 – Variações de velocidade de propagação de ondas após ensaios de imersão parcial.

amostra	VP		Δ_{VP}
	antes	depois	
LBD	3.348±253 (7,5)	4.602±132 (2,9)	37
VCB-3	5.003±68 (1,4)	5.233±84 (1,6)	5
RIC	4.167±166 (4,0)	4.689±232 (4,9)	13
BCR	3.590±339 (9,4)	4.553±180 (4,0)	27
BSV	3.603±110 (3,0)	4.588±135 (3,0)	27
PIT – 2 cm	4.506±58 (1,3)	4.898±97 (2,0)	9
PIT – 3 cm	4.343±144 (3,3)	4.833±77 (1,6)	11
AZF	4.188±135 (3,2)	4.657±131 (2,8)	11
BCE	4.821±96 (2,0)	5.051±51 (1,0)	5
ITN-1	3.747±192 (5,1)	4.513±237 (5,2)	20
ITN-2	3.823±233 (6,1)	4.683±110 (2,3)	23
CRV	4.515±105 (2,3)	4.923±87 (1,8)	9
CSB	3.248±290 (8,9)	4.041±309 (7,6)	24
FLS	3.399±336 (9,9)	4.039±327 (8,1)	19
GVN	4.205±75 (1,8)	4.772±220 (4,6)	13
ARB	4.058±239 (5,9)	4.680±278 (6,0)	15
SCC	4.694±126 (2,7)	4.876±266 (5,5)	4

Nota: VP = velocidade de propagação de ondas; Δ_{VP} = variação da velocidade de propagação de ondas após ensaios de imersão parcial em soluções ácida e alcalina.

As variações de velocidade de propagação de ondas obtidas foram todas positivas o que a princípio indica um “aumento” da coesão da rocha, no caso, por possível cristalização de sais em descontinuidades do interior dos corpos-de-prova.

As variações de massa e de absorção d’água (Tabela 6.48) foram muito irregulares. Na sua maioria, indicaram incipiente modificação da massa e diminuição da absorção d’água, o que aparentemente não condiz com as modificações observadas, especialmente por imersão parcial em ácido sulfúrico, que chegou a causar graves danos à região emersa, em algumas rochas.

Mais uma vez, os dados apontam para uma provável cristalização de sais no interior da rocha, que “mascara” as perdas de massa e o aumento de absorção d’água.

De qualquer forma, na Tab. 6.48 pode ser verificada a perda de massa por imersão parcial nas soluções químicas utilizadas, muito mais perceptível nas situações de imersão em ácido sulfúrico.

Quanto às variações de absorção d’água, as rochas parcialmente imersas em hidróxido de sódio exibiram diminuição da absorção, em geral, entre 15% e 35%, o que também pode ser entendido como a presença de sais em poros e descontinuidades anteriormente acessíveis à água.

As modificações de absorção d’água das rochas que foram parcialmente imersas em ácido sulfúrico foram muito irregulares, com a maioria exibindo diminuição de absorção, mas algumas delas aumento (LBD, SCC e RIC). Também não é observada correspondência com os resultados para imersão em hidróxido de sódio.

Segundo Perry; Duffy (1997), os sais cristalizam tanto de soluções saturadas como insaturadas que estejam no interior dos espaços porosos da rocha. A precipitação de sais a partir de soluções insaturadas, como no caso de evaporação do solvente, não resulta na atuação de tensões na rocha; mas pode resultar no bloqueio de poros e redução da permeabilidade da rocha, levando ao aprisionamento da água e aceleração da degradação devido à dissolução interna da rocha.

Aparentemente, esse fenômeno justifica os dados obtidos e corrobora a interpretação de que ambas simulações levaram à cristalização de sais no interior da rocha, que não foram detectados visualmente ou por microscopia óptica, mas indicados nas determinações de velocidade de propagação de ondas e absorção d’água.

Tabela 6.48 – Variações de massa e de absorção d'água, após ensaios de imersão parcial.

	$\Delta_{\text{massa}} (\%)$		$\Delta_{\text{absorção}} (\%)$	
	NaOH	H ₂ SO ₄	NaOH	H ₂ SO ₄
LBD	0,01	-0,40	-6,0	25,6
	0,06	-0,40	-11,7	17,2
VCB-3	0,03	-0,21	-33,4	0,2
	0,02	-0,19	-33,4	0,2
RIC	0,00	-0,14	-12,8	6,5
	0,03	-0,12	-18,8	12,9
BCR	0,03	-0,09	-35,3	-24,9
	0,00	-0,09	-26,7	-13,2
BSV	-0,04	-0,10	-23,5	-17,5
	0,00	-0,12	-20,3	-17,5
PIT – 2 cm	0,00	-0,12	-15,7	0,1
	-0,03	-0,10	-16,6	-0,1
PIT – 3 cm	0,02	-0,09	-16,1	-11,7
	0,01	-0,11	-12,1	-5,0
AZF	-0,01	-0,14	-23,0	-12,3
	0,00	-0,11	-19,9	-15,9
ITN-1	-0,04	-0,12	-12,3	-0,1
	0,00	-0,05	-8,8	-3,7
ITN-2	-0,06	0,00	-14,2	-20,7
	-0,08	-0,03	-17,2	-18,1
CRV	-0,02	-0,57	-6,7	-33,0
	0,00	-0,19	-6,2	-24,9
BCE	0,01	0,02	-3,0	-3,5
	0,00	0,01	0,7	-6,7
CSB	-0,03	-0,01	-12,6	-12,1
	-0,03	-0,06	-12,0	-16,6
FLS	-0,03	0,01	-6,2	-8,8
	0,00	-0,04	-9,5	-15,9
	-0,03	-0,01	-14,7	-3,2
GVN	0,01	-0,04	-14,4	-7,4
	0,00	-0,05	-7,4	-3,6
ARB	-0,02	-0,19	-13,1	0,4
	-0,03	-0,14	-23,5	0,3
SCC	-0,03	-0,10	-23,0	8,5
	-0,01	-0,15	-22,8	4,0

A dispersão dos resultados de absorção de água também foi verificada por Mancini *et al.* (1994) ao investigarem a durabilidade de duas rochas metassedimentares (clorita xisto e metapelito) utilizadas no revestimento de fachadas, em Turin (Itália), após testes de envelhecimento acelerado por exposição à névoa

ácida (dióxido de enxofre em pH 2) conjugado a ciclos de congelamento e degelo. Também atribuem esse comportamento à presença de sais preenchendo poros, o que não seria inesperado; consideram que, como os sais de sulfato são solúveis, tenderiam a ser lixiviados, em condições naturais.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indicação dos usos mais adequados para as rochas estudadas não foi alvo desta pesquisa, uma vez que se tratam de materiais clássicos, de grande aceitação nos mercados consumidores doméstico e internacional de revestimento de edificações, independentemente de suas propriedades petrográficas, físicas e mecânicas.

Efetivamente, o que se buscou foi, por meio do conjunto de ensaios realizados para a avaliação da alterabilidade de rochas representativas dos materiais pétreos graníticos para revestimento em potenciais situações de uso, obter informações que virão a subsidiar a escolha das técnicas de fixação, manutenção e conservação para este tipo de rocha, prevenir deteriorações e incrementar a sua durabilidade.

As determinações das propriedades petrográficas, físicas e mecânicas das rochas graníticas selecionadas ensejou o conhecimento de suas características tecnológicas, focadas naquelas que apresentam quando *in natura* (aqui denominado *bloco*) e após beneficiamento (aqui denominado *ladrilho*), com vistas ao reconhecimento das possíveis modificações neste produto e a influência das propriedades de um e de outro na alterabilidade destes materiais.

Com o incremento do uso de rochas no revestimento de edificações, esses parâmetros petrográficos, físicos e mecânicos, rotineiramente determinados em laboratório, são cada vez mais requeridos para a elaboração de projetos de engenharia, o que torna mais apropriada a denominação propriedades de engenharia (*engineering properties*, na literatura em inglês) do que o termo propriedades tecnológicas, correntemente em uso, no Brasil.

As especificações para uso de rochas ornamentais e para revestimento, como as da ASTM: C 503, C 568, C 615, C 616 (ASTM 1999a, b, c, d), têm sido utilizadas como guias para a avaliação das propriedades de engenharia e, eventualmente, para indicar a necessidade de investigações e/ou ensaios tecnológicos complementares. Em geral, juntamente com os fatores custos e segurança, têm subsidiado, a decisão da utilização, ou não, de determinado material rochoso.

A durabilidade, que também deveria estar em pauta, não têm sido considerada em razão da ausência de informações técnicas prévias sobre potenciais

comportamentos do material em questão ante às novas situações ambientais e de uso. Há a tendência de se entender a boa qualidade tecnológica da rocha como sinônimo de alta durabilidade, o que muitas vezes não é correto.

Um aspecto ilustrativo, é que, apesar das variações observadas entre os valores de resistência mecânica e os recomendados na norma ASTM C 615 (ASTM 1999c), dirigida para rochas graníticas para fins ornamentais ou para revestimento, como já discutido no Capítulo 6 (item 6.3.3), os valores de absorção d'água de todas as rochas ensaiadas, obtidos tanto para *bloco*, como para *ladrilho*, acham-se nos patamares especificados:

$$\alpha < 0,40\%.$$

E, a despeito dos valores típicos de absorção, as rochas graníticas estudadas, foram diferentemente afetadas (alteradas e deterioradas) ao serem expostas às situações simuladas nos ensaios de alteração.

Essa foi a primeira evidência encontrada, neste estudo, de que as propriedades de engenharia não exibem correspondência direta com alterabilidade, ao menos quanto ao tipo litológico focado.

Como a capacidade da rocha de absorver água está relacionada ao sistema poroso, esperava-se que aquelas com valores relativamente mais altos de absorção mostrassem uma susceptibilidade maior à alteração.

Os ensaios de alteração simularam as intempéries (variações térmicas e umidade); ambientes poluídos, ricos em dióxido de enxofre; ambientes marinhos, por exposição à névoa rica em cloretos (NaCl); e a ação da cristalização de sais e de ambientes quimicamente agressivos (imersão parcial em soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio).

Para a visualização dos efeitos resultantes dessas simulações foi elaborado o diagrama da Figura 7.1, que exhibe a somatória dos graus de modificações, conforme expostos nas Tabelas. 6.31, 6.37 e 6.42, estabelecidos por meio de inspeção visual das alterações ocorridas nas faces polidas das rochas graníticas em estudo.

Nota: algumas amostras não foram submetidas a todos os ensaios, mas o comportamento delas, relativamente àquelas consideradas do mesmo grupo, permite inferir que seus resultados seriam semelhantes.

Figura 7.1 – Somatória dos graus relativos atribuídos às deteriorações observadas na face polida das rochas estudadas.

Como o grau 1 foi aquele atribuído a rochas visualmente inalteradas, somatórias de resultados (Σ) igual a 5 indicam que a rocha foi considerada inalterada; a única amostra que atingiu essa qualificação foi a BCE.

Considerando intervalos de 2,5, a partir de 5, são revelados quatro grupos de rochas, discriminados quanto à deterioração verificada na face polida, como a seguir:

- incipiente ($5 < \Sigma < 7,5$): BCR;
- fraca ($7,5 < \Sigma < 10$): VCB-3 (VCB-2, VCB-1); RIC (BSV), AZF, CSB (FLS), ARB e GVN;
- moderada ($10,0 < \Sigma < 12,5$): PIT e ITN-2 (ITN-1);
- forte ($\Sigma > 12,5$): SCC, CRV, LBD.

Nota: amostras entre parênteses estão com a graduação inferida.

Os resultados obtidos nos ensaios de alteração acelerada não exibiram correlações estatisticamente significantes (por meio das técnicas adotadas nos capítulos anteriores) com as propriedades petrográficas, físicas e mecânicas. Mas, estes podem ser avaliados por meio de uma análise integrada.

Essa análise mostrou, em primeiro lugar, que o tratamento estatístico não foi possível porque não há coerência aparente dos resultados físicos e mecânicos com as degradações ocorridas nos diversos ensaios de alteração acelerada.

Analisando as amostras que acumularam as maiores deteriorações (SCC, CRV e LBD) e a que praticamente não exibiu modificação (BCE), foram verificadas as características reproduzidas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Principais propriedades físicas e mecânicas de rochas com forte e incipiente modificações após ensaios de alteração acelerada.

amostra	LBD	SCC	CRV	BCE
σ_f	baixa	baixa	elevada	elevada
σ_c	baixa	baixa	elevada	elevada
α	baixa a média	média	média	alta
Alteração	moderada	fraca a moderada	fraca a moderada	incipiente
Fissuramento	forte	moderado a forte	fraco a moderado	incipiente
Granulação	grossa	média a grossa	fin a média	fin a média

Nota: α = absorção d'água aparente; σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); σ_f = resistência à flexão (MPa).

Pelo exposto, uma rocha com alta resistência mecânica e alta absorção (BCE), relativamente ao grupo considerado, praticamente não exibiu alterações e outra rocha (CRV), também com alta resistência mecânica e absorção moderada, apresentou as maiores deteriorações observadas, nesta pesquisa. As feições que as diferenciaram foram os graus de alteração e de microfissuramento.

Com base no exame microscópico pôde-se verificar que nas amostras com moderada a forte deterioração, os minerais de alteração tanto dispostos pela rocha como presentes nos minerais constituintes (e.g. argilominerais, carbonato e sericita, em plagioclásio) e as microfissuras constituíram os locais em que puderam ser observadas a maior parte das alterações.

No caso da CRV, as deteriorações se manifestaram pela oxidação ou despegamento dos argilominerais de alteração, intersticiais, identificados como caulinita e, possivelmente, esmectitas. O confinamento desses nos espaços

intergranulares, aparentemente, permitiu que a pressão de cristalização dos sais rompesse com maior intensidade as paredes dos poros, levando inclusive, à quebra das arestas.

Em síntese, a observação visual e microscópica dos efeitos dos ambientes simulados, nas rochas ensaiadas, evidenciou alguns mecanismos de deterioração, conforme descrito a seguir:

- oxidação da rocha e de minerais: observado em praticamente todas as simulações. Está relacionada ao comportamento do ferro, em virtude de seu potencial de oxidação nos ambientes exógenos, nesse caso, de pH ácido (exposição ao dióxido de enxofre e imersão parcial em ácido sulfúrico) ou sob influência da temperatura e umidade (ensaio de resistência ao choque térmico). Como para as demais propriedades, também não se obteve correlação estatística entre os teores de Fe^{2+} e Fe^{3+} e as alterações verificadas. O amarelamento de algumas rochas, nessas mesmas condições também foi relacionado à oxidação e provável remobilização local do ferro;
- clareamento da rocha: observado em câmaras de dióxido de enxofre e ensaios de imersão parcial em ácido sulfúrico. Trata-se de um caso mais específico, em que rocha charnockítica exibiu notável branqueamento, por provável lixiviação do ferro, ao ser exposta a ambientes ácidos. A principal evidência é a ausência de hidróxidos de ferro em microfissuras, e presentes nas mesmas, nos materiais *in natura*.

Sem fornecer a impressão visual de clareamento da rocha, foi observado microscopicamente, em algumas amostras, plaquetas de biotita com lamelas descoloridas, provavelmente resultates da remobilização do ferro;

- cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências): observado em câmaras de dióxido de enxofre e de imersão parcial em ácido sulfúrico. Evidenciado por inchamento, escamação e até esfoliação. A presença de sais em fissuras chegou a provocar locais despegamento em granada e feldspatos, mas a biotita foi o mineral que se revelou mais susceptível à esse processo. Sua estrutura cristalográfica deve facilitar a percolação e retenção de água (e elementos carregados), possibilitando reação com os componentes químicos do mineral e conseqüente cristalização de sais, quando as

condições de supersaturação são alcançadas. A pressão de cristalização dos sais nos espaços interfoliares provoca seu destacamento.

Conforme Aires-Barros (1991), entre outros pesquisadores, a alterabilidade é função de fatores intrínsecos, extrínsecos e do tempo. Com base nos resultados apresentados e discutidos para as rochas graníticas estudadas, pôde-se aprofundar o entendimento dos fatores intrínsecos ligando-os, ainda que empiricamente, ao grau de alteração natural, ao grau de fissuramento e à presença de biotita e outros minerais contendo ferro. Estes configuram o sistema poroso e propiciam a exposição das superfícies, dos minerais e das rochas, à absorção e circulação da água carreando elementos que propiciarão as alterações e/ou cristalização dos sais.

As principais características dos ensaios de alteração experimentalmente conduzidos foram:

- exposição à névoa salina: efeitos visuais pouco perceptíveis, mas, como atestado pelas lâminas petrográficas, são microscopicamente visíveis os efeitos degradadores dos sais (NaCl) dissolvidos no ambiente: aumento da turvação de cristais de plagioclásio já intempericamente alterados; alargamento de fissuras preexistentes; intensificação da oxidação e/ou surgimento de pontos oxidados e outros;
- imersão parcial em hidróxido de sódio: efeitos visuais pouco perceptíveis. Evidenciou que o ambiente alcalino, não foi deletério para as rochas ensaiadas. Mesmo as amostras ITN, que inicialmente exibiram modificação de cor, ao final do ensaio já haviam retornado à cor natural. Indiretamente, foi verificada possível cristalização de sais no interior dos corpos-de-prova, por meio do aumento da velocidade de propagação de ondas e das modificações de absorção após o ensaio;
- exposição a dióxido de enxofre: mostrou o papel degradador desse poluente e resultou em deteriorações que atingiram, diferencialmente, a depender das características intrínsecas, praticamente todas as rochas selecionadas e que variaram desde manchamento até escamação. Também pôde ser detectada a presença de sais no interior dos corpos-de-prova, por meio do aumento da velocidade de propagação de ondas e das modificações de absorção após o ensaio;

- imersão parcial em ácido sulfúrico: é uma simulação muito agressiva, e possibilitou a verificação das deteriorações resultantes da cristalização de sais (eflorescência e subeflorescências) e da estabilidade dos materiais ante os reagentes químicos de caráter ácido, potenciais agentes degradadores de rochas;
- choque térmico: ensaio também bastante agressivo, forneceu informações sobre possíveis modificações estéticas, pela oxidação de minerais, e de resistência mecânica do material, por ação das intempéries e variações cíclicas de temperatura e umidade. O decaimento da resistência à flexão, após esse ensaio, mostrou-se diretamente proporcional às resistências obtidas nas determinações da rocha *in natura*; o que não se verificou quanto à susceptibilidade à oxidação. É um ensaio em vias de publicação, pela CEN, e sua adoção, com as modificações aqui incorporadas, incrementará o conjunto de dados para elaboração de projetos de revestimento de exteriores, especialmente de fachadas.

Conforme exposto, as influências das propriedades físicas e mecânicas, bem como as modificações na transformação de *bloco* para *ladrilho* não puderam ser estatisticamente correlacionadas aos resultados dos ensaios de alteração acelerada. Esta pesquisa evidenciou, porém, algumas informações relevantes, entre as quais destaca-se:

- aumento, muito heterogêneo, da capacidade de absorção de água de *bloco* para *ladrilho* e, em geral, tendendo a uma correlação negativa, ou seja, rochas com maiores valores de absorção determinada para bloco tenderam a exibir menores variações de bloco para ladrilho;
- os valores para as propriedades físicas (densidade, absorção, porosidade aberta e volume de poros abertos) mostraram-se dependentes do método de ensaio e do tamanho do corpo-de-prova. É um dado muito importante, que pode ser incorporado em futuros e necessários programas interlaboratoriais, pois demonstra que as determinações dessas propriedades devem seguir obrigatoriamente todos os passos dos procedimentos normativos, de forma a se poder, efetivamente, comparar e utilizar os dados disponíveis tanto comercialmente, como em trabalhos técnico-científicos. Com base nisso é proposto que:

- o tamanho 10 cm x 10 cm x espessura de *ladrilho*, que se revelou estatisticamente mais adequado, seja adotado para a determinações dessas propriedades físicas do material rochoso beneficiado;
 - corpos-de-prova com dimensões de 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5 cm, para a determinação desses mesmos parâmetros, sejam utilizados na caracterização do material *in natura*;
- proporcionalidade entre as resistências mecânicas de *bloco* (compressão) e *ladrilho* (flexão), para as rochas maciças (isótropas). Para as rochas gnáissicas, no entanto, obteve-se tendência inversa (correlação negativa) entre essas propriedades, evidenciando a influência da estrutura nos resultados dessas propriedades, sugerindo que rochas com maiores resistências *in natura* tenderam a exibir, relativamente, menores resistências após modificação na geometria do material. Estudos complementares poderão esclarecer melhor essa verificação.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Entende-se que um material rochoso destinado à aplicação no revestimento de edificações deva ser tratado, propriamente, como um material de construção, que necessita-se do conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas, a serem tomadas como parâmetros ou critérios de escolha e de elaboração dos projetos de engenharia. Também por isto, há que se contar com estimativas sobre sua durabilidade.

O estudo realizado demonstra a possibilidade de serem estabelecidas rotinas laboratoriais para reconhecimento da alterabilidade de rochas para revestimento, a partir da simulação de situações ambientais reinantes em condições cotidianas de uso e aplicação.

Os resultados obtidos mostraram a susceptibilidade à deterioração das rochas graníticas escolhidas, representativas de materiais correntemente empregados pela construção civil, em formas e intensidades variáveis conforme suas propriedades intrínsecas e a situação simulada.

Tais rotinas estão cercadas de caráter, em grande parte, pioneiro, se consideradas as informações contidas na literatura nacional e internacional, e possibilitam a introdução de novos procedimentos para a previsão e estimativa da durabilidade desses materiais.

A extrapolação temporal do comportamento dos materiais ensaiados ante as condições de uso simuladas, para o relativamente longo período esperado de uso, ainda não é confiável e não foi objeto de investigação.

Embora tenham sido observadas correlações entre características físicas e mecânicas dos materiais selecionados, obtidas para *bloco* e *ladrilho*, respectivamente representantes da rocha *in natura* e beneficiada, não foi possível vinculá-las, em níveis estatisticamente aceitáveis, às alterações e degradações ocorridas nos ensaios de alteração acelerada.

Por sua vez, as rochas, ao serem transformadas em chapas e ladrilhos, revelaram variações nas características físicas e mecânicas, cuja intensidade mostrou-se dependente daquelas do material *in natura*.

As variações nos valores de absorção d'água indicaram que o processo de beneficiamento provoca modificações no sistema poroso da rocha que se reflete no provável aumento do grau de fissuramento, o que, pelos métodos de investigações adotados pode ser inferido, mas não comprovado.

A ausência de altas correlações, especialmente entre absorção, poros abertos e capilaridade e as deteriorações ocorridas nos ensaios realizados, pode também ser atribuída à inadequação dos métodos de ensaio utilizados para a determinação de parâmetros que qualifiquem o sistema poroso da rocha, do ponto de vista da alterabilidade.

As propriedades de engenharia e a alterabilidade ou durabilidade, então, constituem dois segmentos complementares, necessariamente caracterizáveis anteriormente à escolha e definição de material rochoso para revestimento de edificações. O primeiro trata da obtenção de parâmetros de resistência, precisamente definidos e que podem ser medidos em laboratório, por métodos diretos ou indiretos. No outro há a estimativa da durabilidade, que é a capacidade de resistir às condições aplicadas ao material na sua utilização.

Nessa abordagem, valores especificados pela ASTM, e outros, significam mais apropriadamente valores típicos das diversas propriedades da rocha em termos de resistência do que de alterabilidade.

Por isso, na avaliação da alterabilidade, se revelaram insuficientes, pois as propriedades petrográficas e a configuração do sistema poroso passaram a ter papel relevante, traduzidas neste estudo como sendo a intensidade e forma da alteração intempérica dos minerais constituintes e do microfissuramento.

Enfatiza-se, como já relatado, que as heterogeneidades intrínsecas aos materiais rochosos governam seu desempenho ante aos processos de alteração. A petrografia, até que estudos futuros propiciem quantitativamente as informações necessárias, mostrou-se como a principal técnica para o entendimento e explicação das deteriorações observadas em rochas para revestimento.

Salienta-se que o conjunto de ensaios propostos e realizados forneceu importantes indicações do desempenho do material selecionado que, por sua vez, deverão subsidiar a adoção de medidas para conservação dessas rochas. Antecipa-se que, certamente, são extrapoláveis para monumentos e edifícios históricos construídos em rochas de natureza semelhante.

O caráter introdutório deste estudo, no campo experimental da alteração acelerada de rochas graníticas para revestimento, deixa antever a necessidade de trabalhos de futuros, dentre os quais podem ser destacados:

- continuidade das investigações para determinação do sistema poroso e da distribuição dos poros, em rochas graníticas, e sua aplicação no melhor entendimento da alterabilidade dessas rochas em situações semelhantes às aqui simuladas;
- pesquisas para adequação das técnicas de conservação de rochas, a partir do conhecimento prévio das possíveis deteriorações nos ambientes simulados, pois uma vez conhecidos os efeitos degradadores e as deteriorações de cada rocha submetida a ensaios de alteração acelerada, pode-se dispor desses parâmetros para a seleção de técnicas de fixação, assentamento, impermeabilização e outros;
- aprimoramento e futura normalização dos procedimentos aqui estabelecidos para os ensaios de alteração acelerada, em especial aqueles que se revelaram mais eficientes; exposição às câmaras de dióxido de enxofre e de névoa salina, e imersão parcial em ácido sulfúrico, como métodos de investigação da alterabilidade de rochas graníticas.

Finalmente, é possível considerar que, num futuro próximo, possa se ampliar o conceito de durabilidade de materiais rochosos, conforme definido por ASTM e outros, passando a se incorporar a “preservação das características naturais, também por meio da adoção de medidas preventivas ou de conservação”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983a) *NBR 8096/83*: material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição ao dióxido de enxofre. Rio de Janeiro
- _____. (1983b) *NBR 8094/83*: material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro
- _____. (1992a) *NBR 12.766/92*: rochas para revestimento; determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro.
- _____. (1992b) *NBR 12.767/92*: rochas para revestimento; determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro.
- _____. (1992c) *NBR 12.768/92*: rochas para revestimento; análise petrográfica. Rio de Janeiro.
- _____. (no prelo). *Projeto 02:105.45-012*: rochas para revestimento - terminologia. Rio de Janeiro. (Em votação)
- AIRES-BARROS, L. 1991. *Alteração e alterabilidade de rochas*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica. 384p.
- ALMEIDA, F.F.M.; LETWINSKI, N. 1984. Província Mantiqueira; Setor Setentrional. In: AILMEIDA, F.F.M.; HASSUI, Y. (Coord.) *Pré-cambriano no Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher. p.282-307.
- AMOROSO, G.G.; FASSINA, V. 1983. *Stone decay and conservation*. Amsterdam: Elsevier. 453p. (Materials science monograph; v.11)
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1990) *C 170/90*: standard method for compressive strength of dimension stone. Philadelphia.
- _____. (1996) *C 97/96*: absorption and bulk specific gravity of dimension stone. Philadelphia.
- _____. (1997) *B 117/97*: standard practice for operating salt spray; fog; apparatus. Philadelphia.
- _____. (1998) *C 880/98*: standard test method for flexural strength of dimension stone. Philadelphia.
- _____. (1999a) *C 503/99*: standard specification for marble dimension stone; exterior. Philadelphia.
- _____. (1999b) *C 568/99*: standard specification for limestone dimension stone. Philadelphia.
- _____. (1999c) *C 615/99*: standard specification for granite dimension stone. Philadelphia.
- _____. (1999d) *C 616/99*: standard specification for quartz-based dimension stone. Philadelphia.
- _____. (2000) *D 2845/00*: standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks. Philadelphia.

- _____. (2001a) *C 119/01*: standard terminology relating to dimension stone. Philadelphia.
- _____. (2001b) *G 169/01*: standard guide for application of statistical methods to weathering tests. Philadelphia. 10p.
- AZEVEDO, H.C.A.; COSTA, P.H.O. (Coord.) (1994) *Catálogo de rochas ornamentais da Bahia, Brasil*. Salvador: SGM. 146p.
- BARBOSA, J.S.F.; DOMINGUEZ, J.M.L. (Coord.) (1996) *Geologia da Bahia*. texto explicativo. Salvador: SGM/UFBa/Fapex.
- BENAVENTE, D.; GARCIA DEL CURA, M.A.; BERNABÉU, A.; ORDÓÑEZ, S. (2001) Quantification of salt weathering in porous; stones using na experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, v.59, p.313-325.
- BENAVENTE, D.; GARCIA DEL CURA, M.A.; FORTE, R.; ORDÓÑEZ, S. (1999) Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, v.204, p.168-178.
- BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. (1999a) *BS EN 1936*: natural stone test methods; determination of real density and apparent density and of total and open porosity. London.
- _____. (1999b) *BS EN 1925*: natural stone test methods; determination of water absorption coefficient by capillarity. London
- _____. (2000) *BS EN 12407*: natural stone test methods; petrographic examination. London. 8p.
- CARDANI, G.; MEDA, A. (1999) Flexural strength and notch sensitivity in natural building stones: Carrara and Dionysos marble. *Construction and Building Materials*, v.13, p.393-403.
- CARROLL, D. (1970) *Rock weathering*. New York: Plenum. 203p.
- CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (1998a) (draft). *prEN WI 036*: natural stone test methods; determination of water absorption at atmospheric pressure.
- _____. (1998b) *prEN WI 016*: natural stone test methods: determination of resistance to ageing by thermal shock.
- _____. (2000) *BS EN 12407*: natural stone test methods; petrographic examination. London. 8p.
- CHIODI FILHO, C.; TAKAHASHI, A.T.; SILVA, C.R.R.; FERREIRA, J.C.G. (1983) *Projeto Capão Bonito*; relatório final. São Paulo: CPRM/Pró-Minério. v.1
- DELGADO-RODRIGUES, J. (1996) Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments; conclusion report. In: VICENTE, M.A., DELGADO-RODRIGUES, J., ACEVEDO, J. (Ed.) 1996. *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*. Brussels: European Commission. p.161-242. (Protection and conservation of the European Cultural Heritage, Research Report nº 5)
- DIB, P.P.; FRASCÁ, M.H.B.O.; BETTENCOURT, J.S. (1999) Propriedades tecnológicas e petrográficas do “Granito Rosa Itupeva” ao longo dos estágios de extração e beneficiamento. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 6., 1999, São Pedro.

- Boletim de Resumos...* São Pedro: SBG/UNESP. p.154.
- DIN - DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. (1997) *DIN 50018*: sulphur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere. Berlin.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2002) *Sumário mineral*. Brasília: DNPM.
- FEILDEN, B.M. (1994) *Conservation of historic buildings*. Oxford: Reed Educational and Professional Publish. 345p.
- FIGUEIREDO, P.; AIRES-BARROS, L; TORQUATO, J.; BESSA, M.F.; LIMA, M.A.; FERNANDES, A.H. (2001) Determinação laboratorial de um índice de alterabilidade para o granito Rosa Iracema (Ceará, Brasil). In: CONGRESSO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 6., SEMANA DE GEOQUÍMICA, 12., 2001, Faro. *Actas...* Faro, Portugal: Universidade de Algarve. p.384-387.
- FIGUEIREDO, P.; AIRES-BARROS, L; TORQUATO, J.; BESSA, M.F.; LIMA, M.A.; FERNANDES, A.H.; MACHAQUEIRO, P. (2002) Contribuição para o estudo das propriedades petrofísicas do granito Asa Branca e Rosa Iracema do Ceará, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2., 2001, Salvador. *Anais...* Rio de Janeiro: MCT/CETEM. p.31-36.
- FRASCÁ, M.H.B.O. (2002a) Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2., 2001, Salvador. *Anais...* Rio de Janeiro: MCT/CETEM. p.128-135.
- FRASCÁ, M.H.B.O. (2002b) Porosity and technological properties of granite dimension stone and polished tiles. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT, 9., 2002, Durban, África do Sul. *Proceedings...* Pretoria: SAIEG. p.2475-2484. (CD-ROM).
- FRASCÁ, M.H.B.O.; FRAZÃO, E.B. (2002) A normatização no setor de rochas para revestimento. *Rochas de Qualidade*, v.167, p.136-167.
- FRASCÁ, M.H.B.O.; MELLO, I.S.C.; QUITETE, E.B. (2000). *Rochas ornamentais e de revestimento do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT. CD-ROM. (IPT. Pub. 2651)
- FRASCÁ, M.H.B.O.; QUITETE, E.B. (1999) Estudos diagnósticos de patologias em rochas de revestimento. In: CONGRESSO IBERAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES, 7., 1999, Montevideo. *Memorias...* Montevideo: Asiconpat/CIB. v.2, p.1367-1373.
- FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P.L.P. (1998) Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.) *Geologia de engenharia*. São Paulo: ABGE. P.15-38
- FRAZÃO, E.B. (2002) *Tecnologia de rochas na construção civil*. São Paulo: ABGE. 132p.
- FRAZÃO, E.B.; FARJALLAT, J.E.S. 1996. Proposta de especificação para rochas silicáticas de revestimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8., 1996, Rio de Janeiro. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABGE. v.1, p. 369-380.

- FRAZÃO, E.B.; QUEIROZ, F.C., HACHIRO, J., FARJALLAT, J.E.S., CARUSO, L.G., FRASCÁ, M.H.B.O., OLIVEIRA, M.C.B., PINTO, C.P.; CASTANHEIRA, O., ZENÓBIO, H., SANTOS, P.R., SOUZA, R.P. (1993) *Catálogo das rochas ornamentais do Estado do Espírito Santo*. São Paulo: Sedes/IPT. 81p. (IPT. Publicação, 2048)
- GIACOMELLI, V., PEREGO, G. (s.d.) Degradation of stone. Disponível em: <http://www.eni.it/english/notizie/mediteca/specials/s_pietro/pietra.html>. Acesso em: 18/04/2003.
- GOBBI, G.; ZAPPIA, G.; SABBIONI, C. (1998) Sulphite quantification on damaged stones and mortar. *Atmospheric Environment*, v.32, n.4, p.783-789.
- GOLDICH, S.S. (1938). A study in rock-weathering. *Journal of Geology*, v.46, p.17-58.
- GONZÁLEZ-MESSONES, F.L. (2002) La interpretación de los ensayos de caracterización de la piedra natural, en el marco de la nueva normativa europea. In: *Curso de rochas ornamentais*. Recife. CD-ROM.
- GROSSI, C.M.; ESBERT, R.M.; DÍAZ-PACHE, F. (1998) Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos. *Materiales de Construcción*, v.48, n.252, p.5-25.
- GROSSI, C.M.; MURRAY, M. (1999) Characteristics of carbonate building stones that influence the dry deposition of acidic gases. *Construction and Building Materials*, v.1, p.101-08.
- GUPTA, A.S.; RAO, S. (2000) Weathering effects on the strength and deformational behavior of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, v.56, p.357-274.
- HOUAISS, A.; VILLAR, M.S. (2001) *Dicionário Houaiss da língua portuguesa*. Rio de Janeiro: Instituto Houaiss. 2922p.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1995) *Mapa geológico da Folha Itararé, escala 1:250.000*. São Paulo. (inédito).
- _____. (1996) *Adequação e controle da mineração na bacia do Guarapiranga: levantamento geológico e geomorfológico*. São Paulo. (IPT. Relatório IPT 34.540).
- _____. (2000) *Atualização e modernização do catálogo de rochas ornamentais do Estado de São Paulo*. São Paulo. (IPT. Relatório IPT 45.508).
- JCPDS – JOINT COMMITTEE ON POWDER DIFFRACTION STANDARDS. (1974) *Selected powder diffraction data for minerals; data book*. Swarthmore: International Centre for Diffraction Data. 835p.
- _____. (1980) *Mineral powder diffraction data file; search manuals*. Swarthmore: International Centre for Diffraction Data. 484p.
- _____. (1981) *Selected powder diffraction data for minerals: data book supplement I*. Swarthmore: International Centre for Diffraction Data. 463p.
- JEFFERSON, D.P. (1993) The weathering of stone. *Stone Industries*, v.28, n.3, p.24-29.
- JOHNSON, R.B.; DeGRAFF, J.V. (1988) *Principles of engineering geology*. New York: John Wiley. 497p.

- JONES, M.P. (1987) *Applied mineralogy: a quantitative approach*. London: Graham and Trotman. 259p.
- KAHRAMAN, S. 2002. The effects of fracture roughness on *P*-wave velocity. *Engineering Geology*, v.63, p.347-350.
- KELLER, E.A. (1996) *Environmental geology*. New Jersey: Prentice Hall.
- KESSLER, D.W.; INSLEY, H.; SLIGH, W.H. (1940) Physical, mineralogical, and durability studies on the building and monumental granites of the United States. *Journal of Research of National Bureau of Standards*, vol. 25: 161-206. (Research Paper RP1320)
- KOBAYASHI, S., SAKAMOTO, T., KAKITANI, S. (1994) Effects of acid rain on granitic building stone. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 7., 1994, Lisbon. *Proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. v.5, p.3651-3658.
- KRUMBEIN, W.C.; GARRELS, R.M. (1952) Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials. *Journal of Geology*, v.60, n.1, p.1-33.
- KUPCHELLA, C.E.; HYLAND, M.C. (1992) *Environmental science: living with the system of nature*. 3.ed. New Jersey: Prentice-Hall.
- LA IGLESIA, A.; CONZÁLEZ, V. LÓPEZ-ACEVEDO, V.; VIEDMA, C. 1997. Salt crystallization in porous construction materials I: estimation of crystallization pressure. *Journal of Crystal Growth*, v.177, p.111-118.
- LE MAITRE, R.W. (Ed.). (1989) *A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford. Blackwell Scientific Publ. 193p.
- LÓPEZ-ACEVEDO, V.; VIEDMA, C.; GONZALEZ, V. LA IGLESIA, A. (1997) Salt crystallization in porous construction materials II: mass transport and crystallization processes. *Journal of Crystal Growth*, v.182, p.103-110.
- LÓPEZ JIMENO, C. (Ed.) (1996) *Manual de rocas ornamentales: prospección, explotación, elaboración y colocación*. Madrid: Entorno. 696 p.
- MANCINI, R.; MORANDINI FRISA, A.; MARINI, P. (1994) On the importance of a careful characterisation of decorative Stones aimed to durability assessment: An example of faked aesthetic equivalence in stones use in public buildings lining in Turin. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 7., 1994, Lisbon. *Proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. v.5, p.3671-3676.
- MESQUITA, M.P.S. (2002) *Composição, estruturas, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do Stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)*. 169p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Rio Claro.
- MONTANI, C. (2002) *Stone 2002: world marketing handbook*. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Ed.
- MURCK, B.A.; SKINNER, B.J. (1999) *Geology today: understanding our planet*. New York: John Wiley. 527p.

- PEITER, C.C. (Coord.) (2001) *Rochas ornamentais no século XXI: bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras*. Rio de Janeiro: Cetem/Abirochas. 159p.
- PERRY, S.H.; DUFFY, A.P. (1997) The short-term effects of mortar joints on salt movement in stone. *Atmospheric Environment*, v.31, n.9, p.1297-1305.
- ROBERTO, F.A.C. (1998) *Rochas ornamentais do Ceará: geologia, pesquisa, lavra, beneficiamento e mercado*. 225p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ROBINSON, D.A.L; WILLIAMS, R.B.G. (1994) *Rock weathering and landform evolution*. London: John Wiley. 519p.
- RODRIGUES, E.P.; MORAES, M.C. (1978) Exemplo de aplicação de coloração seletiva de feldspatos potássicos e cálcicos, como técnica auxiliar no estudo de rochas. *Cerâmica*, v.24, n.97, jan. (Trabalho apres. no Congresso Brasileiro de Cerâmica, 21., 1977, Blumenau.).
- SCHOBENHAUS, C. *et al.* (Coord.) (1984) *Geologia do Brasil*. Brasília: DNPM. 501p.
- SKINNER, B.J.; PORTER, S.C.; BOTKIN, D.B. (1999) *The blue planet: an introduction to Earth System Science*. 2.ed. New York: John Wiley. 552p.
- STRECKEISEN, A. (1975). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Sci. Rev.*, v.12, p.1-33.
- THEOULAKIS, P.; MOROPOULOU, A. (1997) Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and Building Materials*, v.11, n.1, p.65-71
- THOREZ, J. (1976) *Practical identification of clay minerals*. s.l.: Editions G. Lelotte. 90p.
- UCHIDA, E.; OGAWA, Y.; MAEDA, N.; NAKAGAWA, T. 1999. Deterioration of stone materials in Angkor monuments, Cambodia. *Engineering Geology*, v.55, p.101-112.
- VICENTE, M.A.; DELGADO-RODRIGUES, J.; ACEVEDO, J. (Ed.) (1996) *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*. Brussels: European Commission. 471p. (Protection and Conservation of the European Cultural Heritage, Research Report no 5)
- VIDAL, F.W.H. (1999) *Estudo dos elementos abrasivos de fio diamantado para a lavra de granitos do Ceará*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- VILES, H.A. (1997) Urban air pollution and the deterioration of buildings and monuments. In: BRUNE, D.; CHAPMAN, D.V.; GRUYNNE, M.D.; PACYNA, J.M. (Ed.) *The global environment: science, technology and management*. Weinheim: Scandinavian Science Publ.; VCH. p.599-609.
- WARKE, P.A.; SMITH, B.J. (1998) Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests. *Geomorphology*, v.22. p.347-357.
- WILSON, M.J. 1975. Chemical weathering of some primary rock-forming minerals. *Soil Science*, v.119, n.5, p.349-354.
- WINKLER, E.M. (1997) *Stone in architecture: properties, durability*. 3.ed. Berlin:

Springer-Verlag. 313p.

WINKLER, E.M.; SINGER, P.C. (1972) Crystallization pressure of salts in stone and concrete. *Geological Society of America Bulletin*, v.83, p.3.509-3.514.

WINKLER, H.G. (1976) *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 4.ed. New York: Springer-Verlag. 334p.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. (2001) Acidic attack of cement based materials; a review; part 1: principle of acidic attack. *Construction and Building Materials*, v.5, p.331-340.

ANEXO A

Fichas de Campo

FICHA DE CAMPO – N° 1

N° do Ponto: 1	Data da Visita: 19/06/2000
Tipo Comercial: VERMELHO CAPÃO BONITO	
Local: Bairro Paranaipitanga – Fazenda Somibrás Município: Capão Bonito – SP	
Acesso: Estrada Capão Bonito-Guapiara, km 12,5 (após ponte). Saída à direita, 6 km até a mina.	
Coordenadas UTM	
Latitude 733296 N	Longitude 75617 E
Contexto Geológico	
Granito Capão Bonito, intrusivo nas unidades da Faixa Ribeira	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Vermelha
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Corte através de perfuração semimecanizada e uso de explosivos, e esquadrejamento por cortes espaçados semimecanizados (matacões), ou <i>flame-jet</i> e talha-blocos (maciço).	
Empreendedor	
Somibrás – Sociedade de Mineração Brasileira Ltda.	
Observações	
Há variação no padrão da pedra produzida em matacões. Empreendimento organizado, em consonância com plano de redução de impactos e recuperação da áreas degradadas.	
Produção Média (m ³ /mês): 150-200	
Destino da Produção: Cidade de São Paulo (para processamento), mercado nacional e externo (Itália, Japão).	

FICHA DE CAMPO – N° 2

N° do Ponto: 2	Data da Visita: 19/6/00
Tipo Comercial: VERMELHO CAPÃO BONITO	
Local: Bairro Areias – Fazenda Santa Madalena Município: Capão Bonito	
Acesso: Rodovia Capão Bonito – Guapiara, km 9. Estrada para Apiaí-Mirim, 9,5 km. Saída à esquerda até a lavra.	
Coordenadas UTM	
Latitude 733487 N	Longitude 75428 E
Contexto Geológico	
Granito Capão Bonito, intrusivo nas unidades da Faixa Ribeira	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Vermelha
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento manual de blocos. Empreendimento rudimentar e bastante impactante ao meio físico.	
Empreendedor	
Granitos Brasileiros S.A.	
Observações:	
Mina de empresa verticalizada, com produção bastante diminuída em relação a épocas passadas.	
Produção Média (m ³ /mês): 60-80	
Destino da Produção: Cidade de São Paulo, para serragem e destino aos mercados nacional e internacional.	

FICHA DE CAMPO – N° 3

N° do Ponto: 4	Data da Visita: 20/6/2000
Tipo Comercial: VERMELHO CAPÃO BONITO	
Local: Bairro Areias	Município: Capão Bonito
Acesso: Rodovia Capão Bonito – Guapiara, km 9. Estrada para Apiaí-Mirim, 8 km. Saída à esquerda até a lavra (3km).	
Coordenadas UTM	
Latitude 733378 N	Longitude 75545 E
Contexto Geológico	
Granito Capão Bonito, intrusivo nas unidades da Faixa Ribeira	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Vermelha
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento através de furos espaçados manuais. Empreendimento rudimentar, de baixo rendimento.	
Empreendedor	
Granitos Pires – Mineração e Comércio Ltda.	
Observações	
Produção quase paralisada. Quando em alta, exportação via portos de Rio de Janeiro e Paranaguá.	
Produção Média (m³/mês): 100	
Destino da Produção: Mercado interno das regiões sul e sudeste, e mercado externo (Itália)	

FICHA DE CAMPO – N° 4

N° do Ponto: 5	Data da Visita: 22/11/2000
Tipo Comercial: PRATA INTERLAGOS	
Local: Jardim Sabiá	Município: São Paulo – SP
Acesso: Estrada da Varginha, em Parelheiros, altura da empresa Blocos São Nicolau. Saída à direita, 200 m. Variante à esquerda até a mina.	
Coordenadas UTM	
Latitude 736725 N	Longitude 327029 E
Contexto Geológico	
Granito Parelheiros, intrusivo no Complexo Embú.	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Cinza
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento de blocos por furos espaçados. Todas as operações manuais.	
Empreendedor	
Itaquá Mármore e Granitos Ltda.	
Observações	
Produção quase paralisada. Quando em alta, exportação via portos de Rio de Janeiro e Paranaguá.	
Produção Média (m³/mês): 80	
Destino da Produção: Mercado regional.	

FICHA DE CAMPO – N° 5

N° do Ponto: 6	Data da Visita: 22/11/2000
Tipo Comercial: AZUL PAULISTA FRENTE NOVA	
Local: Jardim Sabiá	Município: São Paulo – SP
Acesso: Estrada da Varginha até a rua Henrique Mazzio. Saída à esquerda, até 500 m além do ponto final da linha de ônibus Jardim Varginha.	
Coordenadas UTM	
Latitude 7368733 N	Longitude 329701 E
Contexto Geológico	
Granito Parelheiros, intrusivo no Complexo Embú.	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Cinza
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento de blocos por furos espaçados. Todas as operações semimecanizadas.	
Empreendedor	
Granitos Brasileiros S.A.	
Observações	
Mesma rocha comercializada com Prata Interlagos (IPT – SP 23) pela Itaqué Mármores e Granitos.	
Produção Média (m³/mês): 80	
Destino da Produção: Mercado regional.	

FICHA DE CAMPO – N° 6

N° do Ponto: 7	Data da Visita: 29/08/2000
Tipo Comercial: ARABESCO	
Local: -	Município: Nova Venécia – ES
Acesso: a partir de Nova Venécia, toma-se estrada para Vila Pavão. No entroncamento, toma-se a direção para Veloso, percorrendo-se 11,5 km em estrada de terra.	
Coordenadas UTM	
Latitude 705125 N	Longitude 33755 E
Contexto Geológico	
Terrenos migmatítico-granulíticos da porção setentrional da Província Mantiqueira	
Tipo de Rocha: “Gnaiss” granítico com granada (kinzigítico?)	Cor: Branco rosado a amarelado
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra mecanizada, com corte com uso de fio diamantado (preferencialmente) e <i>flame jet</i> . Desdobramento com uso de marteletes e ponteiros. Blocos são levados por tratores de esteira até caminhões e daí transportado para beneficiamento ou comercialização.	
Não há capeamento. A lavra se iniciou diretamente na rocha. Há problemas de fraturamento da rocha por alívio de tensões e o uso de massa expansiva não colaborou para solucionar este problema.	
Empreendedor	
Rocha Branca Mineração Comércio e Exportação Ltda.	
Observações	
A cor amarela, que valoriza o material, é resultante de intemperismo e atinge até 5 m de profundidade, quando a cor passa a ser branco rosado.	
Produção Média (m³/mês): 600-700	
Destino da Produção: Mercado interno e externo (Europa e Estados Unidos – chapas, ladrilhos e peças acabadas).	

FICHA DE CAMPO – N° 7

N° do Ponto: 8	Data da Visita: 29/08/2000
Tipo Comercial: GIALLO VENECIANO	
Local : -	Município: Nova Venécia – ES
Acesso: a partir de Nova Venécia, toma-se estrada para Colatina, entrando-se à direita assim que se chega ao asfalto.	
Coordenadas UTM	
Latitude 793127 N	Longitude 34106 E
Contexto Geológico	
Terrenos migmatítico-granulíticos da porção setentrional da Província Mantiqueira	
Tipo de Rocha: “Gnaiss” granítico, pouco orientado, com granada (kinzigítico?)	Cor: Branco rosado a amarelado
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra mecanizada, com corte com uso de fio diamantado (preferencialmente) e <i>flame jet</i> . Desdobramento com uso de marteletes e ponteiros. Blocos são levados por tratores de esteira até caminhões e daí transportado para o pátio. Não há capeamento.	
Empreendedor	
Granasa – Granitos Nacionais Ltda.	
Observações	
Mina em produção há 22 anos. Uma das rochas ornamentais brasileiras mais valorizadas no mercado externo.	
Produção Média (m³/mês): 3.700	
Destino da Produção: Itália – como blocos –, essencialmente. Alguns blocos não classificados para exportação são vendidos no mercado interno.	

FICHA DE CAMPO – N° 8

N° do Ponto: 9	Data da Visita: 30/08/2000
Tipo Comercial: SANTA CECÍLIA	
Local: -	Município: Ecoporanga – ES
Acesso: a partir de Ecoporanga, toma-se estrada de terra, onde se percorre cerca de 25 km.	
Coordenadas UTM	
Latitude 798614 N	Longitude 29770 E
Contexto Geológico	
Terrenos migmatítico-granulíticos da porção setentrional da Província Mantiqueira	
Tipo de Rocha: “Gnaiss” granítico, com abundantes porfiroblastos de granada (kinzigítico?)	Cor: Branco amarelado e amarelo rosado
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra mecanizada, em bancadas. Desdobramento dos blocos é feito com “extrator de blocos” – marteletes em fileira segundo toda frente e base da bancada. Esquadreamento com uso de marteletes e ponteiros. Não há capeamento.	
Empreendedor	
Nemer – Mármore e Granitos S.A.	
Observações	
Mina em produção há 5 anos. A cor amarela é o aspecto valorizador da rocha, e resulta do intemperismo da camada superficial do maciço. A capa intempérica tem aproximadamente 8 m de espessura, e a lavra acompanha este capeamento.	
Produção Média (m³/mês): 800	
Destino da Produção: mercado interno, principalmente centro-oeste e sudeste.	

FICHA DE CAMPO – Nº 9

Nº do Ponto: 10	Data da Visita: 28/08/2000
Tipo Comercial: VERDE LABRADOR	
Local: -	Município: Baixo Guandu – ES
Acesso: a partir de Baixo Guandu, toma-se estrada de terra para Pancas, onde se percorre cerca de 38 km.	
Coordenadas UTM	
Latitude 786090 N	Longitude 30035 E
Contexto Geológico	
Complexo migmatítico-granulítico de Minas Gerais	
Tipo de Rocha: Charnockito	Cor: Verde
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra semimecanizada, com corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadrejamento através de furos de martelo e uso de ponteiros. A exploração é em um alto topográfico, com algum capeamento. Os blocos são lançados por gravidade até cotas mais baixas, de onde são transportados para beneficiamento (em Cachoeiro do Itapemirim).	
Empreendedor	
Marbrasa – Mármore e Granitos do Brasil S.A.	
Observações	
Produção quase paralisada. Quando em alta, exportação via portos de Rio de Janeiro e Paranaguá.	
Produção Média (m³/mês): 600-700	
Destino da Produção: Mercado interno e externo (Europa e Estados Unidos – chapas, ladrilhos e peças acabadas).	

FICHA DE CAMPO – Nº 10

Nº do Ponto: 11	Data da Visita: 31/08/2000
Tipo Comercial: BRANCO ITAÚNAS	
Local: -	Município: Medeiros Neto - BA
Acesso: a partir de Medeiros Neto, no entroncamento toma-se a direção Vereda. Após se percorrer cerca de 6 km, toma-se à direita percorrendo-se mais 6 km em estrada de terra.	
Coordenadas UTM	
Latitude 807717 N	Longitude 37854 E
Contexto Geológico	
Região de Dobramentos Araçuai. Província kinzigítica do sul do Estado da Bahia.	
Tipo de Rocha: “Gnaiss” granítico, com abundantes porfiroblastos de granada	Cor: Branca, levemente esverdeada
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra mecanizada, com uso de fio diamantado. Desdobramento dos blocos é feito com marteletes, e o esquadrejamento com cunhas ou explosivos.	
No início da lavra, houve extração de material granítico de cor amarela, logo abaixo do capeamento.	
Empreendedor	
Mineração Corcovado Ltda.	
Observações	
Existem 2 frentes de lavra, microponto II e microponto III, este último é um pouco mais grosso que o II e com maior tendência à modificação de cor (manchamento). É cortado por abundantes vênulas, veios e bolsões pegmatóides (quartzo, feldspato – esverdeados –, com biotita).	
Produção Média (m³/mês): 250-300 (microponto II), 350-400 (microponto III)	
Destino da Produção: mercado externo e interno.	

FICHA DE CAMPO – Nº 11

Nº do Ponto: 12	Data da Visita: 31/08/2000
Tipo Comercial BRANCO CARAVELAS:	
Local: -	Município: Medeiros Neto - BA
Acesso: a partir de Medeiros Neto, toma-se estrada de terra percorrendo-se cerca de 37 km.	
Coordenadas UTM	
Latitude 807313 N	Longitude 34956 E
Contexto Geológico	
Região de Dobramentos Araçuai. Província kinzigítica do sul do Estado da Bahia.	
Tipo de Rocha: "Gnaiss" granítico, com abundantes agregados subcentimétricos de granada e biotita	
Cor: Branca, levemente esverdeada	
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra mecanizada, com uso de fio diamantado. Desdobramento dos blocos é feito com marteletes, e o esquadrejamento com cunhas ou explosivos.	
Exploração a partir de alto topográfico, com capeamento praticamente inexistente.	
Empreendedor	
Mineração Corcovado Ltda.	
Observações	
Esta rocha não tem apresentado problemas de manchamento, mas já ocorreram algumas eflorescências.	
Há grande perda de material por alívio de tensões do maciço rochoso. A opção por lavra em bancadas só minimizou o problema.	
Produção Média (m³/mês): 250	
Destino da Produção: mercados externo e interno.	

FICHA DE CAMPO – Nº 12

Nº do Ponto: 13	Data da Visita: 23/01/2001
Tipo Comercial: ROSA IRACEMA	
Local: Fazenda Maurício	Município: Forquilha – CE
Acesso: Rodovia BR-222 para Sobral, tomar à direita (estrada de terra) cerca de 200m após o restaurante "Maria dos Patos". Percorrem-se cerca de 10 km até a mina.	
Coordenadas UTM	
Latitude 9590218 N	Longitude 374221 E
Contexto Geológico	
Stock Serra da Barriga, plutonitos ácidos a intermediários do final do Brasiliano.	
Tipo de Rocha: Granito	
Cor: Rosa	
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra em maciço, mecanizada, com uso de <i>flame jet</i> . Desdobramento dos blocos é feito com marteletes, e o esquadrejamento com cunhas e explosivos.	
Empreendedor	
Imarf Granitos S.A.	
Observações	
O uso de fio diamantado foi abandonado, pois havia muito desgaste, atribuído ao teor de quartzo.	
Produção Média (m³/mês): 600	
Destino da Produção: mercados externo e interno.	

FICHA DE CAMPO – Nº 13

Nº do Ponto: 14	Data da Visita: 23/01/2001
Tipo Comercial: BRANCO CRISTAL QUARTZ	
Local: Fazenda Maurício	Município: Forquilha – CE
Acesso: Rodovia BR-222 para Sobral, tomar à direita (estrada de terra) cerca de 200m após o restaurante “Maria dos Patos”. Percorre-se cerca de 8 km até a mina.	
Coordenadas UTM	
Latitude 9587285 N	Longitude 373313 E
Contexto Geológico	
Stock Serra da Barriga, plutonitos ácidos a intermediários do final do Brasileiro.	
Tipo de Rocha: “Granito”, com minúsculos pontos de granada	Cor: Branca
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra em matacões, semimecanizada. O desdobramento dos blocos é feito com marteletes, e o esquadrejamento com cunhas e explosivos.	
Empreendedor	
Imarf Granitos S.A.	
Observações	
Os matacões, eventualmente, poderiam ser grandes blocos rolados do topo do morro, tendo em vista a pouca distância do Rosa Iracema.	
Produção Média (m³/mês): até 900	
Destino da Produção: mercados externo e interno.	

FICHA DE CAMPO – Nº 14

Nº do Ponto: 15	Data da Visita: 23/01/2001
Tipo Comercial: BRANCO SAVANA	
Local: Fazenda Maurício	Município Forquilha – CE:
Acesso: Rodovia BR-222 para Sobral, tomar à direita (estrada de terra) cerca de 200m após o restaurante “Maria dos Patos”. Percorrem-se cerca de 6 km até a mina.	
Coordenadas UTM	
Latitude 9586267 N	Longitude 373444 E
Contexto Geológico	
Stock Serra da Barriga, plutonitos ácidos a intermediários do final do Brasileiro.	
Tipo de Rocha: Granito	Cor: Branco levemente rosado
Dados da Lavra	
Tipo de Lavra: Lavra em maciço, mecanizada, com uso de <i>flame jet</i> ou fio diamantado. Desdobramento dos blocos é feito com marteletes, e o esquadrejamento com cunhas e explosivos.	
Empreendedor	
Imarf Granitos S.A.	
Observações	
É tido como uma variação do Rosa Iracema. No momento, com produção interrompida.	
Produção Média (m³/mês): 650	
Destino da Produção: mercados externo e interno.	

FICHA DE CAMPO – Nº 15

Nº do Ponto: 16		Data da Visita: 23/01/2001	
Tipo Comercial: BRANCO CEARÁ			
Local: Fazenda Memória		Município: Santa Quitéria – CE	
Acesso: Rodovia BR-222, até Forquilha, toma-se a CE-362 e CE-257 no sentido Santa Quitéria, tomar à direita (tem placa) cerca de 13 km antes de Santa Quitéria. Percorre-se 20 km em estrada de terra, até a pedreira.			
Coordenadas UTM			
Latitude	9542520 N	Longitude	361180 E
Contexto Geológico			
Stock Morrinhos; granitos leucocráticos Fazenda Memória			
Tipo de Rocha: Granito		Cor: Branca	
Dados da Lavra			
Tipo de Lavra: Lavra em maciço, mecanizada, com uso de fio diamantado. Desdobramento dos blocos é feito com massa expansiva. Esquadrejamento com marteletes e cunhas.			
Empreendedor			
Granistone S.A.			
Observações			
Trata-se da mais valorizada rocha ornamental brasileira em exploração.			
Produção Média (m³/mês): 1.200			
Destino da Produção: mercados externo, principalmente, e interno.			

FICHA DE CAMPO – Nº 16

Nº do Ponto: 17		Data da Visita: 24/01/2001	
Tipo Comercial: CASABLANCA / FALÉSIAS			
Local: Vila de Tróia		Município: Independência – CE	
Acesso: Rodovia BR-020 (Independência – Cruzeta), estrada para Pedra Branca (de terra). Percorre-se 10 km até o povoado Limoeiro, pouco antes da escola, toma-se a direita e percorre-se mais 14 km até a pedreira.			
Coordenadas UTM			
Latitude 9389477 N		Longitude 398775 E	
Contexto Geológico			
Leptinitos Tróia, ortognaisses leucocráticos ocupando a porção central do Maciço Tróia.			
Tipo de Rocha: Ganisse granítico		Cor: Branca. Com faixas marrom-ferruginosas nas porções intemperizadas, comercializadas como Falésias	
Dados da Lavra			
Tipo de Lavra: Lavra em maciço, mecanizada, com uso de fio diamantado. Desdobramento dos blocos é feito com massa expansiva e o esquadrejamento com marteletes e cunhas.			
Empreendedor			
Granos – Granitos S.A			
Observações			
São comercializadas a rocha de cor branca, inalterada, e a de cor “amarronzada”, variante intemperizada da mesma rocha. Os corpos ocorrem geograficamente próximos, separados por drenagem, que provavelmente condicionou este fenômeno só em parte do maciço.			
Produção Média (m³/mês): -			
Destino da Produção: mercados externo e interno.			

ANEXO B

**Resultados de determinações de massa específica aparente,
porosidade aparente e absorção d'água aparente
(ABNT NBR 12766/92)**

Legenda

ρ_{sec} = massa específica aparente seca (kg/m^3);

η = porosidade aparente (%);

α = absorção d'água aparente (%);

$\bar{X}$ = média

S = desvio padrão

$C.V.$ = coeficiente de variação (%)

TAMANHOS DOS CORPOS-DE-PROVA: 10 cm x 15 cm

LBD	ρ_{sec}	η	α
2	2.669	0,66	0,25
3	2.659	0,64	0,24
8	2.655	0,65	0,24
9	2.668	0,63	0,23
10	2.661	0,64	0,24
$\bar{X}$	2.662	0,64	0,24
S	6	0,01	0,01
$C.V.$	0,23	2,2	2,2

VCB-1	ρ_{sec}	η	α
6	2.633	0,50	0,19
7	2.633	0,51	0,19
8	2.635	0,43	0,16
9	2.633	0,48	0,18
10	2.641	0,47	0,18
$\bar{X}$	2.635	0,48	0,18
S	3	0,03	0,01
$C.V.$	0,13	6,4	6,5

VCB-2	ρ_{sec}	η	α
1	2.633	0,41	0,16
3	2.633	0,41	0,16
4	2.628	0,43	0,16
5	2.631	0,41	0,16
6	2.631	0,37	0,14
$\bar{X}$	2.631	0,41	0,15
S	2	0,02	0,01
$C.V.$	0,09	5,7	5,8

VCB-3	ρ_{sec}	η	α
1	2.634	0,44	0,17
2	2.646	0,44	0,17
3	2.639	0,45	0,17
4	2.635	0,46	0,18
6	2.638	0,44	0,17
$\bar{X}$	2.639	0,45	0,17
S	5	0,01	0,00
$C.V.$	0,18	1,9	2,0

RIC	ρ_{sec}	η	α
1	2.622	0,45	0,17
2	2.615	0,45	0,17
3	2.626	0,45	0,17
4	2.617	0,46	0,18
5	2.619	0,47	0,18
6	2.633	0,46	0,17
$\bar{X}$	2.622	0,46	0,17
S	7	0,01	0,00
$C.V.$	0,26	1,9	1,9

BCR	ρ_{sec}	η	α
1	2.609	0,87	0,34
2	2.610	0,84	0,32
3	2.610	0,87	0,33
8	2.610	0,87	0,33
9	2.610	0,87	0,33
10	2.610	0,87	0,33
$\bar{X}$	2.610	0,87	0,33
S	1	0,01	0,01
$C.V.$	0,02	1,6	1,7

BSV	ρ_{sec}	η	α
1	2.616	0,65	0,25
2	2.619	0,66	0,25
3	2.615	0,73	0,28
4	2.614	0,70	0,27
5	2.619	0,66	0,25
$\bar{X}$	2.616	0,68	0,26
S	2	0,03	0,01
$C.V.$	0,09	4,4	4,4

PIT-2cm	ρ_{sec}	η	α
1	2.624	0,77	0,30
2	2.624	0,78	0,30
3	2.623	0,79	0,30
$\bar{X}$	2.624	0,78	0,30
S	0	0,01	0,00
$C.V.$	0,01	1,1	1,1
AZF	ρ_{sec}	η	α
1	2.631	0,63	0,24
2	2.630	0,63	0,24
3	2.627	0,65	0,25
$\bar{X}$	2.629	0,64	0,24
S	2	0,01	0,01
$C.V.$	0,07	2,2	2,3
BCE	ρ_{sec}	η	α
1	2.616	0,63	0,24
2	2.614	0,59	0,23
3	2.615	0,62	0,24
4	2.614	0,62	0,24
5	2.615	0,58	0,22
$\bar{X}$	2.615	0,61	0,23
S	1	0,02	0,01
$C.V.$	0,04	3,6	3,6
ITN-1	ρ_{sec}	η	α
1	2.607	0,97	0,37
2	2.614	0,91	0,35
3	2.611	0,90	0,35
4	2.610	0,94	0,36
5	2.613	0,89	0,34
$\bar{X}$	2.611	0,92	0,35
S	3	0,03	0,01
$C.V.$	0,10	3,6	3,7

ITN-2	ρ_{sec}	η	α
1	2.613	0,82	0,31
2	2.612	1,08	0,41
3	2.603	0,91	0,35
4	2.611	0,92	0,35
5	2.610	0,95	0,36
6	2.614	0,79	0,30
$\bar{X}$	2.610	0,91	0,35
S	4	0,10	0,04
$C.V.$	0,15	11,1	11,1
CRV	ρ_{sec}	η	α
1	2.620	0,82	0,31
2	2.621	0,82	0,31
3	2.621	0,85	0,33
8	2.621	0,87	0,33
9	2.619	0,87	0,33
10	2.621	0,90	0,34
$\bar{X}$	2.621	0,86	0,33
S	1	0,03	0,01
$C.V.$	0,03	3,4	3,4
CSB	ρ_{sec}	η	α
1	2.634	0,53	0,20
2	2.629	0,72	0,28
3	2.643	0,62	0,24
8	2.630	0,60	0,23
9	2.627	0,63	0,24
10	2.631	0,61	0,23
$\bar{X}$	2.632	0,62	0,23
S	6	0,06	0,02
$C.V.$	0,22	10,3	10,3
FLS	ρ_{sec}	η	α
1	2.632	0,68	0,26
2	2.636	0,65	0,25
3	2.607	0,69	0,26
4	2.636	0,69	0,26
5	2.609	0,72	0,28
$\bar{X}$	2.624	0,68	0,26
S	15	0,03	0,01
$C.V.$	0,55	3,8	4,2

GVN	ρ_{sec}	η	α
1	2.648	0,95	0,36
2	2.645	0,93	0,35
3	2.655	0,89	0,34
4	2.648	0,87	0,33
5	2.630	0,86	0,33
6	2.636	0,84	0,32
$\bar{X}$	2.644	0,89	0,34
s	9	0,04	0,02
C.V.	0,35	4,7	4,6

ARB	ρ_{sec}	η	α
1	2.641	0,75	0,28
2	2.646	0,75	0,28
3	2.641	0,79	0,30
8	2.657	0,73	0,28
9	2.651	0,73	0,28
10	2.649	0,75	0,28
$\bar{X}$	2.648	0,75	0,28
s	6	0,02	0,01
C.V.	0,24	2,6	2,8

SCC	ρ_{sec}	η	α
1	2.644	0,82	0,31
2	2.642	0,74	0,28
3	2.635	0,77	0,29
8	2.646	0,61	0,23
9	2.660	0,78	0,29
10	2.634	0,79	0,30
$\bar{X}$	2.643	0,75	0,28
s	9	0,08	0,03
C.V.	0,35	10,1	10,1

TAMANHOS DOS CORPOS DE PROVA: 10cm x 12cm

LBD	ρ_{sec}	η	α
1 H ₂ SO ₄	2.655	0,70	0,26
2 NaOH	2.659	0,69	0,26
3 NaOH	2.655	0,67	0,25
5 Pd	2.658	0,74	0,28
5 H ₂ SO ₄	2.660	0,70	0,26
$\bar{X}$	2.658	0,70	0,26
s	2	0,03	0,01
C.V.	0,09	3,6	3,6

VCB-1	ρ_{sec}	η	α
6	2.634	0,60	0,23
7	2.635	0,58	0,22
8	2.635	0,54	0,21
9	2.633	0,61	0,23
10	2.641	0,56	0,21

$\bar{X}$	2.636	0,58	0,22
s	3	0,03	0,01
C.V.	0,13	4,7	4,7

VCB-2	ρ_{sec}	η	α
6	2.633	0,26	0,10
7	2.636	0,29	0,11
8	2.631	0,33	0,12
9	2.631	0,31	0,12
10	2.632	0,33	0,13

$\bar{X}$	2.632	0,31	0,12
s	2	0,03	0,01
C.V.	0,08	9,3	9,4

VCB-3	ρ_{sec}	η	α
1 NaOH	2.642	0,53	0,20
2 H ₂ SO ₄	2.639	0,53	0,20
3 NaOH	2.639	0,53	0,20
4 H ₂ SO ₄	2.639	0,53	0,20
5 Pd	2.637	0,56	0,21

$\bar{X}$	2.639	0,54	0,20
s	2	0,01	0,01
C.V.	0,07	2,4	2,5

RIC	ρ_{sec}	η	α
1 H ₂ SO ₄	2.620	0,49	0,19
2 NaOH	2.616	0,56	0,21
3 Pd	2.612	0,59	0,23
4 NaOH	2.619	0,55	0,21
5 H ₂ SO ₄	2.619	0,53	0,20

$\bar{X}$	2.617	0,54	0,21
s	3	0,04	0,01
C.V.	0,12	7,0	7,1

BCR	ρ_{sec}	η	α
1 Pd	2.616	0,53	0,20
2 NaOH	2.616	0,53	0,20
3 H ₂ SO ₄	2.612	0,57	0,22
4 NaOH	2.616	0,53	0,20
6 H ₂ SO ₄	2.617	0,53	0,20
$\bar{X}$	2.615	0,54	0,20
S	2	0,02	0,01
C. V.	0,07	3,2	3,3
BSV	ρ_{sec}	η	α
1 HCL	2.619	0,63	0,24
2 H ₂ SO ₄	2.620	0,67	0,25
3 H ₂ SO ₄	2.620	0,63	0,24
4 Pd	2.619	0,63	0,24
5 NaOH	2.623	0,57	0,22
$\bar{X}$	2.620	0,62	0,24
S	2	0,03	0,01
C. V.	0,06	5,3	5,3
PIT-2cm	ρ_{sec}	η	α
4 H ₂ SO ₄	2.628	0,55	0,21
5 NaOH	2.628	0,50	0,19
5 PD	2.628	0,47	0,18
6 H ₂ SO ₄	2.627	0,54	0,21
7 NaOH	2.627	0,55	0,21
$\bar{X}$	2.628	0,52	0,20
S	1	0,03	0,01
C. V.	0,02	6,7	6,7
PIT-3cm	ρ_{sec}	η	α
1 NaOH	2.623	0,79	0,30
1 Pd	2.624	0,76	0,29
1 H ₂ SO ₄	2.623	0,78	0,30
2 H ₂ SO ₄	2.624	0,79	0,30
2 NaOH	2.622	0,78	0,30
$\bar{X}$	2.623	0,78	0,30
S	1	0,01	0,01
C. V.	0,03	1,8	1,8

AZF	ρ_{sec}	η	α
1 Pd	2.630	0,65	0,25
2 NaOH	2.630	0,65	0,25
3 NaOH	2.631	0,62	0,24
4 H ₂ SO ₄	2.628	0,62	0,24
5 H ₂ SO ₄	2.629	0,65	0,25
$\bar{X}$	2.630	0,64	0,24
S	1	0,02	0,01
C. V.	0,03	2,5	2,5
BCE	ρ_{sec}	η	α
1 H ₂ SO ₄	2.616	0,75	0,29
2 H ₂ SO ₄	2.612	0,80	0,31
3 NaOH	2.613	0,82	0,31
4 Pd	2.614	0,78	0,30
5 NaOH	2.610	0,83	0,32
$\bar{X}$	2.613	0,80	0,30
S	2	0,03	0,01
C. V.	0,08	3,9	4,0
	ρ_{sec}	η	α
1 H ₂ SO ₄	2.614	0,80	0,30
1 Pd	2.613	0,83	0,32
3 NaOH	2.619	0,74	0,28
4 H ₂ SO ₄	2.602	0,76	0,29
5 NaOH	2.613	0,74	0,28
$\bar{X}$	2.612	0,77	0,30
S	6	0,04	0,01
C. V.	0,24	5,0	5,0
ITN-2	ρ_{sec}	η	α
1 Pd	2.617	0,83	0,32
2 NaOH	2.618	0,79	0,30
3 NaOH	2.614	0,86	0,33
5 H ₂ SO ₄	2.611	0,94	0,36
6 H ₂ SO ₄	2.610	0,87	0,33
$\bar{X}$	2.614	0,86	0,33
S	3	0,05	0,02
C. V.	0,13	6,4	6,5

CRV	ρ_{sec}	η	α
1 H ₂ SO ₄	2.623	0,68	0,26
3 NaOH	2.624	0,68	0,26
4 H ₂ SO ₄	2.622	0,67	0,26
5 Pd	2.622	0,68	0,26
NaOH	2.622	0,72	0,27
$\bar{x}$	2.623	0,69	0,26
s	1	0,02	0,01
C. V.	0,04	2,5	2,5

CSB	ρ_{sec}	η	α
1 NaOH	2.630	0,75	0,28
1 Pd	2.627	0,73	0,28
2 H ₂ SO ₄	2.620	0,82	0,31
7 NaOH	2.562	0,77	0,30
8 H ₂ SO ₄	2.599	0,77	0,30
8 Pd	2.598	0,75	0,29
$\bar{x}$	2.606	0,76	0,29
s	26	0,03	0,01
C. V.	0,98	4,1	4,3

FLS	ρ_{sec}	η	α
1 NaOH	2.598	1,05	0,40
2 H ₂ SO ₄	2.613	1,16	0,44
2 Pd	2.601	1,12	0,43
3 NaOH	2.595	0,98	0,38
7 H ₂ SO ₄	2.623	1,07	0,41
8 H ₂ SO ₄	2.616	1,04	0,40
9 NaOH	2.614	1,09	0,42
9 Pd	2.634	1,09	0,42
$\bar{x}$	2.612	1,08	0,41
s	13	0,05	0,02
C. V.	0,51	4,9	4,8

GVN	ρ_{sec}	η	α
2 H ₂ SO ₄	2.636	0,74	0,28
2 Pd	2.629	0,87	0,33
3 NaOH	2.645	0,81	0,30
8 Pd	2.636	0,77	0,29
8 H ₂ SO ₄	2.633	0,81	0,31
9 NaOH	2.638	0,80	0,30
$\bar{x}$	2.636	0,80	0,30
s	5	0,04	0,02
C. V.	0,19	5,6	5,7

ARB	η	α	ρ_{sec}
1 H ₂ SO ₄	2.657	0,58	0,22
2 Pd	2.657	0,62	0,23
3 NaOH	2.645	0,58	0,22
8 H ₂ SO ₄	2.660	0,57	0,22
8 Pd	2.670	0,60	0,23
9 HCl	2.667	0,60	0,23
$\bar{x}$	2.660	0,59	0,22
s	9	0,02	0,01
C. V.	0,33	2,9	2,8

SCC	η	α	ρ_{sec}
1 H ₂ SO ₄	2.638	0,68	0,26
3 NaOH	2.638	0,69	0,26
7 H ₂ SO ₄	2.643	0,73	0,27
8 NaOH	2.637	0,70	0,27
9 Pd	2.628	0,71	0,27
$\bar{x}$	2.637	0,70	0,27
s	6	0,02	0,01
C. V.	0,21	2,6	2,6

TAMANHO DOS CORPOS DE PROVA: 10 cm x 10 cm

LBD	ρ_{sec}	η	α
1	2.656	0,70	0,26
2	2.659	0,69	0,26
3	2.668	0,72	0,27
4	2.659	0,70	0,26
4A	2.663	0,70	0,26
5	2.656	0,70	0,26
$\bar{x}$	2.660	0,70	0,26
s	4	0,01	0,00
C. V.	0,17	1,5	1,4

VCB-1	ρ_{sec}	η	α
1	2.637	0,45	0,17
2	2.636	0,46	0,17
3	2.636	0,39	0,15
4	2.640	0,42	0,16
5	2.637	0,35	0,13
$\bar{x}$	2.637	0,41	0,16
s	2	0,05	0,02
C. V.	0,07	11,3	11,3

VCB-2	ρ_{sec}	η	α
1	2.633	0,28	0,11
2	2.631	0,24	0,09
3	2.643	0,31	0,12
4	2.631	0,38	0,15
5	2.631	0,38	0,14
$\bar{X}$	2.634	0,32	0,12
S	5	0,06	0,02
C. V.	0,19	19,4	19,5

VCB-3	ρ_{sec}	η	α
1	2.640	0,52	0,20
2	2.646	0,53	0,20
3	2.643	0,53	0,20
4	2.641	0,50	0,19
5	2.638	0,56	0,21
5A	2.637	0,53	0,20
$\bar{X}$	2.641	0,53	0,20
S	3	0,02	0,01
C. V.	0,12	4,2	4,3

RIC	ρ_{sec}	η	α
1	2.619	0,66	0,25
1A	2.618	0,67	0,26
2	2.615	0,71	0,27
3	2.617	0,66	0,25
4	2.621	0,70	0,27
5	2.618	0,68	0,26
$\bar{X}$	2.618	0,68	0,26
S	2	0,02	0,01
C. V.	0,08	3,3	3,3

BCR	ρ_{sec}	η	α
1	2.614	0,69	0,26
2	2.614	0,64	0,24
3	2.614	0,63	0,24
4	2.613	0,68	0,26
5	2.614	0,63	0,24
6	2.616	0,63	0,24
$\bar{X}$	2.614	0,65	0,25
S	1	0,03	0,01
C. V.	0,03	3,9	4,0

BSV	ρ_{sec}	η	α
1	2.620	0,74	0,28
2	2.623	0,75	0,28
3	2.621	0,75	0,28
4	2.622	0,69	0,26
5	2.624	0,74	0,28
5A	2.623	0,73	0,28
$\bar{X}$	2.622	0,73	0,28
S	1	0,02	0,01
C. V.	0,05	2,7	2,7

PIT-2cm	ρ_{sec}	η	α
4	2.628	0,76	0,29
5	2.626	0,80	0,30
6	2.626	0,79	0,30
6A	2.624	0,75	0,29
7	2.625	0,73	0,28
7A	2.626	0,80	0,31
$\bar{X}$	2.626	0,77	0,29
S	1	0,03	0,01
C. V.	0,06	4,0	4,0

AZF	ρ_{sec}	η	α
1	2.628	0,74	0,28
2	2.629	0,73	0,28
3	2.632	0,73	0,28
4	2.629	0,73	0,28
5	2.630	0,74	0,28
$\bar{X}$	2.629	0,73	0,28
S	1	0,01	0,00
C. V.	0,05	0,9	1,0

BCE	ρ_{sec}	η	α
1	2.612	0,84	0,32
2	2.612	0,87	0,33
3	2.613	0,84	0,32
4	2.611	0,88	0,34
5	2.611	0,83	0,32
5A	2.611	0,82	0,31
$\bar{X}$	2.612	0,85	0,32
S	1	0,02	0,01
C. V.	0,03	2,7	2,7

ITN-1	ρ_{sec}	η	α
1	2.606	1,08	0,42
2	2.606	1,12	0,43
3	2.606	1,08	0,42
4	2.611	0,91	0,35
5	2.618	0,91	0,35
6	2.612	0,96	0,37
$\bar{X}$	2.610	1,01	0,39
S	5	0,09	0,04
<i>C. V.</i>	0,18	9,3	9,4

ITN-2	ρ_{sec}	η	α
1	2.619	0,85	0,33
2	2.611	0,85	0,32
3	2.615	0,89	0,34
4	2.608	0,90	0,34
5	2.618	0,85	0,33
6	2.612	0,94	0,36
$\bar{X}$	2.614	0,88	0,34
S	4	0,04	0,01
<i>C. V.</i>	0,16	4,1	4,2

CRV	ρ_{sec}	η	α
1	2.622	0,80	0,31
2	2.622	0,75	0,29
3	2.623	0,80	0,31
4	2.621	0,79	0,30
5	2.620	0,78	0,30
6	2.620	0,84	0,32
$\bar{X}$	2.621	0,79	0,30
S	1	0,03	0,01
<i>C. V.</i>	0,05	3,5	3,5

CSB	ρ_{sec}	η	α
1	2.620	0,75	0,29
2	2.641	0,69	0,26
3	2.629	0,78	0,30
7	2.594	0,68	0,26
8	2.597	0,77	0,30
9	2.591	0,68	0,26
$\bar{X}$	2.612	0,72	0,28
S	21	0,05	0,02
<i>C. V.</i>	0,80	6,8	6,6

FLS	ρ_{sec}	η	α
1	2.623	1,01	0,38
3	2.588	0,94	0,36
7	2.622	0,99	0,38
8	2.601	0,86	0,33
8A	2.612	0,89	0,34
9	2.615	0,86	0,33
$\bar{X}$	2.610	0,92	0,35
S	13	0,07	0,02
<i>C. V.</i>	0,51	7,1	6,9

GVN	ρ_{sec}	η	α
1	2.636	0,86	0,33
2	2.627	0,91	0,34
3	2.648	0,86	0,32
7	2.643	0,85	0,32
8	2.637	0,88	0,33
9	2.643	0,87	0,33
$\bar{X}$	2.639	0,87	0,33
S	7	0,02	0,01
<i>C. V.</i>	0,28	2,2	2,5

ARB	ρ_{sec}	η	α
1	2.664	0,74	0,28
2	2.663	0,74	0,28
3	2.652	0,69	0,26
7	2.648	0,63	0,24
8	2.648	0,68	0,26
9	2.663	0,66	0,25
$\bar{X}$	2.656	0,69	0,26
S	8	0,04	0,02
<i>C. V.</i>	0,29	6,2	6,0

SCC	ρ_{sec}	η	α
1	2.631	0,82	0,31
2	2.640	0,82	0,31
3	2.632	0,79	0,30
7	2.639	0,85	0,32
8	2.650	0,75	0,28
9	2.651	0,71	0,27
$\bar{X}$	2.641	0,79	0,30
S	9	0,05	0,02
<i>C. V.</i>	0,33	6,6	6,8

ANEXO C

**Resultados de determinações de densidade aparente e coeficiente de
absorção de água a pressão atmosférica
(prEN WI 036:1998)**

Legenda

ρ_{sec} = massa específica aparente seca (kg/m³) $\bar{x}$ = média
 A_b = coeficiente de absorção d'água a pressão atmosférica (%) s = desvio padrão
 $C.V.$ = coeficiente de variação (%)

TAMANHOS DOS CORPOS-DE-PROVA: 10 cm x 12 cm

LBD	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.657	0,18
2 NaOH	2.661	0,18
3 NaOH	2.655	0,19
5 H ₂ SO ₄	2.661	0,21
5 Pd	2.659	0,21
$\bar{x}$	2.659	0,19
s	3	0,01
$C.V.$	0,11	6,4
VCB-1	ρ_{sec}	A_b
6	2.636	0,20
7	2.636	0,20
8	2.637	0,18
9	2.635	0,21
10	2.642	0,19
$\bar{x}$	2.637	0,20
s	3	0,01
$C.V.$	0,1	4,5
VCB-2	ρ_{sec}	A_b
6	2.633	0,14
7	2.637	0,16
8	2.632	0,15
9	2.633	0,14
10	2.634	0,15
$\bar{x}$	2.634	0,15
s	2	0,01
$C.V.$	0,1	4,1
VCB-3	ρ_{sec}	A_b
1 NaOH	2.640	0,13
2 H ₂ SO ₄	2.639	0,13
3 NaOH	2.639	0,13
4 H ₂ SO ₄	2.639	0,13
5 Pd	2.639	0,13
$\bar{x}$	2.640	0,13
s	2	0,00
$C.V.$	0,07	0,1

RIC	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.620	0,21
2 NaOH	2.617	0,23
3 PD	2.612	0,25
4 NaOH	2.618	0,23
5 H ₂ SO ₄	2.619	0,22
$\bar{x}$	2.617	0,23
s	3	0,02
$C.V.$	0,12	6,8
BCR	ρ_{sec}	A_b
1 PD	2.615	0,22
2 NaOH	2.612	0,25
3 H ₂ SO ₄	2.611	0,23
4 NaOH	2.614	0,22
6 H ₂ SO ₄	2.616	0,22
$\bar{x}$	2.614	0,23
s	2	0,01
$C.V.$	0,08	5,9
BSV	ρ_{sec}	A_b
1 NaOH	2.618	0,25
2 H ₂ SO ₄	2.620	0,25
3 H ₂ SO ₄	2.619	0,25
4 PD	2.619	0,24
5 NaOH	2.624	0,22
$\bar{x}$	2.620	0,24
s	2	0,02
$C.V.$	0,08	6,5
PIT - 2 cm	ρ_{sec}	A_b
4 H ₂ SO ₄	2.628	0,19
5 NaOH	2.627	0,19
5 PD	2.628	0,18
6 H ₂ SO ₄	2.627	0,19
7 HC NaOHI	2.627	0,18
$\bar{x}$	2.627	0,19
s	1	0,01
$C.V.$	0,02	3,7
PIT - 3 cm	ρ_{sec}	A_b
1 NaOH	2.623	0,28
1 PD	2.622	0,30
1 H ₂ SO ₄	2.624	0,28
2 H ₂ SO ₄	2.623	0,29
2 PD	2.621	0,29
2 NaOH	2.623	0,28
$\bar{x}$	2.623	0,29
s	1	0,01
$C.V.$	0,03	3,5

AZF	ρ_{sec}	A_b
1 PD	2.630	0,26
2 NaOH	2.629	0,27
3 NaOH	2.630	0,26
4 H ₂ SO ₄	2.629	0,25
5 H ₂ SO ₄	2.629	0,26
$\bar{x}$	2.630	0,26
s	1	0,01
<i>C.V.</i>	0,02	3,0
BCE	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.618	0,28
2 H ₂ SO ₄	2.613	0,30
3 NaOH	2.615	0,30
4 Pd	2.614	0,31
5 NaOH	2.610	0,32
$\bar{x}$	2.614	0,30
s	3	0,01
<i>C.V.</i>	0,10	4,9
ITN-1	ρ_{sec}	A_b
1 PD	2.611	0,39
1 H ₂ SO ₄	2.612	0,37
3 NaOH	2.616	0,36
4 H ₂ SO ₄	2.600	0,34
5 NaOH	2.612	0,33
$\bar{x}$	2.610	0,36
s	6	0,03
<i>C.V.</i>	0,23	7,3
ITN-2	ρ_{sec}	A_b
1 PD	2.615	0,35
2 NaOH	2.616	0,32
3 NaOH	2.613	0,34
5 H ₂ SO ₄	2.611	0,36
6 H ₂ SO ₄	2.609	0,33
$\bar{x}$	2.613	0,34
s	3	0,02
<i>C.V.</i>	0,11	4,8
CRV	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.622	0,26
3 NaOH	2.623	0,26
4 H ₂ SO ₄	2.621	0,27
5 PD	2.608	0,28
6 NaOH	2.622	0,27
$\bar{x}$	2.619	0,27
s	6	0,01
<i>C.V.</i>	0,24	2,9

CSB	ρ_{sec}	A_b
1 NaOH	2.631	0,24
1 PD	2.628	0,23
2 H ₂ SO ₄	2.622	0,25
7 NaOH	2.611	0,25
8 H ₂ SO ₄	2.600	0,24
$\bar{x}$	2.618	0,24
s	13	0,01
<i>C.V.</i>	0,49	4,0
FLS	ρ_{sec}	A_b
1 NaOH	2.600	0,33
2 H ₂ SO ₄	2.616	0,35
2 PD	2.604	0,36
3 NaOH	2.595	0,34
7 H ₂ SO ₄	2.624	0,34
8 H ₂ SO ₄	2.618	0,34
9 NaOH	2.615	0,36
9 PD	2.637	0,33
$\bar{x}$	2.614	0,34
s	14	0,01
<i>C.V.</i>	0,52	3,0
GVN	ρ_{sec}	A_b
2 H ₂ SO ₄	2.636	0,28
2 Pd	2.630	0,30
3 NaOH	2.645	0,29
8 H ₂ SO ₄	2.634	0,28
8 Pd	2.636	0,28
9 NaOH	2.637	0,28
$\bar{x}$	2.636	0,29
s	5	0,01
<i>C.V.</i>	0,19	3,3
ARB	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.654	0,25
2 PD	2.654	0,25
3 NaOH	2.645	0,24
8 PD	2.670	0,24
8 H ₂ SO ₄	2.658	0,26
9 NaOH	2.666	0,26
$\bar{x}$	2.658	0,25
s	9	0,01
<i>C.V.</i>	0,34	3,9

SCC	ρ_{sec}	A_b
1 H ₂ SO ₄	2.638	0,26
3 NaOH	2.638	0,27
7 H ₂ SO ₄	2.642	0,29
8 NaOH	2.637	0,28
9 PD	2.629	0,27
0	2.637	0,27
$\bar{x}$	2.637	0,27
s	4	0,01
<i>C.V.</i>	0,16	3,2

TAMANHO DOS CORPOS-DE-PROVA: 10 cm x 10 cm

LBD	ρ_{sec}	A_b
1	2.659	0,15
2	2.662	0,16
3	2.670	0,16
4	2.662	0,15
4A	2.665	0,16
5	2.659	0,17
$\bar{x}$	2.663	0,16
s	4	0,01
<i>C.V.</i>	0,16	4,0
VCB-1	ρ_{sec}	A_b
1	2.636	0,21
2	2.634	0,22
3	2.634	0,22
4	2.639	0,21
5	2.636	0,18
$\bar{x}$	2.636	0,21
s	2	0,02
<i>C.V.</i>	0,07	8,3
VCB-2	ρ_{sec}	A_b
1	2.630	0,17
2	2.628	0,17
3	2.639	0,18
4	2.630	0,20
5	2.629	0,21
$\bar{x}$	2.631	0,19
s	4	0,02
<i>C.V.</i>	0,17	9,0

VCB-3	ρ_{sec}	A_b
1	2.642	0,12
2	2.647	0,12
3	2.643	0,15
4	2.643	0,12
5	2.639	0,15
5A	2.639	0,14
$\bar{x}$	2.642	0,13
s	3	0,01
<i>C.V.</i>	0,12	10,1
RIC	ρ_{sec}	A_b
1	2.620	0,20
1A	2.619	0,20
2	2.617	0,22
3	2.619	0,20
4	2.623	0,22
5	2.619	0,22
$\bar{x}$	2.620	0,21
s	2	0,01
<i>C.V.</i>	0,08	4,9
BCR	ρ_{sec}	A_b
1	2.616	0,25
2	2.613	0,24
3	2.614	0,24
8	2.613	0,24
9	2.613	0,24
10	2.616	0,24
$\bar{x}$	2.614	0,24
s	1	0,00
<i>C.V.</i>	0,05	0,7
BSV	ρ_{sec}	A_b
1	2.621	0,26
2	2.624	0,27
3	2.622	0,27
4	2.622	0,26
5	2.624	0,26
5A	2.625	0,26
$\bar{x}$	2.623	0,26
s	2	0,00
<i>C.V.</i>	0,06	0,7

PIT - 2cm	ρ_{sec}	A_b
4	2.629	0,20
5	2.629	0,20
6	2.628	0,20
6A	2.626	0,21
7	2.627	0,18
7A	2.628	0,20
$\bar{x}$	2.628	0,20
s	1	0,01
$C.V.$	0,05	4,8
AZF	ρ_{sec}	A_b
1	2.630	0,21
2	2.630	0,20
3	2.634	0,19
4	2.632	0,19
5	2.632	0,19
$\bar{x}$	2.632	0,20
s	2	0,01
$C.V.$	0,06	3,8
BCE	ρ_{sec}	A_b
1	2.614	0,25
2	2.613	0,26
3	2.615	0,24
4	2.614	0,25
5	2.613	0,22
5A	2.613	0,23
$\bar{x}$	2.614	0,24
s	1	0,01
$C.V.$	0,03	5,9
ITN-1	ρ_{sec}	A_b
1	2.607	0,43
2	2.607	0,43
3	2.606	0,43
4	2.610	0,37
5	2.617	0,35
6	2.613	0,37
$\bar{x}$	2.610	0,40
s	5	0,04
$C.V.$	0,17	10,0

ITN-2	ρ_{sec}	A_b
1	2.617	0,34
2	2.610	0,34
3	2.615	0,34
4	2.607	0,36
5	2.617	0,33
6	2.610	0,40
$\bar{x}$	2.613	0,35
s	4	0,02
$C.V.$	0,16	7,0
CRV	ρ_{sec}	A_b
1	2.624	0,25
2	2.624	0,25
3	2.625	0,28
4	2.623	0,26
5	2.621	0,28
6	2.621	0,28
$\bar{x}$	2.623	0,27
s	2	0,01
$C.V.$	0,07	4,7
CSB	ρ_{sec}	A_b
1	2.623	0,20
2	2.643	0,19
3	2.631	0,23
8	2.596	0,20
9	2.599	0,22
10	2.593	0,20
$\bar{x}$	2.614	0,21
s	21	0,01
$C.V.$	0,80	7,0
FLS	ρ_{sec}	A_b
1	2.624	0,36
3	2.589	0,31
7	2.624	0,33
8	2.603	0,30
8A	2.614	0,30
9	2.616	0,29
$\bar{x}$	2.612	0,32
s	13	0,02
$C.V.$	0,51	7,8

GVN	ρ_{sec}	A_b
1	2.637	0,25
2	2.628	0,26
3	2.650	0,25
7	2.645	0,25
8	2.639	0,27
9	2.645	0,26
$\bar{x}$	2.641	0,25
s	8	0,01
$C.V.$	0,28	3,0
ARB	ρ_{sec}	A_b
1	2.664	0,26
2	2.664	0,26
3	2.653	0,26
7	2.650	0,24
8	2.649	0,24
9	2.664	0,23
$\bar{x}$	2.657	0,25
s	7	0,01
$C.V.$	0,27	5,2
SCC	ρ_{sec}	A_b
1	2.634	0,24
2	2.643	0,22
3	2.634	0,24
7	2.642	0,26
8	2.653	0,23
9	2.655	0,22
$\bar{x}$	2.644	0,23
s	9	0,01
$C.V.$	0,34	5,9

ANEXO D

**Resultados de determinações de densidade aparente,
porosidade aberta e volume de poros abertos
(BS EN 1936:1999)**

Legenda ρ_b = densidade aparente (kg/m³); V_o = volume de poros abertos (mL); p_o = porosidade aberta (%). $\bar{x}$ = média s = desvio padrão $C. V.$ = coeficiente de variação (%)**TAMANHOS DOS CORPOS-DE-PROVA: 10 cm x 15 cm**

BLD	ρ_b	V_o	p_o
1	2.660	2,9	0,71
2	2.664	2,8	0,69
3	2.653	2,9	0,71
4	2.651	2,7	0,67
5	2.663	2,5	0,63
6	2.654	2,7	0,67
$\bar{x}$	2.657	2,8	0,68
s	6	0,2	0,03
$C. V.$	0,21	5,5	4,7
VCB-1	ρ_b	V_o	p_o
6	2.632	2,0	0,44
7	2.631	2,2	0,49
8	2.632	1,8	0,39
9	2.631	2,1	0,46
10	2.640	1,7	0,37
$\bar{x}$	2.633	2,0	0,43
s	4	0,2	0,05
$C. V.$	0,14	10,6	11,8
VCB-2	ρ_b	V_o	p_o
6	2.630	1,4	0,33
7	2.632	1,5	0,36
8	2.628	1,5	0,36
9	2.629	1,4	0,32
10	2.630	1,5	0,33
$\bar{x}$	2.629	1,5	0,34
s	1	0,1	0,02
$C. V.$	0,06	3,8	5,4
VCB 3	ρ_b	V_o	p_o
1	2.630	2,3	0,51
2	2.643	2,1	0,46
3	2.636	2,1	0,47
4	2.632	2,2	0,48
6	2.634	2,1	0,46
$\bar{x}$	2.635	2,2	0,48
s	5	0,1	0,02
$C. V.$	0,19	4,1	4,1

RIC	ρ_b	V_o	p_o
1	2.612	1,6	0,51
2	2.613	1,4	0,45
3	2.613	1,5	0,47
4	2.612	1,6	0,51
5	2.615	1,5	0,48
$\bar{x}$	2.613	1,5	0,48
s	1	0,1	0,03
$C. V.$	0,04	5,5	5,4
BCR	ρ_b	V_o	p_o
1	2.604	2,3	0,69
2	2.606	2,1	0,63
3	2.606	2,1	0,63
4	2.605	2,1	0,63
5	2.604	2,2	0,66
6	2.605	2,2	0,66
$\bar{x}$	2.605	2,2	0,65
s	1	0,1	0,03
$C. V.$	0,03	3,8	4,0
BSV	ρ_b	V_o	p_o
1	2.610	2,0	0,69
2	2.614	1,9	0,66
3	2.612	2,0	0,69
4	2.609	2,0	0,70
5	2.613	2,0	0,70
$\bar{x}$	2.611	2,0	0,69
s	2	0,0	0,01
$C. V.$	0,08	2,3	2,0
PIT – 2 cm	ρ_b	V_o	p_o
1	2.618	2,0	0,64
2	2.618	1,9	0,61
3	2.618	2,0	0,63
$\bar{x}$	2.618	2,0	0,63
s	0	0,1	0,02
$C. V.$	0,01	2,9	2,5
AZF	ρ_b	V_o	p_o
1	2.625	2,5	0,54
2	2.624	2,5	0,55
3	2.622	2,6	0,57
$\bar{x}$	2.624	2,5	0,55
s	1	0,1	0,01
$C. V.$	0,05	2,3	2,5

BCE	ρ_b	V_o	p_o
1	2.612	3,1	0,67
2	2.611	3,1	0,67
3	2.614	2,9	0,63
4	2.620	3,0	0,65
5	2.615	2,9	0,62
6	2.609	3,2	0,67
$\bar{X}$	2.613	3,0	0,65
s	4	0,1	0,02
<i>C. V.</i>	0,15	4,0	3,5
ITN-1	ρ_b	V_o	p_o
1	2.603	2,8	0,94
2	2.609	2,6	0,88
3	2.607	2,6	0,87
4	2.604	2,7	0,91
5	2.609	2,6	0,89
$\bar{X}$	2.606	2,7	0,90
s	3	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,10	3,4	3,1
ITN-2	ρ_b	V_o	p_o
1	2.608	2,9	0,92
2	2.605	3,3	1,04
3	2.603	3,1	0,98
4	2.612	2,8	0,89
5	2.603	3,0	0,95
6	2.608	2,9	0,92
$\bar{X}$	2.606	3,0	0,95
s	3	0,2	0,06
<i>C. V.</i>	0,13	6,0	5,8
CRV	ρ_b	V_o	p_o
1	2.613	2,3	0,82
2	2.617	2,1	0,75
3	2.616	2,2	0,78
4	2.616	2,1	0,76
5	2.615	2,1	0,76
6	2.616	2,1	0,76
$\bar{X}$	2.615	2,2	0,77
s	2	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,06	3,9	3,5

CSB	ρ_b	V_o	p_o
1	2.626	1,8	0,59
2	2.627	1,9	0,63
3	2.639	1,8	0,59
4	2.623	1,9	0,63
5	2.621	1,9	0,63
6	2.626	1,8	0,61
$\bar{X}$	2.627	1,9	0,61
s	6	0,1	0,02
<i>C. V.</i>	0,24	3,0	2,8
FLS	ρ_b	V_o	p_o
1	2.628	1,8	0,65
2	2.631	1,8	0,65
3	2.602	1,9	0,69
4	2.632	1,8	0,65
5	2.604	2,0	0,72
$\bar{X}$	2.619	1,9	0,67
s	15	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,6	4,8	4,8
GVN	ρ_b	V_o	p_o
1	2.642	4,1	0,91
2	2.653	3,7	0,84
3	2.673	3,8	0,85
4	2.676	3,7	0,83
5	2.637	3,4	0,78
6	2.632	3,4	0,77
$\bar{X}$	2.652	3,7	0,83
s	19	0,3	0,05
<i>C. V.</i>	0,70	7,2	6,1
ARB	ρ_b	V_o	p_o
1	2.635	2,2	0,72
2	2.640	2,2	0,72
3	2.637	2,2	0,72
4	2.652	2,1	0,67
5	2.645	2,3	0,73
6	2.643	2,3	0,75
$\bar{X}$	2.642	2,2	0,72
s	6	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,23	3,4	3,7

SCC	ρ_b	V_o	p_o
1	2.638	3,3	0,73
2	2.636	3,1	0,69
3	2.631	2,6	0,59
4	2.632	3,7	0,83
5	2.656	2,8	0,63
6	2.625	3,7	0,83
$\bar{X}$	2.636	3,2	0,72
s	11	0,5	0,10
<i>C. V.</i>	0,40	14,3	14,2

TAMANHOS DOS CORPOS-DE-PROVA: 10cm x 12cm

LBD	ρ_b	V_o	p_o
1 H ₂ SO ₄	2.653	1,9	0,58
2 NaOH	2.657	1,9	0,57
3 NaOH	2.651	1,9	0,58
4 H ₂ SO ₄	2.658	1,9	0,58
5 PD	2.655	2,0	0,62
$\bar{X}$	2.655	1,9	0,58
s	3	0,0	0,02
<i>C. V.</i>	0,12	2,3	3,1
VCB-1	ρ_b	V_o	p_o
6	2.630	2,0	0,55
7	2.630	2,0	0,55
8	2.631	1,9	0,51
9	2.628	2,1	0,58
10	2.637	2,0	0,54
$\bar{X}$	2.631	2,0	0,55
s	3	0,1	0,02
<i>C. V.</i>	0,13	3,5	4,3
VCB-2	ρ_b	V_o	p_o
6	2.628	1,3	0,38
7	2.631	1,4	0,41
8	2.625	1,4	0,41
9	2.626	1,5	0,43
10	2.628	1,5	0,42
$\bar{X}$	2.627	1,4	0,41
s	2	0,1	0,02
<i>C. V.</i>	0,08	5,9	4,5

VCB-3	ρ_b	V_o	p_o
1 NaOH	2.639	1,3	0,39
2 H ₂ SO ₄	2.636	1,4	0,41
3 NaOH	2.636	1,4	0,41
4 H ₂ SO ₄	2.635	1,4	0,41
5 PD	2.636	1,4	0,41
$\bar{X}$	2.636	1,4	0,41
s	2	0,0	0,01
<i>C. V.</i>	0,06	3,2	3,1
RIC	ρ_b	V_o	p_o
1 H ₂ SO ₄	2.614	1,5	0,56
2 NaOH	2.613	1,5	0,56
3 PD	2.608	1,5	0,55
4 NaOH	2.615	1,5	0,55
5 H ₂ SO ₄	2.614	1,4	0,53
$\bar{X}$	2.613	1,5	0,55
s	3	0,0	0,01
<i>C. V.</i>	0,10	3,0	2,3
BCR	ρ_b	V_o	p_o
1 PD	2.609	1,7	0,64
2 NaOH	2.608	1,7	0,64
3 H ₂ SO ₄	2.606	1,6	0,60
4 NaOH	2.608	1,7	0,64
6 H ₂ SO ₄	2.609	1,7	0,64
$\bar{X}$	2.608	1,7	0,63
s	1	0,0	0,02
<i>C. V.</i>	0,04	2,7	2,6
BSV	ρ_b	V_o	p_o
1 NaOH	2.612	1,9	0,74
2 H ₂ SO ₄	2.613	2,0	0,78
3 H ₂ SO ₄	2.614	1,9	0,75
4 PD	2.614	1,9	0,74
5 NaOH	2.618	1,8	0,69
$\bar{X}$	2.614	1,9	0,74
s	2	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,08	3,7	4,6
PIT – 2cm	ρ_b	V_o	p_o
4 H ₂ SO ₄	2.623	1,5	0,59
5 NaOH	2.622	1,5	0,58
5 PD	2.621	1,5	0,59
6 H ₂ SO ₄	2.621	1,6	0,62
7 NaOH	2.622	1,5	0,59
$\bar{X}$	2.622	1,5	0,59
s	1	0,0	0,02
<i>C. V.</i>	0,03	2,9	2,5

PIT – 3 cm	ρ_b	V_o	p_o
1 NaOH	2.619	2,3	0,65
1 PD	2.619	1,8	0,65
1 H ₂ SO ₄	2.619	2,2	0,64
2 H ₂ SO ₄	2.619	2,2	0,62
2 NaOH	2.618	2,3	0,64
2 PD	2.617	2,2	0,64
$\mathcal{X}$	2.619	2,2	0,64
s	1	0,2	0,01
<i>C. V.</i>	0,03	8,6	1,6
AZF	ρ_b	V_o	p_o
1 PD	2.626	2,0	0,54
2 NaOH	2.626	2,0	0,54
3 NaOH	2.626	2,0	0,54
4 H ₂ SO ₄	2.624	2,0	0,54
5 H ₂ SO ₄	2.626	1,9	0,51
$\mathcal{X}$	2.626	2,0	0,53
s	1	0,0	0,01
<i>C. V.</i>	0,03	2,3	2,3
BCE	ρ_b	V_o	p_o
1 H ₂ SO ₄	2.613	2,3	0,60
2 H ₂ SO ₄	2.609	2,5	0,65
3 NaOH	2.611	2,5	0,64
4 PD	2.610	2,5	0,65
5 NaOH	2.607	2,8	0,70
$\mathcal{X}$	2.610	2,5	0,65
s	2	0,2	0,04
<i>C. V.</i>	0,09	7,1	5,8
ITN-1	ρ_b	V_o	p_o
1 H ₂ SO ₄	2.607	2,5	0,99
1 PD	2.606	2,6	1,03
3 NaOH	2.612	2,4	0,94
4 H ₂ SO ₄	2.597	2,3	0,88
5 NaOH	2.607	2,3	0,89
$\mathcal{X}$	2.606	2,4	0,95
s	6	0,1	0,06
<i>C. V.</i>	0,22	5,4	6,8
ITN-2	ρ_b	V_o	p_o
1 PD	2.611	2,4	0,95
2 NaOH	2.612	2,3	0,91
3 NaOH	2.610	2,4	0,94
5 H ₂ SO ₄	2.606	2,6	1,02
6 H ₂ SO ₄	2.604	2,5	0,99
$\mathcal{X}$	2.609	2,4	0,96
s	3	0,1	0,04
<i>C. V.</i>	0,13	4,7	4,4

CRV	ρ_b	V_o	p_o
1 H ₂ SO ₄	2.617	1,6	0,73
3 NaOH	2.616	1,6	0,73
4 H ₂ SO ₄	2.615	1,7	0,76
5 PD	2.612	1,9	0,86
6 NaOH	2.616	1,7	0,76
$\mathcal{X}$	2.615	1,7	0,77
s	2	0,1	0,05
<i>C. V.</i>	0,07	7,2	7,1
CSB	ρ_b	V_o	p_o
1 NaOH	2.628	2,3	0,61
1 PD	2.624	2,1	0,55
2 H ₂ SO ₄	2.617	2,5	0,66
7 NaOH	2.608	2,3	0,60
8 H ₂ SO ₄	2.597	2,1	0,54
8 PD	2.595	2,2	0,57
$\mathcal{X}$	2.611	2,3	0,59
s	14	0,2	0,05
<i>C. V.</i>	0,53	6,7	7,8
FLS	ρ_b	V_o	p_o
1 NaOH	2.595	3,1	0,84
2 H ₂ SO ₄	2.611	3,3	0,89
2 PD	2.598	3,4	0,93
3 NaOH	2.591	3,0	0,82
7 H ₂ SO ₄	2.620	3,1	0,87
8 H ₂ SO ₄	2.613	3,1	0,85
9 PD	2.632	3,1	0,85
9 NaOH	2.611	3,2	0,87
$\mathcal{X}$	2.609	3,2	0,87
s	14	0,1	0,03
<i>C. V.</i>	0,52	4,1	4,0
GVN	ρ_b	V_o	p_o
2 H ₂ SO ₄	2.632	2,5	0,69
2 PD	2.626	2,7	0,74
3 NaOH	2.641	2,6	0,72
8 PD	2.631	2,7	0,74
8 H ₂ SO ₄	2.629	2,6	0,70
9 NaOH	2.632	2,7	0,74
$\mathcal{X}$	2.632	2,6	0,72
s	5	0,1	0,02
<i>C. V.</i>	0,19	3,1	3,0

ARB	ρ_b	V_o	P_o
1 H ₂ SO ₄	2.656	1,5	0,62
2 PD	2.652	1,7	0,70
3 NaOH	2.640	1,6	0,66
8 PD	2.663	1,6	0,64
8 H ₂ SO ₄	2.655	1,6	0,65
9 NaOH	2.662	1,6	0,64
$\mathcal{X}$	2.655	1,6	0,65
$\mathcal{S}$	8	0,1	0,03
C. V.	0,31	4,0	3,9
SCC	ρ_b	V_o	P_o
1 H ₂ SO ₄	2.635	2,1	0,57
3 NaOH	2.634	2,3	0,63
7 H ₂ SO ₄	2.638	2,5	0,70
8 NaOH	2.633	2,3	0,65
9 PD	2.623	2,4	0,68
$\mathcal{X}$	2.632	2,3	0,65
$\mathcal{S}$	5	0,1	0,05
C. V.	0,21	6,4	7,5

TAMANHO DOS CORPOS-DE-PROVA: 10 cm x 10 cm

LBD	ρ_b	V_o	P_o
1	2.654	1,1	0,41
2	2.657	1,2	0,44
3	2.666	1,3	0,47
4	2.657	1,1	0,40
4A	2.661	1,2	0,44
5	2.655	1,2	0,44
$\mathcal{X}$	2.658	1,2	0,43
$\mathcal{S}$	4	0,1	0,02
C. V.	0,16	6,4	5,7
VCB-1	ρ_b	V_o	P_o
1	2.633	1,4	0,45
2	2.631	1,5	0,49
3	2.633	1,3	0,42
4	2.637	1,3	0,42
5	2.633	1,2	0,38
$\mathcal{X}$	2.633	1,3	0,43
$\mathcal{S}$	2	0,1	0,04
C. V.	0,08	8,5	9,7

VCB-2	ρ_b	V_o	P_o
1	2.629	0,8	0,28
2	2.626	1,0	0,34
3	2.639	1,0	0,34
4	2.629	1,2	0,42
5	2.627	1,2	0,41
$\mathcal{X}$	2.630	1,0	0,36
$\mathcal{S}$	5	0,2	0,06
C. V.	0,20	16,1	16,0
VCB-3	ρ_b	V_o	P_o
1	2.638	0,9	0,31
2	2.643	0,9	0,32
3	2.640	1,0	0,35
4	2.638	0,9	0,32
5	2.636	1,0	0,35
5A	2.635	1,0	0,36
$\mathcal{X}$	2.638	1,0	0,34
$\mathcal{S}$	3	0,1	0,02
C. V.	0,11	5,8	6,1
RIC	ρ_b	V_o	P_o
1	2.615	1,1	0,49
1A	2.613	1,1	0,49
2	2.611	1,1	0,49
3	2.612	1,1	0,49
4	2.617	1,2	0,53
5	2.615	1,1	0,50
$\mathcal{X}$	2.614	1,1	0,50
$\mathcal{S}$	2	0,0	0,02
C. V.	0,08	3,7	3,3
BCR	ρ_b	V_o	P_o
1	2.612	1,3	0,60
2	2.609	1,3	0,59
3	2.609	1,3	0,59
4	2.608	1,4	0,63
5	2.608	1,4	0,63
6	2.609	1,4	0,63
$\mathcal{X}$	2.609	1,4	0,61
$\mathcal{S}$	1	0,1	0,02
C. V.	0,05	4,1	3,5

BSV	ρ_b	V_o	P_o
1	2.614	1,6	0,74
2	2.617	1,6	0,75
3	2.615	1,5	0,70
4	2.616	1,6	0,74
5	2.616	1,7	0,78
5A	2.617	1,6	0,73
$\mathcal{X}$	2.616	1,6	0,74
$\mathcal{S}$	1	0,1	0,03
$C.V.$	0,04	4,0	3,5
PIT-2cm	ρ_b	V_o	P_o
4	2.627	1,0	0,48
5	2.625	1,0	0,47
6	2.624	1,1	0,51
6A	2.622	1,1	0,52
7	2.623	0,9	0,44
7A	2.624	1,0	0,47
$\mathcal{X}$	2.624	1,0	0,48
$\mathcal{S}$	2	0,1	0,03
$C.V.$	0,06	7,4	6,2
AZF	ρ_b	V_o	P_o
1	2.626	1,5	0,48
2	2.627	1,5	0,47
3	2.630	1,4	0,44
4	2.627	1,5	0,48
5	2.628	1,5	0,48
$\mathcal{X}$	2.627	1,5	0,47
$\mathcal{S}$	1	0,0	0,02
$C.V.$	0,06	3,0	3,6
BCE	ρ_b	V_o	P_o
1	2.610	2,0	0,63
2	2.610	2,1	0,65
3	2.611	1,9	0,59
4	2.610	2,0	0,63
5	2.609	1,8	0,55
5A	2.609	1,9	0,58
$\mathcal{X}$	2.610	2,0	0,60
$\mathcal{S}$	1	0,1	0,04
$C.V.$	0,03	5,4	6,2

ITN-1	ρ_b	V_o	P_o
1	2.601	2,3	1,08
2	2.602	2,3	1,07
3	2.601	2,2	1,03
4	2.606	1,9	0,86
5	2.612	1,8	0,82
6	2.608	2,0	0,91
$\mathcal{X}$	2.605	2,1	0,96
$\mathcal{S}$	5	0,2	0,11
$C.V.$	0,17	10,3	11,6
ITN-2	ρ_b	V_o	P_o
1	2.612	1,9	0,90
2	2.605	1,8	0,85
3	2.609	1,9	0,89
4	2.605	1,9	0,90
5	2.613	1,7	0,80
6	2.607	2,0	0,94
$\mathcal{X}$	2.608	1,9	0,88
$\mathcal{S}$	3	0,1	0,05
$C.V.$	0,13	5,5	5,3
CRV	ρ_b	V_o	P_o
1	2.618	1,3	0,70
2	2.618	1,3	0,70
3	2.620	1,3	0,70
4	2.617	1,3	0,68
5	2.615	1,4	0,73
6	2.614	1,4	0,73
$\mathcal{X}$	2.617	1,3	0,71
$\mathcal{S}$	2	0,1	0,02
$C.V.$	0,08	3,9	2,9
CSB	ρ_b	V_o	P_o
1	2.619	1,7	0,53
2	2.639	1,6	0,50
3	2.625	1,9	0,59
4	2.592	1,6	0,49
5	2.593	1,9	0,58
6	2.587	1,7	0,52
$\mathcal{X}$	2.609	1,7	0,54
$\mathcal{S}$	21	0,1	0,04
$C.V.$	0,81	7,9	7,9

FLS	ρ_b	V_o	p_o
1	2.618	3,0	0,98
3	2.583	2,8	0,91
7	2.621	2,5	0,83
8	2.596	2,5	0,83
8A	2.607	2,6	0,86
9	2.610	2,5	0,83
$\mathcal{X}$	2.606	2,7	0,87
$\mathcal{S}$	14	0,2	0,06
<i>C.V.</i>	0,54	7,8	7,0
GVN	ρ_b	V_o	p_o
1	2.633	2,1	0,69
2	2.625	2,2	0,71
3	2.645	2,1	0,69
7	2.641	2,1	0,69
8	2.634	2,2	0,74
9	2.641	2,1	0,68
$\mathcal{X}$	2.636	2,1	0,70
$\mathcal{S}$	7	0,1	0,02
<i>C.V.</i>	0,28	2,4	3,2
ARB	ρ_b	V_o	p_o
1	2.660	1,3	0,64
2	2.658	1,3	0,64
3	2.646	1,4	0,69
7	2.644	1,3	0,63
8	2.641	1,4	0,68
9	2.657	1,3	0,62
$\mathcal{X}$	2.651	1,3	0,65
$\mathcal{S}$	8	0,1	0,03
<i>C.V.</i>	0,31	3,9	4,3
SCC	ρ_b	V_o	p_o
1	2.627	2,0	0,65
2	2.636	1,9	0,62
3	2.628	1,9	0,63
7	2.634	2,2	0,75
8	2.645	2,0	0,68
9	2.647	1,8	0,61
$\mathcal{X}$	2.636	2,0	0,66
$\mathcal{S}$	8	0,1	0,05
<i>C.V.</i>	0,31	6,9	7,7

ANEXO E

Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial (NBR ABNT 12.767/92)

Legenda

CP = corpo-de-prova

h = altura (cm)

A_1 = aresta 1 (cm)

A_2 = aresta 2 (cm)

P = carga de ruptura (kgf)

σ_C = resistência à compressão (MPa)

VP = velocidade de propagação de ondas (m/s)

$\bar{x}_{sec}$ = média (condição seca)

$\bar{x}_{sat}$ = média (condição saturada)

S = desvio padrão

$C.V.$ = coeficiente de variação (%)

Δ = variação entre resistência à compressão seca e saturada (%)

LBD	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,48	7,46	7,45	58.400	103	5.500
	2	7,47	7,45	7,42	62.400	111	5.533
	3	7,45	7,60	7,68	60.800	102	5.438
	4	7,36	7,59	7,38	67.200	118	5.452
	5	7,31	7,57	7,48	41.800	72	5.455
seca	6	7,41	7,40	7,47	56.800	101	5.449
	7	7,49	7,51	7,52	64.800	113	5.428
	8	7,50	7,53	7,56	53.600	92	5.396
	9	7,45	7,45	7,63	71.200	123	5.438
	10	7,59	7,46	7,59	78.400	136	5.581
			$\bar{x}_{sat}$	101	$\bar{x}_{sec}$	113	5.467
			S	17	S	17	55
			$C.V.$	17,1	$C.V.$	15,3	1,0
			Δ	-10			

VCB-1	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,45	7,82	7,79	80.800	130	5.399
	2	7,63	7,85	7,87	72.800	116	5.450
	3	7,66	7,77	7,80	70.400	114	5.511
	4	7,60	7,87	7,88	67.200	106	5.352
	5	7,61	7,88	7,91	68.400	108	5.285
seca	6	7,58	7,81	7,82	80.000	128	5.338
	7	7,56	7,87	7,90	81.200	128	5.400
	8	7,54	7,86	7,80	78.000	125	5.464
	9	7,66	7,87	7,88	64.000	101	5.433
	10	7,62	7,77	7,82	80.400	130	5.443
			$\bar{x}_{sat}$	115	$\bar{x}_{sec}$	123	5.407
			S	9	S	12	67
			$C.V.$	8,2	$C.V.$	9,8	1,2
			Δ	-6			

VCB-2	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,47	7,68	7,58	80.400	136	5.374
	2	7,58	7,66	7,59	60.000	101	5.493
	3	7,55	7,65	7,65	69.600	117	5.393
	4	7,58	7,71	7,65	66.000	110	5.831
	5	7,58	7,69	7,68	59.400	99	5.493
seca	6	7,55	7,71	7,68	90.400	150	5.355
	7	7,47	7,58	7,65	90.000	152	5.493
	8	7,48	7,57	7,63	85.800	146	5.420
	9	7,46	7,70	7,63	78.800	132	5.217
	10	7,53	7,73	7,72	78.000	128	5.379
			$\bar{x}_{sat}$	112	$\bar{x}_{sec}$	141	5.445
			S	15	S	11	159
			$C.V.$	13,2	$C.V.$	7,7	2,9
			Δ	-21			

VCB-3	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,45	7,65	7,72	66.400	110	5.210
	2	7,54	7,67	7,72	64.000	106	5.200
	3	7,52	7,73	7,68	64.800	107	5.333
	4	7,49	7,72	7,78	90.800	148	5.428
	5	7,62	7,82	7,80	69.600	112	5.329
seca	6	7,43	7,73	7,67	82.000	136	5.504
	7	7,55	7,69	7,70	82.800	137	5.317
	8	7,56	7,71	7,71	74.400	123	5.250
	9	7,74	7,82	7,87	86.400	138	5.338
	10	7,56	7,87	7,86	74.800	119	5.178
			$\bar{x}_{sat}$	117	$\bar{x}_{sec}$	130	5.309
			S	18	S	9	103
			$C.V.$	15,3	$C.V.$	6,9	1,9
			Δ	-10			
BCE	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,64	7,78	7,79	82.000	133	4.494
	2	7,59	7,74	7,80	118.400	193	4.897
	3	7,55	7,68	7,79	95.200	156	4.840
	4	7,67	7,82	7,80	103.200	166	4.459
	5	7,50	7,71	7,87	102.000	165	4.747
seca	6	7,62	7,80	7,76	90.400	146	4.763
	7	7,64	7,78	7,80	98.400	159	4.630
	8	7,52	7,84	7,74	93.600	151	4.821
	9	7,57	7,78	7,81	103.200	167	4.326
	10	7,51	7,75	7,76	98.800	161	4.607
			$\bar{x}_{sat}$	162	$\bar{x}_{sec}$	157	4.658
			S	22	S	8	187
			$C.V.$	13,3	$C.V.$	5,1	4,0
			Δ	3			
ITN-1	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,52	7,57	7,56	56.400	97	4.476
	2	7,52	7,59	7,57	55.600	95	3.979
	3	7,46	7,54	7,49	62.000	108	4.191
	4	7,57	7,55	7,56	32.800	56	4.229
	5	7,52	7,68	7,59	53.200	90	4.450
seca	6	7,39	7,68	7,67	68.800	115	4.152
	7	7,51	7,53	7,56	67.200	116	4.444
	8	7,46	7,56	7,54	72.000	124	4.440
	9	7,47	7,62	7,54	65.200	111	4.368
	10	7,50	7,57	7,54	59.200	102	4.190
			$\bar{x}_{sat}$	89	$\bar{x}_{sec}$	113	4.292
			S	19	S	8	167
			$C.V.$	21,8	$C.V.$	7,1	3,9
			Δ	-22			
ITN-2	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,51	7,70	7,54	56.800	96	3.755
	2	7,48	7,69	7,57	52.000	88	3.631
	3	7,44	7,40	7,44	52.400	93	4.227
	4	7,49	7,40	7,51	45.600	80	3.708
	5	7,47	7,50	7,51	59.600	104	3.973
seca	6	7,36	7,58	7,57	74.000	127	3.573
	7	7,35	7,51	7,45	51.600	91	3.621
	8	7,41	7,58	7,42	62.400	109	3.761
	9	7,48	7,48	7,40	62.000	110	4.110
	10	7,44	7,73	7,53	78.000	132	3.701
			$\bar{x}_{sat}$	92	$\bar{x}_{sec}$	113	3.806
			S	9	S	16	222
			$C.V.$	9,5	$C.V.$	14,3	5,8
			Δ	-19			

CRV	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,49	7,67	7,63	79.800	134	4.864
	2	7,46	7,63	7,65	86.000	145	4.844
	3	7,53	7,67	7,67	80.400	134	4.954
	4	7,56	7,55	7,68	81.600	138	4.941
	5	7,49	7,67	7,59	91.600	154	4.864
seca	6	7,50	7,60	7,65	114.800	194	4.870
	7	7,50	7,65	7,69	108.000	180	4.808
	8	7,48	7,70	7,64	114.000	190	4.921
	9	7,51	7,75	7,66	93.200	154	4.908
	10	7,52	7,57	7,61	78.000	133	4.915
			$\bar{x}_{sat}$	141	$\bar{x}_{sec}$	170	4.889
			S	9	S	26	46
			$C.V.$	6,1	$C.V.$	15,3	0,9
			Δ	-17			
PIT	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,49	7,52	7,51	68.000	118	5.238
	2	7,43	7,49	7,52	88.200	154	5.232
	3	7,52	7,47	7,49	87.600	154	5.259
	4	7,49	7,53	7,43	84.400	148	5.201
	5	7,49	7,52	7,45	82.000	144	5.275
seca	6	7,44	7,52	7,60	117.800	202	5.239
	7	7,44	7,52	7,57	97.200	168	5.277
	8	7,44	7,58	7,63	115.200	195	5.203
	9	7,53	7,58	7,60	83.600	142	5.229
	10	7,55	7,57	7,57	87.600	150	5.207
			$\bar{x}_{sat}$	143	$\bar{x}_{sec}$	171	5.236
			S	15	S	27	28
			$C.V.$	10,3	$C.V.$	15,5	0,5
			Δ	-16			
AZF	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,75	7,80	7,78	73.200	118	4.905
	2	7,67	7,71	7,81	78.800	128	4.885
	3	7,57	7,78	7,79	72.000	117	4.853
	4	7,66	7,78	7,78	68.400	111	4.818
	5	7,64	7,83	7,78	75.200	121	4.897
seca	6	7,79	7,77	7,85	74.000	119	4.779
	7	7,62	7,75	7,74	101.600	166	4.885
	8	7,56	7,76	7,77	82.400	134	4.909
	9	7,70	7,79	7,77	88.800	144	4.873
	10	7,53	7,79	7,75	76.800	125	4.620
			$\bar{x}_{sat}$	119	$\bar{x}_{sec}$	138	4.842
			S	6	S	19	88
			$C.V.$	5,4	$C.V.$	13,5	1,8
			Δ	-14			
RIC	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,47	7,67	7,76	94.000	155	4.318
	2	7,49	7,73	7,60	69.200	116	4.380
	3	7,49	7,61	7,70	68.800	115	4.406
	4	7,44	7,56	7,57	76.800	132	4.301
	5	7,41	7,63	7,65	64.800	109	4.308
seca	6	7,51	7,60	7,54	86.800	149	4.418
	7	7,47	7,50	7,74	78.000	132	4.394
	8	7,55	7,57	7,72	80.200	135	4.364
	9	7,45	7,67	7,66	93.400	156	4.515
	10	7,42	7,57	7,71	65.600	110	4.314
			$\bar{x}_{sat}$	125	$\bar{x}_{sec}$	136	4.372
			S	19	S	18	67
			$C.V.$	14,8	$C.V.$	12,9	1,5
			Δ	-8			

BCR	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,26	7,48	7,53	70.400	123	4.595
	2	7,31	7,55	7,45	52.400	91	4.377
	3	7,32	7,56	7,62	76.800	131	4.357
	4	7,40	7,54	7,60	68.000	116	4.353
	5	7,30	7,56	7,55	79.600	137	4.371
seca	6	7,18	7,51	7,44	69.600	122	4.724
	7	7,36	7,43	7,52	89.200	157	4.407
	8	7,23	7,52	7,49	96.400	168	4.463
	9	7,30	7,49	7,53	70.800	123	4.591
	10	7,20	7,61	7,49	78.600	135	4.615
			$\bar{x}_{sat}$	120	$\bar{x}_{sec}$	141	4.485
			S	18	S	20	134
			$C.V.$	14,7	$C.V.$	14,5	3,0
			Δ	-15			
BSV	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
saturada	1	7,47	7,64	7,65	83.600	140	4.082
	2	7,42	7,69	7,61	66.000	111	3.729
	3	7,53	7,83	7,65	61.600	101	4.160
	4	7,53	7,68	7,68	74.000	123	3.803
	5	7,48	7,82	7,68	81.200	133	4.065
seca	6	7,55	7,67	7,79	74.800	123	4.148
	7	7,49	7,68	7,64	80.400	134	3.745
	8	7,54	7,76	7,65	80.800	134	3.827
	9	7,42	7,70	7,66	90.800	151	4.099
	10	7,45	7,62	7,73	86.800	145	3.582
			$\bar{x}_{sat}$	121	$\bar{x}_{sec}$	137	3.924
			S	16	S	11	209
			$C.V.$	13,1	$C.V.$	7,9	5,3
			Δ	-12			
GVN	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
Sat $\perp$	1	7,34	7,43	7,50	60.400	106	4.646
	2	7,30	7,47	7,41	61.600	109	4.506
	3	7,34	7,37	7,42	48.000	86	4.503
Sec $\perp$	4	7,26	7,31	7,42	64.000	116	4.566
	5	7,39	7,84	7,76	82.800	134	4.648
	6	7,38	7,73	7,80	81.200	132	4.671
Sat $//$	7	7,43	7,45	7,39	50.000	89	4.673
	8	7,38	7,47	7,34	59.200	106	4.613
	9	7,32	7,50	7,44	66.000	116	4.575
Sec $//$	10	7,30	7,33	7,45	71.200	128	4.506
	11	7,41	7,43	7,41	69.200	123	4.690
	12	7,34	7,40	7,37	65.200	117	4.559
			$\bar{x}_{sec}$	101(//)	127(L)	4590	
			S	13	10	75	
			$C.V.$	13	8	2	
			Δ		-21		
			$\bar{x}_{sat}$	104(//)	123(L)	4603	
			S	14	5	70	
			$C.V.$	13	4	2	
			Δ		-16		

CSB	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
Sat $\perp$	1	7,46	7,70	7,75	63.600	105	3.552
	2	7,51	7,86	7,72	74.400	120	3.526
	3	7,38	7,68	7,76	66.000	109	3.884
Sec $\perp$	4	7,49	7,69	7,73	81.600	135	3.636
	5	7,53	7,79	7,74	82.000	133	3.765
	6	7,51	7,73	7,70	97.600	161	3.663
Sat $//$	7	7,48	7,69	7,79	79.200	130	3.856
	8	7,51	7,74	7,67	74.400	123	3.774
	9	7,39	7,69	7,74	70.000	115	3.790
Sec $//$	10	7,50	7,80	7,80	102.400	165	4.032
	11	7,50	7,71	7,62	86.400	144	3.989
	12	7,52	7,69	7,76	84.000	138	4.043
$\bar{x}_{sec}$					111(//)	143(L)	3671
S					8	15	135
C.V.					7	11	4
Δ					-22		
$\bar{x}_{sat}$					123(//)	149(L)	3914
S					7	14	122
C.V.					6	9	3
Δ					-18		
FLS	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
Sat $\perp$	1	7,60	7,65	7,75	97.600	161	2.969
	2	7,57	7,70	7,74	63.200	104	2.867
	3	7,59	7,79	7,72	70.800	115	3.872
Sec $\perp$	4	7,57	7,70	7,77	84.000	138	3.902
	5	7,61	7,71	7,83	100.400	163	3.459
	6	7,61	7,78	7,73	60.000	98	4.275
Sat $//$	7	7,42	7,70	7,70	91.200	151	3.105
	8	7,61	7,69	7,80	92.400	151	4.026
	9	7,66	7,72	7,69	89.600	148	4.118
Sec $//$	10	7,64	7,80	7,77	74.000	120	4.064
	11	7,59	7,76	7,73	79.600	130	4.545
	12	7,63	7,75	7,73	68.400	112	4.488
$\bar{x}_{sec}$					127(//)	133(L)	3558
S					30	33	560
C.V.					24	25	16
Δ					-4		
$\bar{x}_{sat}$					121(//)	150(L)	4058
S					9	2	517
C.V.					8	1	13
Δ					-20		
ARB	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
Sat $//$	1	7,66	7,78	7,72	54.000	88	4.728
	2	7,61	7,77	7,86	53.600	86	4.114
	3	7,48	7,88	7,68	56.800	92	4.110
Sec $//$	4	7,52	7,71	7,74	67.600	111	4.273
	5	7,38	7,84	7,73	77.200	125	4.193
	6	7,50	7,80	7,82	73.200	118	4.717
Sat $\perp$	7	7,63	7,70	7,77	47.200	77	4.488
	8	7,46	7,84	7,71	48.000	78	4.634
	9	7,47	7,70	7,67	57.600	96	4.016
Sec $\perp$	10	7,42	7,73	7,86	36.000	58	4.216
	11	7,35	7,73	7,82	50.800	82	4.083
	12	7,47	7,67	7,85	62.800	102	4.500
$\bar{x}_{sec}$					89(//)	118(L)	4356
S					3	7	290
C.V.					3	6	7
Δ					-25		
$\bar{x}_{sat}$					84(//)	81(L)	4323
S					10	22	252
C.V.					12	27	6
Δ					3		

SCC	CP	h	A_1	A_2	P	σ_C	VP
Sat //	1	7,60	7,71	7,76	60.000	98	3.762
	2	7,45	7,65	7,74	64.400	107	3.763
	3	7,54	7,83	7,86	51.200	82	3.660
Sec //	4	7,52	7,79	7,87	70.000	112	3.817
	5	7,58	7,87	7,76	85.600	138	3.790
	6	7,43	7,75	7,70	68.800	113	3.753
Sat $\perp$	7	7,50	7,73	7,75	69.200	113	3.024
	8	7,47	7,69	7,78	52.800	87	4.500
	9	7,57	7,81	7,74	72.400	117	3.364
Sec $\perp$	10	7,51	7,63	7,82	73.200	120	3.209
	11	7,47	7,73	7,65	69.200	115	3.491
	12	7,47	7,77	7,77	84.000	137	3.165
$\bar{x}_{sec}$					106(//)	124($\perp$)	3757
S					17	11	53
$C.V.$					16	9	1
Δ						-15	
$\bar{x}_{sat}$					95(//)	121($\perp$)	3459
S					13	14	535
$C.V.$					13	12	15
Δ						-21	

ANEXO F

Resultados dos ensaios de resistência à flexão (ASTM C 880/98)

Legenda

CP = corpo-de-prova

d = espessura média (mm)

b = largura média (mm)

W = carga de ruptura (N)

σ_f = resistência à flexão (MPa)

VP = velocidade de propagação de ondas (m/s)

Δ_m = variação de massa (%)

Δ = decaimento da resistência à flexão após choque térmico (%)

$\bar{X}_{ct}$ = média após choque térmico

$\bar{X}_{nat}$ = média na condição natural

S = desvio padrão

$C.V.$ = coeficiente de variação (%)

LBD	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	27,5	100,6	2.472,7	7,33	4.696		
	2	27,5	101,3	2.513,7	7,37	4.704		
	3	27,6	100,7	2.439,0	7,15	4.739		
	4	27,0	101,5	2.337,3	7,11	4.851		
	5	27,3	100,9	2.373,0	7,12	4.798		
	9	30,5	100,9	4.189,0	10,06	5.650		
	4´	30,6	101,3	3.151,7	7,50	5.000		
	1R	27,4	101,4	2.559,7	7,58	4.851		
choque térmico	6A	31,0	100,7	2.169,7	5,05	5.646	2.747	0,04
	7A	31,0	100,5	2.390,0	5,59	5.589	2.673	0,06
	10A	30,5	101,1	2.160,7	5,16	5.573	2.553	0,05
	1´	27,2	101,6	1.445,0	4,33	4.843	2.377	0,04
	2´	27,3	101,7	1.354,0	4,02	4.872	2.307	0,05
	3´	27,3	101,6	1.530,3	4,55	4.849	2.435	0,03
	2R	30,5	101,4	2.064,7	4,92	5.569	2.680	0,04
	4R	31,0	101,1	1.734,0	4,02	5.655	2.715	0,04
				$\bar{x}_{nat}$	7,65	5118	2.561	0,04
				S	0,99	404	169	0,01
				$C.V.$	12,9	7,9	6,6	24,1
				$\bar{x}_{CT}$	4,70	Δ	-52	
				S	0,57			
				$C.V.$	12,1			
				Δ	-39			

VCB-3	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	30,1	94,5	5.105,0	13,40	5.526		
	2	30,1	94,7	4.846,0	12,73	5.560		
	3	30,0	94,7	4.943,3	13,02	5.594		
	4	30,0	94,8	5.093,3	13,41	5.585		
	5	29,8	94,8	4.657,0	12,43	5.566		
choque térmico	6	29,8	95,0	4.032,3	10,80	5.579	4.499	0,04
	7	29,6	95,0	3.481,7	9,42	5.588	4.216	0,04
	8	29,5	94,2	3.230,0	8,87	5.588	4.316	0,04
	9	30,4	94,0	3.277,3	8,49	5.555	4.118	0,05
	10	30,5	94,7	4.136,0	10,60	5.561	4.424	0,04
				$\bar{x}_{nat}$	13,00	5.570	4.315	0,04
				S	0,43	21	154	0,00
				$C.V.$	3,3	0,4	3,6	10,4
				$\bar{x}_{CT}$	9,63	Δ	-23	
				S	1,03			
				$C.V.$	10,7			
				Δ	-26			

BCE	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	31,6	101,3	7.450,7	16,55	5209		
	2	31,7	101,4	7.358,0	16,25	5212		
	3	31,9	102,0	7.998,3	17,34	5230		
	4	31,9	101,0	7.704,3	16,84	5193		
	5	32,9	100,1	8.398,3	17,44	5143		
choque térmico	6	32,7	102,7	6.479,7	13,26	5114	4.285	0,03
	7	32,5	101,2	6.254,3	13,15	5122	4.283	0,02
	8	32,5	100,6	6.959,3	14,78	5108	4.253	0,03
	9	32,2	100,9	6.397,3	13,74	5116	4.303	0,03
	10	32,3	100,7	6.714,7	14,43	5100	4.321	0,02
				$\bar{x}_{nat}$	16,88	5155	4.289	0,02
				S	0,51	50	25	0,01
				$C.V.$	3,0	1,0	0,6	26,2
				$\bar{x}_{CT}$	13,87	Δ	-16	
				S	0,71			
				$C.V.$	5,2			
				Δ	-18			
ITN-2	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	21,0	100,6	2.269,0	7,66	3.890		
	2	21,1	100,9	2.202,3	7,37	4.040		
	6	21,2	100,8	2.220,7	7,35	3.800		
	9	21,3	100,8	3.325,0	10,90	4.260		
	2A	21,3	100,5	3.416,0	11,24	4.200		
	4A	21,1	101,5	3.091,0	10,26	4.210		
	6A	21,4	101,2	3.339,7	10,78	4.190		
	8A	21,5	100,9	3.570,3	11,51	4.200		
choque térmico	7	21,2	100,7	3.033,7	10,03	4.270	3.645	0,06
	10	21,0	100,7	2.650,7	8,93	4.200	3.459	0,04
	11	21,0	101,3	2.953,7	9,90	4.250	3.568	0,05
	12	21,1	101,4	2.761,3	9,22	3.510	3.081	0,05
	1A	21,3	101,0	2.730,3	8,94	4.240	3.610	0,02
	3A	21,1	100,8	2.165,7	7,27	4.230	3.552	0,03
	5A	21,1	100,9	2.574,3	8,62	4.230	3.571	0,02
	7A	21,4	100,9	2.577,7	8,39	4.180	3.557	0,02
				$\bar{x}_{nat}$	9,63	4119	3.506	0,04
				S	1,84	211	180	0,02
				$C.V.$	19,1	5,1	5,1	44,5
				$\bar{x}_{CT}$	8,91	Δ	-15	
				S	0,88			
				$C.V.$	9,8			
				Δ	-7			
ITN-1	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	21,4	100,1	2.557,7	8,39	3.840		
	2	21,4	100,6	2.422,3	7,87	3.840		
	3	21,5	100,7	2.341,0	7,58	3.880		
	4	22,0	100,4	2.409,3	7,46	3.880		
	5	21,8	101,0	2.287,7	7,17	3.850		
	6	21,7	101,1	2.453,3	7,75	3.950		
choque térmico	7	21,5	99,8	2.326,7	7,57	3.850	3.060	0,05
	8	21,6	100,4	2.288,7	7,36	3.940	3.130	0,03
	9	21,6	101,0	1.906,3	6,07	3.910	3.050	0,06
	10	21,5	100,0	1.865,0	6,08	4.050	3.280	0,04
	11	21,5	100,7	2.445,7	7,90	3.940	3.170	0,06
	12	21,6	100,5	2.030,3	6,53	3.810	3.090	0,04
				$\bar{x}_{nat}$	7,70	3.895	3.080	0,05
				S	0,42	67	44	0,01
				$C.V.$	5,4	1,7	1	26,1
				$\bar{x}_{CT}$	6,92	Δ	-21	
				S	0,80			
				$C.V.$	11,5			
				Δ	-10			

CRV	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	18,6	100,4	3.611,7	15,64	4.916		
	2	18,5	100,8	3.511,3	15,23	4.945		
	3	18,5	100,9	3.446,3	14,98	4.963		
	4	19,1	100,5	3.420,3	14,03	4.881		
	5	19,0	100,6	3.427,0	14,15	4.869		
	7	18,9	100,7	4.442,7	18,58	5.121		
	11	18,6	100,8	4.125,0	17,70	5.109		
	1A	18,9	100,7	4.701,3	19,65	5.034		
	3A	18,8	100,9	4.395,7	18,54	5.181		
choque térmico	8	18,8	100,5	3.260,7	13,80	5.100	4.344	0,03
	9	18,8	101,1	3.426,3	14,38	5.071	4.371	0,05
	10	18,7	100,4	3.536,0	15,11	5.079	4.302	0,05
	12	18,7	101,1	3.520,0	14,89	4.989	4.352	0,06
	2A	18,7	100,9	3.283,3	13,99	5.080	4.468	0,01
	4A	18,6	100,8	3.262,0	14,11	5.164	4.497	0,01
	6A	18,7	101,1	3.535,0	15,00	5.023	4.493	0,01
				$\bar{x}_{nat}$	16,50	5.033	4.404	0,03
				S	2,12	97	80	0,02
				$C.V.$	12,9	1,9	1,8	80,8
				$\bar{x}_{CT}$	14,47	Δ	-13	
				S	0,53			
				$C.V.$	3,7			
				Δ	-12			
PIT	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	29,6	99,9	5.809,0	14,90	4.364		
	2	30,1	99,9	5.470,3	13,60	4.402		
	4	21,3	99,9	4.948,3	16,38	4.800		
	5	21,5	100,2	4.847,0	15,66	4.962		
	6	21,4	100,3	4.936,7	16,08	4.965		
	7	21,2	100,5	4.469,7	14,87	4.904		
	3	30,4	100,0	5.233,0	12,75	4.782	4.039	0,00
choque térmico	8	21,2	100,9	3.743,7	12,41	4.923	4.067	0,04
	9	21,2	99,7	4.075,3	13,61	4.959	3.899	0,03
	10	21,4	100,1	3.272,7	10,76	5.003	3.936	0,05
	11	21,4	100,1	3.929,7	12,92	4.883	4.019	0,03
				$\bar{x}_{nat}$	15,32	4.813	3.992	0,03
				S	1,12	224	71	0,02
				$C.V.$	7,3	4,6	1,8	58,0
				$\bar{x}_{CT}$	12,49	Δ	-20	
				S	1,06			
				$C.V.$	8,5			
				Δ	-18			
AZF	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	31,3	100,5	5.871,0	13,47	4.737		
	2	31,3	101,4	5.559,3	12,60	4.746		
	3	31,5	100,9	7.271,0	16,35	4.949		
	4	31,6	100,5	7.033,7	15,77	4.905		
	5	31,2	101,2	6.898,7	15,73	4.905		
choque térmico	6	31,2	101,4	6.252,0	14,28	4.974	3.935	0,04
	7	31,0	101,7	5.432,7	12,51	4.957	3.846	0,05
	8	30,5	101,4	4.476,0	10,72	4.667	3.929	0,04
	9	30,5	101,0	4.402,7	10,58	4.730	3.581	0,04
	10	30,6	101,4	4.728,7	11,21	4.757	3.463	0,04
				$\bar{x}_{nat}$	14,78	4.833	3.751	0,04
				S	1,65	115	216	0,00
				$C.V.$	11,1	2,4	5,8	9,2
				$\bar{x}_{CT}$	11,86	Δ	-22	
				S	1,55			
				$C.V.$	13,1			
				Δ	-20			

RIC	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	22,5	100,6	4.037,3	11,95	4689		
	2	22,5	100,2	3.534,3	10,50	4736		
	3	22,7	100,8	3.773,0	10,90	4682		
	4	22,8	100,5	4.047,0	11,65	4694		
	5	22,2	100,2	4.132,3	12,52	4696		
choque térmico	6	22,3	101,1	2.606,0	7,81	4680	3.592	0,03
	7	22,2	100,6	3.054,0	9,26	4721	3.641	0,03
	8	22,2	100,3	2.875,3	8,73	4706	3.674	0,03
	9	22,5	100,5	2.990,3	8,81	4627	3.736	0,02
	10	22,5	101,0	2.724,0	8,00	4713	3.626	0,02
				$\bar{x}_{nat}$	11,50	4694	3.654	0,02
				S	0,81	30	54	0,00
				$C.V.$	7,1	0,6	1,5	17,9
				$\bar{x}_{CT}$	8,52	Δ	-22	
				S	0,60			
				$C.V.$	7,1			
				Δ	-26			
BCR	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	22,0	100,9	2.842,3	8,77	3.803		
	2	22,0	101,6	3.047,0	9,28	3.789		
	3	22,1	101,6	3.039,7	9,23	3.780		
	4	22,1	101,3	2.963,0	8,97	3.799		
	5	22,3	101,0	4.345,7	13,04	4.328		
	6	22,2	101,3	4.445,7	13,36	4.223		
	8	22,9	101,6	4.512,3	12,68	4.160		
	2A	22,9	101,7	3.489,3	9,82	4.031		
	4A	22,7	101,8	4.413,7	12,68	4.263		
	6A	22,2	101,7	4.296,0	12,92	4.106		
choque térmico	7	22,2	100,9	4.352,3	13,11	4.255	3.803	0,04
	9	22,3	101,1	2.678,3	8,01	4.324	3.438	0,04
	10	22,8	101,4	2.934,3	8,35	4.083	3.468	0,03
	11	22,1	100,5	4.011,7	12,26	4.315	3.468	0,03
	12	22,1	100,5	3.413,7	10,46	4.194	3.836	0,04
	1A	22,8	101,5	2.933,3	8,32	4.119	3.836	0,03
	3A	22,7	101,2	3.795,7	10,97	4.210	3.714	0,02
	5A	22,2	101,6	3.774,7	11,34	4.111	3.425	0,03
				$\bar{x}_{nat}$	11,07	4.105	3.643	0,03
				S	1,99	191	171	0,01
				$C.V.$	17,97	4,7	4,7	26,8
				$\bar{x}_{CT}$	10,35	Δ	-13	
				S	1,93			
				$C.V.$	18,68			
				Δ	-7			
BSV	CP	d	b	W	σ_f	VP	CHOQUE TÉRMICO	
							VP	Δ_m
natural	1	21,3	100,6	2.952,3	9,73	3910		
	2	21,3	100,7	3.171,7	10,41	3877		
	3	21,4	100,4	3.045,0	9,96	3878		
	4	21,4	100,7	3.275,7	10,68	3876		
	5	21,9	100,4	3.125,3	9,78	3755		
choque térmico	6	21,9	100,8	2.734,7	8,49	3978	3.604	0,02
	7	22,0	101,0	3.328,3	10,19	4006	3.611	0,03
	8	22,1	101,4	2.829,7	8,57	3968	3.602	0,05
	9	21,2	100,9	2.458,3	8,15	3874	3.514	0,03
	10	21,1	100,9	2.425,7	8,12	3833	3.408	0,03
				$\bar{x}_{nat}$	10,11	3895	3.548	0,03
				S	0,42	74	88	0,01
				$C.V.$	4,1	1,9	2,5	36,5
				$\bar{x}_{CT}$	8,70	Δ	-10	
				S	0,85			
				$C.V.$	9,8			
				Δ	-14			

Legenda

$VP_{//}$ = velocidade de propagação de ondas paralelo (m/s)

$VP_{\perp}$ = velocidade de propagação de ondas perpendicular (m/s)

$\Delta_{//}$ = decaimento da resistência à flexão após choque térmico (determinação paralela à estrutura) (%)

$\Delta_{\perp}$ = decaimento da resistência à flexão após choque térmico (determinação perpendicular à estrutura) (%)

$\bar{x}_{nat//}$ = média natural (determinação paralela à estrutura) (%)

$\bar{x}_{nat\perp}$ = média natural (determinação perpendicular à estrutura) (%)

$\bar{x}_{ct//}$ = média após choque térmico

$\bar{x}_{ct\perp}$ = média após choque térmico

CSB	CP	d	b	W	σ_f	$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	CHOQUE TÉRMICO		
								$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	Δ_m
Natural //	1	31,5	100,7	2.722,0	6,12	3.510	3.209			
	2	31,6	100,7	2.166,7	4,86	3.472	3.218			
	3	31,6	101,7	2.661,3	5,90	3.670	3.281			
choque térmico //	4	32,2	100,2	1.430,0	3,10	3.855	3.368	3.529	2.969	0,03
	5	32,2	100,7	2.145,3	4,64	3.675	3.359	3.558	3.087	0,02
	6	32,2	100,8	1.169,7	2,52	3.488	3.409	3.574	3.035	0,03
Natural $\perp$	7	32,3	100,4	3.280,0	7,07	3.448	3.279			
	8	32,2	100,7	4.057,3	8,73	3.708	3.595			
	9	32,4	101,2	3.745,3	7,94	3.903	3.163			
choque térmico $\perp$	10	32,0	100,4	2.744,7	6,02	3.732	3.733	3.320	3.475	0,03
	11	32,1	101,2	1.234,7	2,66	3.765	3.967	3.302	3.488	0,05
	12	32,2	101,2	2.596,7	5,58	3.524	3.431	3.091	3.057	0,05
	$\bar{x}_{nat\perp}$	7,92		$\bar{x}_{nat//}$	5,62	3.646	3.418	3.396	3.185	0,03
	S	0,83		S	0,67	155	238	192	233	0,01
	$C.V.$	10,5		$C.V.$	12,0	4,3	7,0	5,6	7,3	38,0
	$\bar{x}_{CT\perp}$	4,75		$\bar{x}_{CT//}$	3,42		Δ	-7	-7	
	S	1,39		S	1,10					
	$C.V.$	29,3		$C.V.$	32,1					
	$\Delta_{\perp}$	-40		$\Delta_{//}$	-39					

FLS	CP	d	b	W	σ_f	$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	CHOQUE TÉRMICO		
								$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	Δ_m
Natural //	1	30,8	100,4	3.816,7	9,00	3.071	3.769			
	2	30,8	100,4	3.351,3	7,94	2.998	3.587			
	3	30,7	100,4	3.441,3	8,20	3.107	3.474			
choque térmico //	4	30,4	100,5	2.813,7	6,83	3.372	3.988	2.973	3.640	0,03
	5	30,4	99,8	2.989,0	7,29	2.996	3.744	2.787	3.527	0,03
	6	30,4	100,4	3.542,3	8,60	3.282	4.048	2.813	3.538	0,02
Natural $\perp$	7	30,5	97,3	1.549,7	3,85	2.883	3.799			
	8	30,5	100,3	1.381,7	3,34	2.825	3.673			
	9	30,6	100,5	1.657,0	3,96	2.930	3.514			
choque térmico $\perp$	10	30,4	100,8	1.188,0	2,88	3.008	4.049	2.652	3.720	0,03
	11	30,4	100,4	942,7	2,29	2.990	3.690	2.652	3.380	0,03
	12	30,2	100,0	1.161,3	2,86	2.997	3.876	2.666	3.367	0,02
	$\bar{x}_{nat\perp}$	8,38		$\bar{x}_{nat//}$	3,72	3.038	3.768	2.757	3.529	0,03
	S	0,55		S	0,33	156	195	127	140	0,01
	$C.V.$	6,6		$C.V.$	8,9	5,1	5,2	4,6	4,0	21,1
	$\bar{x}_{CT\perp}$	7,57		$\bar{x}_{CT//}$	2,68		Δ	-9	-6	
	S	0,92		S	0,54					
	$C.V.$	12,1		$C.V.$	20,2					
	$\Delta_{\perp}$	-10		$\Delta_{//}$	-28					

GVN	CP	d	b	W	σ_f	VP //	VP $\perp$	CHOQUE TÉRMICO		
								VP //	VP $\perp$	Δ_m
Natural //	1	30,7	100,4	3.048,0	7,25	4.564	4.819			
	2	30,7	100,4	2.928,0	6,96	4.649	4.951			
	3	30,5	100,9	2.819,7	6,77	4.651	4.991			
choque térmico //	4	31,0	100,6	2.432,0	5,66	4.815	4.940	3.713	3.578	0,02
	5	31,1	101,1	2.451,7	5,66	4.839	4.856	3.845	3.501	0,01
	6	31,1	101,5	2.501,3	5,75	4.789	4.913	3.733	3.506	0,02
Natural $\perp$	7	30,2	101,4	4.642,7	11,30	4.702	4.827			
	8	30,2	101,3	4.494,3	10,95	4.841	4.868			
	9	30,2	101,5	4.379,0	10,66	4.822	4.975			
choque térmico $\perp$	10	29,5	100,6	3.534,3	9,07	4.700	4.857	3.740	3.710	0,02
	11	29,6	100,5	3.537,0	9,06	4.621	4.525	3.668	3.537	0,00
	12	29,6	101,1	3.533,7	8,98	4.659	4.472	3.795	3.485	0,02
	$\bar{x}_{nat\perp}$	10,97		$\bar{x}_{nat//}$	6,99	4.721	4.833	3.749	3.553	0,01
	S	0,32		S	0,24	96	166	62	84	0,01
	C.V.	2,9		C.V.	3,4	2,0	3,4	1,7	2,4	56,3
	$\bar{x}_{CT\perp}$	9,04		$\bar{x}_{CT//}$	5,69		Δ	-21	-26	
	S	1,01		S	0,05					
	C.V.	11,2		C.V.	0,9					
	$\Delta\perp$	-18		$\Delta//$	-19					

ARB	CP	d	b	W	σ_f	VP //	VP $\perp$	CHOQUE TÉRMICO		
								VP //	VP $\perp$	Δ_m
Natural //	1	20,3	101,1	2.213,7	8,01	4.555	4.294			
	2	20,4	101,1	1.756,3	6,28	4.471	4.249			
	3	20,4	101,1	2.143,7	7,66	4.679	4.109			
choque térmico //	4	20,9	101,0	1.309,7	4,47	4.612	4.292	4.008	3.448	0,04
	5	20,8	101,1	1.204,3	4,12	4.681	4.333	3.844	3.343	0,06
	6	20,6	101,4	1.530,7	5,32	4.715	4.261	4.121	3.410	0,04
Natural $\perp$	7	20,6	100,9	3.427,0	11,98	4.755	4.237			
	8	20,8	101,0	2.752,0	9,49	4.608	4.315			
	9	20,9	101,3	3.132,0	10,62	4.650	4.151			
choque térmico $\perp$	10	20,4	101,2	2.901,3	10,36	4.720	4.163	4.029	3.600	0,03
	11	20,4	101,2	2.649,3	9,41	4.729	4.326	4.056	3.654	0,03
	12	20,8	101,6	3.152,3	10,81	4.633	4.358	4.014	3.614	0,05
	$\bar{x}_{nat\perp}$	10,70		$\bar{x}_{nat//}$	7,32	4.651	4.257	4.012	3.511	0,04
	S	1,25		S	0,91	81	79	92	128	0,01
	C.V.	11,6		C.V.	12,5	1,7	1,9	2,3	3,6	29,5
	$\bar{x}_{CT\perp}$	10,20		$\bar{x}_{CT//}$	4,64		Δ	-14	-18	
	S	0,59		S	0,62					
	C.V.	5,8		C.V.	13,3					
	$\Delta\perp$	-5		$\Delta//$	-37					

SCC	CP	d	b	W	σ_f	$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	CHOQUE TÉRMICO		
								$VP_{//}$	$VP_{\perp}$	Δ_m
Natural //	1	30,5	101,2	4.616,3	11,05	5.196	4.984			
	2	30,4	100,1	4.820,0	11,73	5.294	5.004			
	3	30,4	100,9	4.845,0	11,73	5.292	5.097			
choque térmico //	4	29,4	101,2	2.857,0	7,36	5.138	4.958	3.985	3.774	0,03
	5	29,3	100,6	2.705,0	7,07	5.259	5.054	4.005	3.781	0,02
	6	29,3	101,6	2.809,3	7,24	5.249	5.129	4.053	3.876	0,03
Natural $\perp$	7	29,6	101,6	2.710,0	6,86	5.159	5.163			
	8	29,5	101,5	3.504,7	8,91	5.285	5.184			
	9	29,5	101,7	3.300,3	8,42	5.298	5.183			
choque térmico $\perp$	10	30,6	101,1	2.111,3	5,04	5.104	5.000	4.010	3.617	0,04
	11	30,7	101,4	1.551,7	3,65	5.044	5.116	3.884	3.644	0,04
	12	30,9	101,4	1.574,3	3,66	5.147	4.907	4.105	3.542	0,02
	$\bar{x}_{nat\perp}$	11,50		$\bar{x}_{nat//}$	8,06	5.205	5.065	4.007	3.706	0,03
	S	0,39		S	1,07	86	94	74	125	0,01
	C.V.	3,4		C.V.	13,3	1,7	1,9	1,8	3,4	36,3
	$\bar{x}_{CT\perp}$	7,23		$\bar{x}_{CT//}$	4,12		Δ	-23	-27	
	S	0,15		S	2,11					
	C.V.	2,0		C.V.	51,2					
	$\Delta_{\perp}$	-37		$\Delta_{//}$	-49					