

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Campus de Rio Claro

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS GNAISSES CASABLANCA,
JUPARANÁ DELICATO E GIALLO FALÉSIA (Ceará-Brasil) EM
ATMOSFERA SALINA**

MARIA ANGÉLICA BATISTA LIMA

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Artur
Co-orientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto

Tese de Doutorado elaborada junto ao Curso de Pós-Graduação em Geociências – Área de Concentração em Geologia Regional para obtenção do Título de Doutor em Geologia Regional.

Rio Claro – SP

2006

552 Lima, Maria Angélica Batista
L732e Estudo do comportamento dos gnaisses casablanca, juparaná delicato e giallo falésia (Ceará-Brasil) em atmosfera salina / Maria Angélica Batista Lima. – Rio Claro : [s.n.], 2006
182 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, fots., mapas

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Antônio Carlos Artur
Co-orientador: José de Araújo Nogueira Neto

1. Petrologia. 2. Alterabilidade de rochas. 3. Rochas ornamentais. 4. Ensaios acelerados. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

BANCA EXAMINADORA

ANTÔNIO CARLOS ARTUR

ANTÔNIO GILBERTO COSTA

FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL

TAMAR MILCA BORTOLOZZO GALEMBECK

MARIA HELOÍSA BARROS DE OLIVEIRA FRASCÁ

Rio Claro, 22 de setembro de 2006.

*“ Quando achamos que temos todas as respostas,
vem a vida e muda todas as perguntas”.*

(Autor Desconhecido)

*“ Ao Hélio, pelo amor e serenidade demonstrados na
distância ao longo desse tempo.”*

AGRADECIMENTOS

De modo destacado ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Carlos Artur, pelo incentivo científico, pelas horas de paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto, pela co-orientação, acompanhamento no campo, incentivo, amizade e discussões no decorrer de todo o curso.

Ao CNPq pela concessão de bolsa que possibilitou esta qualificação profissional e pelo apoio financeiro ao Projeto de Pesquisa.

À Empresa GRANOS, em especial ao Dr. Silveira e ao amigo Petrochelli, pela receptividade e apoio desta empresa ao projeto.

À Empresa GEOMAC, ou seja, ao Eduardo Zanibone, Moacir e Almir, que muito contribuíram com informações preciosas sobre a pedreira e geologia da área.

Aos amigos que tive o imenso prazer de conhecer em Rio Claro, de quem recebi muito apoio e demonstrações de carinho: Profa. Tamar, Duda, Neide, Iramaia, Paulo César, Cláudia, Irani, Paulinho, Julião, Shirley, Tácito, Jaqueline, Mirna e Suzana.

À Ana Cândido, Mayra Fernandes e Jean, com quem tive a oportunidade de maior aproximação nos últimos tempos.

Em especial ao amigo Ivaldo Trindade que me ajudou com os gráficos de Isocon e com quem tive valiosas discussões nesta fase final do trabalho.

Aos amigos da UFC, pelas contribuições e paciência em ouvir, a Martha, Magnólia, Anna Paula, Íris e, principalmente, ao Carlos Alberto Holanda Maciel que me ajudou com a preparação das amostras e execução de ensaios tecnológicos.

Aos técnicos dos laboratórios do Departamento de Petrologia e Metalogenia da UNESP –RC, Júnior, Wladimir e especialmente ao Adilson que me ajudou com a dilatação térmica e com seu bom humor contagiante.

Ao NUTEC, em especial a Ana Luíza Maia pelo exemplo de administração e amizade, e a Cristina Parente pelo suporte técnico, dedicação e pelo sorriso maroto. A todos que integram a DIQUI, pelo companheirismo demonstrado: Érika, Solange, Luzia, Jackson, Pedrinho (*in memoriam*) e Josilene.

A Iêda Nadja com quem tive as primeiras discussões e informações sobre atmosfera agressiva e quem me concedeu os dados dos contaminantes atmosféricos.

Ao Romeo e ao Prof. Galindo da UFRN, pela presteza e auxílio com a condutividade térmica.

Ao Marcos Mansueto pela atenção dedicada por ocasião das análises com microsonda.

Agradeço, de forma muito particular, aos meus pais José Batista Lima (*in memoriam*) e Raimunda Dias Lima pelo exemplo de vida e por terem sempre nos encaminhado na

direção do saber. Agradeço aos meus irmãos Diana, Franzé e Genivaldo, esteio nas horas de cansaço e estímulo constante. A Tia Isabel e Tio Lourival pelo apoio incondicional sempre.

SUMÁRIO

RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
CAPITULO 1	
INTRODUÇÃO	01
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS	04
CAPITULO 2	
REFERENCIAL TEÓRICO	07
2.1 ESTADO DA ARTE	07
2.2 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA	13
2.3 MECANISMOS ATUANTES NA ATMOSFERA	16
2.4 PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS CONDICIONANTES NA REGIÃO	18
2.5 ALTERAÇÃO DE ROCHA COMPARADA COM CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAL	29
CAPITULO 3	
MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 MATERIAIS E ÁREA DE LOCALIZAÇÃO	30
3.2 ENSAIOS E ANÁLISES LABORATORIAIS	35
3.2.1 ENSAIO DE ALTERAÇÃO ACELERADA	38
3.2.1.1 Contínuo (Exposição à névoa salina - NBR 8094)	39
3.2.1.2 Cíclico (Exposição à névoa salina - prEN 14147)	39
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	40
3.2.2.1 Análise petrográfica	40
3.2.2.2 Ensaio de coloração seletiva	42
3.2.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	43
3.2.3.1 Intensidade de brilho	43
3.2.3.2 Índices físicos	43
3.2.3.3 Resistência à compressão uniaxial simples	44
3.2.3.4 Desgaste Abrasivo Amsler	44
3.2.3.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas	45
3.2.3.6 Microdurezza Knoop	45
3.2.3.7 Dilatação Térmica Linear	45
3.2.3.8 Condutividade Térmica	46
3.2.3.9 Aptidão de molhagem	47

CAPITULO 4

ARCABOUÇO REGIONAL E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA

PESQUISADA	49
4.1 ARCABOUÇO TECTÔNICO	49
4.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	55
4.2.1 UNIDADE TRÓIA	57
4.2.2 UNIDADE CEDRO	60
4.2.3 COBERTURAS CENOZÓICAS.....	60
4.3 GEOLOGIA DA ÁREA	60
4.3.1 LITOESTRATIGRAFIA.....	61
4.3.2 TECTÔNICA/METAMORFISMO	64
4.3.2.1 Dúcteis	65
4.3.2.2 Rúpteis	67
4.3.3 GEOCRONOLOGIA E GÊNESE DO JAZIMENTO.....	68

CAPITULO 5

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS	70
5.1 PETROGRAFIA	70
5.1.1 GRANADA-BIOTITA-MUSCOVITA GNAISSE (CASABLANCA)	72
5.1.2 GRANADA-MUSCOVITA-BIOTITA GNAISSE (JUPARANÁ DELICATO)	77
5.1.3 GRANADA-MUSCOVITA-BIOTITA GNAISSE (GIALLO FALÉSIA).....	82

CAPITULO 6

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
6.1 ÍNDICES FÍSICOS	89
6.1.1 MASSA ESPECÍFICA APARENTE.....	90
6.1.2 POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO D'ÁGUA	91
6.1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ÍNDICES FÍSICOS	93
6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL SIMPLES.....	94
6.2.1 GENERALIDADES	94
6.2.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	95
6.3 DESGASTE ABRASIVO AMSLER.....	98
6.3.1 GENERALIDADES	98
6.3.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	98
6.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS	100
6.4.1 GENERALIDADES	100
6.4.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	101
6.5 INTENSIDADE BRILHO	104
6.5.1 GENERALIDADES	104
6.5.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	105

6.6 DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	108
6.6.1 GENERALIDADES	108
6.6.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	109
6.7 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	113
6.7.1 GENERALIDADES	113
6.7.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	113
6.8 APTIDÃO DE MOLHAGEM	117
6.8.1 GENERALIDADES	117
6.8.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	117
6.9 MICRODUREZA KNOOP	120
6.9.1 GENERALIDADES	120
6.9.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	120
6.10 ENSAIO CÍCLICO DE ALTERAÇÃO ACELERADA	124
6.11 ÍNDICE DE ALTERABILIDADE	129
CAPITULO 7	
CONCLUSÕES	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
APÊNDICES	
APÊNDICE 1	
DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS, AO NATURAL	145
APÊNDICE 2	
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS ROCHAS ESTUDADAS	147
APÊNDICE 3	
MEDIDAS DE DESGASTE AMSLER DAS ROCHAS ESTUDADAS	148
APÊNDICE 4	
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS NAS ROCHAS ESTUDADAS	149
APÊNDICE 5	
MEDIDAS DE BRILHO DAS ROCHAS ESTUDADAS	152
APÊNDICE 6	
DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ROCHAS ESTUDADAS	155

ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 1.1 Efeito da corrosão num pilar de sustentação de edificação localizada na Praia do Futuro	5
FIGURA 1.2 Efeito da corrosão numa laje de concreto da mesma edificação	5
FIGURA 1.3 Deslocamento de minerais em placa granítica, assemelhando-se a uma espécie de corrosão superficial (peitoril da janela). Apartamento localizado na Avenida Beira Mar em Fortaleza-Ce	6
Figura 1.4 Revestimento externo em prédio, localizado na Avenida Beira Mar (Fortaleza-Ce), apresentando surgimento de manchas ferruginosas esparsas, provavelmente devido a oxidação de minerais máficos	6
FIGURA 2.1 Vista do interior da câmara climática de ensaio contínuo em névoa salina (Modelo Bass USC) exibindo corpos-de-prova presos aos suportes por fios de nylon (a e b)	14
FIGURA 2.2 Vista da câmara climática de ensaio contínuo em névoa salina (a) e detalhe do painel onde se tem o controle de temperatura, vazão de líquido e pressão de ar do bico pulverizador (b)	15
FIGURA 2.3 Registros da precipitação pluviométrica mensal da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME	21
FIGURA 2.4 Registros da temperatura mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME	22
FIGURA 2.5 Registros da velocidade mensal média dos ventos da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME	23
FIGURA 2.6 Registros da radiação solar mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME	24
FIGURA 2.7 Registros da umidade relativa mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME	25
FIGURA 2.8 Teores de cloretos ($\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO	26
FIGURA 2.9 Teores de sulfatos ($\text{mgSO}_2/100\text{cm}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO	27
FIGURA 2.10 Teores de particulados ($\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO	28
FIGURA 3.1 Mapa de localização da área fonte dos gnaisses estudados	31
FIGURA 3.2 Frente de lavra do granito Casablanca	32
FIGURA 3.3 Placa do granito Casablanca	32

FIGURA 3.4 Frente de lavra do granito Juparaná Delicato	33
FIGURA 3.5 Placa do granito Juparaná Delicato	33
FIGURA 3.6 Frente de lavra do granito Giallo Falésia	34
FIGURA 3.7 Placa do granito Giallo Falésia	34
FIGURA 3.8 Fluxograma das atividades envolvidas na pesquisa	36
FIGURA 3.9 Vista exterior da câmara de ensaio cíclico com névoa salina (a) e do gabinete interno com amostras suspensas por fios de nylon (b)	40
FIGURA 3.10 Detalhes do equipamento utilizado para medir a condutividade térmica	46
FIGURA 4.1 Delimitação e subdivisão da Província Borborema(Trompette,1994).....	49
FIGURA 4.2 Localização da Província Borborema no Brasil (Schobbenhaus & Campos, 1984)	50
FIGURA 4.3 O Domínio Ceará Central limitado a SE pela ZCO-Orós e ZCA-Aiuába (Arthaud et al., 1998) a	52
FIGURA 4.3 O Domínio Ceará Central limitado a SE pela ZCSP-Senador Pompeu (Fetter, 1999) b	52
FIGURA 4.4 Localização de blocos Arqueanos identificados no Ceará (em vermelho). O Maciço de Tróia - (TM) é localizado nos blocos tectônicos de Mombaça e Santa Quitéria (Fetter, 1999). PB – Bloco Tróia-Pedra Branca e Mo – Bloco Mombaça	54
FIGURA 4.5 Esboço da Geologia Regional de Pedra Branca (baseado no mapa geológico do Ceará, escala 1:500.000 – Cavalcante <i>et al.</i> , 2003)	56
FIGURA 4.6 Zona do contato entre o Casablanca e Juparaná Delicato (a e b)	61
FIGURA 4.7 Mapa geológico da área simplificado e modificado de Zanibone & Moacir, 2001	62
FIGURA 4.8 Diagrama de foliação das áreas estudadas	66
FIGURA 4.9 Diagrama de roseta das áreas estudadas	67
FIGURA 4.10 Gráfico com resultado de datação obtido a partir de monazita para o gnaiss Casablanca (Fetter, 1999).....	68
FIGURA 4.11 Gráfico com resultado de datação obtido em rocha localizada nas proximidades da jazida do granito Casablanca (Fetter, 1999)	69
FIGURA 5.1 Fotografia de placa pétrea (40 x 40cm) já assentada. Em detalhe estrutura xenolítica de anfíbolito (provavelmente pertencente à Unidade Tróia) imersa em matriz quartzo-feldspática do Granada biotita muscovita gnaiss (Casablanca)	72
FIGURA 6.1 Valores Médios da Massa Específica Aparente Seca medidos em diferentes tempos de exposição	91

FIGURA 6.2 Valores Médios da Porosidade Aparente medidos em diferentes tempos de exposição	92
FIGURA 6.3 Valores médios de Absorção D'Água medidos em diferentes tempos de exposição	93
FIGURA 6.4 Resistência à Compressão após 360 horas de exposição à névoa salina	96
FIGURA 6.5 Resistência à Compressão após 720 horas de exposição à névoa salina	97
FIGURA 6.6 Resistência à Compressão após 1080 horas de exposição à névoa salina	98
FIGURA 6.7 Valores de desgaste medidos em diferentes tempos de exposição à névoa salina	100
FIGURA 6.8 Propagação de ondas ao natural e após 360 horas de exposição à névoa salina	103
FIGURA 6.9 Propagação de ondas ao natural e após 720 horas de exposição à névoa salina	104
FIGURA 6.10 Propagação de ondas ao natural e após 1080 horas de exposição à névoa salina	104
FIGURA 6.11 Medida de brilho ao natural e após 360 horas de exposição à névoa salina	106
FIGURA 6.12 Medida de brilho ao natural e após 720 horas de exposição à névoa salina	107
FIGURA 6.13 Medida de brilho ao natural e após 1080 horas de exposição à névoa salina	108
FIGURA 6.14 Velocidade de propagação de ondas antes e depois do ensaio de alteração acelerada	111
FIGURA 6.15 Dilatação Térmica Linear antes e depois do ensaio de alteração acelerada	112
FIGURA 6.16 Placas do Gnaiss Casablanca com as respectivas demarcações dos pontos de leitura	114
FIGURA 6.17 Placas do Gnaiss Juparaná Delicato com as respectivas demarcações dos pontos de leitura	115
FIGURA 6.18 Placas do Gnaiss Giallo Falésia com as respectivas demarcações dos pontos de leitura	115
FIGURA 6.19 Valores de t_p nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Casablanca	119
FIGURA 6.20 Valores de t_p nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Juparaná Delicato	119
FIGURA 6.21 Valores de t_p nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Giallo Falésia	119

FIGURA 6.22 Amostras dos gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia onde foram realizadas as medidas de dureza e brilho para determinação do índice de alterabilidade (Placas 5cm x 5cm x 5cm)	121
FIGURA 6.23 Curva de distribuição da dureza <i>Knoop</i> para o gnaiss Casablanca.....	123
FIGURA 6.24 Curva de distribuição da dureza <i>Knoop</i> para o gnaiss Delicato.....	123
FIGURA 6.25 Curva de distribuição da dureza <i>Knoop</i> para o gnaiss Falésia.....	124
FIGURA 6.26 Amostra do gnaiss Falésia antes e após exposição à névoa salina, podendo-se observar o aumento da oxidação preexistente	125
FIGURA 6.27 Mudanças no peso do gnaiss Casablanca após ensaio de alteração acelerada	126
FIGURA 6.28 Mudanças no peso do gnaiss Juparaná Delicato após ensaio de alteração acelerada	126
FIGURA 6.29 Mudanças no peso do gnaiss Giallo Falésia após ensaio de alteração acelerada	127
FIGURA 6.30 Resíduo de filtragem da 4ª lavagem contendo pequenas placas (ou lascas) de biotita, muscovita e hidróxidos de ferro, além de grãos de feldspato e quartzo	127
FIGURA 6.31 Controle da remoção do sal presente no interior das amostras por meio da medida de condutividade das águas de lavagem	128

ÍNDICE DAS PRANCHAS

- PRANCHA 5.1 – (1) e (2) Placas polidas do Gnaiss Casablanca, mostrando leitos descontínuos. Fotomicrografias do Gnaiss Casablanca. Nicóis paralelos e cruzados. (3,4) Porfiroblasto de granada, com forma anedral, apresentando intenso fraturamento. (5,6) Micas cisalhadas, mostrando localmente o sentido do deslocamento, e encurvamento de “cordões” das mesmas. (7,8) Grão de quartzo com forma hexagonal, característica de dinâmica estática 74
- PRANCHA 5.2 – Fotomicrografias do Gnaiss Casablanca. Nicóis paralelos e cruzados. (11,12) Microclínio mesopertítico parcialmente sericitizado com inclusões de plagioclásio de núcleo sausuritizado. (13,14) Muscovita e plagioclásio encurvados, apresentando extinção ondulante característica de um primeiro estágio deformacional. (15,16) Concentrações de muscovita lineares, descontínuas, com espessuras milimétricas e mostrando uma certa isorientação. Mosaico granoblástico interlobado a poligonal, composto a partir de intercrescimento do quartzo..... 75
- PRANCHA 5.3 – Fotomicrografias do Gnaiss Delicato. Nicóis paralelos e cruzados. (1,2) Placas polidas exibindo microleitos descontínuos a lineares biotíticos-muscovíticos, além de porções quartzo-feldspáticas de aspecto pegmatóide..... 79
- PRANCHA 5.4 – Fotomicrografias do Gnaiss Delicato. Nicóis paralelos e cruzados. (9) Albita com forma anédrica e dimensão maior, exibindo fratura preenchida com quartzo. (10) Feldspato com sericita e lamelas de muscovita. (15) Albita exibindo manteamento com núcleo mais rico em cálcio 80
- PRANCHA 5.5 – (1,2) Placas polidas do Gnaiss Falésia exibindo concentrações lineares de minerais micáceos com espessuras milimétricas. Fotomicrografias com nicóis paralelos e cruzados. (6) Cristalização de grãos hexagonais de quartzo por alívio de pressão. (7) Muscovita dobrada exibindo extinção ondulante resultante de esforço..... 86
- PRANCHA 5.6 – Fotomicrografias do Gnaiss Falésia. Nicóis paralelos e cruzados. (9) Muscovitização da biotita, evidência de retrometamorfismo. (11) Muscovita, biotita e granada compondo textura lepidoblástica. (15) Plagiocásio alterado apresentando inclusão de quartzo 87

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 Número de corpos-de-prova (CPs) utilizados, <i>in natura</i> e depois de exposição contínua à névoa salina, em ensaios comparativos de caracterização tecnológica	38
TABELA 5.1 Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-biotita muscovita gnaíse (Casablanca)	77
TABELA 5.2 Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-muscovita biotita gnaíse (Juparaná Delicato)	82
TABELA 5.3 Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-muscovita biotita gnaíse (Giallo Falésia)	88
TABELA 6.1 Valores de condutividade térmica (κ) dos gnaisses estudados	116
TABELA 6.2 Resultados da dureza <i>Knoop</i>	121
TABELA 6.3 Resultados da análise química da água destilada e água de lavagem das amostras de rocha	129
TABELA 6.4 Valores de brilho para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia antes e após ensaio de alteração acelerada	130
TABELA 6.5 Valores de microdureza <i>Knoop</i> para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia antes e após ensaio de alteração acelerada	131
TABELA 6.6 Cálculo do índice de alterabilidade para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia	131

ÍNDICE DOS QUADROS

QUADRO 2.1 Métodos e ensaios de durabilidade das rochas	9
QUADRO 2.2 Valores médios de poluentes atmosféricos da orla de Fortaleza em 2003....	28
QUADRO 4.1 Coluna Estratigráfica Proposta para Área	57

RESUMO

Nesta pesquisa procurou-se simular as condições de atmosfera quimicamente agressiva (atmosfera marinha) por meio da exposição dos gnaisses Casablanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia em duas distintas câmaras climáticas de névoa salina, que permitiram a realização de ensaios do tipo contínuo e cíclico. Os ensaios tecnológicos de controle e as análises realizadas visaram à compreensão e interpretação das alterações observadas ao final dos respectivos tempos de exposição. Para escolha das propriedades tecnológicas avaliadas foram considerados os graus de influência e/ou de dependências no processo de alteração das rochas, bem como o espaço físico da câmara que delimitou as dimensões das amostras que foram expostas e o número de corpos-de-prova que foi ensaiado. No ensaio contínuo foi utilizada a câmara Modelo Bass USC com a temperatura mantida em $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$, a pressão de ar comprimido em 70 KPa e a solução de ensaio a 5% de NaCl com pH entre 6,5 e 7,2. O acervo exposto nesta câmara salina compreendeu então 73 (setenta e três) corpos-de-prova representando os três gnaisses que foram retirados ao final de 360, 720 e 1080 horas de exposição para realização de ensaios tecnológicos de controle, com a finalidade de monitorar qualitativamente as alterações ocorridas durante os respectivos períodos de exposições. No ensaio cíclico foi utilizada a câmara Modelo BASS MP-GS-01/2004, tendo sido composto por 30 ciclos onde foram alternadas 6 horas de névoa salina com 12 horas de secagem para cada ciclo concluído. Para este ensaio a temperatura foi mantida em $(40\pm 5)^{\circ}\text{C}$, a pressão de ar comprimido em 70 KPa e a solução de ensaio a 10% de NaCl com pH entre 6,5 e 7,2. O acervo exposto compreendeu 18 (dezoito) corpos-de-prova na forma de cubos com 5cm de arestas, representando os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia. Estas amostras foram retiradas ao completar 15 ciclos, para inspeção visual e registro fotográfico, e ao final de 30 ciclos, para pesagem em balança semi-analítica e avaliação das alterações ocorridas durante o respectivo período de exposição. As duas abordagens de ensaio acelerado, tanto contínuo quanto cíclico, permitiram concluir que os três gnaisses em estudo sofreram alteração com redução do brilho e perda de massa, quando

expostos à atmosfera salina. Essa última tem reflexo direto na diminuição da resistência mecânica dessas rochas, como um todo. Dentre os três litotipos estudados o Falésia foi aquele que sofreu mais evidente processo de alteração, conseqüência do seu intemperismo natural e sistema poroso mais favorável a percolação do *spray* salino e cristalização dos sais. Os resultados obtidos permitem inferir que neste estudo o processo de degradação física foi mais evidente; as amostras intempericamente alteradas responderam mais rapidamente aos ataques de degradação; a susceptibilidade dos gnaisses a alteração foi determinada por dois fatores, a porosidade, que tem controle sobre a forma de penetração da solução salina e quantidade de sal que migra para o interior da rocha, o que influencia no nível de pressão de cristalização exercida na mesma e a dimensão dos grãos (média a grossa), que aumenta a susceptibilidade à degradação na presença de sal.

ABSTRACT

In this research, aggressive atmosphere conditions (marine atmosphere) were simulated using three commercial rock types (Casablanca, Delicato and Falésia). The gneisses were located in two different saline mist weathering chambers that operating in continuous and cyclical tests process type. The technological tests for control and analyses allowed the understanding and interpretation of the observed weathering processes after respective time of exposition of the stone. The choice of technological properties was guided by the influence and/or dependence degree of weathering processes with the saline chamber dimensions (influence on size and number of samples). The continuous test method have used a chamber Model Bass USC with the temperature kept in (35 ± 2) °C, the air pressure compressed in 70 KPa and the saline solution (5% of NaCl) with pH values between 6.5 and 7.2. In that test, the gneisses were represented by 73 (seventy three) samples in the chambers that had been removed at the end of 360, 720 and 1080 hours of exposition hours to the control technological tests, in order to monitoring alterations occurred during the respective exposition. The cyclical test have used chamber Model BASS MP-GS-01/2004. For this test, the samples passed by 30 cycles alternated with saline mist for 6 hours and 12 hours of drying for each concluded cycle. The temperature was kept in (40 ± 5) °C, the air pressure compressed in 70 KPa and the saline solution (10% of NaCl) with pH between 6.5 and 7.2. In that test the gneisses were represented by 18 (eighteen) 5 cm cubic samples in the chambers. These samples had been removed after completing 15 cycles, for visual inspection and photographic register. After 30 cycles, the samples have been weighed in analytical scale and evaluated alterations during the respective exposition period. The two chosen ways (continuous and cyclic accelerated tests) allow concluding that the rocks in study showed loss of mass and brightness, after exposed to saline atmosphere. That fact brings consequences as reductions of mechanic resistance of these rocks, as a whole. Amongst the three studied rock types the Falésia had more evident weathering, mainly because of the previous weathering state and favorable porosity system for salt percolation and crystallization. The results indicate that, in this study, the process of physical degradation was most evident. The naturally weathered

samples have shown faster results when exposed to aggressive atmosphere. For the analyzed rocks, the weathering tendencies were determined by two main factors: the porosity, that influenced the percolation mode of the saline solution and amount of salt that moves towards inside the rock, what influences in the level of crystallization pressure exerted in same and the grain size (in this case, medium and coarse) that increase degradation susceptibility in salt presence.

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização da pedra remonta à história da humanidade, quer de forma rudimentar quer em grandes construções, prevalecendo nestas últimas seu uso com funções estruturais. Na atualidade, sua utilização se faz predominantemente como revestimento, na busca da durabilidade e agregação de valor estético aos empreendimentos.

Durante a dominação romana, grandes edificações foram construídas utilizando principalmente calcários e em menor escala mármore e arenitos, por serem os litotipos mais representativos da ambiência geológica até então conhecida, e por oferecerem melhores condições de manuseio, permitindo, no caso dos calcários jurássicos, melhores detalhes de cantaria rendilhados.

Estas edificações resistiram à ação destruidora do tempo, tendo perpetuado a história da humanidade. No entanto, um expressivo aumento na deterioração das estruturas de nossas heranças arquitetônicas tem sido observado durante o último século, mais concretamente após o desenvolvimento da atividade industrial. Toda a atmosfera gasosa poluente imprime ação nefasta quando, reagindo em meio úmido, acidifica as águas das chuvas que lixiviam elementos constitutivos (minerais, elementos químicos componentes, etc.) dos monumentos expostos às intempéries.

A proteção dessa herança arquitetônica tem importância cultural e histórica, como também substancial valor econômico. Grande soma de recursos vêm sendo empregada pelo mundo inteiro nas medidas de prevenção e recuperação dos monumentos e construções históricas. Surgiu à necessidade da otimização dos procedimentos de análises de deteriorações, o controle de seus processos, além do desenvolvimento de sistemas de monitoramento e previsão de deteriorações.

As décadas passadas tiveram um nível de pesquisas sem precedente nesta área, no entanto dificuldades residem no fato de tratarem em sua maioria de rochas de composição carbonáticas, por serem as constituintes mais comuns das grandes

edificações históricas. No entanto, as edificações mais recentes são revestidas por diferentes tipos de rochas, predominando às denominadas “graníticas”, cujos processos de alteração são igualmente importantes, tanto do ponto de vista econômico quanto de segurança dessas edificações.

A proteção que os revestimentos exercem, segundo Flain (1997), está associada à durabilidade da rocha e do componente de fixação, servindo de escudo contra a ação dos agentes agressivos que atuam na superfície e estrutura das edificações.

No contexto de aplicação como revestimento de interiores e exteriores, as rochas devem atender aos seguintes requisitos de qualidade para apresentar um bom desempenho: alta resistência ao intemperismo e aos agentes químicos agressivos quando usada em revestimentos de exteriores; baixa capacidade de absorção de líquidos para evitar manchamentos e deteriorações; baixa dilatação térmica para garantir a estabilidade do revestimento; baixa condutividade térmica para promover conforto térmico; alta resistência à flexão para suportar a ação dos ventos e boa resistência ao desgaste para serem usadas como piso.

Os materiais rochosos usados como revestimentos de edificações tendem a se modificar e deteriorar, naturalmente, com o tempo. Esse processo pode ser acelerado em condições climáticas agressivas, a exemplo da atmosfera de Fortaleza, responsável por prejuízos causados na rede de energia, em equipamentos eletro-eletrônicos, alvenarias, estruturas metálicas e de concreto, e nos diversos tipos de revestimentos, através do processo de corrosão atmosférica.

Historicamente, a classificação do ambiente atmosférico está baseada na localização geográfica e nos poluentes atmosféricos associados entre si que contribuem para suas relativas corrosividades. Sendo assim, um ambiente marinho é caracterizado pela proximidade em relação ao oceano e, conseqüentemente, pela atmosfera salina que pode produzir danos severos de corrosão nos diversos materiais, acelerando a deterioração dos sistemas de revestimentos cuja função básica corresponde à proteção, e no caso específico das rochas ornamentais também a função estética que é considerada de relevante importância.

O principal responsável pela atmosfera marinha corrosiva é o cloreto (Cl^-), íon derivado de cloreto de sódio, soprado pelos ventos no sentido do oceano para o continente. Se for acrescido o fato de se tratar de uma área urbana teremos que considerar, ainda, outros contaminantes como o SO_2 , CO_2 , materiais particulados liberados pelos automóveis, e menos freqüentemente fuligem das chaminés domésticas.

A presença simultânea, na atmosfera contaminada, do (Cl^-) e demais elementos, tem um efeito sinérgico na degradação das rochas e monumentos. O SO_2 deixa como vestígio as crostas negras tão típicas nos monumentos construídos com rochas calcárias e que são encontradas, também, nos revestimentos de edifícios com placas dos mais diferentes tipos de rochas. O CO_2 é um componente do ar atmosférico, mas quando presente em excesso devido à queima de madeira, carvão, papel e outros materiais, impede que parte do calor terrestre seja irradiado prontamente para o espaço, devido à absorção da radiação infravermelha, sendo responsável pelo efeito estufa. Os particulados são partículas sólidas (poeiras) ou líquidas (gotículas) que permanecem em suspensão no ar e perfazem cerca de 5%, em peso, dos poluentes atmosféricos, sendo constituídas 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 entre outros.

O resultado das reações entre estes contaminantes é danoso para os materiais pétreos, provocando em alguns casos o colapso total dos mesmos. Daí a necessidade de conhecermos os mecanismos de atuação destes componentes atmosféricos, como forma de subsidiar o planejamento de medidas preventivas e/ou de recuperação desses materiais.

O objetivo deste estudo experimental, desenvolvido por meio da simulação da ação de atmosfera marinha em rochas graníticas, é tentar prever as deteriorações destes materiais nesta situação específica de uso, associando a questão da durabilidade aos critérios de escolha dessas rochas.

Ressalta-se que este trabalho está focado, tão somente, no avanço do conhecimento das rochas graníticas utilizadas como rochas ornamentais, em resposta a uma demanda atual da sociedade. Outrossim, acredita-se que somente

estudando profundamente os processos de evolução dos materiais e os mecanismos que os governam poderá obter-se, além do conseguinte avanço no conhecimento científico, objetivo prioritário em todo trabalho de pesquisa, uma base sólida que permitirá a tomada de decisões com certa garantia de êxito.

1.2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho tem como objeto de investigação o comportamento de rochas de revestimento expostas em ambientes litorâneos com a finalidade de obter informações quanto à alterabilidade potencial das mesmas, ocasionada pela ação dos principais agentes intempéricos que compõem estas atmosferas.

Nesta pesquisa foi levada em consideração a alteração na resistência mecânica da rocha, a redução de brilho, mudanças na velocidade de ondas ultrassônicas, variações na porosidade e absorção, perda de massa e as modificações químicas ocasionadas.

A agressividade da atmosfera de Fortaleza, responsável por prejuízos causados em redes aéreas de distribuição de energia, alvenarias/estruturas e rochas ornamentais aplicadas em edificações motivou o desenvolvimento desta pesquisa (Figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4).

Pesquisas realizadas pela Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial - NUTEC apontam o cloreto como o poluente atmosférico comum que mais se destaca, em valores relativos e absolutos, em quase toda a área do Estado do Ceará.

Dados obtidos na região praiana da “Cofeco” (localizada à 20km do centro de Fortaleza) e na “Praia do Futuro” (localizada à 10km do centro de Fortaleza) durante o período compreendido entre os meses de fevereiro a junho, período de chuva e de menor velocidade dos ventos, registraram valor médio de **1.500 mg.Cl/m².dia**, e no decorrer do intervalo dos meses de julho a janeiro, o valor médio de **3.500 mg.Cl/m².dia**. O projeto de Norma ISO DP 9223 estabelece um limite máximo de classificação de salinidade S3 entre **300 mg.Cl/m².dia < S3 ≤ 1.500 mg.Cl/m².dia**.

Assim, os valores encontrados na “Cofeco” e “Praia do Futuro” são muito superiores aos normalizados, durante parte do ano.

Considerando os dados meteorológicos de: umidade relativa média mensal no ano, em torno de 75-80%; temperatura média mensal no ano, entre 27-30°C; e as médias mensais de 250 horas de insolação durante todos os meses do ano, teremos um somatório de condições favoráveis ao desenvolvimento dos processos que provocam a corrosão pela exposição atmosférica.

Conforme mencionado anteriormente, na literatura corrente é encontrado farto número de trabalhos abordando a deterioração das rochas carbonáticas (mármore e calcários) por terem sido os materiais rochosos mais abundantemente utilizados no passado.

Relativamente às rochas graníticas, poucos são os estudos realizados, a maioria delas ainda não reproduzindo ou investigando detalhadamente os mecanismos geoquímicos das deteriorações mais comuns destes litotipos, sendo este outro fator que contribuiu para o desenvolvimento desta pesquisa.



Figura 1.1 – Efeito da corrosão num pilar de sustentação, em concreto, de edificação localizada na Praia do Futuro.



Figura 1.2 – Efeito da corrosão numa laje de concreto da mesma edificação.



Figura 1.3 – Escamação em placa granítica, assemelhando-se a uma espécie de corrosão superficial (peitoril da janela). Apartamento localizado na Avenida Beira Mar em Fortaleza-Ce.



Figura 1.4 – Revestimento externo em prédio, localizado na Avenida Beira Mar (Fortaleza-Ce), apresentando surgimento de manchas ferruginosas esparsas, devido a provável oxidação de minerais máficos.

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTADO DA ARTE

As publicações referentes à degradação de rochas ornamentais são frutos de estudos interdisciplinares que buscam explicar a causa específica de degradação pelo meio, compreendendo o efeito do sinergismo do agente degradante, evidente no produto de alteração de um material lapídeo.

Estas pesquisas podem ser enquadradas em três categorias principais:

- Métodos indiretos: baseiam-se nas características petrofísicas para deduzir a durabilidade de uma rocha, considerando também os fatores ambientais que atuam sobre a mesma. Assim, a composição, textura, sistema poroso e determinadas propriedades físicas, especialmente as hídricas, constituem pontos de apoio que contribuem para a previsão da alterabilidade de um material rochoso;
- Métodos comparativos: deduzem o comportamento de um material pétreo a partir do conhecimento prévio que se tem do mesmo ou de outro de características similares. Os diferentes níveis de degradação observados em monumentos e edifícios históricos, expostos aos agentes de alteração ao longo dos anos e em ambientes e climas distintos, constituem um bom indicador da durabilidade real desses materiais sob diversas circunstâncias, podendo ser tomados como pontos de referência para outros materiais idênticos ou similares.
- Métodos experimentais: em alguns casos, além da caracterização petrofísica e das referências prévias, é conveniente recorrer a ensaios de laboratório, onde as amostras de rocha devem ser submetidas ao ensaio de “envelhecimento artificial acelerado” ou, “ensaio de durabilidade” ou de “alteração acelerada”, ou, ainda, “ensaio acelerado de corrosão” como são normalmente conhecidos e diferentemente denominados.

A maioria dos estudos se situa na primeira categoria, métodos indiretos. Estes têm uma notável importância por que constituem a base na qual se fundamenta a

hipótese relativa ao mecanismo de degradação, mas somente quando contém dados precisos relativos ao contexto no qual o material se alterou após sua aplicação final, porém nem sempre é o que se obtém.

Um número muito restrito de estudos se enquadra na segunda categoria isto é métodos comparativos ou de avaliação *in situ*; a maior parte dessas pesquisas é limitada ao monitoramento dos parâmetros atmosféricos, como clima de degradação, transformando-se num instrumento útil somente para a situação/ou caso em que foi aplicado com a finalidade de compreender a troca atmosfera-material.

A terceira categoria de estudos, relativa aos métodos experimentais ou testes de degradação artificial, tem mostrado nos últimos anos um certo avanço, graças a uma série de programas de pesquisa envolvendo diversos países, promovidos pela Comunidade Econômica Européia - CEE e outros organismos internacionais.

Os ensaios de degradação artificial (ou alteração acelerada) funcionam como apoio aos diagnósticos de durabilidade das rochas que tentam prever ou avaliar o comportamento das mesmas quando aplicadas, com o objetivo de evitar uma degradação prematura.

De um modo geral, estes ensaios são interpretados em termos comparativos, sendo ainda difícil estabelecer as funções de transferência dos comportamentos em laboratório para a vida real.

O objetivo final de todo estudo de durabilidade é, em último caso, a avaliação do desempenho das rochas empregadas em edificações, considerando suas funções dentro da obra, durante um longo período de tempo sem que as mesmas apresentem mudanças inaceitáveis de aparência, propriedades ou perda de sua integridade física.

O Quadro 2.1 resume os métodos e ensaios mais utilizados para avaliar a durabilidade das rochas.

Quadro 2.1 – Métodos e ensaios de durabilidade das rochas

<p><i>1- Indiretos:</i></p> <ul style="list-style-type: none">- Caracterização petrofísica <p><i>2- Comparativos:</i></p> <ul style="list-style-type: none">- Comparação de deterioração <p><i>3- Experimentais (ensaios de durabilidade):</i></p> <ul style="list-style-type: none">- Em tempo real: exposição à intempérie.- Acelerados: ensaios de envelhecimento artificial<ul style="list-style-type: none">- Básicos:<ul style="list-style-type: none">• Ciclos de umedecimento e secagem• Ciclos de congelamento e degelo• Ciclos de cristalização de sais- Atmosferas controladas:<ul style="list-style-type: none">• Atmosferas contaminadas• Névoa salina• Chuva ácida- Outros:<ul style="list-style-type: none">• Ataque com soluções agressivas• Exposição à radiação ultravioleta• Desmoronamento• Ciclos térmicos• Ensaios combinados
--

No âmbito de um projeto prioritário da Comissão Europeia, sobre Ciência e Tecnologia ao Serviço do Meio Ambiente, foram desenvolvidas pesquisas cujo objetivo principal foi a proteção e conservação do Patrimônio Cultural Europeu. O estudo do comportamento dos materiais pétreos, utilizados como rochas ornamentais e de construção, vem desde então contribuindo para a manutenção e

restauração do Patrimônio Histórico Mundial, além de fornecer subsídios para o conhecimento e utilização adequados desses materiais na atualidade e finalmente para o avanço científico da ciência dos materiais.

A especialização dos pesquisadores engajados no projeto *Protection and Conservation of European Cultural Heritage-STEP-CT-90-0101*, foi diversificada de forma que trabalhou um grupo multidisciplinar composto por espanhóis, franceses e portugueses buscando atender a complexidade envolvida nestas pesquisas.

Dentre as publicações resultantes desse trabalho conjunto, será dado maior destaque, aqui, às pesquisas em que foram abordados os comportamentos dos materiais pétreos em ambientes distintos, principalmente aquelas que retrataram alterações de rochas graníticas em atmosferas agressivas.

Rivas *et al* (2003) estudaram o comportamento de cinco granitos do NW da Espanha submetidos à exposição em câmara de névoa salina, sob condições de atmosfera controlada. Foram utilizadas como solução o cloreto de sódio e água do mar, revelando ao final diferentes morfologias de alteração para cada uma. Em ambos os testes, os íons mais abundantemente encontrados foram Cl^- e Na^+ . Contudo, obviamente nas amostras ensaiadas com água do mar outros íons estavam presentes, modificando a solubilidade do NaCl e, por conseguinte, sua mobilidade e seus efeitos deteriorantes. Verificaram que a perda de peso das amostras expostas ao NaCl foi bem mais expressiva do que para aquelas expostas a água do mar, e que para o primeiro a perda de peso foi contínua durante todo o teste, enquanto para o segundo houve ligeiro e prolongado aumento de peso, decrescendo um pouco somente ao final do teste. Os mapas obtidos com SEM-EDAX (*Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Analyses X-Ray*) e as análises de sais solúveis revelaram níveis mais altos dos íons cloro e sódio em maior profundidade para as amostras expostas à água do mar e em menor profundidade para aquelas expostas à solução salina. Isto se deveu à diminuição da solubilidade do NaCl, na presença de outros íons, reduzindo a mobilidade do cloro e sódio e conseqüentemente dificultando o acesso, dos mesmos, de volta à superfície, o que explica o aumento inicial de peso nas amostras. Estes autores verificaram, também, que as amostras expostas ao NaCl apresentaram preferencialmente alteração por desagregação granular, enquanto as expostas à água do mar

apresentaram desagregação granular vinculada à formação de pequenas lascas ou destacamentos, semelhantes aos observados em ambientes naturais de zonas costeiras.

Cardell *et al* (2003) também realizaram testes de envelhecimento artificial com névoa salina (água do mar) procurando simular os efeitos produzidos em granitos e rochas sedimentares sob condições ambientais costeiras. Análise microestrutural e o estudo de secções delgadas revelaram que os destacamentos foram causados exclusivamente por processos físicos de cristalização e dissolução dos sais. Esses sais se cristalizaram em fissuras pré-existentes e exerceram pressões maiores do que a resistência do material, provocando o surgimento de novas fissuras e aumento na porosidade. Por fim, constataram que a susceptibilidade dessas amostras de granitos à alteração foi determinada por três fatores: a porosidade, a dimensão dos grãos e o sistema de poros das rochas.

Cooper *et al* (1991) estudaram rochas de diferentes durabilidades aplicadas no Trinity College de Dublin, onde o calcário de Portland é utilizado somente no contorno das janelas enquanto o resto do edifício é revestido em granito. Este último mostra, contrariamente a todas as previsões, uma considerável degradação localizada, sobretudo quando associado ao calcário. Para analisar este fenômeno em laboratório foram postos corpos-de-prova destes materiais numa câmara climática com spray ácido durante três meses, com alternância de ciclo seco e úmido procurando reproduzir a atmosfera local. As amostras foram colocadas, ora isoladas ora agrupadas, de modo que o produto da lixiviação da rocha carbonática escorresse sobre o granito numa simulação do que aconteceu no referido edifício. Foi observado que as chuvas ácidas provocavam a dissolução do calcário depositando sobre a superfície do granito o produto desta dissolução. Ao final deste ciclo iniciava-se a evaporação (ciclo seco) e os sais cristalizavam provocando desagregação nos corpos de prova graníticos devido à pressão de cristalização exercida nas paredes dos poros.

Azzoni *et al* (1992) compararam o resultado da degradação em amostras, de diorito e mármore, submetidas a diversos ensaios acelerados: ensaio em câmara climática de névoa ácida, ciclo de gelo-degelo, ensaio de envelhecimento acelerado com raios ultravioleta e ensaio de cristalização por imersão total. Eles verificaram

que todas as técnicas de degradação, com exceção da exposição ao raio ultravioleta, produziram alterações irreversíveis nas rochas examinadas e que os ensaios mecânicos são aqueles que melhor evidenciam tais degradações.

Trujillano *et al* (1994), submeteram três espécies de granitos ao ensaio de cristalização salina, com sulfato de sódio e fosfato, segundo o procedimento padrão e um outro modificado. O grau de decaimento atingido foi diferente para cada tipo de rocha, variando de acordo com as suas propriedades petrofísicas, e foi quantificado pelas mudanças na textura, cor e remoção de massa nas superfícies testadas. O ensaio que obedeceu ao procedimento padrão provocou alterações nas superfícies das rochas logo nos primeiros ciclos, enquanto o ensaio modificado inicialmente conduziu a um baixo grau de decaimento, somente exibindo súbito e intenso fissuramento a partir do 12º - 15º ciclos.

Marini (1994) verificou que a degradação dos materiais rochosos pode ser avaliada quantitativamente com base na variação da resistência à flexão entre o material *in natura* e alterado. Concluiu ainda que a variação do coeficiente de embebição não é um indicador seguro de degradação, principalmente em se tratando de rochas carbonáticas, uma vez que a transformação do carbonato em sulfato provoca aumento de volume e muitas vezes diminuição da dimensão dos poros. A pesquisa forneceu parâmetros padrões para ensaios de envelhecimento acelerado, com a finalidade de avaliar a degradação dos materiais rochosos em atmosferas industriais de climas frios, determinando 25 ciclos de gelo-degelo acrescidos a 100-150 horas de exposição em câmara climática de névoa ácida.

No Brasil as pesquisas em degradação de rochas ornamentais ainda são incipientes registrando-se um pequeno número de trabalhos em alteração acelerada e, dentre estes, somente Frascá (2003) verificou a degradação de materiais rochosos por meio de câmara climática.

Figueiredo *et al* (2001) determinaram um índice de alterabilidade para o granito Rosa Iracema, baseado em ensaios cíclicos constituídos por um período de 10 minutos de insolação, seguido de arrefecimento/imersão em água por 5 minutos. O ensaio foi executado a seco, utilizando água do mar e água deionizada, evidenciando ao final o papel destrutivo das sucessivas ações de secagem e molhagem alternantes. Os controles de decaimento foram, entre outros: refletância,

variação do 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) avaliou a alterabilidade dos granitos explorados na jazida do Branco Ceará, através de ensaios de lixiviação contínua com extrator Soxhlet e de resistência ao ataque químico, sendo as quatro variedades estudadas mais intensamente atacadas pelas soluções à base de ácidos clorídrico e cítrico. No ensaio de lixiviação contínua foram tomados como base para a análise da alterabilidade os resultados dos índices físicos que mostraram deteriorações em todas as amostras estudadas, sendo, no entanto, o Granito Clássico aquele que sofreu maior degradação. Por fim concluiu que o comportamento das rochas estudadas foi controlado diretamente pela conjugação dos aspectos composicionais, texturais e estruturais das mesmas.

Frasca (2003) realizou estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas mais comumente empregadas na construção civil, onde se revelaram mais eficientes os ensaios de exposição à névoa ácida e salina além da imersão parcial em ácido sulfúrico. Os resultados obtidos mostraram diferentes susceptibilidades das rochas estudadas à deterioração, com formas e intensidades variáveis (oxidação de minerais, eflorescências, escamações e outras) diretamente relacionadas com suas propriedades intrínsecas e à situação simulada.

2.2 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

No caso das atmosferas controladas, os materiais a serem ensaiados são expostos no interior das câmaras, sob a ação de atmosferas artificiais com características específicas que normalmente as tornam mais agressivas do que as atmosferas naturais, com o objetivo de acelerar a deterioração desses materiais em curto espaço de tempo.

Neste trabalho foram realizados ensaios acelerados cíclicos e contínuos em câmaras climáticas de névoa salina, razão pela qual se descrevem a seguir detalhamentos da metodologia dos mesmos.

- **Exposição à Névoa Salina**

O ensaio de durabilidade acelerado por exposição à névoa salina baseou-se nas normas ABNT NBR 8094 (ABNT,1983b) e ASTM B117 (ASTM,1997).

Esse ensaio consiste da exposição de corpos-de-prova, em câmara de névoa salina (*salt spray*), dispostos de forma a não entrarem em contato entre si. Os corpos-de-prova devem ser posicionados, também, de forma a permitir o livre acesso da névoa aos demais, sem que haja gotejamento da solução escorrida de um corpo-de-prova sobre outro. A área de contato entre o corpo-de-prova e seu suporte deverá ser a menor possível (Figura 2.1 a e b).

A zona de exposição da câmara de ensaio deve ser mantida a uma temperatura de $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e a pressão de ar comprimido, utilizado para a formação de névoa salina, a um valor constante de 70KPa (Figura 2.2 a e b).



Figura 2.1. a e b – Vista do interior da câmara climática de ensaio contínuo em névoa salina (Modelo Bass USC) exibindo corpos-de-prova suspensos por fios de nylon.



Figura 2.2. – Vista da câmara climática de ensaio contínuo em névoa salina (a) e detalhe do painel onde se tem o controle de temperatura, vazão de líquido e pressão de ar do bico pulverizador (b).

A solução aquosa de aproximadamente 5% de cloreto de sódio (NaCl) é preparada pela dissolução de (50 ± 5) g de cloreto de sódio num volume de água que permita a obtenção de 1 litro de solução, à temperatura ambiente. A água utilizada para a preparação da solução deve ser destilada ou desmineralizada. A solução de ensaio deve ter seu pH entre 6,5 e 7,2 e ser filtrada, a fim de prevenir a obstrução dos bicos de pulverização, devendo ser pulverizada uma única vez.

Os corpos-de-prova ficam permanentemente no interior da câmara, com curtos períodos de interrupção do ensaio necessários para inspeção, rearranjo ou remoção das amostras, bem como para suprimento da solução e outros ajustes. Os períodos de interrupção devem ser computados na duração do ensaio, sendo reduzidos ao mínimo de acordo com a programação operacional.

Os corpos-de-prova devem ser limpos após o ensaio, removendo-os da câmara de ensaio cuidadosamente e lavando-os em seguida em água corrente à temperatura inferior a 40°C , a fim de eliminar os depósitos de sal da superfície. Ao final deve-se proceder à secagem.

Após a secagem dos corpos-de-prova deve ser efetuada uma cuidadosa avaliação das alterações, bem como realizada a fotodocumentação e registro em planilha.

Na câmara de atmosfera artificial com névoa salina, a absorção e penetração da solução no interior da amostra de rocha, por meio de seus poros, se processam no primeiro minuto de exposição ao *spray* salino, sendo que posteriormente, durante o ciclo de secagem, essa solução salina migra do interior da amostra para sua superfície onde os sais são precipitados de acordo com a sua solubilidade.

2.3 MECANISMOS ATUANTES NA ATMOSFERA

A atmosfera é uma mistura de gases que formam uma camada de aproximadamente 400km de espessura em torno da Terra. A camada inferior (16-19km) é a parte mais importante em termos meteorológicos e de outros aspectos do ciclo biogeoquímico, sendo que os últimos 600m constituem praticamente toda a porção atmosférica da ecosfera.

Conforme Aires Barros (1991) os fatores ou agentes atmosféricos que atuam diretamente nas rochas são:

- 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.

Podem-se acrescentar, ainda, outros fatores como a temperatura da superfície das amostras e o tempo de molhamento.

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 granitoides, 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). Estes complexos mecanismos agregados nas categorias física, química e biológica, por sua vez, são dependentes do tipo de deposição que ocorre sobre as superfícies da placas de rocha podendo ser a úmido ou a seco.

Na deposição úmida os componentes da atmosfera atingem as edificações carreados pela chuva, enquanto na deposição seca os componentes da atmosfera normal ou contaminada atingem as edificações sob a forma de partículas, gases ou aerossóis transportados por ação eólica.

A deposição úmida provoca uma brusca e sincopada deposição de poluentes dissolvidos nas chuvas, enquanto a deposição seca é um processo mais lento, porém mais contínuo. Esta última, por sua vez, é comandada pelos seguintes fatores:

- De dia o fluxo das partículas será maior nas partes mais frias das superfícies expostas;
- Quer as partículas, quer os fluxos gasosos aumentam quando se dá a condensação à superfície e diminui quando ocorre a evaporação;
- Se a superfície estiver úmida, haverá maior possibilidade de aderência das partículas de colisão e de captura dos gases dissolvidos;
- A natureza química da superfície é muito importante para o início e prosseguimento do processo de reação;
- A textura da superfície é muito importante. As superfícies rugosas promovem maior deposição do que as superfícies lisas.

A poluição do ar é um fator atmosférico de extrema importância sendo um assunto bastante complexo, pois os poluentes podem advir de diversas 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.

Os particulados ou aerossóis integram a lista dos elementos poluentes mais prejudiciais para as rochas de revestimentos e constituem o foco central desta pesquisa. Podem ser definidos como uma mistura de partículas suficientemente pequenas dispersa na atmosfera sob a forma de sólidos ou de líquidos em gotas e pode ser produto da nebulização de substância líquida ou sólida (*spray* marinho ou tempestade de poeira) ou da condensação da fase gasosa (fumaça produzida pelas indústrias). Os particulados em suspensão são constituídos de partículas muito pequenas (variando de 0,005 μm até cerca de 100 μm), que podem ser transportadas em suspensão até milhares de quilômetros do local de origem.

Assumem, ainda, importância relevante as pequenas diferenças espaciais que criam gradientes entre a atmosfera e a rocha como também as variações temporárias destes gradientes que criam processos de degradação relacionados com os tempos de adaptação diferentes da atmosfera e da rocha. Deste modo geram-se fluxos de calor e de vapor entre o ambiente e a rocha.

Muitas vezes são estes fluxos que favorecem ou impedem o depósito na superfície de gases e partículas, que promovem o ingresso de vapores para o interior das rochas, que facilitam migrações de sais, a formação de eflorescências, microfraturas e a criação de condições adequadas ao desenvolvimento de organismos diversos.

Na prática, o tempo de molhamento pode ser determinado a partir dos dados meteorológicos de temperatura e umidade relativa. Este tempo seria o período em que a umidade relativa é maior que 80% em temperaturas superiores a 0°C. O valor assim determinado pode ser utilizado para estimar o período de tempo cineticamente decisivo durante o qual a degradação por atmosfera salina ocorre em ambientes externos.

2.4 PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS CONDICIONANTES NA REGIÃO

- **Ambiente Climático do Estado do Ceará**

A grande extensão territorial da Região Nordeste (1.540.827 km^2), o relevo – constituído por amplas planícies (baixadas litorâneas), por vales geralmente inferiores a 500m, entre superfícies que se alçam, muitas vezes, a cotas de 800m

nas serras da Borborema, Araripe, Ibiapaba e de 1.300m na Diamantina, adicionado à conjunção dos diferentes sistemas de circulação atmosférica, tornam a climatologia desta Região uma das mais complexas do mundo.

Esta complexidade não se traduz em grandes diferenciações térmicas, mas reflete-se em uma extraordinária variedade climática, do ponto de vista da pluviosidade, sem igual em outras regiões brasileiras.

Entretanto, apesar dos dois primeiros fatores acima citados exercerem papéis importantes na climatologia da região Nordeste, sua complexidade decorre fundamentalmente de sua posição geográfica em relação aos diversos sistemas de circulação atmosférica. Até mesmo os demais fatores, tais como o relevo, a latitude, a maior ou menor proximidade do litoral, agem sobre condições climáticas em interação com os sistemas zonais e regionais de circulação atmosférica. As correntes de circulação atmosféricas perturbadas são responsáveis por instabilidades e chuvas na Região Nordeste.

Considerando-se o total de chuvas, a marcha estacional da precipitação e o regime das secas, poucas regiões no mundo possuem tantas diversificações climáticas quanto o Nordeste brasileiro. Sabe-se que uma parte importante desta Região constitui o domínio de clima semi-árido, contudo, cerca de 50% de seu território possui climas que vão do semi-árido ao superúmido, nos quais os períodos secos decrescem em duração de 5 a 1 mês apenas, e em algumas áreas não acusam, normalmente, sequer um mês seco.

A circulação atmosférica, em geral, encontra-se regida pelos deslocamentos das massas de ar, destacando-se no Estado, a Massa Equatorial Norte (mEn), a Massa Equatorial Atlântica (mEa) e a Massa Equatorial Continental (mEc). São também de representativa influência as penetrações da Convergência Intertropical (CIT). Ressalta-se, ainda, a influência dos ventos alísios de NE (quentes e úmidos) e os SE (quentes e secos), provocando nas áreas de convergência as descontinuidades climáticas com grandes variações no Estado.

A combinação destes elementos com os fatores geográficos, tais como: latitude, orientação do litoral em relação à corrente dos alísios, o relevo, a orientação das serras, as baixas altitudes e o posicionamento do Estado com relação ao Hemisfério Sul, caracterizam as condições climáticas vigentes no espaço em estudo.

Estas são expressas por elevadas temperaturas, baixas amplitudes térmicas, baixos índices de nebulosidades, forte insolação, elevadas taxas de evaporação e principalmente, pela marcante irregularidade das chuvas no tempo e no espaço.

Foram considerados os dados climáticos e de coleta de poluentes atmosféricos locais como parâmetros para fundamentação e discussão da pesquisa em apreço.

- **Atmosfera Climática**

As regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, são submetidas a condições anômalas com períodos prolongados de seca.

A circulação atmosférica no Estado do Ceará é regida, basicamente, por três sistemas sinóticos geradores de precipitação: as frentes frias, com sua formação original no pólo Sul, a Zona de Convergência Intertropical, que oscila dentro da faixa de trópicos e um Centro de Vorticidade Ciclônica, com tempo de atuação variável dentro do período de chuvas. Além desses, outros sistemas de menor escala atuam na região, como as linhas de instabilidade formada ao longo da costa e as brisas marítima e terrestre que incidem com frequência na zona litorânea (Ceará, 1992).

Na Região Metropolitana de Fortaleza-R.M.F., o clima é razoavelmente homogêneo, estando as pequenas variações diretamente ligadas ao regime pluviométrico. Com base nos índices de precipitação média anual, pode-se esboçar o seguinte zoneamento pluviométrico:

- Uma zona predominante, em que o índice pluviométrico médio situa-se no patamar de 1.200mm a 1.400 mm e as temperaturas são mais amenas nas zonas litorâneas;
- Climas localizados, definidos em áreas de altitudes elevadas (serras de Maranguape e Aratanha/Pacatuba), onde a incidência de chuvas orográficas determina um aumento significativo da pluviometria média anual, situando-se numa faixa da ordem de 1.400mm–1.600mm. Esses setores caracterizam-se também, pela ocorrência de temperaturas mais baixas;
- Clima de condições mais secas, na porção ocidental, estando numa faixa em que a precipitação média oscila em torno de 900mm a 1.200mm, com temperaturas mais elevadas nas áreas interioranas (sertões) e mais amenas no litoral.

O regime pluviométrico é bastante variável, podendo ocorrer anos de chuvas excessivas e de precipitações escassas, com ocasionais períodos de estiagem prolongada. No decorrer do ano a distribuição também é muito irregular. Normalmente cerca de 90% das precipitações ocorrem no primeiro semestre, sendo os meses de março a maio, os mais chuvosos, concentrando aproximadamente dois terços do total. Por vezes, ocorrem chuvas excessivas em curto espaço de tempo, ocasionando as enchentes e, conseqüentemente, sérios problemas para as áreas ribeirinhas. Os meses mais secos correspondem ao período de setembro a novembro. A Figura 2.3 exibe o gráfico pluviométrico de 2003 a 2004 em Fortaleza, no qual se verifica o registro de maior incidência de chuvas no primeiro semestre do ano.

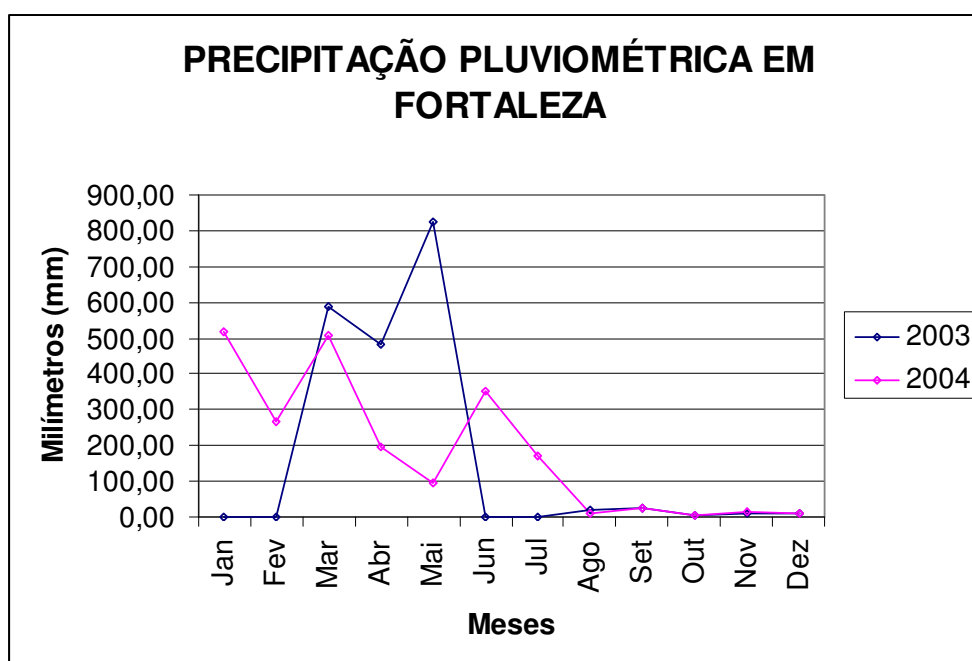


Figura 2.3. – Registros da precipitação pluviométrica mensal da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME.

A temperatura média anual nas áreas mais litorâneas é da ordem de 26°C a 27°C com máximas situando-se, com maior freqüência, entre 31°C e 32°C. Nas áreas interiores, a média atinge o patamar de 28°C, enquanto a média das máximas fica em torno de 33°C a 34°C. A média anual nas zonas de climas serranos torna-se mais amena e decai para 25°C, atingindo valores em torno de 22°C.

Em termos absolutos, as temperaturas podem elevar-se a valores próximos a 38°C, sendo mais freqüentes limites de 35°C a 37°C. Nas áreas altas, as mínimas absolutas chegam abaixo de 17°C, sendo mais comum em torno de 20°C.

A Figura 2.4 exibe o gráfico de temperaturas médias mensais registradas em Fortaleza no período compreendido entre 2003 e 2004, onde se verifica o registro de maiores temperaturas no segundo semestre do ano coincidindo com o final das chuvas.

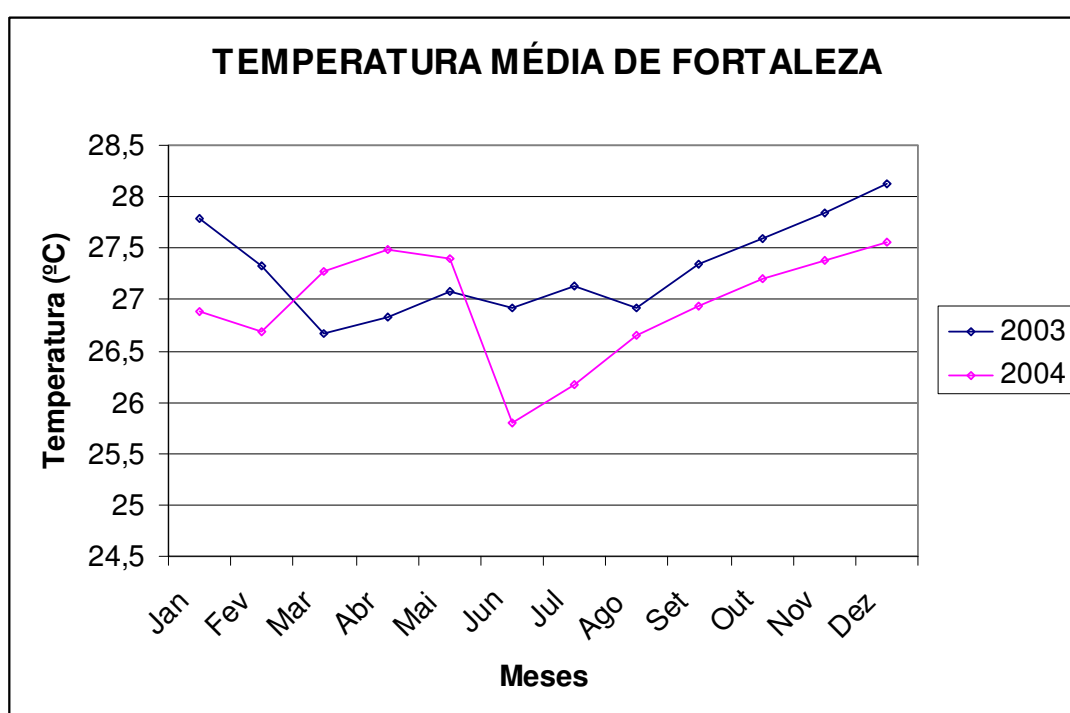


Figura 2.4. – Registros da temperatura mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME.

Outras características predominantes no panorama climático da R.M.F., com exceção das áreas topograficamente mais elevadas, são: baixos índices de nebulosidade, ventos alísios que sopram do quadrante leste, forte insolação e altas taxas de evaporação.

Conforme consta no Plano Estadual de Recursos Hídricos (Ceará, 1992), os ventos mostram uma flutuação de direção predominante entre os pontos cardeais de

nordeste e sudeste. As maiores velocidades ocorrem no segundo semestre, quando os valores médios situam-se entre 3m/s e 4m/s, enquanto no primeiro semestre, principalmente antes do início da época de chuvas mais abundantes, as velocidades reduzem-se bastante.

A Figura 2.5 exibe o gráfico de velocidades médias mensais dos ventos registradas em Fortaleza no período compreendido entre 2003 e 2004, onde se verifica o registro das maiores velocidades no segundo semestre do ano atingindo 4,92m/s e 4,71m/s.

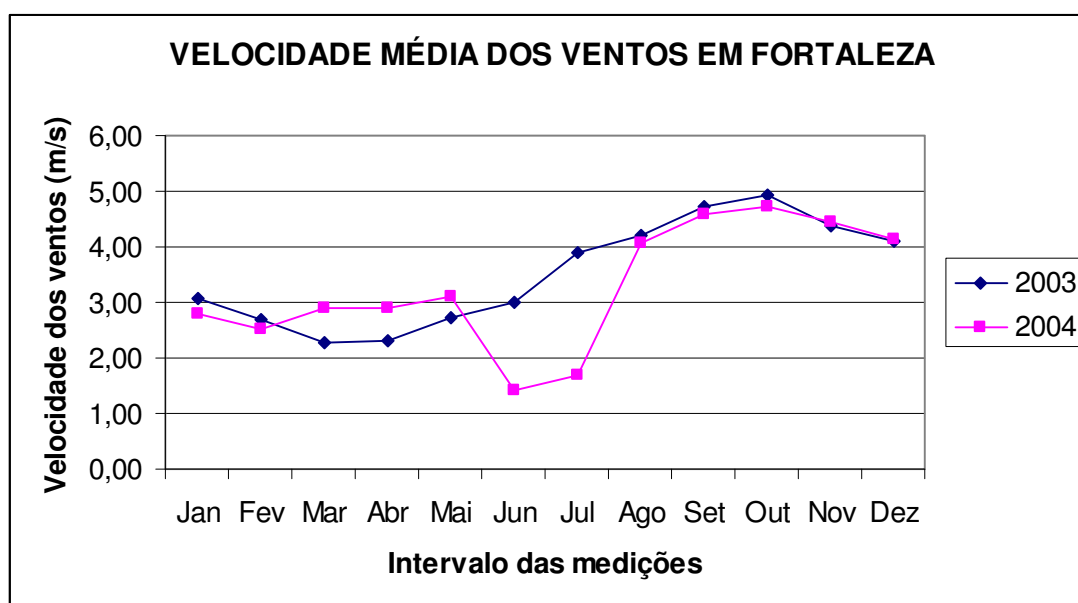


Figura 2.5. – Registros da velocidade mensal média dos ventos da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME.

Quanto à insolação, a região apresenta uma exposição média ao sol, de cerca de 2.650 horas/ano a quase 3.000 horas/ano. No decorrer do ano a incidência de luz solar atinge os menores valores, em torno de 6 horas/dia, nos meses de maior pluviosidade e, no auge da estiagem, situa-se na faixa de 9 horas/dia.

Aires-Barros (1991) realizou estudo sobre os efeitos da fadiga térmica das rochas por insolação e concluiu que esta se mostra suficiente para produzir perdas de peso relevantes, desde que as rochas estejam finamente microfissuradas gerando detritos granulares, como foi o caso do granito porfiróide biotítico utilizado no referido estudo.

A Figura 2.6 exibe o gráfico de distribuição da radiação solar mensal registrada em Fortaleza no período compreendido entre 2003 e 2004.

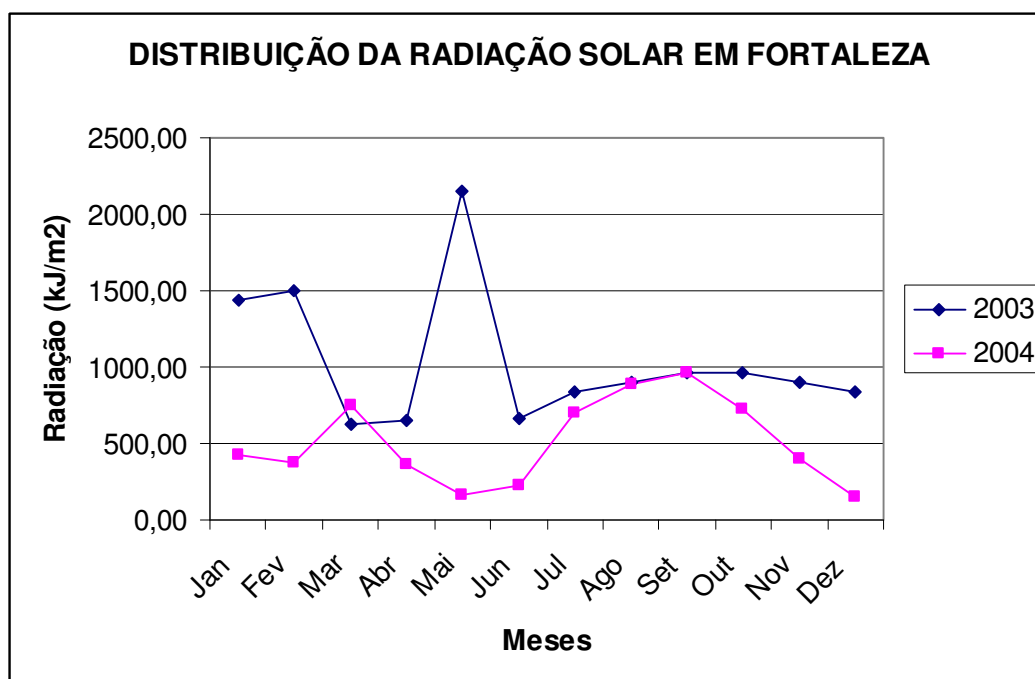


Figura 2.6. – Registros da radiação solar mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME.

Conforme Aires Barros (1991), o ciclo térmico diurno das edificações, associado à variação da umidade específica do ambiente (quantidade de vapor de água, em grama, dispersa em 1kg de ar), pode provocar ciclos de condensação/evaporação. Ainda, segundo este autor, a evaporação provocada pelo vento transportando massas de ar não saturado pode ter efeitos diferentes da evaporação provocada pelo aquecimento solar nas edificações.

A Figura 2.7 exibe o gráfico de umidade relativa média mensal em Fortaleza no período compreendido entre 2003 e 2004. Os maiores valores são registrados no primeiro semestre do ano, correspondendo ao período de maior precipitação pluviométrica.

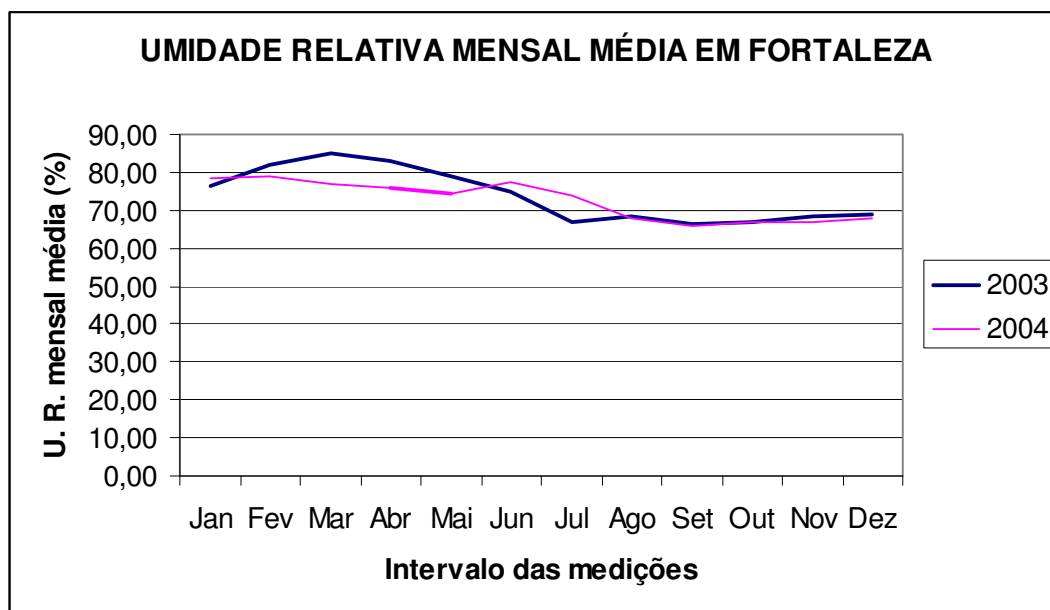


Figura 2.7. – Registros da umidade relativa mensal média da estação meteorológica de Fortaleza, no período de 2003 a 2004, medidos pela FUNCEME.

Quando a superfície da parede já não é alimentada por água capilar, a taxa de evaporação diminui e a evaporação dá-se nos poros internos. O vento favorece a lenta difusão do vapor de água e o prosseguimento do processo com o enfraquecimento mecânico do interior do material pétreo.

- **Principais Poluentes da Atmosfera Local**

Os dados obtidos dos poluentes atmosféricos na Região Metropolitana de Fortaleza-R.M.F. apresentam um somatório de condições favoráveis ao desenvolvimento de degradação por corrosão atmosférica, influenciadas pela posição geográfica local em relação aos diversos sistemas de circulação atmosférica.

A baixa pluviometria e alta velocidade dos ventos favorecem localmente a origem de algumas patologias nos materiais rochosos podendo vir a se manifestar na forma de desintegração granular e esfoliações, dentre outras, devido à influência dos aerossóis provenientes do Atlântico.

Os resultados obtidos em coletas realizadas pelo NUTEC, no âmbito do projeto de P&D da COELCE-Companhia Elétrica do Ceará/ANEEL-Agência Nacional

de Energia Elétrica intitulado Corrosão e Degradação Atmosférica dos Materiais Elétricos, mostraram que o cloreto é o mais importante poluente sobressaindo-se em valores relativos e absolutos (Figura 2.8). Estes dados permitem classificar a agressividade corrosiva da atmosfera de Fortaleza como marinha, em conformidade com Montenegro (1996).



Figura 2.8. – Teores de cloretos ($\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO.

Os valores encontrados superam em alguns meses do ano os limites de classificação de salinidade estabelecido na norma ISO DP 9223 que é $300 \text{ mg.Cl}/\text{m}^2.\text{dia} < S3 \leq 1.500 \text{ mg.Cl}/\text{m}^2.\text{dia}$.

Em valores relativos, os sulfatos determinados nas estações atmosféricas de Fortaleza, comparados quantitativamente com os cloretos e partículas sedimentáveis, se faz o poluente de menor concentração. Isto leva a acreditar que as fontes poluidoras são geradoras dos gases SO_x estáveis e próprios da área de proximidade de cada estação, e que a concentração na atmosfera não sofre influência do período chuvoso nem de maiores velocidades dos ventos. Somente o mês de outubro apresentou uma discrepância de valor, decorrente de fator desconhecido ou de algum erro de análise laboratorial, tornando o valor médio anual dos sulfatos não representativo (Figura 2.9).

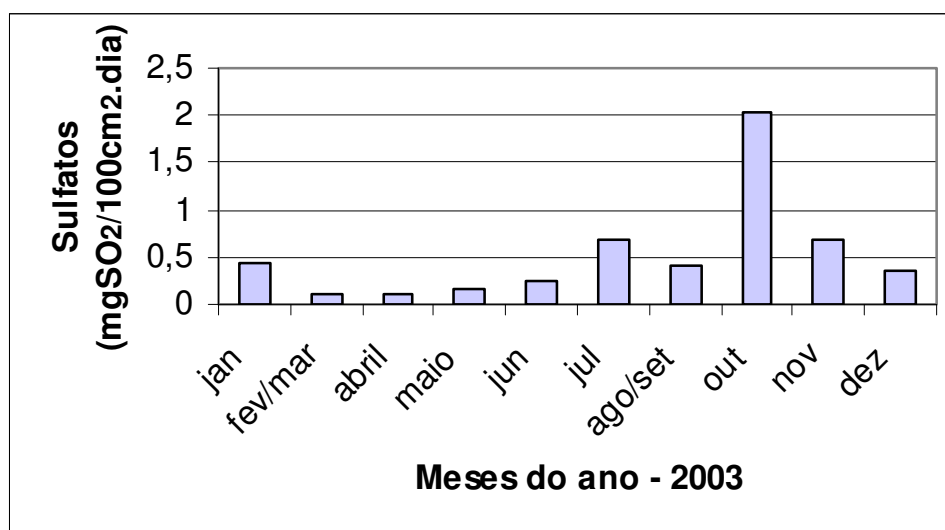


Figura 2.9. – Teores de sulfatos ($\text{mgSO}_2/100\text{cm}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO.

Os materiais particulados sofrem influência direta dos ventos que arrastam areia da praia, as quais são verdadeiros jatos de partículas sólidas provocando abrasão nas superfícies expostas das edificações que se localizam em toda a orla marítima ou em suas proximidades. No período de poucas chuvas e de aumento na velocidade dos ventos, além de não existir o efeito de lavagem sob os materiais expostos, a areia, material particulado com alta salinidade, é mais seca sendo facilmente carregada pelos ventos que vão encontrar como barreira os materiais umedecidos quer pelos aerossóis marinhos, quer pela própria umidade do ar. Como consequência, grande parte deste material particulado tenderá a ficar aderido na superfície dos revestimentos das edificações, provocando efeitos indesejáveis.

A Figura 2.10 apresenta os teores de particulados coletados na estação atmosférica Praia da Cofeco durante o ano de 2003.

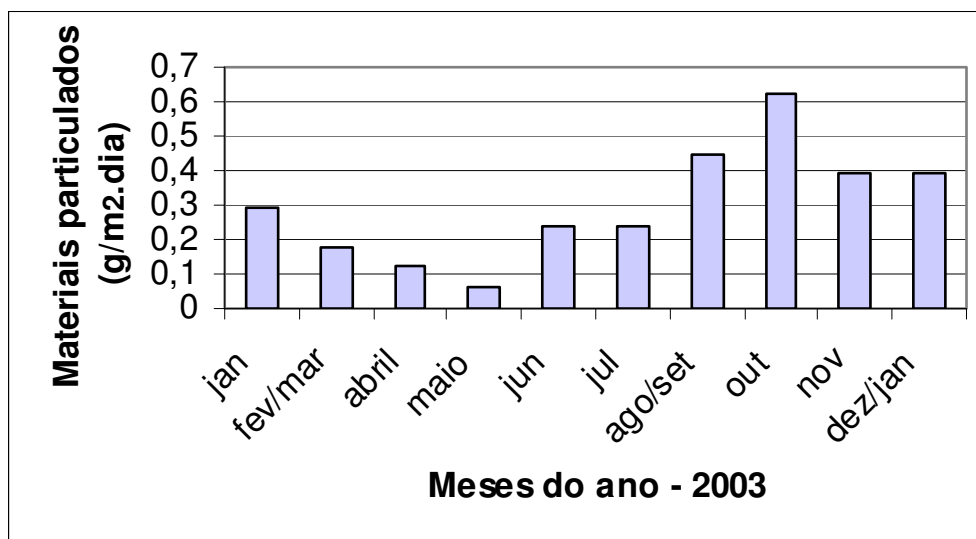


Figura 2.10. – Teores de particulados ($\text{g/m}^2.\text{dia}$) coletados na estação atmosférica Praia da COFECO.

O Quadro 2.2 apresenta os valores médios dos poluentes atmosféricos coletados na COFECO, de janeiro/2003 a dezembro/2003, com as unidades de medidas expressas dentro da mesma ordem de grandeza. Desta forma, pode-se ter um melhor comparativo da importância de cada um no ambiente atmosférico local.

Quadro 2.2 - Valores médios de poluentes atmosféricos da orla de Fortaleza em 2003

ESTAÇÃO DE COLETA	CLORETOS ($\text{mg/m}^2.\text{dia}$)	SULFATOS ($\text{mg/m}^2.\text{dia}$)	PARTICULADOS ($\text{mg/m}^2.\text{dia}$)
COFECO	815,3	41,7	248,3

Se considerarmos que a composição normal do ar é de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de dióxido de carbono, argônio e de outros gases em quantidades traços, veremos que o quantitativo de cloretos encontrado na atmosfera

de orla marítima de Fortaleza permite caracterizá-la como salina e fortemente agressiva.

Observando os dados atmosféricos apresentados pode-se sugerir que a corrosividade atmosférica na R.M.F. torna-se mais efetiva no período de poucas chuvas, maior insolação e alta velocidade dos ventos. Com poucas chuvas ou estiagem, além de não existir o efeito de lavagem sob os materiais expostos, a areia, material particulado com alta salinidade, é mais seca e facilmente carregada pelos ventos que vão encontrar como barreira os materiais umedecidos quer pelas gotículas do *spray* marinho, quer pela própria umidade do ar cujo valor médio se mantém em torno de 75% em todos os meses do ano. Presume-se que grande parte deste material particulado ficará aderida aos revestimentos das edificações (placas de rochas) atuando na superfície dos mesmos por meio de desgaste mecânico e de reações químicas.

2.5 ALTERAÇÃO DE ROCHA COMPARADA COM CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAL

A corrosividade de diferentes ambientes atmosféricos nos metais é bastante conhecida. A classificação qualitativa de atmosfera corrosiva é do tipo marinha, industrial, urbana e rural. Elas atuam na alteração de óxidos ferrosos e minerais ferrosos silicatados de forma semelhante à corrosão de metais. Minerais condutivos, como a pirita, marcassita, hematita e magnetita, podem também agir como complexos galvânicos na presença de um eletrólito. Tais minerais podem ser submetidos à corrosão eletroquímica por aeração diferencial. Enquanto metais dissimilares são conhecidos por formar células elétricas, diferentes tipos de rochas em contato direto entre si e ao apresentar alteração diferenciada contaminam a sua adjacente pela passagem de substância mineral dissolvida de uma rocha para outra. Por exemplo, calcário ou mármore sendo lixiviado para o interior de granito, como resultado da ação de sal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas a metodologia e a especificação do equipamento utilizado, como também a norma aplicada para cada ensaio ou análise.

Aborda, ainda, a localização e acesso da área fonte dos materiais utilizados nesta pesquisa.

3.1 MATERIAIS E ÁREA DE LOCALIZAÇÃO

A área fonte dos materiais objetos deste estudo situa-se na região Centro Sudoeste do Estado do Ceará, circunvizinhanças de Tróia, próximo à cidade de Pedra Branca, num total de 606,09 ha compreendidos entre 05º 31' 09" de Latitude Sul e 39º 55' 41" de Longitude Oeste (Figura 3.1).

O acesso à área partindo-se de Fortaleza pode ser feito tanto pela BR-020, quanto pela CE-021. Pela BR-020, segue-se até o Distrito de Riachão do Banabuiú (Cruzeta) num percurso de 262 km, deste ponto segue-se pela BR-226 na direção de Pedra Branca, percorrendo 12 km, até a localidade de Limoeiro, segue-se então no sentido Sul pela estrada que dá acesso ao Distrito de Tróia, num percurso de 18 km até a área.

Pela CE-021 segue-se até o município de Minerolândia, num percurso de 269 km. Em Minerolândia segue-se pela BR-226, percorrendo aproximadamente 50 km na direção de Pedra Branca, até a localidade denominada Limoeiro. A partir deste ponto segue-se o mesmo percurso descrito no roteiro anterior.

Em linhas gerais, as jazidas dos gnaisses Casablanca, Giallo Falésia e Juparaná Delicato estão inseridas em uma serra alongada de sentido SW-NE, com extensões aproximadas de 6 e 1,5 km nos sentidos longitudinal e transversal, respectivamente.

A base da serra encontra-se delineada pela curva de nível de cota 500m enquanto o cume atinge a cota 695m, evidenciando, portanto, um acentuado gradiente topográfico.

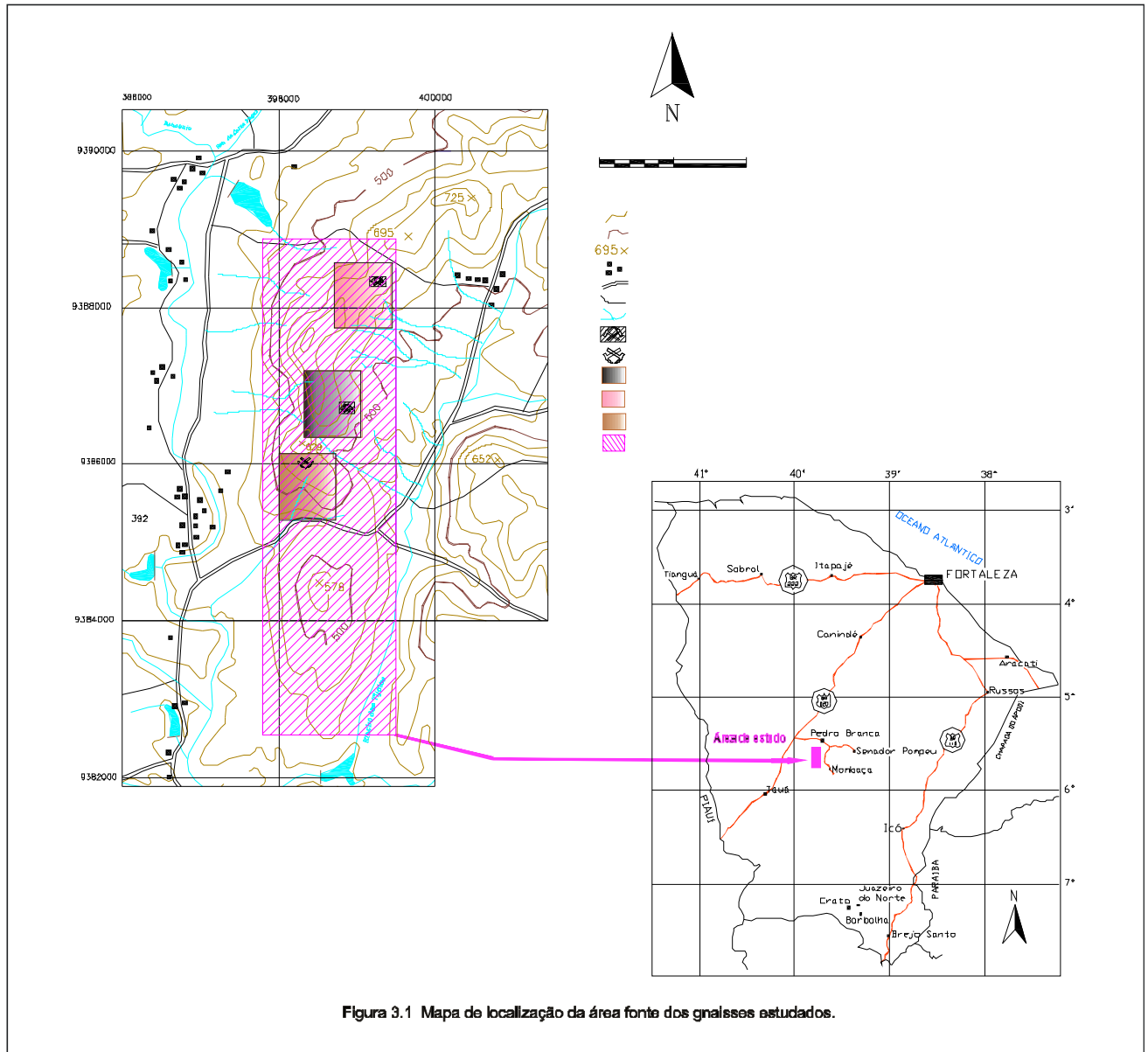


Figura 3.1 Mapa de localização da área fonte dos gnaisses estudados.

A lavra do maciço é do tipo mecanizada, com uso do fio diamantado. O desdobramento dos blocos é feito com massa expansiva e o esquadrejamento com martelos e cunhas (Figuras 3.2, 3.4 e 3.6).

São comercializadas as rochas de cor branca (Casablanca) bem como a variante intemperizada da mesma, de cor “amarelo-ferruginosa” (Giallo Falésia), e a de cor róseo (Juparaná Delicato) (Figuras 3.3, 3.5 e 3.7). Os corpos ocorrem geograficamente próximos, separados por drenagem, no caso do Giallo Falésia, o que provavelmente condicionou o fenômeno do intemperismo só nesta parte do maciço e por nível de cota, no caso do Juparaná Delicato, que somente ocorre em cotas mais altas e na porção nordeste.



Figura 3.2 – Frente de Lavra do Gnaiss Casablanca



Figura 3.3 – Placa do Gnaiss Casablanca



Figura 3.4 – Frente de Lavra do Gnaiss Juparaná Delicato

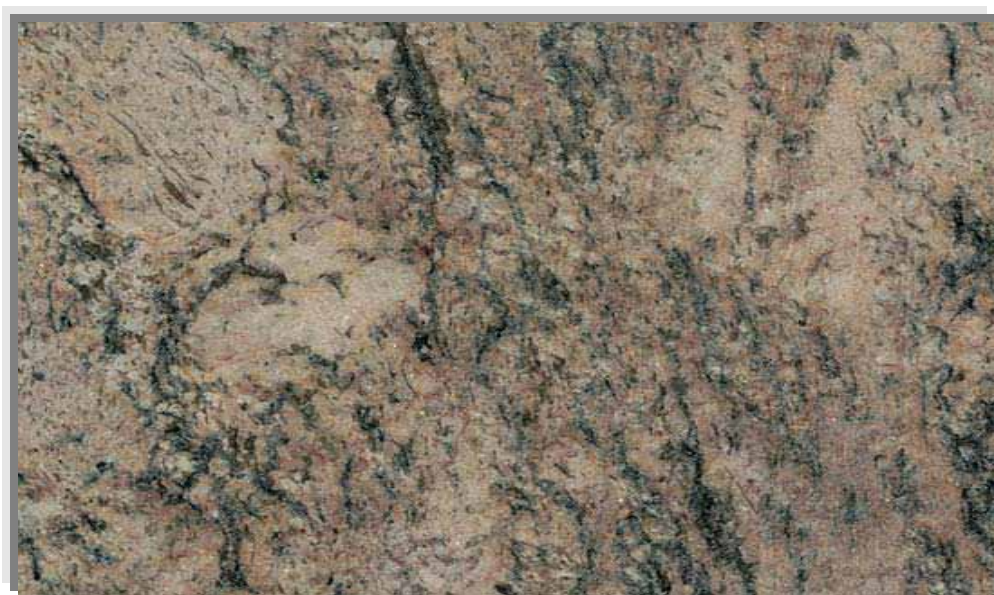


Figura 3.5 – Placa do Gnaiss Juparaná Delicato



Figura 3.6 – Frente de Lavra do Gnaiss Giallo Falésia



Figura 3.7 – Placa do Gnaiss Giallo Falésia

3.2 ENSAIOS E ANÁLISES LABORATORIAIS

Esta etapa foi desenvolvida, em sua maior parte, nos laboratórios do NUTEC onde se encontra a câmara climática de ensaio acelerado e demais equipamentos utilizados na preparação dos corpos-de-prova e execução dos ensaios tecnológicos de controle.

Nesta pesquisa procurou-se simular as condições de atmosfera quimicamente agressiva (atmosfera marinha) através da exposição dos três litotipos, já descritos anteriormente, em duas distintas câmaras climáticas de névoa salina, a primeira onde foram realizados os ensaios contínuos e a segunda que permitiu a realização dos ensaios cíclicos.

Os ensaios tecnológicos de controle e as análises realizadas visaram à compreensão e interpretação das alterações observadas ao final dos tempos de exposição pré-estabelecidos.

Para escolha das propriedades tecnológicas a serem avaliadas foram considerados os graus de influência e/ou de dependência no processo de alteração das rochas, bem como o espaço no interior da câmara que delimita as dimensões e o número de corpos-de-prova a ser ensaiado, buscando atender a disposição espacial recomendada na literatura, e em normas, para uma melhor exposição desses materiais à névoa.

Na elaboração dos gráficos foram padronizadas, sempre que possível, as cores das barras e ou símbolos em tons de cinza, rosa e amarelo para o Casablanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia, respectivamente, estabelecendo uma associação entre a coloração natural da rocha e a sua correspondente representação gráfica.

A Figura 3.8 sintetiza o conjunto de procedimentos utilizados nesta pesquisa.

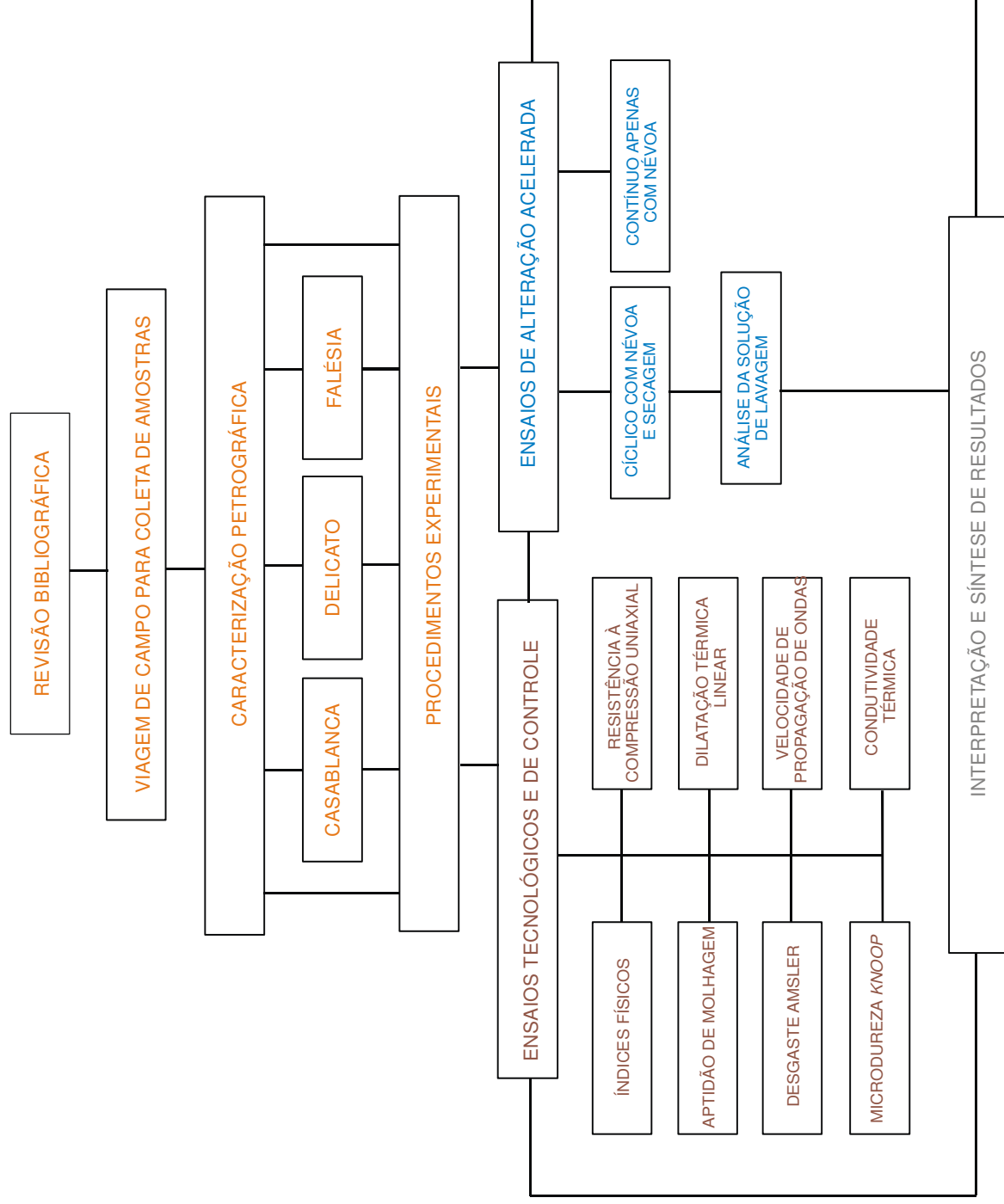


Figura 3.8 Fluxograma das atividades envolvidas na pesquisa.

Nas rochas estudadas são observadas seqüências de pouca deformação, alternadas com seqüência de foliações marcantes e estrutura planar bem desenvolvida, por essa razão um plano de corte que oferece melhor visualização dessas estruturas é aproveitado na pedreira e nas indústrias de serragem e beneficiamento. Considerando este fato, a orientação de corte para o preparo dos corpos-de-prova e execução dos ensaios foi à mesma adotada no plano de serragem dos blocos para obtenção das placas de rocha.

Os corpos-de-prova tiveram seus registros conforme os tipos de ensaios tecnológicos aos quais foram submetidos e suas respectivas denominações comerciais. Assim, a amostra denominada de Bd1 refere-se ao corpo-de-prova número um (1) do granito Casablanca (B) a ser submetido ao ensaio de desgaste Amsler (d).

A Tabela 3.1 apresenta o número de corpos-de-prova correspondente a cada ensaio de caracterização tecnológico específico, considerando os três diferentes litotipos rochosos (Casablanca, Delicato e Falésia) e compreendendo tanto aqueles ensaiados somente no seu estado natural quanto os que foram expostos à névoa salina em ensaio contínuo (360h, 720h e 1080h).

Tabela 3.1 – Número de corpos-de-prova (CPs) utilizados, *in natura* e depois de exposição contínua à névoa salina, em ensaios comparativos de caracterização tecnológica.

DENOMINAÇÃO DO ENSAIO	NÚMERO DE CPs EXPOSTOS AO ENSAIO CONTÍNUO COM NÉVOA SALINA	NÚMERO DE CPs AO NATURAL	ORIENTAÇÃO DO CORTE	TOTAL DE CPs POR ENSAIO
Índices Físicos	3 x 3 x 3 = 27	10 x 3 = 30	⊥	57
Resistência à compressão	2 x 3 x 3 = 18	7 x 3 = 21	⊥	39
Desgaste Amsler	1 x 3 x 3 = 9	2 x 3 = 6	⊥	15
Velocidade de Ondas	-	-	⊥ //	-
Intensidade de brilho	2 x 3 x 3 = 18	-	⊥	18
Dilatação Térmica	1 x 3 = 3	1 x 3 = 3	⊥	6
	1 x 3 = 3	1 x 3 = 3	//	6
Condutividade Térmica	-	1 x 3 = 3	⊥	3
Aptidão de Molhagem	-	1 x 3 = 3	⊥	3
Midro dureza <i>Knoop</i>	1 x 3 = 3		⊥	3

3.2.1 ENSAIO DE ALTERAÇÃO ACELERADA

Ensaio de envelhecimento ou alteração acelerada foram concebidos para simular condições semelhantes àquelas em que as rochas estarão expostas após sua aplicação.

Dentre os ensaios existentes foi selecionado o de exposição à névoa salina por ser o que melhor atende ao objetivo desta pesquisa, que aborda o estudo do comportamento das rochas de revestimento em ambientes de atmosfera marinha.

Foram realizados dois procedimentos distintos para este ensaio. O primeiro baseou-se nas normas ABNT NBR 8094 (ABNT, 1983b) e ASTM B 117 (ASTM, 1997), onde foram expostos corpos-de-prova de diferentes dimensões sendo os

resultados avaliados, ao final de tempos de exposição pré-determinados, por meio de ensaios tecnológicos comparativos. Para o segundo foi aplicada a metodologia proposta na EN 14147 (2003), onde foram expostos seis corpos-de-prova de cada amostra, cubos com 5cm de arestas, sendo os resultados avaliados e expressados através da perda de massa ou aparecimento de fissuras em atendimento a referida norma.

3.2.1.1 Contínuo (Exposição à névoa salina).

Trata-se de um ensaio contínuo em névoa salina e consiste da exposição de corpos-de-prova em câmara *salt spray*, dispostos de forma a permitir a perfeita distribuição da névoa sem que haja gotejamento da solução escorrida de um corpo-de-prova sobre outro. A temperatura é mantida em $(35\pm 2)^\circ\text{C}$, a pressão de ar comprimido em 70 KPa e a solução de ensaio a 5% de NaCl com pH entre 6,5 e 7,2.

O acervo exposto na câmara salina (Modelo Bass USC) compreendeu então 73 (setenta e três) corpos-de-prova representando o Casablanca, Delicato e Falésia, sendo retirados ao final de 360h, 720h e 1080 horas de exposição para realização de ensaios tecnológicos de controle, com a finalidade de monitorar qualitativamente as alterações ocorridas durante os respectivos períodos de exposições.

3.2.1.2 Cíclico (Exposição à névoa salina - EN 14147 (2003)).

Trata-se de um ensaio composto por 30 ciclos e realizado em câmara *salt spray* de ensaios cíclicos (Modelo BASS MP-GS-01/2004), que alterna 6 horas de névoa salina com 12 horas de secagem para cada ciclo concluído (Figura 3.9 a e b). Consiste da exposição de corpos-de-prova dispostos, também, de forma a permitir a perfeita distribuição da névoa, sem que haja sobreposição de um corpo-de-prova sobre outro. A temperatura é mantida em $(40\pm 5)^\circ\text{C}$, a pressão de ar comprimido em 70 KPa e a solução de ensaio a 10% de NaCl com pH entre 6,5 e 7,2.

O acervo exposto para este ensaio compreendeu 18 (dezoito) corpos-de-prova na forma de cubos com 5cm de arestas representando o Casablanca, Delicato e Falésia. Estas amostras foram retiradas ao completar 15 ciclos, para inspeção

visual e registro fotográfico, e ao final de 30 ciclos, para pesagem em balança semi-analítica e avaliação das alterações ocorridas durante o respectivo período de exposição.



Figura 3.9 – Vista exterior da câmara de ensaio cíclico com névoa salina (a) e do gabinete interno com amostras suspensas por fios de nylon (b).

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

3.2.2.1 Análise Petrográfica

As análises petrográficas foram realizadas nos três tipos comerciais estudados, levando em consideração as determinações gerais das Normas NBR – 12768 (ABNT) e C-294-86 (ASTM), bem como as orientações presentes em Navarro (1998), Rodrigues et al. (1996, 1997) e Artur et al. (2001).

A análise das características microscópicas seguiu a metodologia tradicional, sendo obtida em microscópio petrográfico (Laborlux 12pol.). Foram avaliados a disposição e comportamento mineralógico, bem como o tipo e a distribuição por mm² dos contatos minerais e microfraturamentos.

A classificação petrográfica das rochas estudadas seguiu as recomendações da IUGS (Streckeisen, 1976; Le Maitre, 1989).

O estudo petrográfico envolve parâmetros que são determinantes para as propriedades físico-mecânicas, conforme se verifica a seguir.

A química mineral e as correspondentes arquiteturas dos cristais e microtexturas refletem as condições de cristalização dos magmas e influenciam nas características das rochas.

Spry (1969) sugere que o tipo de cristal depende da interação de cinco mecanismos de crescimento de grãos:

- Crescimento livre – cristais desenvolvidos sem interferências;
- Crescimento conturbado – a forma dos minerais é regulada pelos cristais vizinhos formados simultaneamente;
- Baixa temperatura e rupturas mecânicas de origem essencialmente tectônicas, permitindo o fraturamento de minerais ou deslocamento de suas bordas;
- Alta temperatura com mecanismos de deformação, causando distorções no eixo ótico e migração de defeitos pontuais ou lineares na rede cristalina.

A forma e o tipo de contatos intergrãos (relações texturais) são importantes fatores a serem considerados, pois como vimos anteriormente, influenciam no grau de resistência físico-mecânica da rocha. O intercrescimento de minerais essenciais, a relação de concavidade-convexidade e a ordem de cristalização são fatores que podem influenciar no grau de alterabilidade de um determinado corpo rochoso.

Os contatos intergrãos comumente descritos na literatura são do tipo plano, lobular, côncavo-convexo, denteado e serrilhado, entretanto, não é incomum existirem subtipos que englobem duas ou mais categorias expostas acima.

As dimensões dos grãos minerais em rochas representam também um fator influente nas propriedades físico-mecânicas e alterabilidade. Especificamente nas rochas ornamentais, este fator merece especial atenção, pois além dos aspectos relativos à resistência físico-mecânica existe, também, o aspecto estético. Como exemplo da importância desse parâmetro temos que uma granulação mais fina,

dependendo do grau de imbricamento dos cristais, pode ser determinante de uma maior resistência físico-mecânica. Todavia, uma superfície específica maior pode favorecer a decomposição da rocha, sobretudo em ambientes mais agressivos como, por exemplo, em grandes centros urbanos.

Foram considerados os seguintes parâmetros para a caracterização da granulação das rochas estudadas:

- Diâmetro médio predominante dos cristais inferior a 1,0mm – granulação fina;
- Diâmetro médio predominante entre 1 e mais de 3mm - granulação média;
- Diâmetro médio predominante entre 7 e 10mm - granulação média-grossa;

A caracterização e quantificação do microfissuramento são de grande importância no estudo das rochas ornamentais, uma vez que, são fatores utilizados na compreensão do comportamento das rochas quanto à porosidade, absorção d'água e resistência mecânica.

A presença de microfissuramentos acarreta um aumento dos coeficientes de absorção capilar e de permeabilidade, que por sua vez pode ser fator preponderante no surgimento de patologias e deteriorização da rocha.

Preferencialmente, as microfissuras devem ser avaliadas em termos de preenchimentos ou não preenchimentos, de tipologia se intragranular ou intergranular, de apresentação se contínua ou descontínua, sendo a quantificação expressa pelo número de microfissuras por mm².

3.2.2.2 Ensaio de Coloração Seletiva

Para avaliação macroscópica dos litotipos estudados, optou-se pela utilização de placas polidas de 15cm x 7,5cm, submetidas a ensaio de coloração seletiva por cobaltinitrito de sódio. A escolha desta metodologia é decorrente da predominância de granulações médias e grossas de difícil quantificação por meios exclusivamente microscópicos. Assim, a identificação e contagem dos minerais nas placas polidas foram realizadas em lupa binocular (Olympus SC-BR) com o auxílio de uma malha de espaçamento de 1,0cm e 0,5cm, impressa em filme plástico, que por sua vez se

sobrepõe às placas de rocha. Cada “nó” da malha foi considerado um ponto de identificação mineral.

O método adotado baseia-se em Rodrigues e Moraes (1978). Consiste em mergulhar uma face da rocha, previamente lixada, em contato com o ácido hidrófluídrico 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), o que facilita a identificação e quantificação dos mesmos.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

3.2.3.1 Intensidade de Brilho

A determinação da intensidade de brilho foi realizada com o auxílio de um medidor modelo ZGM 1020 – ZEHNTNER GLOSSMEETER 60°. Para a realização deste ensaio foram utilizadas placas polidas com dimensões 10cm x 10cm. O ensaio constou da realização de 05 (cinco) medidas em cada placa ao final de cada ciclo de exposição na câmara *Salt Spray*. Foram utilizadas 06 (seis) placas de cada tipo rochoso a cada ciclo.

3.2.3.2 Índices Físicos

O procedimento laboratorial para determinação dos índices físicos seguiu a norma NBR 12.766 da ABNT (1992b). Contudo, para ensaio do material *in natura* foram utilizados 10 (dez) corpos-de-prova enquanto para o material submetido ao ensaio acelerado foram utilizados somente 3 (três) corpos-de-prova de cada um dos litotipos para cada número de horas especificado, face à limitação de espaço físico no interior da câmara.

Os corpos-de-prova com dimensões de 5cm x 5cm x 5cm foram inicialmente secos em estufa por 24 horas (massa seca) e posteriormente imersos em água durante 24 horas, sendo procedida à pesagem para o cálculo da massa saturada e submersa. Ao final do ensaio foram obtidos os seguintes parâmetros:

- Massa específica aparente seca (kg/m^3) $\rho_{\text{sec}} = \frac{m_{\text{sec}}}{(m_{\text{sat}} - m_{\text{sub}})}$
- Massa específica aparente saturada (Kg/m^3) $\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{(m_{\text{sat}} - m_{\text{sub}})}$
- Porosidade aparente (%) $\eta = \frac{(m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}})}{(m_{\text{sat}} - m_{\text{sub}})} \times 100$
- Absorção d'água aparente (%) $\alpha = \frac{(m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}})}{(m_{\text{sec}})} \times 100$

3.2.3.3 Resistência à Compressão Uniaxial Simples

Esta determinação foi realizada segundo a norma NBR 12.767 (ABNT, 1992c) em 5 (cinco) corpos-de-prova *in natura* e 2 (dois) corpos-de-prova para cada um dos litotipos submetidos ao ensaio acelerado, para cada período de horas determinado.

Foi utilizada uma prensa com capacidade de 200t da marca EMIC, sendo a tensão de ruptura determinada perpendicularmente à direção de estruturação da rocha.

A resistência à compressão (σ_c) é calculada pela relação entre a carga de ruptura e área do corpo-de-prova onde é aplicada. Assim, $C = \frac{P}{A}$ onde C = resistência à compressão (MPa); P = carga total de ruptura (N); A = área de aplicação da carga (mm^2).

3.2.3.4 Desgaste Abrasivo Amsler

O ensaio do desgaste Amsler foi realizado em conformidade com a norma NBR 12.042 (ABNT, 1992d) em 2 (dois) corpos-de-prova de cada litotipo *in natura* e 2 (dois) corpos-de-prova equivalentes para cada número de horas estabelecido. Para tanto foi utilizada máquina de desgaste por abrasão Amsler e dispositivo para medida de perda de espessura com relógio comparador.

3.2.3.5 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sônicas Longitudinais

A determinação da velocidade de propagação de ondas, baseada na norma ASTM D 2845 (ASTM, 2000), foi efetuada em todos os corpos-de-prova destinados ao ensaio de compressão.

A medição foi realizada utilizando-se o Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Test-PUNDIT, sendo avaliada a velocidade de propagação em 3 (três) direções assim distribuídas: duas no plano de foliação e uma ortogonal a essa (X,Y e Z).

3.2.3.6 Microdureza Knoop

O teste de dureza Knoop é um teste de dureza de micro impressão, sendo determinada pela razão entre a área produzida por uma ponta de diamante e a carga utilizada para produzir a impressão numa superfície a ser avaliada. Assim, quanto maior a impressão produzida, menor a dureza.

Frisa Morandini e Mancini (1982 apud Quitete e Kahn 2002, p.84) propuseram um diagrama de distribuição de dureza onde são determinadas as frequências cumulativas HK_{25} , HK_{50} e HK_{75} que, segundo esses autores, refletiriam as diversas situações em que a dureza da rocha estaria envolvida. A razão entre HK_{75}/HK_{25} exprime o coeficiente de heterogeneidade e HK_{50} é considerado um valor muito próximo da dureza média da rocha ($HK_{\text{médio}}$).

Este ensaio foi realizado pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, sendo para tanto utilizado um aparelho modelo Miniload 2, marca E. Leitz e as impressões feitas com carga de 1,96 N (200 gf). Para este ensaio foram realizadas dez medições em quatro direções a 45° em placas polidas de cada um dos litotipos estudados, cujas dimensões mínimas foram de 6cm x 6cm x 2cm.

3.2.3.7 Dilatação Térmica Linear

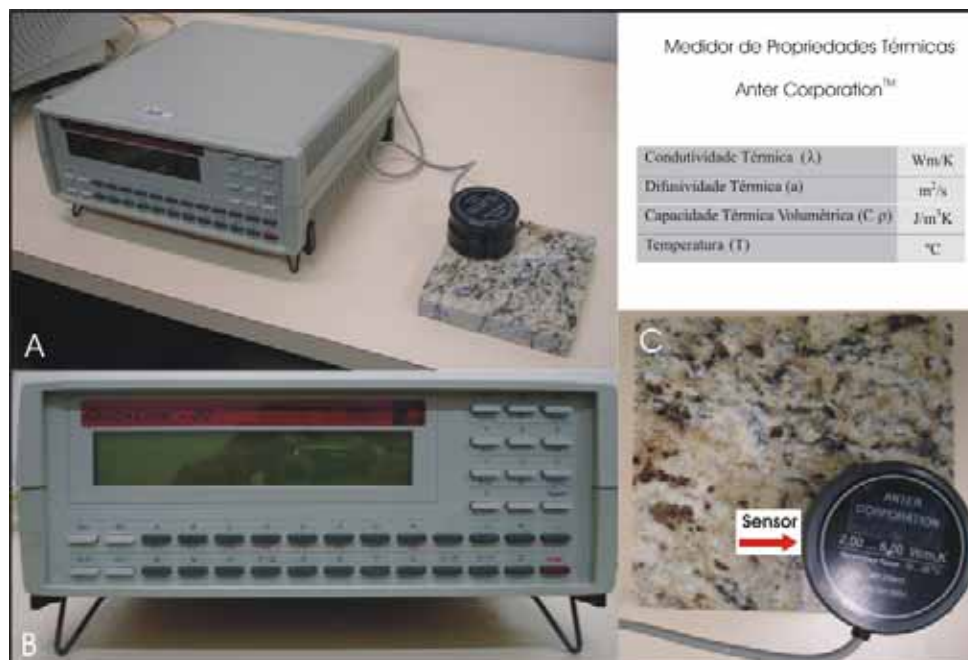
Os dados de dilatação térmica linear foram obtidos no laboratório de Rochas Ornamentais da UNESP, por meio do dilatômetro marca CONTENCO projetado para

baixar e elevar a temperatura, numa taxa de $0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até os limites de 0°C e 50°C , respectivamente.

Este ensaio seguiu as diretrizes da norma NBR 12.765 (ABNT, 1992e) e constou de medições em doze cilindros dos três litotipos estudados, sendo seis cilindros paralelos e seis perpendiculares à direção do plano de foliação da rocha. A amostragem foi, ainda, composta da rocha no seu estado natural e após exposição em câmara salina, com o objetivo de averiguar se existe ou não influência da atmosfera marinha na dilatação das rochas.

3.2.3.8 Condutividade Térmica

A medida de condutividade térmica realizada envolve a teoria dinâmica e para tanto foi utilizado o equipamento da marca Anter Corporation, modelo Quickline™ - 30, de propriedade da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN (Figura 3.10). Para este ensaio foram realizadas quatro medições em placas polidas de cada um dos litotipos estudados, ao natural, cujas dimensões mínimas foram de $6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 2\text{cm}$.



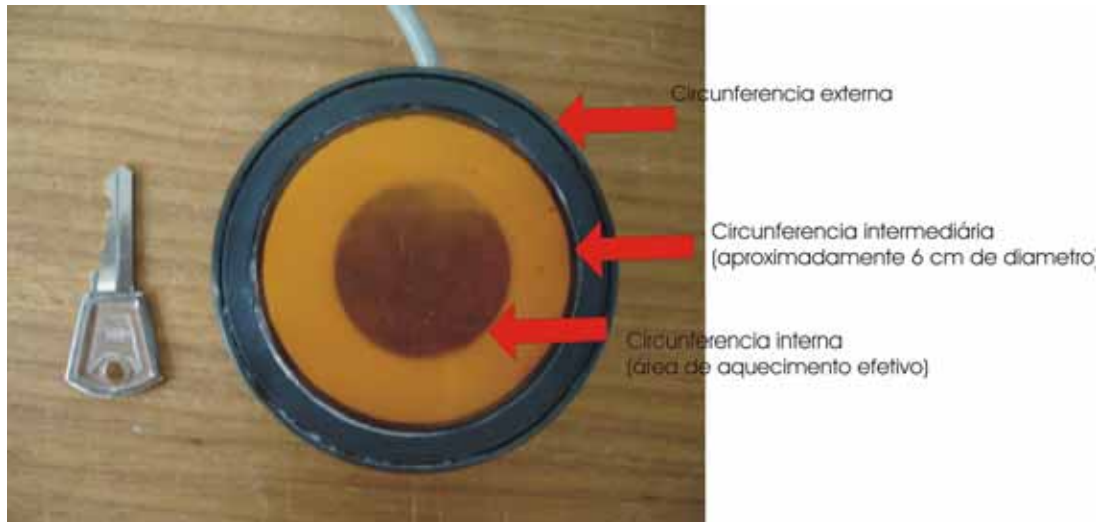


Figura 3.10 – Detalhes do equipamento utilizado para medir a condutividade térmica.

3.2.3.9 Aptidão de Molhagem

Para a determinação desta característica da superfície da rocha, foi utilizado o ensaio de determinação do tempo de absorção de microgotas. A determinação da aptidão de molhagem fornece indicações sobre o estado da superfície da rocha permitindo detectar a presença de heterogeneidades (Ferreira Pinto, 1994 *in* Rodrigues, 1998).

O Procedimento de ensaio foi baseado na metodologia adotada por Rodrigues (*op cit*) e constou do ensaio em três placas de 10cm x 10cm x 2cm de rochas polidas, secas durante 72h a uma temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$. Depois de esfriarem por 24h num dissecador, as placas são dispostas numa superfície horizontal e, utilizando-se a água destilada contida numa pipeta deixa-se cair sobre a superfície da placa, uma microgota com $4\pm 0,4\mu\text{l}$. A pipeta deverá estar afastada cerca de 10mm da superfície de ensaio.

Determina-se o tempo de absorção total da microgota desde que esta toca a placa de rocha até desaparecer da superfície. Este mesmo processo é efetuado sobre uma placa de vidro fosco que permite determinar o tempo médio necessário à evaporação total das microgotas.

A determinação do tempo de absorção de microgotas é expressa em %, sendo obtida por meio da seguinte expressão:

$$Tp = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{ti}{tv} \right]}{n} \times 100 \right]$$

onde:

tp - tempo de absorção da microgota

ti - tempo necessário à absorção da microgota na placa

tv - tempo médio necessário à evaporação total das microgotas na superfície do vidro polido

n - número de microgotas utilizadas na realização do ensaio.

ARCABOUÇO REGIONAL E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA PESQUISADA

Neste capítulo será abordado o contexto geológico da região compreendida entre as localidades de Tróia e Pedra Branca, centro-oeste do Estado do Ceará, onde se encontram inseridas as rochas graníticas objetos deste estudo. Será, inicialmente, feita uma breve revisão dos mais importantes trabalhos versando acerca dos aspectos tectônicos/estruturais e litoestratigráficos regionais, seguido do estudo da geologia local tratando dos mesmos aspectos, além da geocronologia.

4.1 ARCABOUÇO TECTÔNICO

Tomando-se a divisão do território brasileiro em Províncias, proposta por Almeida et al. (1977), o Nordeste Oriental está inserido na Província Borborema, delimitada pelas províncias do São Francisco, Parnaíba e pelas bacias costeiras e margem continental (Figura 4.1).

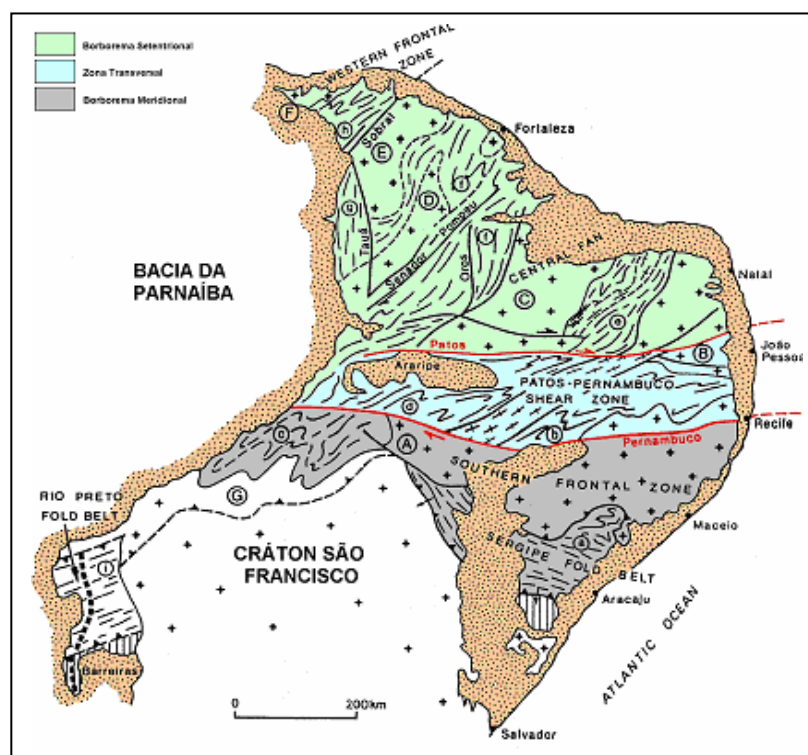


Figura 4.1 - Delimitação e Subdivisão da Província Borborema (Trompette, 1994).

Esta Província representa o extremo nordeste da Plataforma Sul-americana, sendo sua extensão territorial da ordem de 400.000 km² que cobrem partes do norte do Estado da Bahia, sudoeste do Piauí e noroeste do Ceará (Figura 4.2).

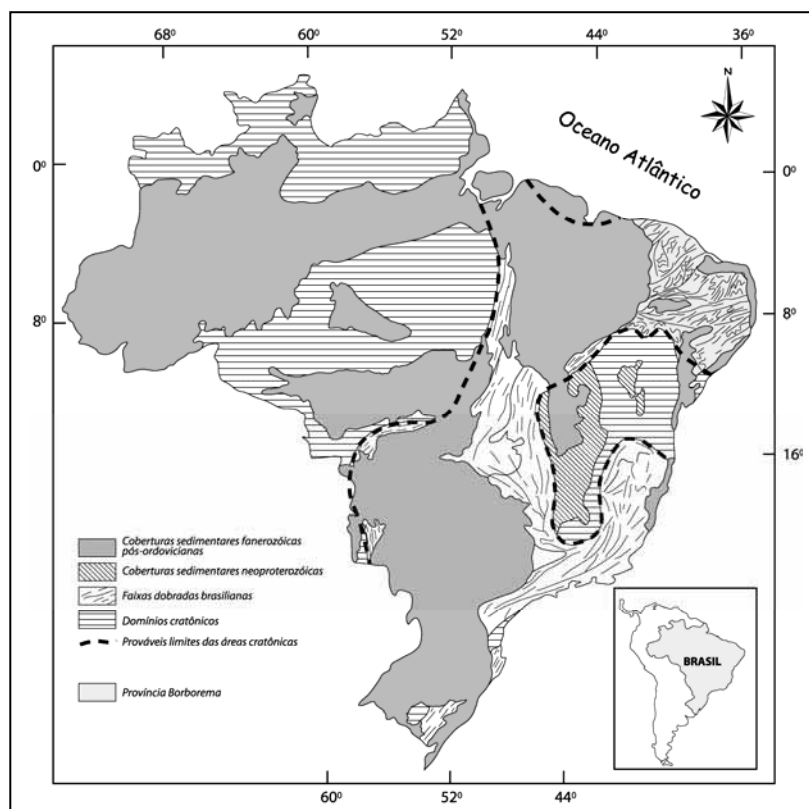


Figura 4.2 - Localização da Província Borborema no Brasil (Schobbenhaus & Campos, 1984).

Trata-se de uma região que possui uma complexa evolução geológica tendo sido alvo de inúmeros trabalhos com enfoque estrutural, que geraram e geram vários modelos tectônicos.

Os aspectos mais importantes, desta Província, em termos de estruturas e plutonismo granitóide são freqüentemente relacionados ao desenvolvimento do Ciclo Brasileiro (Proterozóico Superior-Eopaleozóico), com espaços geodinâmicos entre blocos cratônicos de São Luís (Extensão do Cráton Oeste Africano) e do São Francisco (continuidade do Cráton do Congo) a nordeste e sul respectivamente. A colisão continental correspondendo ao Ciclo Brasileiro-Pan-Africano completou-se, no caso da Província Borborema, por volta de 600-550 Ma.

Brito Neves (1975, *apud* Nogueira, 1993) reconheceu duas entidades geotectônicas principais situadas entre os Crátons de São Luís e São Francisco: 1- Os “Maciços Medianos”, que corresponderiam a “Blocos” rígidos, sobrepostos por processos dinâmicos e termiais, que preservariam unidades lito-estruturais dos ciclos anteriores e dividiriam as regiões dobradas em ramos diferenciados; 2- as “Faixas de Dobramentos” representariam zonas dobradas de extensão regional separadas pelos “Maciços Medianos”, “zonas geoanticlinais” ou “geofraturas”. De acordo com este modelo, a região em apreço pertenceria ao que Brito Neves (*op. cit.*) designou por “Maciço Mediano de Tróia”.

Conforme Caby e Arthaud (1986, *apud* Nogueira 1993), o Pré-Cambriano do Ceará inclui rochas do embasamento Arqueano e metassedimentos proterozóicos, retrabalhados através de um único evento metamórfico e deformacional, durante a orogênese Brasileira. A tectônica gerada neste ciclo corresponderia ao tipo colisional Himalaiano. Mais especificamente, o segmento crustal de Tróia seria submetido a uma tectônica tangencial de baixo ângulo (*nappes*), responsável pelo transporte de massa em sentido Sul, originando zona de cavalgamento oblíqua à oeste de Tróia.

Monié *et al.* (1997) consideram na Província Borborema um embasamento páleo-proterozóico e coberturas proterozóicas que experimentaram uma complexa história tectono-metamórfica durante a Orogenia Brasileira. Propuseram para esta Província, ao norte da Zona de Cisalhamento de Patos, a divisão em quatro domínios principais separados por grandes zonas de cisalhamento dextrais de direções preferenciais E-W a NE-SW: Domínio Médio Coreaú ao norte, Domínio Ceará Central, Domínio de Cinturões Xistosos a sudeste e o Domínio Patos ao sul. Nesta divisão o Domínio Ceará Central englobaria a área enfocada.

Arthaud *et al.* (1998) propõem modificações na subdivisão do Pré-Cambriano do Estado do Ceará, reagrupando os domínios já estabelecidos anteriormente em cinco segmentos baseados em critérios tectono-metamórficos. São eles os domínios Piancó-Alto Brígida, Jaguaribe-Orós, Ceará Central, Granjeiro e Noroeste do Ceará (Figura 4.3a). Para Arthaud *op. cit.* as zonas de Cisalhamento de Orós e Aiuába separam o Domínio Ceará Central do Domínio Jaguaribe-Orós, contudo outros autores (Cavalcante, 1999; Fetter, 1999; Brito Neves *et al.*, 2000) consideram que a

Zona de Cisalhamento Senador Pompeu estabelece o limite entre o Domínio Ceará Central e o Domínio Rio Grande do Norte (Figura 4.3b).

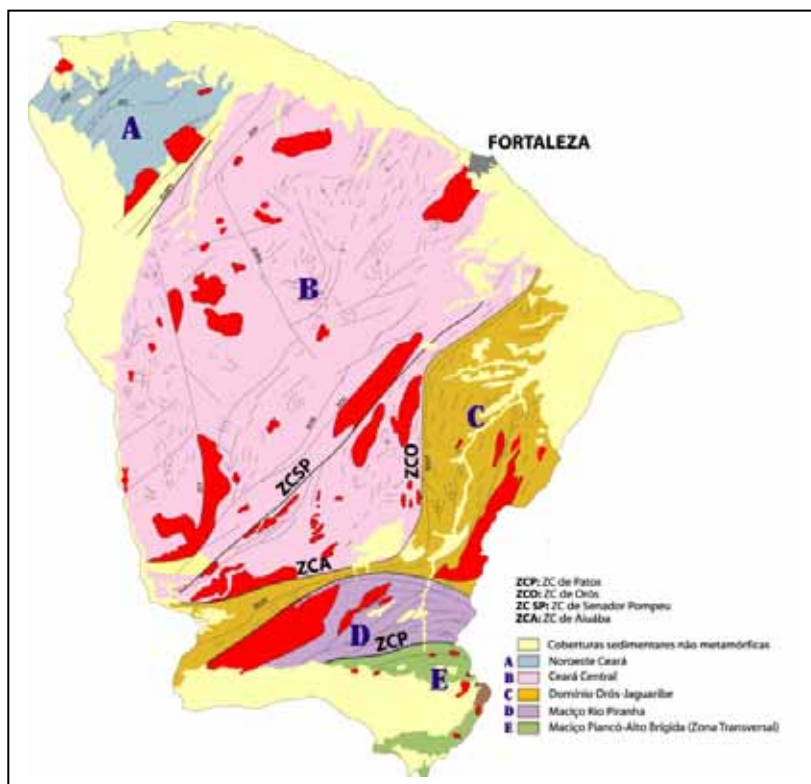


Figura 4.3a - O Domínio Ceará Central limitado a SE pela ZCO-Orós e ZCA-Aiuába (Arthaud *et al.*, 1998).

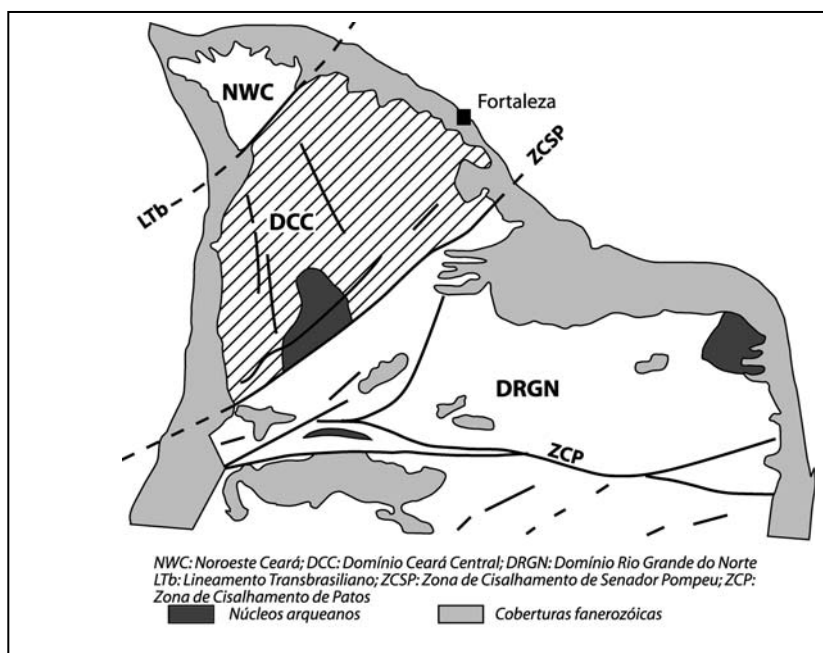


Figura 4.3b - O Domínio Ceará Central limitado a SE pela ZCSP-Senador Pompeu (Fetter, 1999).

Fetter (1999) interpretou os diferentes domínios definidos por Caby *et al.* (1977) para o Estado do Ceará como representando uma colagem de núcleos crustais de idade arqueana, com registros importantes na região sudeste do Bloco de Santa Quitéria em grandes porções gnáissicas constituintes do embasamento páleo-proterozóico, blocos crustais mesoproterozóicos, seqüências supracrustais variavelmente deformadas e metamorizadas de idade arqueana a neoproterozóica, e granitóides brasileiros sin a tarditectônicos neoproterozóicos. Para este autor, as rochas arqueanas no Estado do Ceará são restritas a fragmentos crustais ou pequenos blocos no domínio do embasamento páleo-proterozóico, cuja exposição mais extensiva está localizada principalmente no extremo sudeste do bloco de Santa Quitéria, originalmente nomeada por Brito Neves (1975) de Maciço de Tróia (Figura 4.4).

O Maciço de Tróia compreende, pois, uma área de aproximadamente 6000 km² e está localizado na porção sudeste do Domínio Ceará Central. Por sua vez o limite sudeste desse bloco é nitidamente definido pelo lineamento Senador Pompeu, contudo os limites norte e oeste não estão bem definidos e têm sido inferidos com base nas mudanças de idades pelo método Nd. A zona de cisalhamento dúctil Sabonete-Inharé corta esse bloco Arqueano dividindo o Maciço de Tróia em dois blocos subordinados: o bloco Tróia-Pedra Branca e o bloco Mombaça. De maneira simplificada, o sub-bloco Tróia-Pedra Branca é composto por rochas supracrustais formando associação do tipo *greenstone* gnaisses, enquanto o sub-bloco Mombaça é composto principalmente por gnaisses cinza (*grey gneisses*), derivados de protólitos plutônicos de natureza essencialmente tonalítica trondhjemítica granodiorítica-TTG (Pessoa & Archanjo, 1984; Caby & Arthaud, 1986; Caby *et al.*, 1995). Para estas duas unidades são propostas origem e evolução distinta.

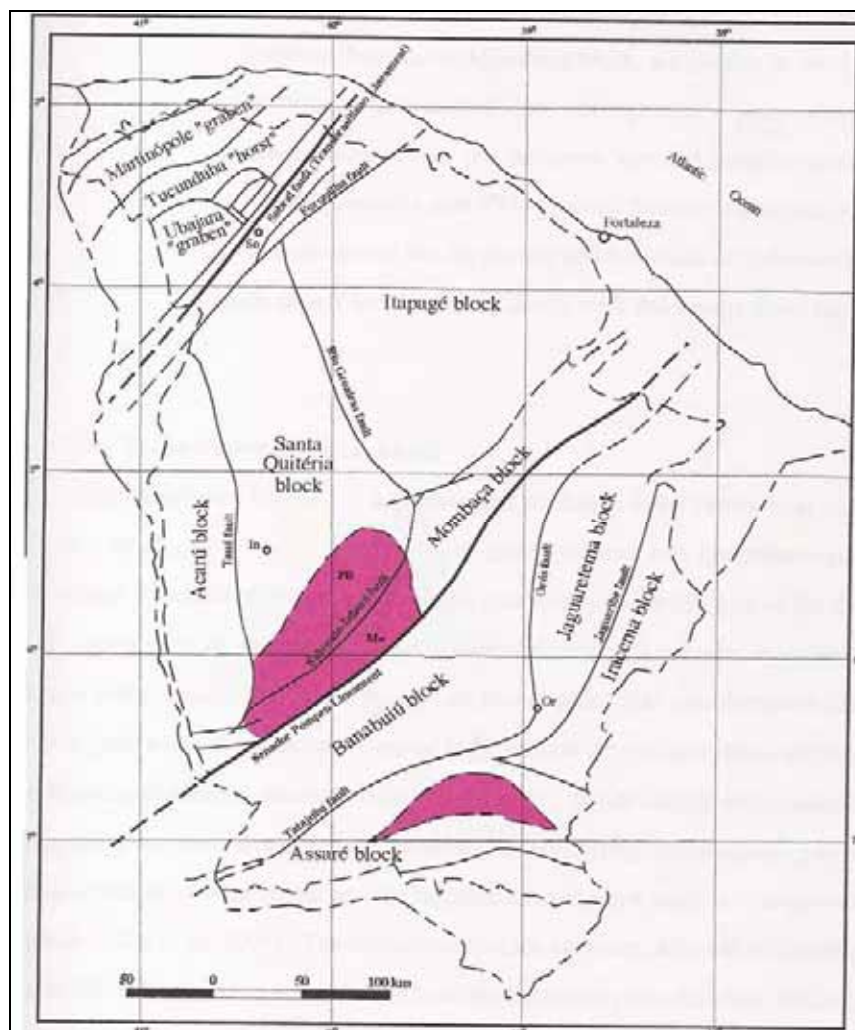


Figura 4.4 – Localização de blocos Arqueanos identificados no Ceará (em vermelho). O Maciço de Tróia - (TM) é localizado nos blocos tectônicos de Mombaça e Santa Quitéria (Fetter, 1999). PB – Bloco Tróia-Pedra Branca e Mo – Bloco Mombaça.

Para Fetter (1999), o Complexo Santa Quitéria, que foi primeiramente interpretado como uma janela do embasamento por Caby e Arthaud (1986, *apud* Fetter, 1999), corresponde a uma assembléia neoproterozóica de plútons de composição granodiorítica a tonalítica, variavelmente deformada, cobrindo uma área de proporções batolíticas. Deformações sin e tarditectônicas afetaram com diferentes intensidades estas rochas intrusivas transformando-as em plútons com tramas deformacionais fracas até gnaisses migmatíticos.

4.2 UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS

Na região compreendida entre as localidades de Tróia, Independência e Pedra Branca, quatro unidades litoestratigráficas podem ser individualizadas da base para o topo: i – Migmatitos e ortognaisses (TTG); ii – Complexo ígneo bandado e diferenciado, com litótipos de natureza gabróides metamorfisados, incluindo níveis de cromititos; iii – Seqüência meta-vulcano-sedimentar composta por quartzitos, mármore, xistos grafitosos e metabasalto com feições em “pillow” e iv – Rochas graníticas-granodioríticas em “sherts” com foliação bem desenvolvida (Pessoa & Arcanjo, 1984). Todo esse conjunto foi denominado pelo termo “Complexo Pedra Branca”, no sentido definido por Hartmann *et al.*(1986 *apud* Nogueira, 1993).

Para Gomes *et al.*(1981), o Complexo Pedra Branca teria no aspecto espacial um formato elipsoidal delimitado pelos cisalhamentos Sabonete – Inharé, a sudoeste e Tauá a oeste. No tocante ao metamorfismo, Gomes (op. cit.), com base nas paragêneses observadas, englobam-nas no fácies anfibolito com pressão média. Estes autores constataram ainda para esta unidade, uma maior participação de rochas ortoderivadas em contraposição aos trabalhos anteriores que sugeriam uma derivação tipicamente sedimentar.

No trabalho apresentado por Caby e Arthaud (1986), o Complexo Pedra Branca é colocado juntamente com outras unidades de característica ortoderivada, como formando parte do embasamento arqueano de evolução policíclica.

Oliveira *et al* (1993), retoma o uso do termo Complexo Cruzeta, proposto por Barreto (1993), em substituição à Complexo Pedra Branca por entender que o simples acréscimo de novos tipos petrográficos, não invalidam a denominação original. Desta forma a divisão litoestratigráfica adotada para porção meridional do Maciço de Tróia-Tauá resultou nas seguintes unidades: Unidade Tróia e Unidade Pedra Branca.

É provável que a unidade atualmente denominada Complexo Cruzeta tenha resultado da acresção de vários arcos insulares paleoproterozóicos (idades compreendidas entre 2,1 e 2,15 Ga) em torno de pequeno núcleo arqueano (Fetter, 1999). Como no caso do Complexo Pedra Branca, é predominante, nesta unidade, o registro deformacional (tangencial) e metamórfico (fácies anfibolito alto, por vezes

acompanhado de migmatização mais ou menos acentuada) relacionados ao Ciclo Brasileiro.

Mais recentemente, por ocasião da confecção do novo Mapa Geológico do Ceará, as rochas arqueanas foram englobadas, junto com os terrenos paleoproterozóicos vizinhos, no Complexo Cruzeta Indiferenciado (Figura 4.5).

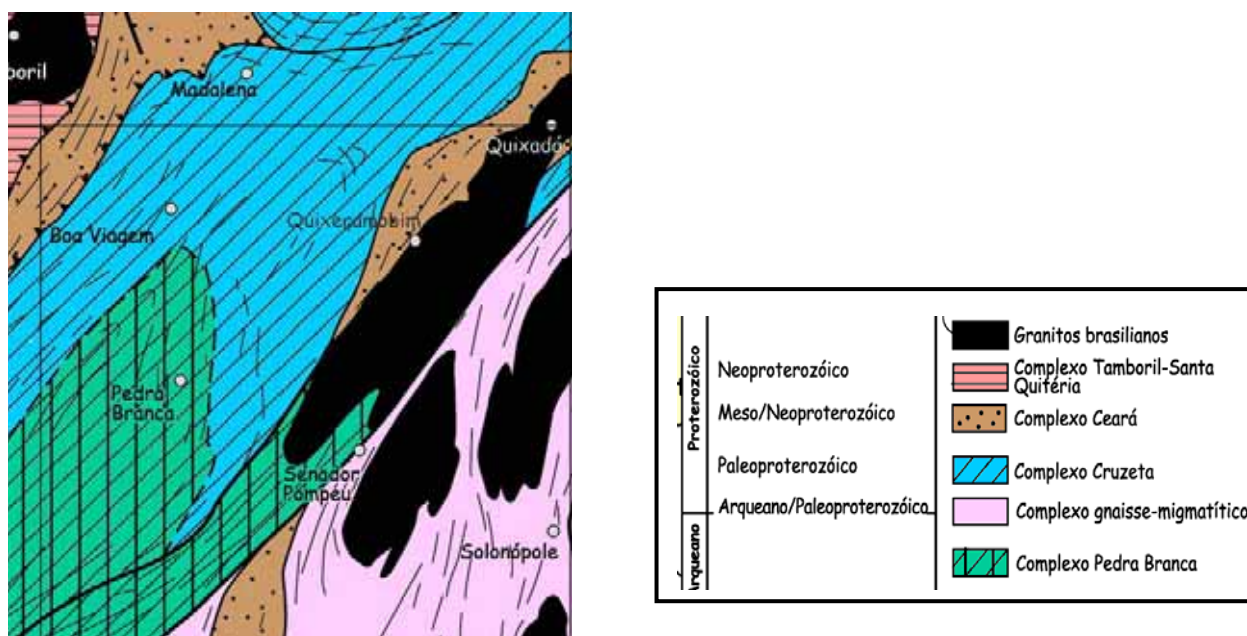


Figura 4.5 – Esboço da Geologia Regional de Pedra Branca (baseado no mapa geológico do Ceará, escala 1:500.000 – Cavalcante *et al.*, 2003).

Contudo, Zanibone & Moacir (2001), tendo como base as relações de contato encontradas no campo e os elementos estruturais mapeados, adotaram a coluna estratigráfica descrita no Quadro 4.1 observando o empilhamento estratigráfico proposto por Oliveira *et al.* (1993), quais sejam da base para o topo: Unidade Tróia, representando o Complexo Cruzeta, Unidade Cedro e Coberturas Cenozóicas.

Quadro 4.1 - Coluna Estratigráfica Proposta para Área

IDADE GEOLÓGICA	SIMBOLOGIA	LITOLOGIA	
Coberturas Cenozóicas	Qa	Sedimentos Colúvios-Aluvionais	
Proterozóico Superior	PYS1	Unidade Cedro	
Arqueano	A(T-B)t	Unidade Tróia	Quartzitos
			Cumulatos cromitíferos
			Anfibolitos (metagabros)
			Clorita-tremolita-xistos

4.2.1 UNIDADE TRÓIA

Esta unidade distribui-se por toda região de Tróia, ocorrendo a leste e oeste da área mapeada e servindo de encaixante para os leucognaisses que compõem a Unidade Cedro.

Esta denominação envolve uma associação plutonovulcanossedimentar, constituída por metagabros, tremolita-xistos, cumulatos cromitíferos e quartzitos. Segundo Fetter (1999), a porção supracrustal e máfica desse complexo parece ter sido desenvolvida primeiramente em torno de 2.78 Ga, sendo subseqüentemente intrudida por plútons félsicos em cerca de 2 Ga.

Quanto às relações de contato, com a Unidade Cedro, se efetuam tanto por zonas de cisalhamento como por intrusões normais, assinalando-se entre Tróia – Barra do Riachão – Cedro, restritas zonas milonitizadas. Apesar do contato de natureza tectônica, os limites entre as duas unidades não podem ser definidos de forma simples, visto que coexistem num curto espaço geográfico litotipos referentes às duas unidades na forma de xenólitos da Unidade Tróia na Unidade Cedro e *sheets* deste na primeira.

◆ Metagabros

Ocorrem associados aos xistos sob a forma de bandas e lentes de espessuras que variam de centímetros a dezenas de metros, não mapeáveis nesta escala de trabalho, intercaladas as metaultramáficas ou na forma de pequenos blocos. No caso das lentes ou bandas, exibem coloração cinza escura ligeiramente

esverdeada, foliação bem marcada e granulação variável (0.5 a 5 mm). Estruturalmente, distinguem-se os tipos maciços e bandados. Alguns dos anfibólios guardam uma textura gabróica semipreservada, indicando que apesar das fortes condições tectono-metamórficas, receberam pouca influência dos processos deformacionais. Eles são encontrados preferencialmente sob forma de blocos, já próximos das regiões de contato com os granitóides, nas proximidades da vila de Tróia. São rochas pouco foliadas de aspecto equigranular e com variações de tonalidades de verde. Sem auxílio do microscópio sua mineralogia inclui hornblenda (65%), plagioclásio (20%), quartzo (10%) e biotita (5%).

Em lâmina delgada foram identificados: hornblenda e tremolita-actinolita, apresentando alteração para clorita; plagioclásio em cristais hipidiomórficos do tipo andesina/labradorita, por vezes apresentando textura pertítica; quartzo ocorrendo sob forma de pequenos cristais intersticiais aos anfibólios e feldspatos e ainda biotita, granada, epidoto, apatita e titanita como acessórios. Facilmente denunciadas através da alteração pedológica, por gerarem solo muito escuro e argiloso.

◆ Clorita-Tremolita-Xistos

Este tipo petrográfico aflora na forma de lentes, apresentando foliação penetrativa, concordante com o *trend* regional. Exibe coloração esverdeada ou ocre (quando alteradas), granulação fina a média, por vezes sedosos, sendo compostos por tremolita e clorita magnesianas.

Não são raras as intercalações de veios e diques de composição granodiorítica a pegmatóide entre as metaultramáficas, não mapeáveis nesta escala de trabalho, imprimindo ao conjunto uma coloração mais clara.

Ao microscópio revelam clorita sob forma de palhetas e agregados, desenvolvidos ao longo da foliação ou aleatoriamente. Os cristais de tremolita exibem hábito prismático alongado em duas direções preferenciais de orientação. Concomitantemente ocorre actinolita distinguida pelo pleocroísmo azul esverdeado. A antofilita apresenta extinção reta e hábito prismático típico. O talco aparece em pequena quantidade, sob forma de palhetas sem orientação, possuindo um caráter tipicamente retromórfico, substituindo a tremolita e a antofilita.

O solo oriundo desta rocha apresenta coloração creme com fração arenosa maior do que nos solos formados pelos metagabros.

◆ **Cumulatos Cromitíferos**

A escala de mapeamento deste trabalho permitiu a individualização deste tipo petrográfico, de sua rocha mãe. Ocorre na forma de corpos tectônicos lenticulares, encaixados concordantemente nas rochas ultramáficas (clorita-tremolita-xistos) ou xenólitos nos leucognaisses granitóides, observando dimensões inferiores a 500 metros de comprimento e 50 metros de espessura.

Este tipo rochoso encerra mineralizações de cromita e EGP (elementos do Grupo da Platina) que foram e são alvos de pesquisa de empresas nacionais e internacionais. Nas áreas requeridas pela Granos, ocorre sob a forma de xenólitos nos leucognaisses granitóides, de forma restrita, com lentes que variam de 40 a 60 metros de comprimento por 30 a 40 metros de espessura.

Apesar desta região ter sido afetada por intenso tectonismo, os níveis maciços dos cromititos exibem cromitas bem preservadas, relacionadas a processos magmáticos intrusivos, contrastando com as feições da rocha encaixante (clorita-tremolita-xisto) que perderam sua identidade original.

Pessoa (1982, in Oliveira et al. 1993), descreve tais corpos como serpentinito-cromitífero, talco-xistos-cromitíferos, além de particularidades no serpentino cromitífero, reconhecidas como clorititos, sendo as porções mais mineralizadas nomeadas de cromititos ou serpentina-cromitito.

◆ **Quartzitos**

Ocorrem na porção sudeste da área estudada de forma subordinada, aflorando sob forma de bancadas condicionadas a estruturação regional. Constitui acidente topográfico denominado Serrote do Galo.

Representando o topo da Unidade Tróia na área mapeada, apresenta relação de contato de caráter discordante com os demais litotipos desta seqüência e de natureza tectônica com o leucognaisse da Unidade Cedro.

Macroscopicamente podem ser descritos como rocha de coloração amarelada, foliada e de aspecto brilhante, granulação média e sacaroidal.

Em lâmina delgada apresenta textura granolepidoblástica, sendo composto por quartzo (88%) na forma de pequenos cristais estirados de formato subeudral a anedral, palhetas de muscovita (10%) e minerais acessórios (2%), principalmente plagioclásio e biotita.

4.2.2 UNIDADE CEDRO

Representada pelos gnaisses que ocorrem a leste da vila de Tróia, estendendo-se a norte até as localidades de Cedro e Barra do Riachão.

Trata-se de rochas leucocráticas, constituídas de quartzo, feldspato, muscovita, (+) biotita, (+) granada e (\pm) magnetita, por vezes portando xenólitos do Complexo Cruzeta. Análises químicas revelam a natureza crustal (alta razão Sr87/Sr86), fortemente contaminados, redutores, per aluminosos e alcalinos.

A Unidade Cedro é a de maior interesse para o estudo aqui apresentado, por ser aquela onde estão inseridas as áreas fontes dos litotipos objeto desta pesquisa.

4.2.3 COBERTURAS CENOZÓICAS

◆ Sedimentos Colúvios-Aluvionais

O Quaternário é representado basicamente por sedimentos inconsolidados aluvionares compostos por: cascalhos com seixos de diversas rochas e de quartzo leitoso em sua maioria; material areno-argiloso com granulometria grossa a média sendo que, os mais expressivos afloramentos encontram-se ao longo do Rio Banabuiú, Riachos Caixa D'Água e dos Tijolos.

4.3 GEOLOGIA DA ÁREA

A descrição da unidade abaixo bem como da sua tectônica e metamorfismo são fruto das observações feitas por Zanibone e Moacir (2001), tendo sido complementadas com os dados obtidos no decorrer deste trabalho.

Distingue-se, em essência, inserida regionalmente no Complexo Cruzeta, termo retomado por Oliveira *et al* (1993) em substituição ao Complexo Pedra Branca, sendo denominada por Unidade Cedro.

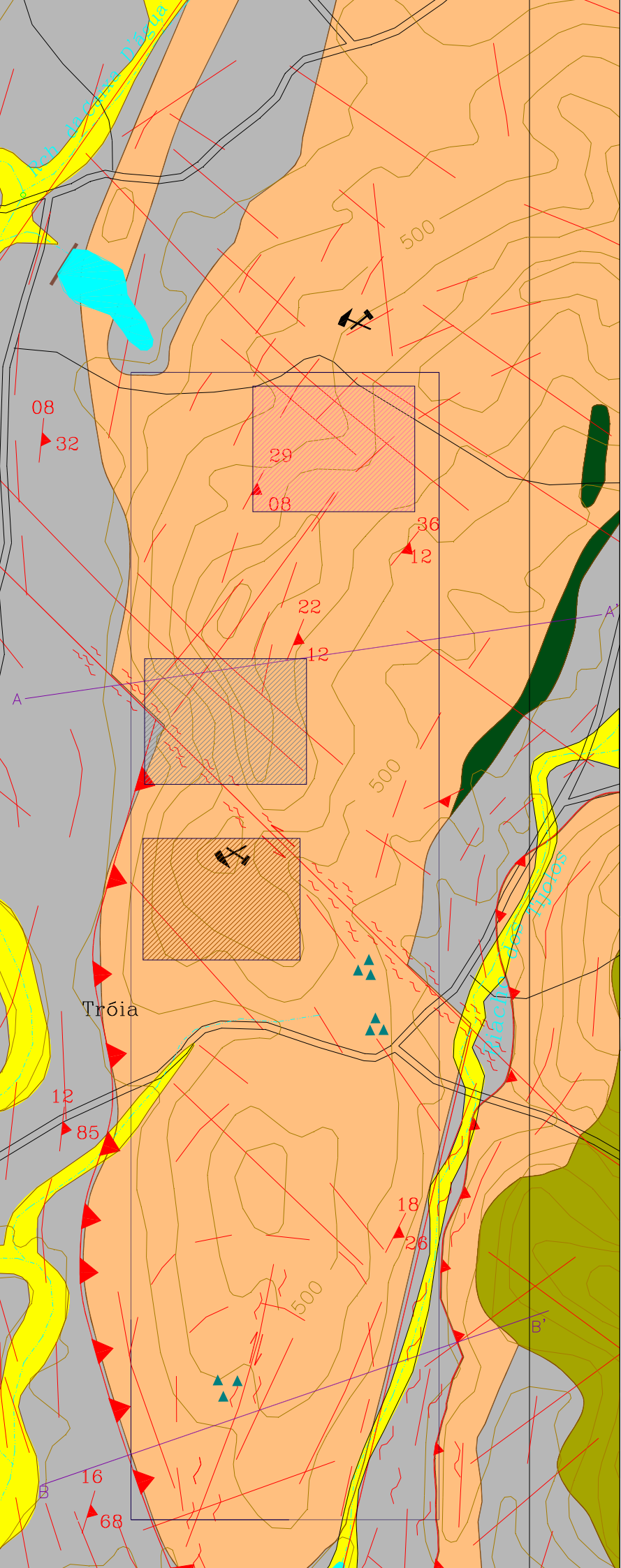
No mapa geológico da área podemos observar o comportamento tectônico do corpo rochoso bem como os contatos geológicos com as demais unidades (Figura 4.7).

4.3.1 LITOESTRATIGRAFIA

A Unidade Cedro, de cunho litoestratigráfico, corresponde à entidade onde estão inseridas as áreas fontes dos litotipos objetos desta pesquisa. Litologicamente compõe-se de um pacote rochoso de coloração esbranquiçada em quase sua totalidade e na porção nordeste em curvas de nível mais altas, mostra-se com tonalidade róseo. Exibe uma granulação variando de média a grossa, e por vezes em escala de afloramento um aspecto pegmatítico, com textura gráfica nos fácies de coloração róseo e simplectítica nos fácies esbranquiçados, sendo que este apresenta uma foliação incipiente com destaque na parte mais interna do maciço e bem desenvolvida nas bordas, próximo ao contato com o fácies róseo (Figura 4.6 a e b).








Figura 4.6 a e b – Zona do contato entre o Casablanca e Juparaná Delicato














LEGENDA






CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS

-  Curva de Nível
-  Estrada carroçal
-  Trilha/Caminho
-  Drenagem
-  Área de Pesquisa

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

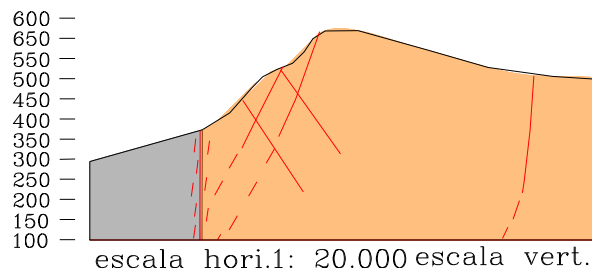
-  Foliação com indicação de direção
-  Fraturas
-  Lineamentos estruturais
-  Contato geológico
-  Zona cisalhamento c/ sentido de movimento
-  Falha inversa
-  Pedreira ativa
-  Pedreira desativada
-  Jazida do Casablanca
-  Jazida do Juparaná Delicato
-  Jazida do Giallo Falésia

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

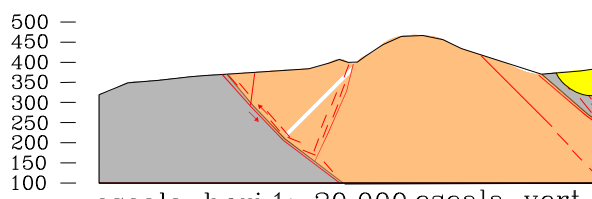
-  Coberturas Cenozóicas
-  Unidade Cedro - Leuco-gnaiss com enclaves de ortoanfibólitos
-  ApctaP1Y1 - Quartzitos muscovíticos
-  Cumulatos cromitíferos
-  Unidade Tróia - conjunto metavulcânico constituído preferencialmente por basaltos com intercalações anfibolíticas (m)

PERFIS

Corte AA'



Corte BB'



Morfologicamente compõe uma topografia de destaque, formando uma encosta de serra em quase cuesta, cuja cota máxima atinge 695 metros, alongando-se por 6Km no sentido norte-sul e infletindo para nordeste nos arredores da localidade Barra do Riachão.

Encontra-se postada entre rochas arqueanas, por meio de tectônica tangencial. O posicionamento estratigráfico desses litotipos ainda é objeto de discussão, sendo posicionado por alguns autores no Paleoproterozóico e por outros no Neoproterozóico. Trata-se de um leucognaisse do fácies anfibolito porém, como as demais rochas que se encontram na região, reconhece-se dois eventos metamórficos: um precoce de grau médio a alto (fácies anfibolito superior) e um tardio de grau baixo (fácies xisto verde).

Litoestratigraficamente estão inseridas na Unidade Cedro, sendo o seu posicionamento geocronológico baseado em relação ao desenvolvimento das deformações transcorrentes do Proterozóico Superior com idade de 586 Ma (Fetter, 1999) e compõem-se litologicamente por um pacote rochoso de coloração esbranquiçada, em quase sua totalidade, e rosada, na porção nordeste e mais alta.

Seus contatos foram definidos ao longo do Riacho dos Tijolos a sudeste, como também do Riacho Caixa D'água ao norte e em toda a sua porção oeste, com as unidades do Complexo Cruzeta, especialmente a Unidade Tróia (Rio Banabuiú).

◆ Leucognaisses Pré-Tangenciais

Este tipo petrográfico pode ser diferenciado em três variedades distintas que resguardam diferenças na coloração e textura, denominadas de Casablanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia.

Casablanca – Granada-biotita-muscovita gnaisse

Rocha gnáissica, de granulação média a grossa, coloração esbranquiçada com matizes acinzentados e negros e foliação penetrativa, composta essencialmente por feldspatos (% K-feldspatos < % plagioclásios), quartzo, micas, além de minerais máficos com destaque para a granada.

Localizada na borda do corpo, sob influência das zonas de cisalhamento, a rocha registra pronunciados efeitos tectônicos, ressaltados no estiramento do quartzo, contornando os agregados de feldspatos e na orientação das micas, que se amoldam ao contorno dos mesmos, como também aos fenocristais de granada.

Apresenta fraturas internas intragranulares com espaçamento apertado e plano de fraqueza da rocha ao longo das micas, partindo-se preferencialmente segundo estes quando submetida à pressão.

Juparaná Delicato – Granada-muscovita-biotita gnaisse

Pode ser reconhecido por apresentar coloração rosada com matizes negros e hialinos, por vezes textura pegmatóide, granulação grossa e foliação irregular. Petrograficamente compõe-se de feldspatos (% K-feldspatos < % plagioclásios), quartzo, minerais máficos e granada. São comuns fraturas irregulares e massas esbranquiçadas de alteração dos feldspatos, provenientes do intemperismo físico-químico.

Giallo Falésia – Granada-muscovita-biotita gnaisse

Trata-se do fácies intempericamente alterado dos leucognaisses objeto desta pesquisa, destacando-se pela marcante alteração cromática e pela presença de clorita nas microfraturas das granadas, além de microfissuras mais largas e preenchidas. Rocha gnáissica, de granulação média à grossa, composta essencialmente por feldspatos (% plagioclásios \geq % feldspatos potássicos), quartzo e micas brancas (biotitas e muscovitas). As superfícies dos grãos, principalmente ao longo dos planos micáceos, encontram-se permeadas por material amarelo-ferruginoso.

4.3.2 TECTÔNICA/METAMORFISMO

Os diferentes aspectos que dizem respeito à análise estrutural, bem como uma noção evolutiva da porção da crosta abrangida pela área estudada, referem-se à arquitetura estrutural regional, que tem como característica principal, uma acentuada linearidade de direções preferenciais NE-SW, subordinadas ao

desenvolvimento de mega zonas de cisalhamento, que por ordem hierárquica são: Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e Zona de Cisalhamento Sabonete – Inharé.

As deformações ocorridas na Unidade Cedro e nas encaixantes (Complexo Cruzeta), apontam para uma importante fase de tectonização e metamorfismo regional, com foliação de origem tectônica cuja atitude média é de N 30°E / 32°SE. Essa foliação é caracterizada por uma deformação plástica mais ou menos intensa dos minerais, em particular nos quartzos e feldspatos que se apresentam geralmente em forma lenticular ou em massas disformes com recristalização imposta pela dinâmica atuante.

As feições tectônicas identificadas em escala de afloramento foram divididas de acordo com o nível crustal em que se formaram, para que se tenha uma idéia melhor dos efeitos destas feições sobre o corpo gnáissico fonte dos litotipos objetos deste trabalho.

4.3.2.1 – Dúcteis

• Foliação

Nas rochas estudadas observou-se a presença de dois padrões de foliação distintos, que designaremos de Sn e Sn+1 (Figura 4.8).

A foliação Sn possui comumente um aspecto de bandamento composicional com diferentes graus de mobilização. No caso dos gnaisses, nota-se um padrão de bandamento ligeiramente homogêneo quando visto em escala de afloramento, embora mostre porções de rocha com foliação mal exprimida.

A foliação Sn+1 possui características regionais, com uma orientação em torno de NNE-SSW. Onde os mergulhos são suaves (10° a 30°), podendo acentuar-se de maneira abrupta até verticalizar-se em pequenas zonas com largura de 25 metros.

Nas metaultramáficas (clorita-tremolita-xistos), esta foliação é dada por palhetas plano-paralelas de tremolita e antofilitas, às vezes formando ângulos ortogonais entre si.

Nas rochas de composição granítica (ortognaisses), esta foliação se apresenta tanto de forma homogênea, mais freqüente, quanto heterogênea materializada através de zonas miloníticas estreitas, sendo muitas vezes difícil de distinguir uma orientação planar, principalmente no Delicato.

Ao contrário da foliação S_n , cujo processo não é bem compreendido, a foliação S_{n+1} tem sua origem relacionada diretamente com a deformação, materializando juntamente com a lineação, uma tectônica tangencial em condições profundas que poderia ser interpretada como uma falha dúctil.

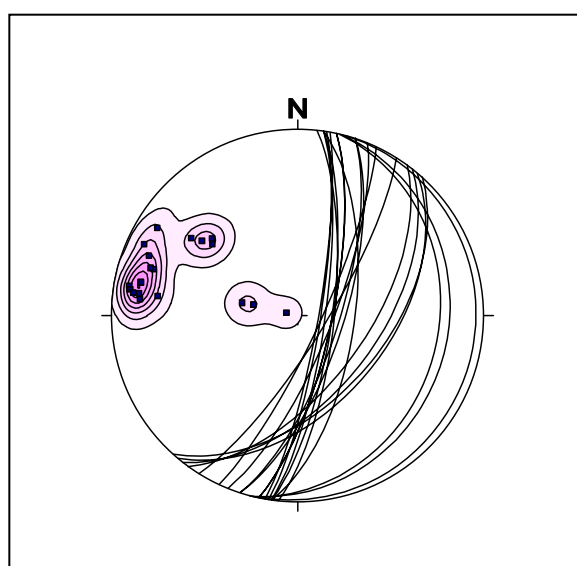


Figura 4.8 – Diagrama de Foliação das Áreas Estudadas.

• Lineações

A direção de estiramento mineral nos leucognaisses é revelada em escala mesoscópica, pelo alongamento das micas e fenocristais de feldspatos e em escala de lâmina pelas biotitas e *ribbons* de quartzo, onde se observa o padrão homogêneo de orientação E-W.

Os valores encontrados na área podem ser enquadrados no *trend* regional, obtidos em trabalhos já realizados, e que atestam duas direções de estiramento na região de Tróia, com uma delas vinculada ao que denominamos de primeira fase deformacional, com valores próximos a N100 e transporte para oeste, e a segunda

relacionada à tectônica horizontal, responsável pela formação de *nappes* com orientação N20.

4.3.2.2 – Rúpteis

Para a mineração em rocha ornamental esta é a feição tectônica mais determinante no sucesso da empreitada, condicionando tanto o método como a forma de lavra.

A região em apreço, apesar de ter sido submetida à deformação tectono metamórfica, apresenta grau de fraturamento que varia de médio a baixo, tanto em meso escala, quanto em micro escala.

O padrão de fraturamento que mais se repete na área obedece a uma direção preferencial N28° Az e outras duas subordinadas N135° Az e N160° Az, caracterizado como sistema de fraturas penetrativas. Os elementos que denunciam o grau de penetratividade das fraturas são observados nestas duas famílias: preenchimento e magnitude espacial (Figura 4.9).

Ao longo do fácies Delicato pode-se distinguir zonas mais ou menos fraturadas, predominando baixo grau de fraturamento em contraste com os fácies Casablanca e Falésia que se destacam por apresentar maior intensidade de microfraturas, resultado da tensão residual a qual essas rochas foram submetidas. No entanto, essa diferença de intensidade de fraturamentos não pode ser atribuída somente a divergentes comportamentos reológicos, mas principalmente ao posicionamento dentro do corpo. As porções mais afetadas pela deformação rúptil distribuem-se ao longo da borda do corpo, sendo que à medida que se avança para porção central o grau de fraturamento diminui.

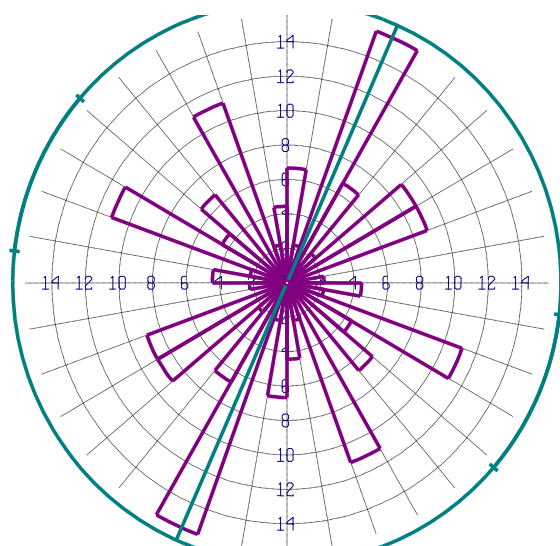


Figura 4.9 – Diagrama de Roseta das Áreas Estudadas.

4.3.3 GEOCRONOLOGIA E GÊNESE DO JAZIMENTO

Fetter (1999) encontrou evidências, por meio de datações Sm-Nd em rochas locais, que indicam preliminarmente que ambas as orogêneses Transamazônica e Brasileira, afetaram esse domínio. Uma isócrona Sm-Nd de 2,060 Ma do Complexo máfico-ultramáfico próximo de Tróia (Liégois, 1995 *apud* Fetter, 1999) e uma datação U-Pb em monazita de 586 Ma, no que ele denominou corpo intrusivo granitóide de Pedra Branca, atestam esta colocação. Assim, esse registro de idade mais recente seria indicativo do último evento que atingiu este corpo rochoso, resultando em deformações moderadas e foliação sin-metamórfica regional.

As Figuras 4.10 e 4.11 exibem as isócronas obtidas por Fetter para o que ele denominou “granitóide de Pedra Branca” (na realidade gnaiss Casablanca) e de rocha circunvizinha a esta jazida sugerindo que, esses registros de idade recente em contraposição aos de idade mais antiga encontrados em outras rochas da área, são indicativos de uma estruturação Transamazônica com forte retrabalhamento durante o evento Brasileiro.

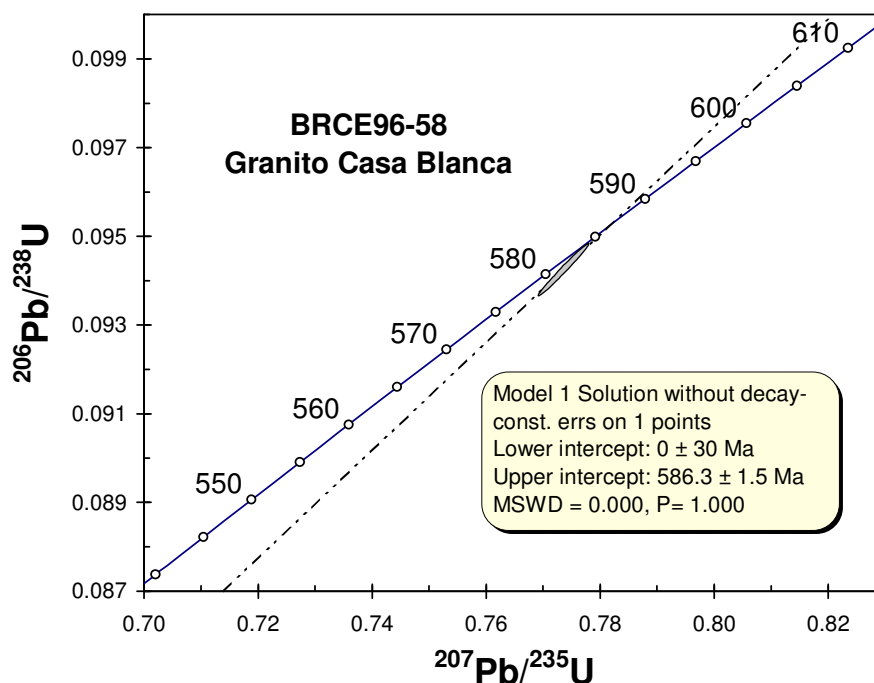


Figura 4.10 - Gráfico com resultado de datação obtido a partir de monazita para o gnaiss Casablanca (Fetter, 1999).

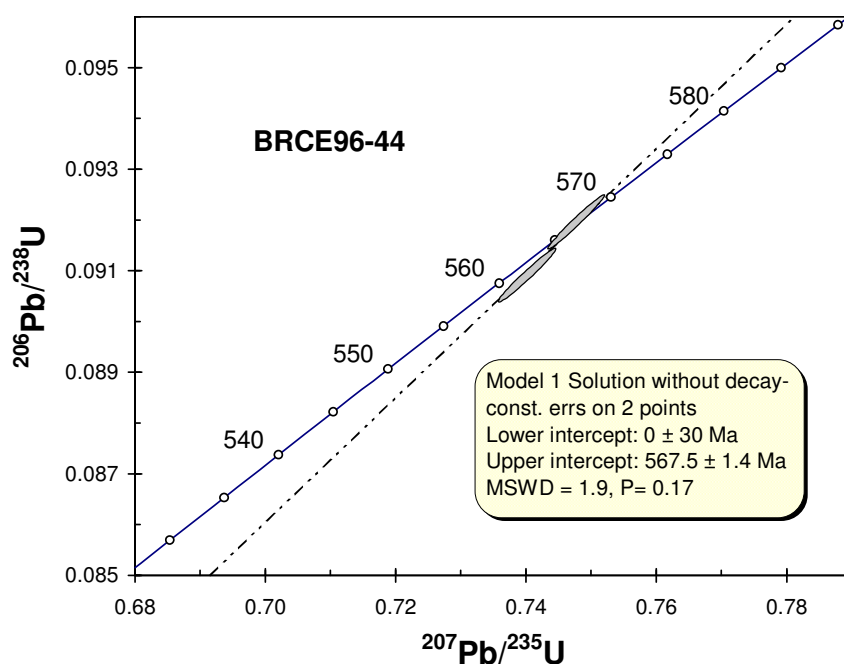


Figura 4.11 - Gráfico com resultado de datação obtido em rocha localizada nas proximidades da jazida do gnaiss Casablanca (Fetter, 1999).

O posicionamento estratigráfico da Unidade Cedro foi estabelecido baseado nas fases de intrusão e deformação, relacionadas ao Proterozóico Inferior (deformação tangencial) e Proterozóico Superior (Ciclo Brasileiro). Todavia esta arrumação estratigráfica esta sujeita a alterações, podendo relacionar-se a um evento mais antigo, possivelmente num contexto de plutonismo anarogênico (Cavalcante *et al.* 1993).

As feições texturais, estruturais e composicionais exibidas pelo leucognaiss Cedro sugerem que o mesmo corresponda a um migmatito nebulítico a homofânico originado pela fusão parcial de rochas pretéritas (xistos ou gnaisses), e que foi gnaissificado durante evento metamórfico superimposto acompanhado por recalibração mineral sob condições metamórficas/metassomáticas mais brandas ou retrometamórficas.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

O presente capítulo trata e discute as principais características petrográficas intrínsecas dos granada-biotita-muscovita gnaisses cinza esbranquiçado (Casablanca), granada-muscovita-biotita gnaisses rosado (Juparaná Delicato) e granada-muscovita-biotita gnaisses branco amarelado (Giallo Falésia) da região de Pedra Branca, no Ceará, utilizados para o desenvolvimento dos estudos ora em apreço.

Foram analisadas 15 lâminas delgadas e realizada quantificação mineral modal em placas polidas, submetidas ao ensaio colorimétrico com cobaltinitrito de sódio. A escolha desta metodologia deveu-se a predominância de granulações média e grossa exibidas pelos referidos gnaisses, de difícil quantificação por meios exclusivamente microscópicos.

Para a análise das características petrográficas dos materiais seguiu-se a metodologia tradicional, descrita no Capítulo 3, voltada para avaliação dos aspectos estruturais, texturais e composicionais exibidos pelos gnaisses investigados. Na análise microscópica foram avaliados a disposição e comportamento dos minerais, bem como dada especial atenção para as relações e tipos de contatos entre os cristais e o estado de microfissuramento, os quais foram quantificados por mm².

5.1 PETROGRAFIA

As rochas objetos desta pesquisa apresentam padrões texturais movimentados e variações cromáticas entre tons de róseo, cinza esbranquiçado e branco amarelado, que favoreceram a sua utilização como rocha ornamental tendo sido rápida e amplamente reconhecida pela indústria.

Por vezes, observam-se em escala de afloramento feições texturais/estruturais pegmatíticas, com marcante intercrescimento gráfico entre feldspato e quartzo definindo o contato do fácies de coloração branca com o róseo. O maciço exibe uma foliação incipiente na sua porção mais interna, próximo ao contato com o fácies róseo, e um pouco mais desenvolvida nas bordas.

As deformações ocorridas na região apontam para uma importante fase de tectonização e metamorfismo regional, com foliação de origem tectônica cuja atitude média é de N 30°E / 32°SE. Essa foliação registra uma deformação de caráter dúctil com intensidade distinta, cujos cristais de quartzo e feldspatos apresentam em geral formas lenticulares a laminadas/discóides, também ocorrendo em massas disformes com recristalização imposta pela dinâmica atuante.

A associação mineral nestes gnaisses de composição granítica é formada essencialmente por feldspato potássico (microclínio), quartzo, plagioclásio (albita com porções mais cálcicas no centro), biotita, muscovita e granada, e como produtos de alteração são encontrados sericita, epidoto, clorita, muscovita, argilo-minerais, óxidos e hidróxidos de ferro. Os acessórios estão representados por opacos e raros cristais de zircão e apatita. A assembléia mineral composta por feldspato potássico, plagioclásio, biotita e granada, sugerem um metamorfismo de mais baixo grau, contudo as feições texturais e estruturais encontradas, tais como mobilizados anatéticos com presença de textura gráfica e de microleitos tipicamente melanossômicos, indicam que essas rochas atingiram o fácies anfibolito até o início do fácies granulito, inclusive com fusão parcial. Posteriormente com o resfriamento, sofreram metamorfismo retrógrado até o limite do fácies xisto verde caracterizado pela presença de sericita, epidoto e clorita.

Os litotipos estudados são aqui classificados petrograficamente como granada-biotita-muscovita gnaisse, granada-muscovita-biotita gnaisse e granada-muscovita-biotita gnaisse. No entanto, apesar das similaridades observadas à luz do microscópio petrográfico, os três tipos são diferenciados entre si por mudanças na textura e coloração sendo denominados comercialmente como “Casablanca”, o de cor branca com tons de cinza médio, “Giallo Falésia”, o de cor branca com tons amarelados ferruginosos, e “Juparaná Delicato”, o de cor rosa com tons de preto.

Considerando as diferenças apresentadas na textura e coloração destes gnaisses, acrescidas às feições encontradas em escala de afloramento, a análise petrográfica deu-se no sentido de conhecer mais detalhadamente as características intrínsecas de cada um deles, de forma que pudessem auxiliar na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios físico-mecânicos e de envelhecimento acelerado com atmosfera salina.

5.1.1 GRANADA-BIOTITA-MUSCOVITA GNAISSE CINZA ESBRANQUIÇADO (CASABLANCA)

Trata-se de uma rocha grosseiramente gnaissificada, leucocrática, de cor branca com tons de cinza médio, nitidamente inequigranular de granulação média a média-grossa, com feições pegmatóides localizadas (Prancha 5.1 - Fotos 1 e 2). Em termos gerais é constituída por arcabouço quartzo-feldspático de granulação média contendo porções pegmatóides (leucossomas?) com formas lenticularizadas a alongadas de dimensões variadas, desde decimétricas a submétricas, e irregularmente espaçadas, entremeadas pela presença de microleitos descontínuos a lineares biotíticos-muscovíticos (melanossômicos?) com espessuras desde submilimétricas a cerca de 3 a 4mm. A granulação das porções pegmatóides é bastante variável, podendo localmente exibir cristais de feldspato potássico com dimensões que superam 2,0 a 3,0cm.

Por vezes ocorrem xenólitos de anfibolito inseridos na “matriz” quartzo-feldspática, fato este consoante com as complexas relações existentes entre as diferentes unidades da região e da qual faz parte o complexo máfico-ultramáfico acamadado de Tróia, rochas encaixantes de idade Arqueana (Figura 5.1).

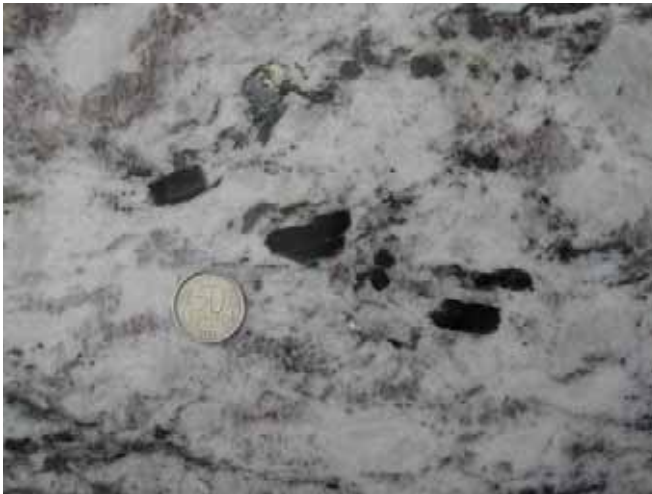


Figura 5.1 - Fotografia de placa pétrea (40 x 40cm) já assentada. Em detalhe estrutura xenolítica de anfibolito (provavelmente pertencente à Unidade Tróia) imersa em matriz quartzo-feldspática do Granada-biotita-muscovita gnaisse (Casablanca).

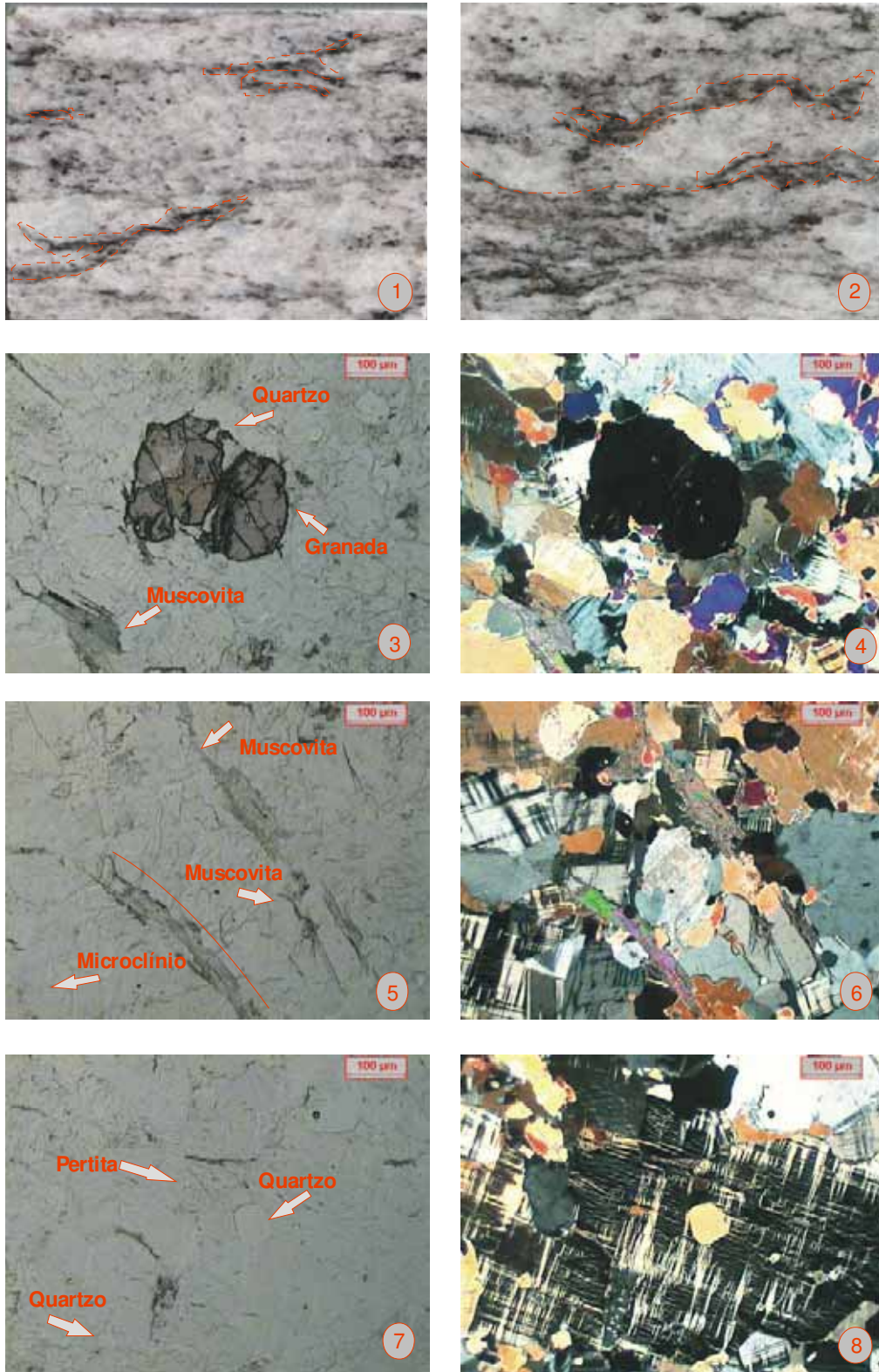
A composição mineralógica modal média (Tabela 5.1), obtida pela integração através da quantificação macro e microscópica, para estes gnaisses é cerca de 17,4% de quartzo, 38% de plagioclásio (albita e oligoclásio), 28% de feldspato

potássico (microclínio pertítico) e 13,2% de micas (8,0% de muscovita e 5,2% de biotita) e cerca de 1,8% de granada. Como minerais acessórios ocorrem os opacos, zircão e apatita, enquanto os secundários estão representados por sericita, epídoto, argilo-minerais, clorita e hidróxidos de ferro (Prancha 5.1 e 5.2, Fotos 1 a 16).

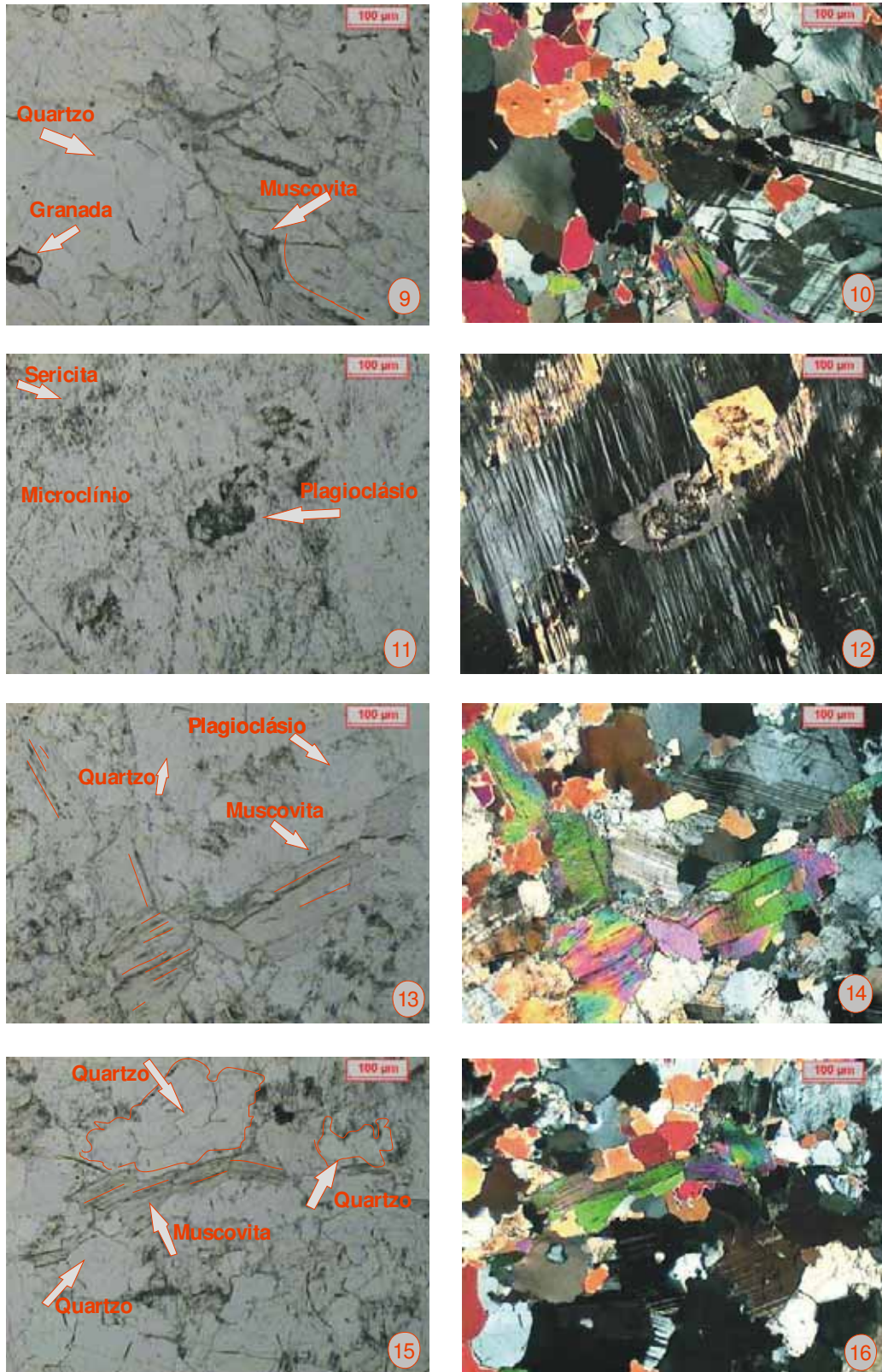
Ao microscópio apresentam textura granoblástica inequigranular orientada, com granulação bastante variável em função das porções quartzo-feldspáticas e dos leitos micáceos observados. As porções quartzo-feldspáticas do arcaço do gnaiss (paleossoma gnaissificado?) exibe granulação média a média-fina (0,5 a 7,0mm, e em média entre 2,0 e 4,0mm), sendo que nas porções pegmatóides as dimensões dos minerais excedem às das seções delgadas. Os leitos micáceos apresentam texturas lepidoblásticas a grano-lepidoblásticas e granulação média-fina a média (em média entre 2,0 a 3,0mm).

O feldspato potássico está representado pelo microclínio e ocorre sob forma de grãos subedrais e anedrais com reticulado em xadrez das maclas da albita e do periclínio. Nas porções pegmatóides é o mineral predominante e com as maiores dimensões, freqüentemente mesopertíticos e apresentando freqüentes inclusões de minúsculos cristais de quartzo, plagioclásio saussuritizado e alguma biotita.

O plagioclásio, caracterizado por uma composição na faixa albita-oligoclásio, é o mineral predominante na massa quartzo-feldspática de granulação média (paleossoma gnaissificado?) e bastante freqüente nos microleitos micáceos (melassômicos?). A albita constitui cerca de 15% da rocha e ocorre predominantemente sob forma de anéis ou subanéis mantendo núcleos mais cálcicos (oligoclásio a andesina ácida parcialmente saussuritizados) e, por vezes, intersticialmente aos demais minerais. O aspecto exibido pela albita sugere uma cristalização tardia para a mesma, provavelmente associada a uma fase metamórfica compatível com o fácies xisto verde médio-alto através de percolação de fluídos enriquecidos em sódio.



Prancha 5.1 – (1) e (2) Placas polidas do gnaiss Casablanca, mostrando leitões descontínuos. Fotomicrografias do Gnaiss Casablanca. Nicóis paralelos e cruzados. (3,4) Porfiroblasto de granada, com forma anedral, apresentando intenso fraturamento. (5,6) Micas cisalhadas, mostrando localmente o sentido do deslocamento, e encurvamento de “cordões” das mesmas. (7,8) Grão de quartzo com forma hexagonal, característica de dinâmica estática.



Prancha 5.2 – Fotomicrografias do Gnaiss Casablanca. Nicóis paralelos e cruzados. (11,12) Microclínio mesoperfítico parcialmente sericitizado com inclusões de plagioclásio de núcleo saussuritizado. (13,14) Muscovita e plagioclásio encurvados, apresentando extinção ondulante característica de um primeiro estágio deformacional. (15,16) Concentrações de muscovita lineares, descontínuas, com espessuras milimétricas e mostrando uma certa isorientação. Mosaico granoblástico interlobado a poligonal, composto a partir de intercrescimento do quartzo.

O quartzo ocorre comumente na forma de grãos anédricos com forte extinção ondulante, porém com forma poligonizada quando resultante de recuperação em subgrãos. Pode estar disposto intersticialmente ou como grãos isolados. Forma com o microclínio níveis quartzo-feldspáticos num arranjo granoblástico, por vezes poligonal.

Os cristais de granada ocorrem de forma subedral e anedral aparentemente ricas na molécula de almandina. Estão intensamente fraturados ora exibindo cloritização ao longo das microfissuras, ora substituídas por filossilicatos castanhos.

Ocorrem duas fases micáceas. Uma primária representada por biotitas e muscovitas e uma secundária representada por muscovitas e sericitas. A existência de biotita passando a muscovita sugere retrometamorfismo na fase final de resfriamento dessa rocha. As relações de substituição entre as fases estão evidenciadas por restos de biotitas presentes nos planos de clivagens de lamelas de muscovitas.

A avaliação do percentual de alteração evidencia um processo de sericitização moderado nos feldspatos e nas micas. A alteração da rocha como um todo foi julgada fraca, apesar da aparência turva existente nos plagioclásios.

Quanto ao microfraturamento, os intragrãos mostraram-se mais evidentes que os intergrãos, sendo que os primeiros se concentram principalmente nos cristais de quartzo e feldspatos enquanto o segundo nas micas e em menor escala.

Os contatos do tipo plano-lobulados predominaram com cerca de 71% das ocorrências, seguidos de aproximadamente 20% de contatos plano-serrilhados.

As observações macro e microscópica revelaram tratar-se de um granito de originalmente de anatexia (migmatito nebulítico) originado a partir de intensa fusão parcial das rochas pretéritas (xistos ou gnaisses), e que foi gnaissificado durante evento metamórfico superimposto acompanhado por recalibração mineral sob condições metamórficas/metassomáticas mais brandas. Os efeitos tectonotermiais superimpostos são bem evidenciados em lâmina delgada, pela observação de feições desenvolvidas nos cristais de quartzo, tais como banda de deformação e recuperação em subgrãos, formação de albita intersticial, além da isorientação geral das micas. Como subsídio para essa afirmação, temos ainda a associação mineral

GRANADA + BIOTITA + QUARTZO + PLAGIOCLÁSIO + MICROCLÍNIO
característica de rochas formadas sob condições de T x P mais altas.

Tabela 5.1- Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-biotita-muscovita gnaiss (Casablanca)

Nome Comercial		CASABLANCA					
Amostra		CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	Valores Médios
Mineralogia		%	%	%	%	%	%
Quartzo		15	16	19	19	18	17,4 (17)
Albita/Oligoclásio		15/31	15/30	14/30	8/17	10/20	13/25
Microclínio		20	22	20	40	38	28
Muscovita		9	7	9	8	7	8
Biotita		7	6	4	5	4	5,2
Granada		2	1,0	2	2	2	1,8 (2)
Acessórios (opacos)		0,5	2,5	1,3	0,5	0,6	1,1 (1)
Secundários (argilo-minerais, sericita, clorita, epidoto e hidróxido de ferro)		0,5	0,5	0,7	0,5	0,4	0,5
Estrutura		Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica
Textura		Granoblástica /Granolepidoblástica	Granoblástica /Granolepidoblástica	Granoblástica /Granolepidoblástica	Granoblástica /Granolepidoblástica	Granoblástica /Granolepidoblástica	Granoblástica /Granolepidoblástica
Granulação (mm)	Níveis Granoblásticos	4 a 10mm	9 a 10mm	6 a 8mm	8 a 10mm	6 a 8mm	6,6 a 9,2mm
	Níveis Granolepidoblásticos	0,1 a 1mm	0,5 a 3mm	0,1 a 2mm	0,3 a 2mm	0,5 a 3mm	0,3 a 2,2mm
Classificação (QAP)		Gnaiss sienogranítico	Gnaiss sienogranítico	Gnaiss sienogranítico	Gnaiss sienogranítico	Gnaiss sienogranítico	Gnaiss sienogranítico
Microfissuras/mm ²	Intergrão	0,03	0,06	0,12	0,04	0,04	0,06
	Intragrão	0,14	0,15	0,21	0,08	0,13	0,14
Alteração		Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca
Contatos (%)	Planos	2	7	7	6	6	5,6
	PI-serrilhados	23	23	25	18	12	20,2
	PI-lobulados	75	64	68	72	76	71
	Côncavo-serrilhados	-	6	-	4	6	3,2

5.1.2 GRANADA-MUSCOVITA-BIOTITA GNAISSE ROSADO (JUPARANÁ DELICATO)

Refere-se a uma seqüência litológica com coloração rosada, grosseiramente gnaissificada, caracterizada por um arcabouço quartzo-feldspático gnáissico de granulação média (paleossoma?) contendo porções quartzo-feldspáticas de granulação média a grossa ou pegmatóide com freqüentes texturas gráficas

(neossoma granítico?) com a presença de microleitos descontínuos a lineares biotíticos-muscovíticos (melanossomas?) (Prancha 5.3, Fotos 1 e 2).

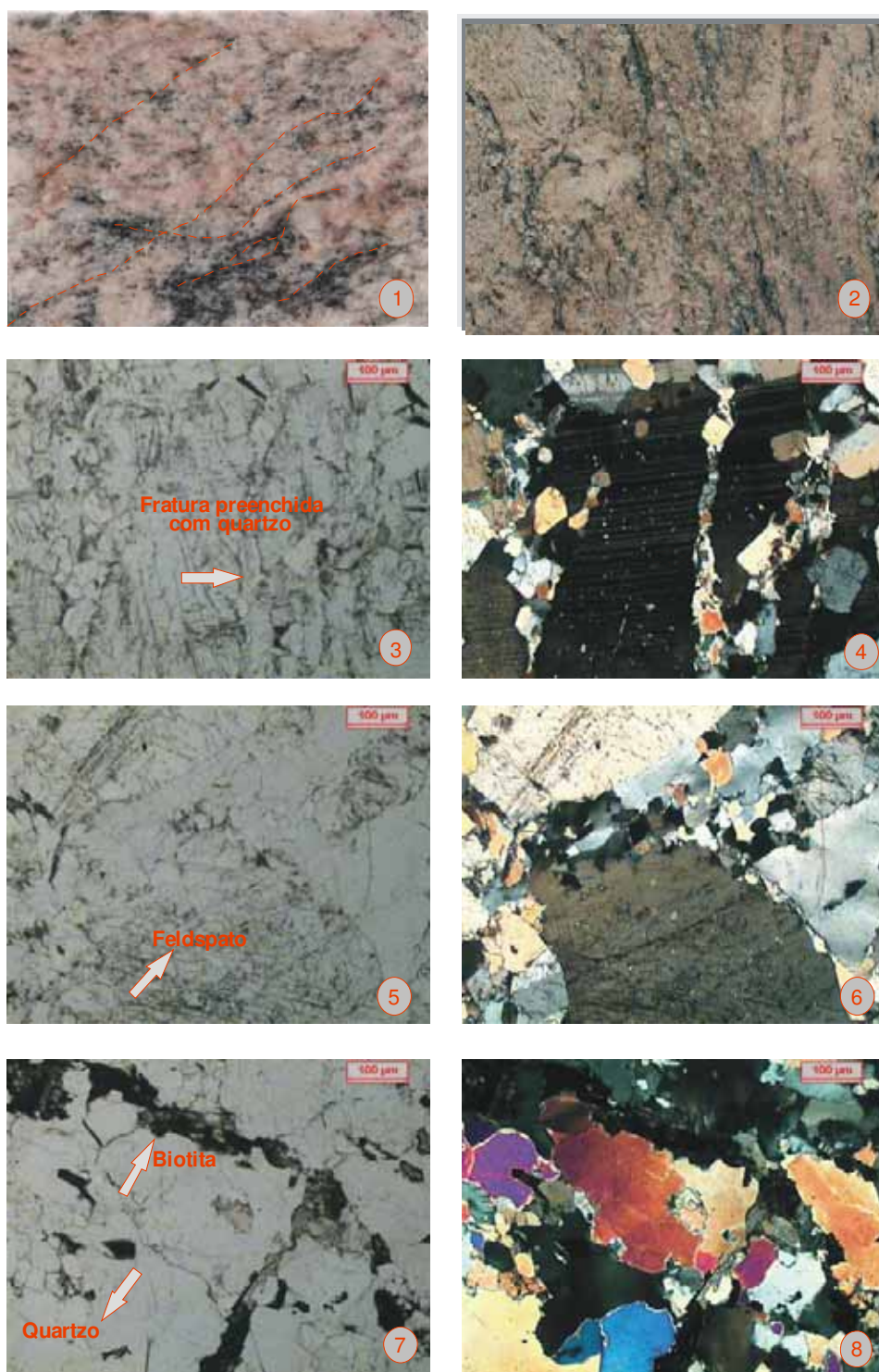
As porções quartzo-feldspáticas de granulação grossa a pegmatóide, com granulação que pode atingir dimensões centimétricas, constituem bolsões lenticulares a macroleitos isorientados com dimensões variadas, decimétricos a submétricos, com contornos irregulares e muitas vezes delineados por concentrações micáceas (melanossomas?).

As concentrações micáceas lineares apresentam espessuras reduzidas, de no máximo alguns milímetros, mais ou menos persistentes e irregularmente distribuídas. Concentram-se preferencialmente nas bordas e no interior das porções quartzo-feldspáticas de granulação mais grossa a pegmatóides (leucossomáticas?), imprimindo, em termos gerais, um aspecto ligeiramente anastomosado à rocha.

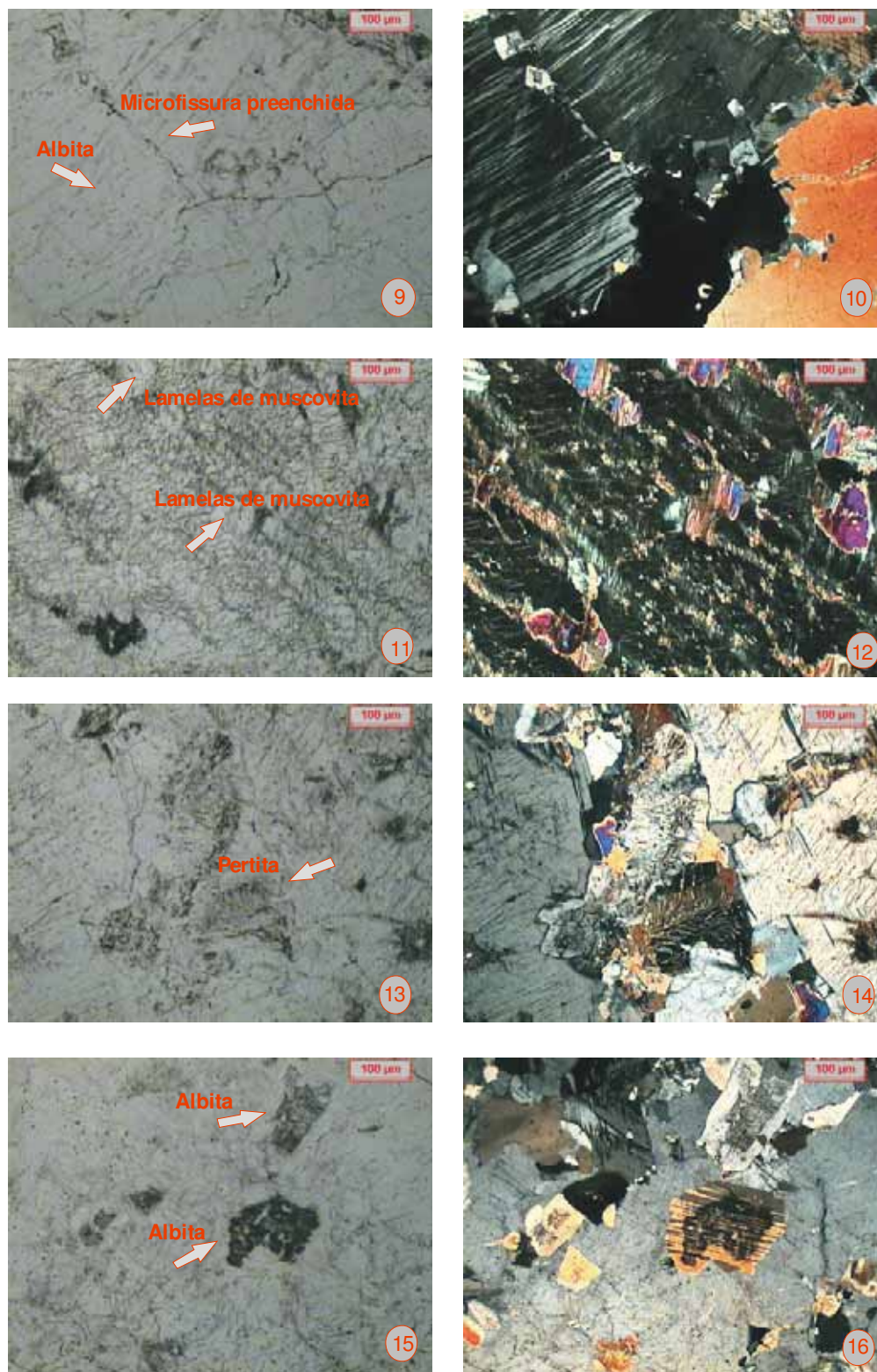
A composição mineralógica modal média (Tabela 5.2) está representada essencialmente por 20,6% de quartzo, 36,4% de feldspato potássico (representado por microclínio), 26,6% de plagioclásio (5,0% de albita e 20,6% de oligoclásio) e 13,8% de micas (4,8% de muscovita e 9,0% de biotita) e cerca de 1,8% de granada, opacos, zircão e apatita, bem como 0,8% representados pelos minerais secundários sericita, epídoto, argilominerais e hidróxidos de ferro (Pranchas 5.3 e 5.4, Fotos 1 a 16).

Microscopicamente o gnaiss caracteriza-se por nítida textura essencialmente granoblástica, sendo que nas concentrações micáceas desenvolve texturas lepidoblástica a granolepidoblástica.

O feldspato potássico, representado pelo microclínio, ocorre normalmente sob forma de grãos anedrais e subedrais, com típica geminação em grade e por vezes Carlsbad, exibindo fraturamento, com ou sem preenchimento por sericita e mais raramente contendo epídoto e opacos, acompanhados de extinção ondulante. Corresponde ao mineral amplamente predominante nas porções quartzo-feldspáticas pegmatóides, ocasiões que apresentam certa riqueza em inclusões de minúsculos cristais de quartzo, plagioclásio saussuritizados e lamelas de biotita.



Prancha 5.3 – Fotomicrografias do Gnaiss Delicato. Nicóis paralelos e cruzados. (1,2) Placas polidas exibindo microleitos descontínuos a lineares biotíticos-muscovíticos, além de porções quartzo-feldspáticas de aspecto pegmatóide.



Prancha 5.4 – Fotomicrografias do Gnaiss Delicato. Nicóis paralelos e cruzados. (9) Albite com forma anédrica e dimensão maior, exibindo fratura preenchida com quartzo. (10) Feldspato com sericita e lamelas de muscovita. (15) Albite exibindo manteamento com núcleo mais rico em cálcio.

O plagioclásio está representado pela albita e por oligoclásio. A albita ocorre sob forma de pequenos cristais anédricos (submilimétricos) intersticiais e, preferencialmente, formando delgados anéis mantendo cristais maiores de oligoclásio. Este último pode ser zonado, com núcleos que atingem composição da andesina ácida, normalmente afetados por parcial sericitização, ou mesmo saussuritização, que lhes conferem aspecto ligeiramente turvo.

A presença da albita sob forma intersticial e de anéis emoldurando cristais de plagioclásio mais cálcicos sugerem recalibrações minerais em condições metamórficas superimpostas mais brandas, ou de efeitos retrometamórficos, acompanhados por percolação de fluidos enriquecidos em sódio.

Os grãos de quartzo em geral formam mosaico granoblástico com formas anedrais a subedrais, exibindo extinção ondulante. Bandas de deformação também são observadas com efeitos de recristalização.

As micas apresentam-se comumente em agregados lamelares deformados e em lamelas individuais. Frequentemente exibem os planos de clivagem preenchidos por minúsculos cristais de opacos sob forma disseminada. A evidência de retrometamorfismo também é constatada por processos de muscovitização parcial de cristais de biotita, bem como na coexistência de albita-oligoclásio, caracterizando provável transição do fácies xisto verde a anfibolito.

A biotita concentra-se preferencialmente nos leitões melanossômicos que normalmente delineiam porções quartzo-feldspáticas de granulação mais grossa a pegmatóide, aonde juntamente com a muscovita conduzem a aspectos texturais tipicamente lepidoblásticos a granolepidoblásticos, responsáveis pelo desenvolvimento de evidentes planos de descontinuidades físicas à rocha.

A granada é o mineral acessório mais significativo, apresenta grãos anedrais fraturados com presença de biotitas e cloritas em suas bordas e interstícios.

Ocorre o predomínio de microfissuras intragrãos, com cerca de 0,13 microfissuras/mm², fechadas ou preenchidas por sericita, argilominerais incolores e mais raramente contendo algum epidoto. As fissuras intergrãos são preenchidas por quartzo recristalizado ou biotitas formando níveis lineares descontínuos de espessuras submilimétricas isorientadas.

Há a predominância de contatos plano-lobulados com cerca de 62% das ocorrências e 24% de contatos plano-serrilhados.

Tabela 5.2 – Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-muscovita-biotita gnaïsse rosado (Juparaná Delicato)

Nome Comercial		JUPARANÁ DELICATO					
Amostra		JD1	JD2	JD3	JD4	JD5	Valores Médios
Mineralogia		%	%	%	%	%	%
Quartzo		23	17	14	28	21	20,6 (20)
Albita/Oligoclásio		4/16	3/15	4/15	9/40	5/17	5,0/20,6 (26)
Microclínio		39	43	53	9	38	36,4
Biotita		9	12	7	6	11	9
Muscovita		6	6	3	4	5	4,8 (5)
Acessórios (granada, opacos, zircão, apatita)		1	2,5	2	2	1,5	1,8
Secundários (argilo-minerais, sericita, biotita, epidoto e óxido de ferro)		1	0,5	1	1	0,5	0,8
Estrutura		Gnáïssica	Gnáïssica	Gnáïssica	Gnáïssica	Gnáïssica	Gnáïssica
Textura		Granoblástica /Granolepido blástica	Granoblástica /Granolepido blástica	Granoblástica /Granolepido blástica	Granoblástica /Granolepido blástica	Granoblástica /Granolepido blástica	Granoblástica /Granolepido blástica
Granulação (mm)	Níveis granoblásticos	8 a 14mm	7 a 13mm	7 a 14mm	5 a 12mm	7 a 13mm	6,8 a 13mm
	Níveis granolepidoblásticos	0,1 a 2,0mm	0,5 a 2mm	0,3 a 1,5mm	0,5 a 2,0mm	1 a 2mm	0,5 a 1,9mm
Classificação (QAP)		Gnaïsse sienogranítico	Gnaïsse sienogranítico	Gnaïsse sienogranítico	Gnaïsse sienogranítico	Gnaïsse sienogranítico	Gnaïsse sienogranítico
Microfissuras /mm ²	Intergrão	0,03	0,05	0,10	0,03	0,04	0,04
	Intragrão	0,13	0,14	0,19	0,07	0,12	0,13
Alteração		Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca
Contatos (%)	Planos	9	10	16	13	8	11,2 (11)
	PI-serrilhados	20	30	25	22	25	24,4 (24)
	PI-lobulados	71	60	55	65	60	62,2 (62)
	Côncavo-serrilhados	-	-	4	-	7	3

5.1.3 GRANADA-MUSCOVITA-BIOTITA GNAÏSSE BRANCO AMARELADO (GIALLO FALÉSIA)

Rocha gnáïssica leucocrática de coloração branco amarelada inequigranular, de granulação variando de média a grossa, com porções tipicamente pegmatóides (Prancha 5.5, Fotos 1 e 2). Corresponde a um material petrograficamente bastante heterogêneo, tanto sob aspectos texturais/estruturais quanto composicionais, definido pela alternância de bandas lenticulares irregulares ora quartzo-feldspáticas

(graníticas), de granulação grossa a pegmatóide, ora gnáissicas, de granulação média com maior ou menor riqueza de microleitos micáceos (melanossômicos), no geral grosseiramente isorientadas. As bandas lenticulares apresentam dimensões e espessuras variadas, centimétricas a métricas, irregularmente distribuídas e com contatos gradacionais e difusos entre si.

Os microleitos micáceos, com predominância de biotita sobre a muscovita, são descontínuos a persistentes com espessuras submilimétricas a milimétricas, isorientados, podendo ocorrer tanto isoladamente quanto concentrados em certas porções da rocha, ocasiões que imprimem aspecto mais ou menos bandado ao material. Em termos gerais os microleitos micáceos representam prováveis concentrações melanossômicas, e como tais são responsáveis pelo desenvolvimento de planos de descontinuidades físicas com conseqüente redução da resistência mecânica das rochas. Destaca-se que os cristais de biotita destes microleitos encontram-se relativamente oxidados com a formação e conseqüente liberação de hidróxidos de ferro, os quais pela dispersão através das microfissuras e interfácies minerais conferem à rocha manchamentos aleatórios de coloração amarelada com faixas irregulares de aspectos ferruginosos.

A composição mineralógica modal média deste gnaiss está representada por cerca de 18,8% de quartzo, 36,4% de feldspato potássico, 26,6% de plagioclásio (aproximadamente 6,0% de albita e 35,0% de oligoclásio), 10,0% de biotita, 5,0% de muscovita, além de 2,2% de granada, opacos, zircão e apatita. Como minerais secundários ocorrem sericita, epidoto, argliominerais, óxidos e hidróxidos de ferro (Tabela 5.3).

Microscopicamente apresenta textura predominantemente granoblástica com presença de típicas feições lepidoblásticas nos microleitos micáceos (Prancha 5.3; Fotos 3 a 16).

O feldspato potássico corresponde ao microclínio, podendo ser fortemente pertíticos, com cristais anédricos e subédricos caracterizado por nítida geminação em grade, freqüentemente exibindo microfissuramentos, recristalização e por vezes extinção ondulante. Representa o mineral mais freqüente das porções quartzo-feldspáticas de granulação grossa a pegmatóide, ocasiões que atingem as maiores dimensões. Por vezes encontram-se parcialmente sericitizados e com variável

intensidade de argilização que lhe imprime aspecto turvo devido a presença de pigmentação dada por hidróxidos de ferro.

O plagioclásio apresenta composição na faixa albita-oligoclásio e representa o feldspato mais freqüente das porções gnáissicas de granulação média a média-fina (restos paleossômicos?) e nas faixas e concentrações enriquecidas em micas. A albita ocorre tanto sob forma de pequenos cristais anédricos intersticialmente aos demais minerais quanto formando delgados anéis descontínuos que emolduram parcialmente cristais de plagioclásio mais cálcicos (oligoclásio com núcleos que podem atingir a composição de andesina ácida). Os cristais mais cálcicos exibem, com freqüência, núcleos parcial a totalmente sericitizados e por vezes encontram-se intensamente saussuritizados.

Os microfissuramentos minerais, bem como os interstícios dos grãos, em sua maioria encontram-se preenchidos por um material ferruginoso, proveniente de minerais opacos e da biotita. Os grãos menores de plagioclásio que se encontram formando os níveis quartzo-feldspáticos exibem boa geminação e forma subedral, no entanto os grãos maiores têm forma anedral, mostram-se bastante fraturados e com presença de mobilizados que migram para essas zonas de alívio de pressão formando grãos hexagonais de quartzo que caracterizam uma dinâmica estática.

Os grãos de quartzo podem ocorrer de forma individualizada ou constituírem mosaicos granoblásticos, por vezes microfissurados (algumas microfissuras encontram-se preenchidas por materiais de alteração). Os efeitos de extinção ondulante e recristalização são bem mais intensos do que nos feldspatos.

Nos agregados micáceos verifica-se a predominância da biotita sobre a muscovita. De forma similar aos outros minerais essenciais, a biotita exhibe extinção ondulante e recristalização com recuperação em sublamelas. A muscovita ocorre, quase sempre, na forma de agregados ou lamelas reliquiares com microfissuras preenchidas por hidróxido de ferro liberado a partir da oxidação da biotita.

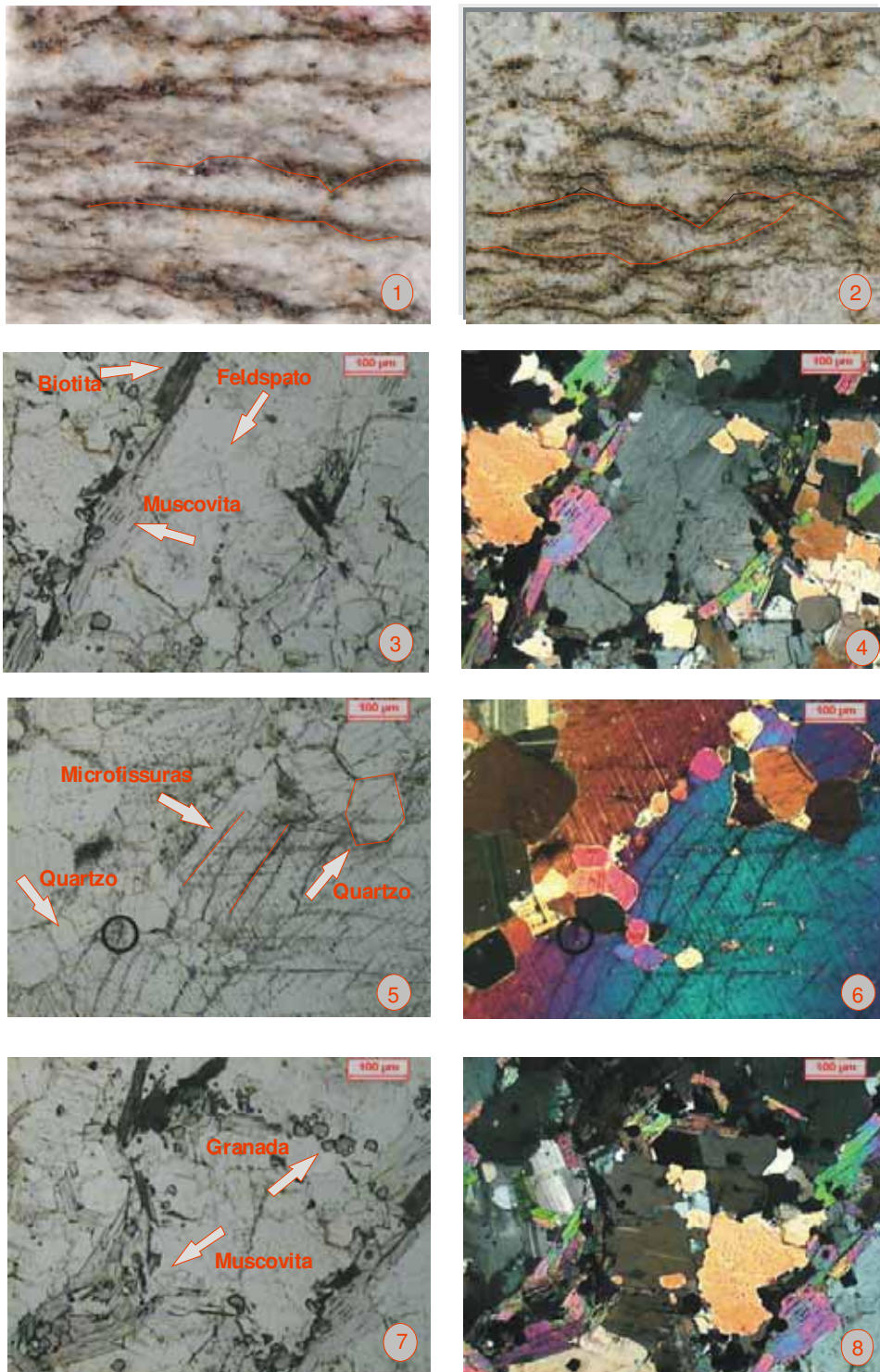
Os minerais acessórios mais significativos compõem-se de granada e minerais opacos, enquanto os secundários estão representados por minerais de argila neoformados, sericita, epidoto, óxido e hidróxidos de ferro e alguma clorita.

Os contatos entre grãos são predominantemente plano-lobulados (62% das ocorrências) e plano-serrilhados (24%).

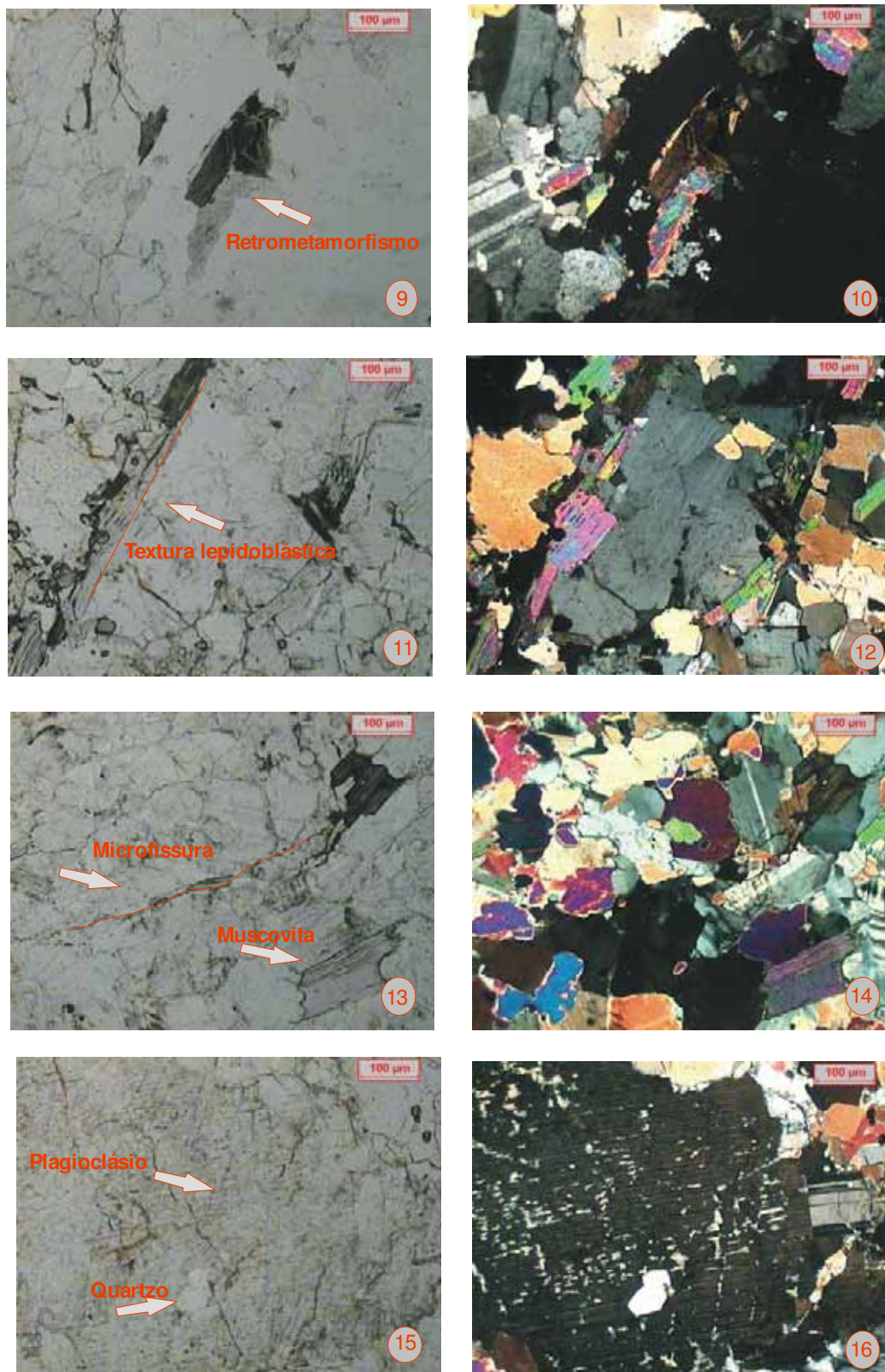
Também neste litotipo predominaram microfissuras intragrãos, com cerca de 0,18 microfissuras/mm², contudo o número de fissuras intergrão é bem mais significativo do que nos outros dois litotipos estudados além do que as fissuras mostram-se mais espessas e maiores.

Os processos de alteração considerados moderados concentram-se em plagioclásios e subordinadamente em micas (processos de muscovitização de biotitas). Entretanto, a rocha exibe uma forte dispersão de material ferruginoso nas microfissuras e interstícios de grãos, este processo parece estar relacionado com a presença de opacos (óxidos de ferro) e com o posicionamento estrutural da jazida.

Similarmente aos outros dois gnaisses anteriormente descritos, as feições texturais, estruturais e composicionais exibidas pelo gnaisse sugerem que o mesmo corresponda a um migmatito nebulítico a homofânico originado pela fusão parcial de das rochas pretéritas (xistos ou gnaisses), e que foi gnaissificado durante evento metamórfico superimposto acompanhado por recalibração mineral sob condições metamórficas/metassomáticas mais brandas ou retrometamórficas.



Prancha 5.5 – (1,2) Placas polidas do Gnaiss Falésia exibindo concentrações lineares de minerais micáceos com espessuras milimétricas. Fotomicrografias com nicóis paralelos e cruzados. (6) Cristalização de grãos hexagonais de quartzo por alívio de pressão. (7) Muscovita dobrada exibindo extinção ondulante resultante de esforço.



Prancha 5.6 – Fotomicrografias do Gnaiss Falésia. Nicóis paralelos e cruzados. (9) Muscovitização da biotita, evidência de retrometamorfismo. (11) Muscovita, biotita e granada compoendo textura lepidoblástica. (15) Plagioclásio alterado apresentando inclusão de quartzo.

Tabela 5.3 – Síntese dos dados petrográficos referentes ao Granada-Muscovita-Biotita Gnaiss Branco Amarelado (Giallo Falésia)

Nome Comercial		GIALLO FALÉSIA					
Amostra		FL1	FL2	FL3	FL4	FL5	Valores Médios
Mineralogia		%	%	%	%	%	%
Quartzo		17	19	12	26	20	18,8 (19)
Albita/Oligoclásio		45	41	46	36	37	6/35
Microclínio		20	23	24	25	25	23,4 (23)
Biotita		7	7	8	6	10	7,6 (8)
Muscovita		7	6	7	5	5	6
Acessórios (opacos e granada)		3	3	2	1	2	2,2 (2)
Secundários (argilo-minerais, sericita, óxido de ferro, epidoto e clorita)		1	1	1	1	1	1
Estrutura		Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica	Gnáissica
Textura		Granoblástica /granolepido Blástica	Granoblástica /granolepido blástica	Granoblástica /granolepido blástica	Granoblástica /granolepido blástica	Granoblástica /granolepido blástica	Granoblástica /granolepido blástica
Granulação (mm)	Níveis granoblásticos	7 a 15mm	5 a 13mm	5 a 12mm	4 a 10mm	4 a 12mm	5 a 12,4mm
	Níveis granolepidoblásticos	1 a 2,5mm	1,5 a 2,5mm	1 a 2,0mm	1 a 2,5mm	1,5 a 2,0mm	1,2 a 2,3mm
Classificação (QAP)		Gnaiss Sienogranítico	Gnaiss Sienogranítico	Gnaiss Sienogranítico	Gnaiss Sienogranítico	Gnaiss Sienogranítico	Gnaiss Sienogranítico
Microfissuras /mm ²	Intergrão	0,05	0,07	0,14	0,06	0,07	0,08
	Intragrão	0,16	0,17	0,23	0,09	0,15	0,18
Alteração		Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Contatos (%)	Planos	9	10	16	13	8	11,2 (11)
	PI-serrilhados	20	30	25	22	25	24,4 (24)
	PI-lobulados	71	60	55	65	60	62,2 (62)
	Côncavo-serrilhados	-	-	4	-	7	3

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões de ensaios tecnológicos associados a ensaios de alteração, estabelecendo um comparativo entre amostras *in natura* (sã) e amostras submetidas à alteração forçada.

Para avaliar a implicação resultante da exposição dessas rochas ao ensaio contínuo de alteração acelerada foram realizados, como forma de controle qualitativo, os seguintes ensaios: índices físicos, resistência à compressão, desgaste Amsler, intensidade de brilho, velocidade de ondas ultra-sônicas e dilatação térmica. Os resultados das amostras *in natura* e após ensaio acelerado são correlacionados com os aspectos mineralógicos, texturais e estruturais dessas rochas, visando o melhor entendimento do comportamento físico-mecânico apresentado por elas diante do processo de alteração induzida.

A condutividade térmica, microdureza *Knoop* e aptidão de molhagem foram também avaliadas como forma de complementar a caracterização destes materiais e poder identificar melhor suas suscetibilidades às alterações.

A microdureza *Knoop* e o brilho foram, ainda, utilizados como ferramenta na determinação de um índice de alterabilidade das rochas estudadas, após o ensaio cíclico de alteração acelerada.

Evidentemente, os dados revelados em trabalhos anteriores com algum desses gnaisses também foram considerados e comparativamente analisados.

Apesar da marcante anisotropia, característica peculiar das rochas gnáissicas, a escolha desses litotipos foi realizada levando em conta a sua importância no mercado brasileiro de rochas, e por outro lado à possibilidade de avaliar, para os mesmos ensaios e análises, o comportamento de três variantes de rocha de mesma história e/ou formação geológica.

6.1. ÍNDICES FÍSICOS

As propriedades físicas são de notável interesse como indicadores da qualidade das rochas, na quantificação das trocas experimentadas como

conseqüência dos processos de deterioração e na avaliação de sua durabilidade. Influenciam diretamente em vários outros parâmetros importantes como resistência à compressão, resistência à flexão, propagação de ondas elásticas, entre outros.

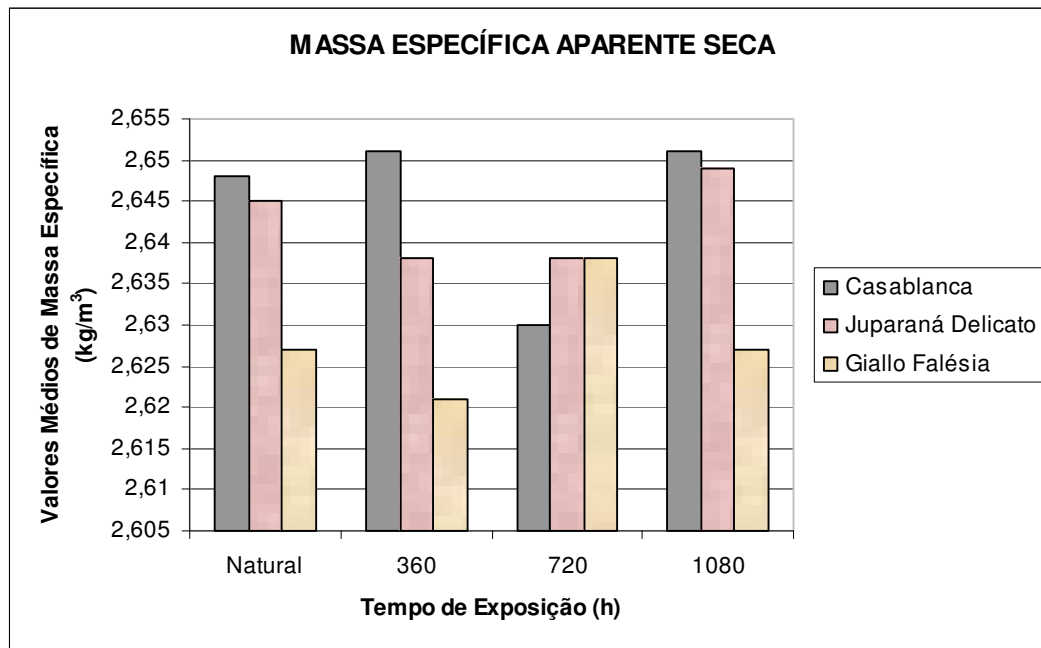
Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- dez corpos-de-prova para cada uma das três amostras, totalizando 30 (trinta) corpos-de-prova ao natural;
- três corpos-de-prova para cada uma das três amostras, nos três diferentes números de horas o que totalizou 27 (vinte e sete) corpos-de-prova.

6.1.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE (KG/M³)

A massa específica aparente se define como a massa do material rochoso por unidade de volume total, ou seja o volume incluindo sua parte sólida e todo os seus espaços vazios.

O efeito da água contida nos poros ou cavidades rochosas reflete-se em todas as propriedades físico-mecânicas, uma vez que a densidade da água é muito maior que a do ar. Isso faz aumentar a densidade aparente da rocha, mesmo sem qualquer alteração estrutural.



AMOSTRAS	Natural	360 h	720 h	1080 h
Casablanca	2,648	2,651	2,630	2,651
Delicato	2,645	2,638	2,638	2,649
Falésia	2,627	2,621	2,638	2,627

Figura 6.1- Valores Médios da Massa Específica Aparente Seca medidos em diferentes tempos de exposição

6.1.2. POROSIDADE APARENTE (%) E ABSORÇÃO D'ÁGUA (%)

A porosidade se define como o volume ocupado pelos espaços vazios por unidade de volume de rocha, expresso em porcentagem.

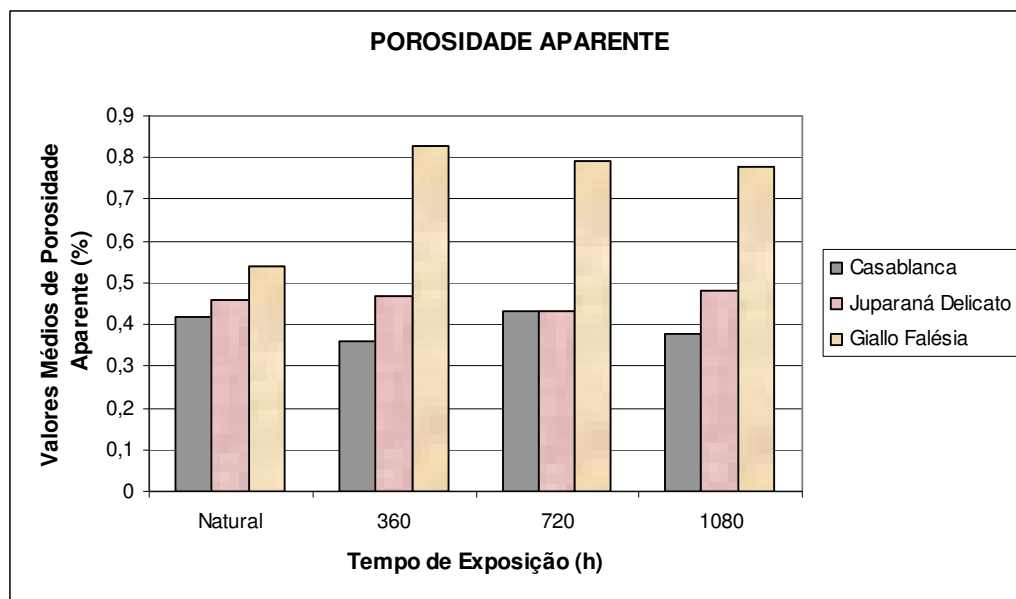
Trata-se sem dúvida do parâmetro mais significativo das rochas de edificação, por sua influência nas demais propriedades físicas, na reatividade química e, em última instância, na durabilidade e qualidade do material.

Quando abordadas as características do espaço poroso deve ser considerado não somente o volume ocupado pelos vazios, mas também a dimensão, forma, superfície e distribuição dos mesmos. Tais características permitem, entre outros aspectos, conhecer o transporte das fases líquidas e gasosas na rocha, a formação de minerais secundários no espaço poroso (principalmente sais) e até quantificar o grau de alteração da rocha (Fitzner, 1993).

Castro (1978 apud Figueiredo 1997, p. 168) afirma que duas rochas mineralógica e quimicamente semelhantes poderão ter um comportamento em obra

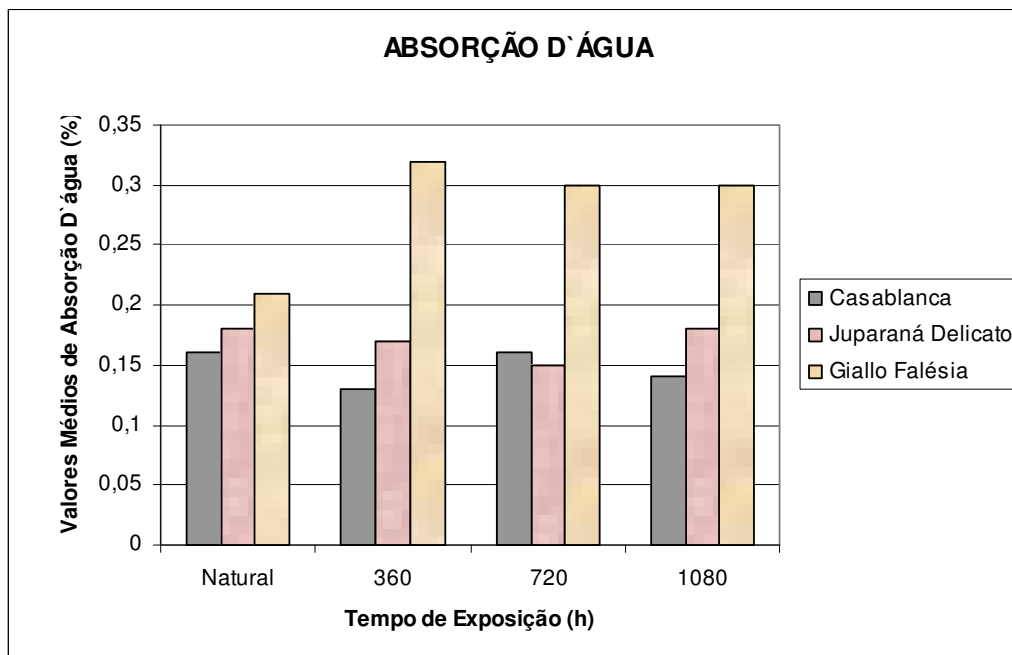
muito diverso se o volume e as dimensões dos seus poros forem diferentes. Aires-Barros (1991) acrescenta que o conhecimento da porometria e da superfície específica das rochas empregues em monumentos é fundamental para a compreensão do seu comportamento físico (resistência mecânica e durabilidade).

A absorção é a capacidade de assimilação ou incorporação de água pela rocha. Assim, a relação expressa em percentagem, entre a massa da amostra seca e depois de 24 horas submersa em água é designada absorção d'água, a qual é influenciada diretamente pela porosidade e permeabilidade do material.



AMOSTRAS	Natural	360 h	720 h	1080 h
Casablanca	0,42	0,36	0,43	0,38
Delicato	0,46	0,47	0,43	0,48
Falésia	0,54	0,83	0,79	0,78

Figura 6.2- Valores Médios da Porosidade Aparente medidos em diferentes tempos de exposição



AMOSTRAS	Natural	360 h	720 h	1080 h
Casablanca	0,16	0,13	0,16	0,14
Delicato	0,18	0,17	0,15	0,18
Falésia	0,21	0,32	0,30	0,30

Figura 6.3- Valores médios de Absorção D'Água medidos em diferentes tempos de exposição

6.1.3. RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ÍNDICES FÍSICOS

A média dos resultados obtidos para os índices físicos dos três diferentes gnaisses analisados encontra-se nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada gnaisse para os diferentes tempos de exposição estipulados.

Os índices físicos determinados ao natural para duas destas rochas situaram-se muito próximos daqueles encontrados por Frascá (2003) em seu estudo (Apêndice 1). Na oportunidade foram ensaiados os gnaisses Casablanca e Falésia que exibiram para massa específica, porosidade e absorção d'água, respectivamente, os seguintes valores: ρ_{sec} (2.636 ± 16 e 2.616 ± 22), η ($0,44 \pm 0,03$ e $0,61 \pm 0,08$) e α ($0,17 \pm 0,01$ e $0,23 \pm 0,03$).

A compilação dos dados obtidos para os índices físicos revelou variações entre os diferentes tempos de exposição.

As variações de massa foram sutis e muito irregulares, provavelmente pela presença de solução salina residual no interior da rocha, o que poderia acarretar aparente aumento da densidade. Contudo, o Falésia comparativamente apresentou menores valores de massa específica, confirmando a existência de um volume maior de vazios (poros, fissuras etc.) desta variedade em relação as demais.

Dentre os três litotipos estudados o Falésia foi aquele que se mostrou mais susceptível ao ensaio acelerado, com aumento da porosidade e absorção posterior a esse ensaio, seguido do Delicato e Casablanca.

6.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAxIAL SIMPLES

6.2.1. GENERALIDADES

O ensaio de resistência à compressão uniaxial determina a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos. Representa o valor da carga máxima suportada pelo corpo de prova durante o teste, dividido pela seção onde foi aplicada a carga. Trata-se de um valioso índice de qualidade dos materiais pétreos, permitindo a comparação entre rochas semelhantes e suas resistências quando da utilização como elementos estruturais. Conforme Ciccu et al. (1996), valores elevados de resistência à compressão significam, de um modo geral, baixos valores de porosidade e alta resistência à flexão. É correto afirmar que percentuais de microfraturamento e alteração são inversamente proporcionais aos valores de resistência à flexão.

Diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de sistematizar e comparar resultados de ensaios tecnológicos. No caso específico dos ensaios de resistência à compressão uniaxial temos que em 1979 a International Society Rocks Mechanics (ISRM) classificou as rochas segundo a resistência à compressão simples tendo como parâmetros limite os termos extremamente brandos e extremamente resistentes. Valores limites de resistência à compressão para rochas com fins ornamentais foram estipulados pela ASTM-C-615 (ASTM, 1992) como maior ou igual a 130 MPa. Frazão & Farjallat (1995) propuseram uma especificação de resistência à compressão igual ou superior a 100 MPa para rochas silicáticas, baseados em valores estatísticos de mais de uma centena de rochas brasileiras.

6.2.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

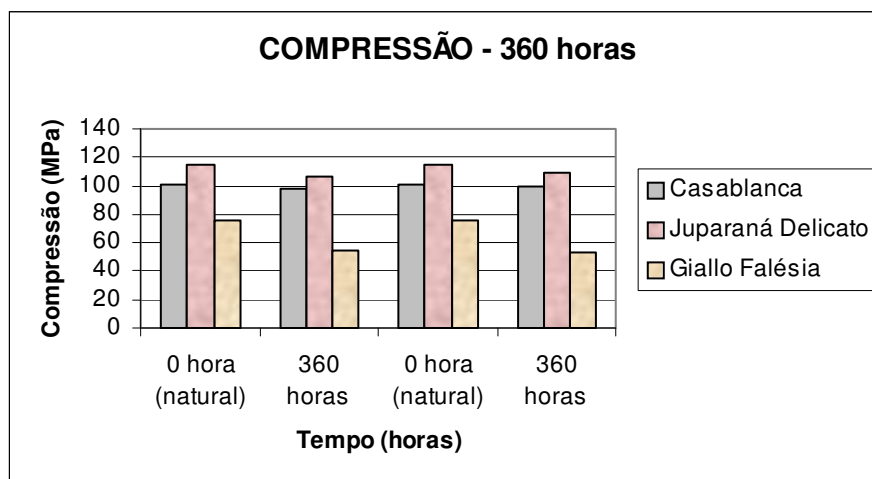
- sete corpos-de-prova para cada uma das três amostras, totalizando 21 (vinte e um) corpos-de-prova ao natural;
- dois corpos-de-prova para cada uma das três amostras, nos três diferentes números de horas o que totalizou 18 (dezoito) corpos-de-prova.

Os resultados do ensaio encontram-se nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

De acordo com os resultados do ensaio de resistência ao natural e a classificação da ISRM (1979), os gnaisses Delicato e Casablanca, podem ser considerados muito resistentes, enquanto o Falésia situa-se na categoria de rocha resistente.

As resistências relativamente elevadas destas rochas ao natural, devem-se ao bom embricamento mineral que elas apresentam, com recristalização em grãos e subgrãos do quartzo o que confere a textura níveis/faixas com característica de mosaico granoblástico (Apêndice 2).

Todas as amostras submetidas ao ensaio acelerado apresentaram valores de resistência comparativamente mais baixos do que o seu similar ensaiado ao natural. A queda da resistência mecânica das rochas pode ser atribuída a ação da solução



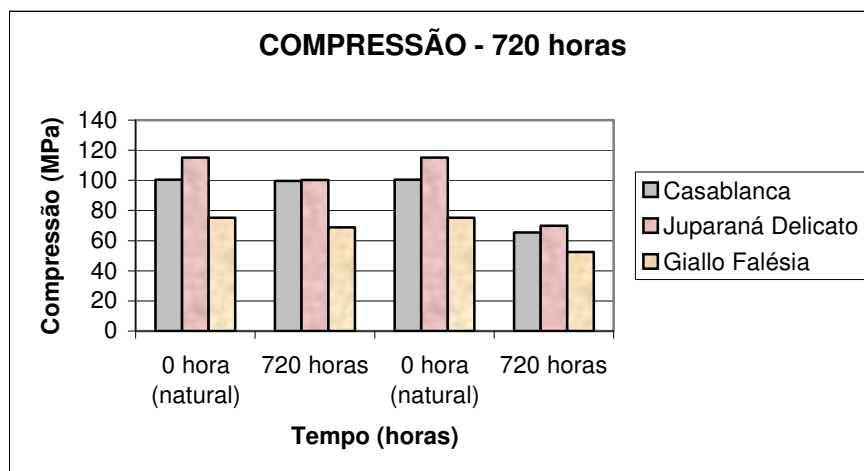
AMOSTRAS	COMPRESSÃO			
	natural	360 horas	natural	360 horas
Casablanca	100,4	108,4	100,4	99,5
Delicato	115,2	106,9	115,2	109,8
Falésia	75,25	54,1	75,3	52,7

Figura 6.4 - Resistência à Compressão após 360 horas de exposição à névoa salina.

salina usada no teste. Assim, o cloreto de sódio cristaliza nas microfissuras pré-existentes e exerce pressões maiores do que a resistência do material, alargando essas fissuras e provocando a abertura de novas, com conseqüente aumento da porosidade.

Tal proposição pode ser comprovada em estudos realizados por Rivas et al. (2000) e Birginie et al. (2000) em rochas de composição graníticas e carbonáticas, submetidas a ensaios similares. Estes autores verificaram a redução de peso das amostras e constataram o aumento de fissuras intergranulares.

Os valores obtidos após o ensaio acelerado sinalizam na direção de um enfraquecimento da resistência dessas rochas quando utilizadas em ambiente marinho, por exposição à atmosfera rica em cloreto (NaCl). Contudo, vale ressaltar que, em virtude das limitações impostas pelo espaço físico das câmaras e do tempo estabelecido para realização da pesquisa, somente dois corpos-de-prova de cada gnaisse foram testados, o que confere um caráter qualitativo a estes resultados.

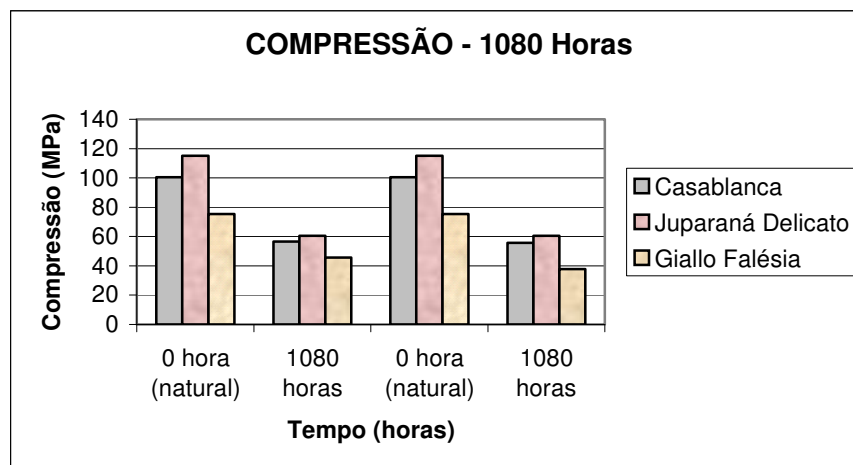


AMOSTRAS	COMPRESSÃO			
	natural	720 horas	natural	720 horas
Casablanca	100,4	99,6	100,4	65,5
Delicato	115,2	100,3	115,2	69,9
Falésia	75,25	88,8	75,3	52,5

Figura 6.5- Resistência à Compressão após 720 horas de exposição à névoa salina.

Além disto, a marcante heterogeneidade destas rochas determina seu desempenho ante aos processos de alteração, sugerindo uma abordagem estatística em trabalhos futuros que venha propiciar quantitativamente as informações necessárias à compreensão de todo o processo.

Frasca (2003) verificou uma redução de aproximadamente 20% na resistência à compressão para os litotipos Casablanca e Falésia quando testados em condições de saturação em água. Esses resultados são importantes indicações do desempenho desses materiais e que sugerem maiores reduções de resistência dos mesmos se submetidos a condições mais agressivas, como é o caso desta pesquisa.



AMOSTRAS	COMPRESSÃO			
	Natural	1080 horas	Natural	1080 horas
Casablanca	100,4	56,6	100,4	55,7
Delicato	115,2	60,4	115,2	60,6
Falésia	75,25	45,6	75,3	37,89

Figura 6.6- Resistência à Compressão após 1080 horas de exposição à névoa salina.

6.3. DESGASTE ABRASIVO AMSLER

6.3.1. GENERALIDADES

É o ensaio que se refere à resistência apresentada por um dado material quando do contato por friccionamento com material abrasivo. É extremamente utilizado para avaliar a resistência de rochas de uso ornamental, sendo regido pela norma NBR 12042 (ABNT, 1992e). Está relacionado à dureza da rocha e, por conseguinte tem relação direta com a composição mineralógica, o grau de dureza dos constituintes minerais e sua compacidade, além da dimensão dos grãos e arranjo mineral (textura).

É possível observar que rochas formadas predominantemente por minerais de baixa dureza mostram considerável desgaste e conseqüentemente efeito estético desagradável. Dessa forma não são indicadas para utilização como revestimentos de áreas com intenso tráfego de pedestres, tais como: pisos de *hall*, elevadores ou degraus de escadaria, uma vez que poderia acarretar considerável desgaste com conseqüente perda de brilho. Por outro lado, rochas quartzosas ou constituídas essencialmente de minerais silicatados são menos desgastadas quando submetidas às mesmas solicitações (Vidal et al., 1999).

6.3.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- dois corpos-de-prova para cada uma das três amostras, totalizando 6 (seis) corpos-de-prova ao natural;

- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras, nos três diferentes números de horas o que totalizou 9 (nove) corpos-de-prova.

O Delicato apresenta o melhor desempenho em relação ao desgaste abrasivo, seguido do Casablanca. O Falésia apresenta o pior resultado se comparado aos outros dois litotipos, notadamente com expressivo aumento do desgaste quando submetido a 720 horas e 1080 horas de exposição em câmara de névoa salina (Figura 6.7).

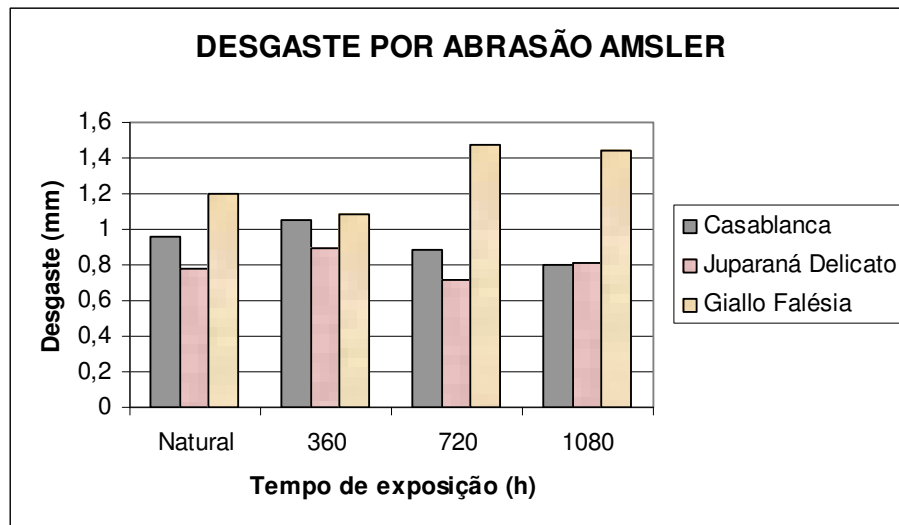
Os gnaisses Casablanca e Delicato, de maneira geral, apresentaram valores dentro dos limites de qualidade sugeridos por Frazão & Farjallat (1995), inclusive após ensaio acelerado (Apêndice 3). A exceção se fez com relação ao Falésia que apresentou desgaste sempre maior do que 1mm, mesmo quando ensaiado ao natural.

Os resultados obtidos mostram-se plenamente coerentes quando comparados com as características petrográficas exibidas pelas rochas estudadas.

Dentre os três litotipos estudados o Delicato apresenta maior percentual de quartzo em relação aos demais, sendo por esta razão aquele que menor desgaste sofreu.

Contudo, apesar dos percentuais de quartzo do Casablanca e Falésia serem muito próximos, este último apresenta um maior número de microfissuras predominantemente do tipo intergrão o que lhe confere um caráter de maior vulnerabilidade ao desgaste.

A maior porosidade e permeabilidade do Falésia favorece o transporte do *spray* salino e, conseqüentemente, a penetração de uma maior quantidade de sal em seu interior, promovendo o alargamento e o desenvolvimento de fissuras que contribuem para o desgaste.



AMOSTRAS	DESGASTE AMSLER			
	Natural	360 h	720 h	1080 h
Casablanca	0,96	1,05	0,88	0,80
Delicato	0,78	0,89	0,72	0,81
Falésia	1,20	1,08	1,47	1,44

Figura 6.7- Valores de desgaste medidos em diferentes tempos de exposição à névoa salina.

6.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS

6.4.1. GENERALIDADES

De um modo geral os ultra-sons são ondas elásticas de mesma natureza das ondas sonoras, porém com frequências que estão fora do nível de percepção do ouvido humano (15 a 20 KHz) e a sua velocidade é medida com base no tempo de trânsito percorrido entre um emissor e um receptor por uma onda sonora numa distância conhecida (Torquato et al., 2002).

A determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais é regida pela norma ASTM 2845 (1995). A aparelhagem necessária para realização do ensaio (*PUNDIT-Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicator Tester*) consiste de um transmissor e de um receptor ligado a um gerador de impulsos elétricos à base de materiais piezoelétricos. Este sistema é capaz de emitir por cada impulso elétrico um impulso ultra-sônico que ao retornar é transformado em impulsos elétricos que são registrados e visualizados num osciloscópio.

Este ensaio permite a avaliação indireta de vários parâmetros tecnológicos das rochas tais como: densidade, porosidade, absorção d'água, grau de alteração etc. É um dos poucos ensaios de caracterização tecnológica não destrutivos e disponíveis para avaliação das características físico-mecânicas, por esta razão é bastante utilizado nos estudos de patologias e recuperação de monumentos históricos.

Diferenças na velocidade de propagação de ondas elásticas são freqüentemente observadas em rochas, condicionadas pela orientação das estruturas internas ou pela presença de descontinuidades. Weiss (2000 apud Mesquita, p.115) ressalta que a anisotropia é um importante parâmetro para qualquer interpretação de velocidade de ondas, uma vez que esta velocidade pode aumentar até 30% em função da direção de propagação nas amostras.

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados os mesmos corpos-de-prova submetidos à compressão uniaxial, pelo fato de ser um ensaio não destrutivo e, além de funcionar como parâmetro de seleção para as amostras, também ser um instrumento auxiliar nas interpretações de resultados.

6.4.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

O Delicato apresentou valores mais altos na avaliação realizada ao natural, denotando uma maior coesão desta rocha em relação às demais estudadas (Figura 6.8).

O Falésia apresentou, em média, os menores valores obtidos para esta propriedade indicativo de maior existência de microfissuras e de minerais alterados neste litotipo.

O Casablanca situou-se numa posição intermediária entre os demais, com valores próximos daqueles obtidos por Frascá (2003) para o mesmo gnaiss. Contudo, vale ressaltar que variações de dados encontradas ao longo de toda esta pesquisa refletem à estruturação muito heterogênea dessas rochas que praticamente impossibilitou a obtenção de corpos-de-prova representativos das suas diferenças estruturais e mineralógicas.

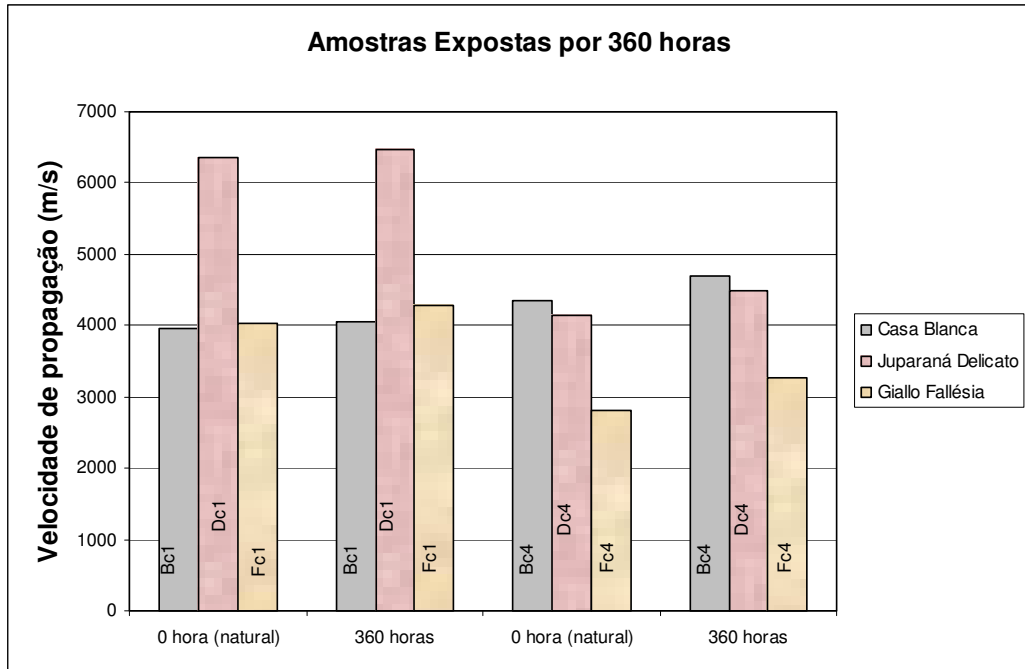
Tanto os valores obtidos para as amostras *in natura* como aqueles verificados após ensaio acelerado (Figuras 6.8, 6.9 e 6.10) encontram-se acima do limite estabelecido no gráfico de Tarkoy que é $V_p \geq 2.500$ m/s para granitos sãos ou não alterados (Winkler, 1997).

Contrariando as expectativas, os valores de velocidade mostraram-se em média mais elevados após ensaio acelerado do tipo contínuo, provavelmente uma conseqüência do procedimento de lavagem que não se mostrou suficientemente eficaz para completa retirada do sal depositado no interior da rocha (Apêndice 4).

Diferentemente daquelas que antecederam à dilatação térmica, as medições, neste caso, foram realizadas com as amostras no estado seco, ou seja, sem que houvesse uma prévia saturação em água.

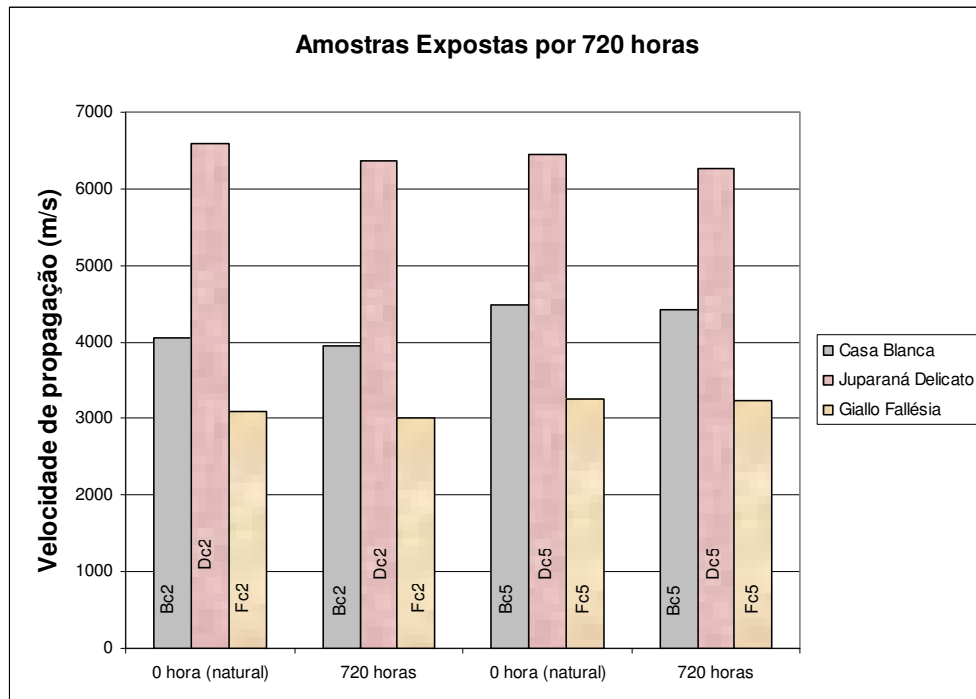
Ao que tudo indica, as partículas de sal depositadas preencheram vazios existentes nas amostras e criaram uma falsa coerência e conseqüente redução da porosidade que, por sua vez, favoreceu o deslocamento das ondas aumentando os valores de velocidade.

Estes resultados são compatíveis com os encontrados por Frascá (2003) que também constatou variações positivas de velocidade de ondas, após ensaio de imersão parcial em soluções ácida e alcalina para o Casablanca e Falésia. Ela sugere que ambas simulações levaram à cristalização de sais no interior da rocha, que não foram detectados visualmente ou por microscopia ótica, mas indicados nas determinações de velocidade de propagação de ondas e absorção d'água.



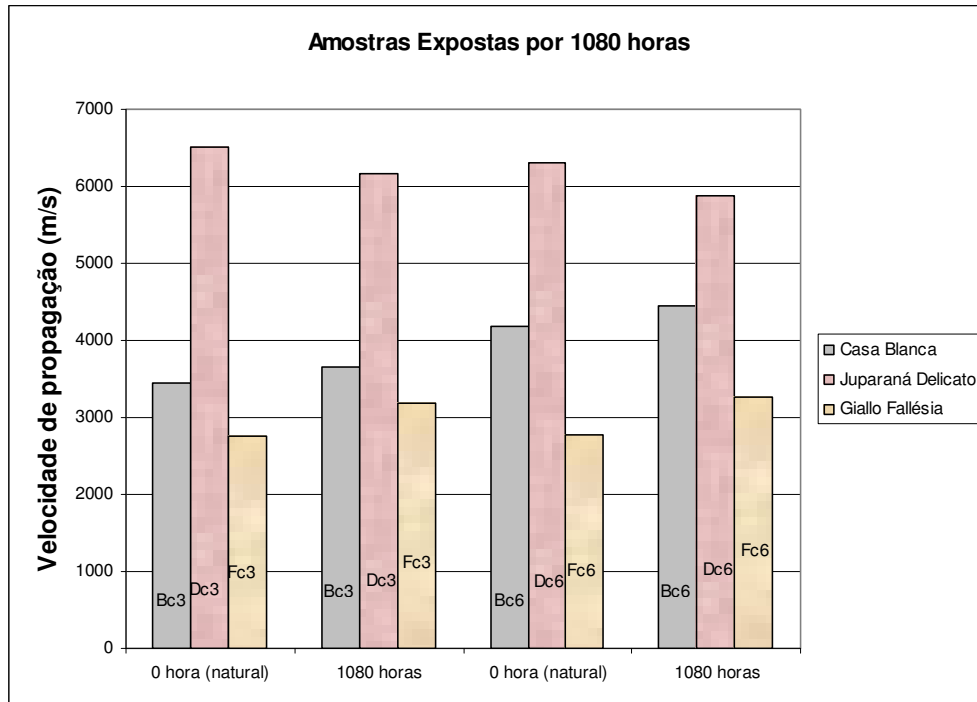
AMOSTRAS	natural	360 horas	natural	360 horas
Casablanca	3960	4053	4356	4702
Delicato	6351	6472	4153	4483
Falésia	4035	4291	2812	3265

Figura 6.8- Propagação de ondas ao natural e após 360 horas de exposição à névoa salina.



AMOSTRAS	natural	720 horas	natural	720 horas
Casablanca	4052	3960	4487	4431
Delicato	6592	6357	6443	6266
Falésia	3081	3013	3261	3231

Figura 6.9- Propagação de ondas ao natural e após 720 horas de exposição à névoa salina.



AMOSTRAS	natural	1080 horas	natural	1080 horas
Casablanca	3453	3651	4182	4443
Delicato	6514	6168	6305	5870
Falésia	2759	3187	2784	3257

Figura 6.10- Propagação de ondas ao natural e após 1080 horas de exposição à névoa salina.

6.5. INTENSIDADE BRILHO

6.5.1. GENERALIDADES

O brilho ou refletância é uma das características que imprimem qualidade à rocha ornamental e sua redução ou ausência total, em função de sua utilização, é um reflexo e/ou indicativo de patologia. A redução de brilho durante a vida útil do material pétreo pode ser provocada por processos físicos ou químicos. Dentre as

causas físicas mais comuns está o desgaste mecânico provocado em pisos polidos por tráfego intenso de pedestres ou o desgaste abrasivo de particulados transportados por ação eólica que se chocam com os revestimentos de paredes. Entre as causas químicas, destaca-se a degradação das rochas pelo uso indevido de produtos de limpeza ou pela ação de poluentes e atmosferas agressivas, que se depositam nas superfícies rochosas provocando inchamento, escamação e destacamento dos minerais.

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- dois corpos-de-prova para cada uma das três amostras, nos três diferentes números de horas o que totalizou 18 (dezoito) corpos-de-prova.

Por ser um ensaio não destrutivo, os corpos-de-prova utilizados para medida de brilho ao natural são expostos e reutilizados para as medidas de brilho seguintes, seqüenciadas de acordo com a ordem crescente de tempo de ensaio.

6.5.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Analisando os valores obtidos para intensidade de brilho verifica-se que o tempo de exposição à névoa salina influencia diretamente nesta propriedade. Desta forma tem-se que o decréscimo mais significativo se deu em 1080 horas de exposição, seguido de 720 horas e, finalmente, 360 horas onde se verificou os menores percentuais de perda de brilho (Apêndice 5).

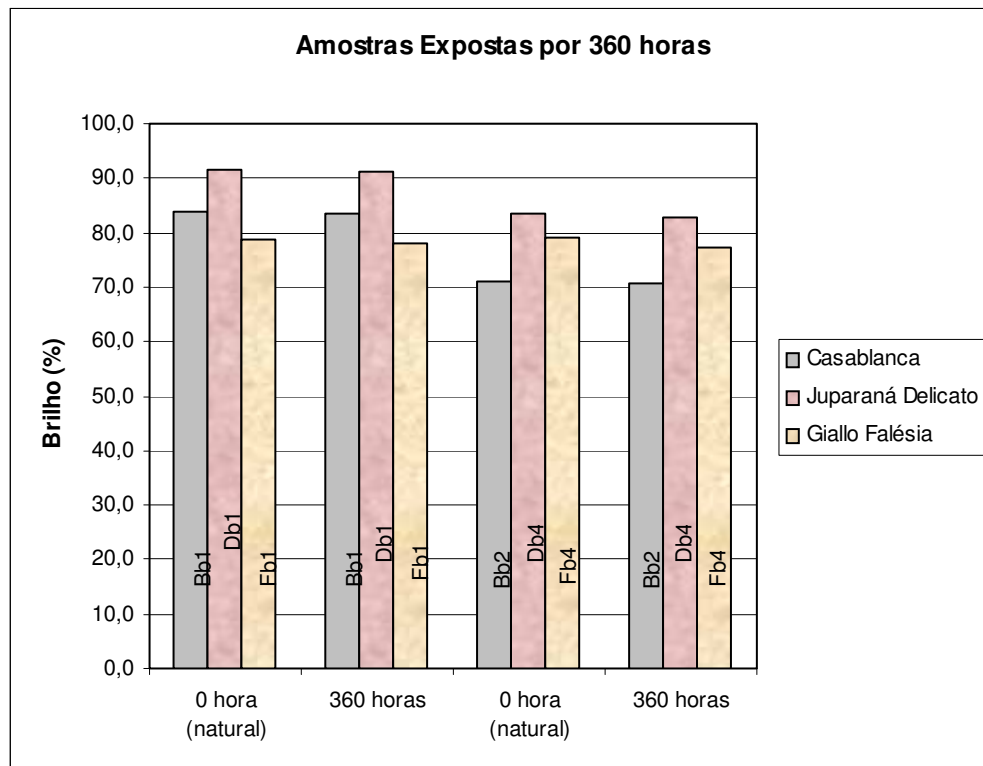
As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 mostram que os gnaisses expostos à névoa salina apresentam perda de brilho inicial decrescente obedecendo sempre a mesma seqüência, formada pelo Falésia, Casablanca e Delicato.

Estes resultados são compatíveis com a perda de massa que se dá por meio de inchamento, escamações e destacamento dos minerais, que ocorrem tanto na parte interna quanto na superfície polida dos gnaisses estudados, resultando no surgimento de pequenas irregularidades e conseqüente diminuição do brilho.

Do acima exposto, compreende-se que, o gnaisse Falésia por representar o tipo petrográfico com mais alterações e, conseqüentemente, mais baixo poder

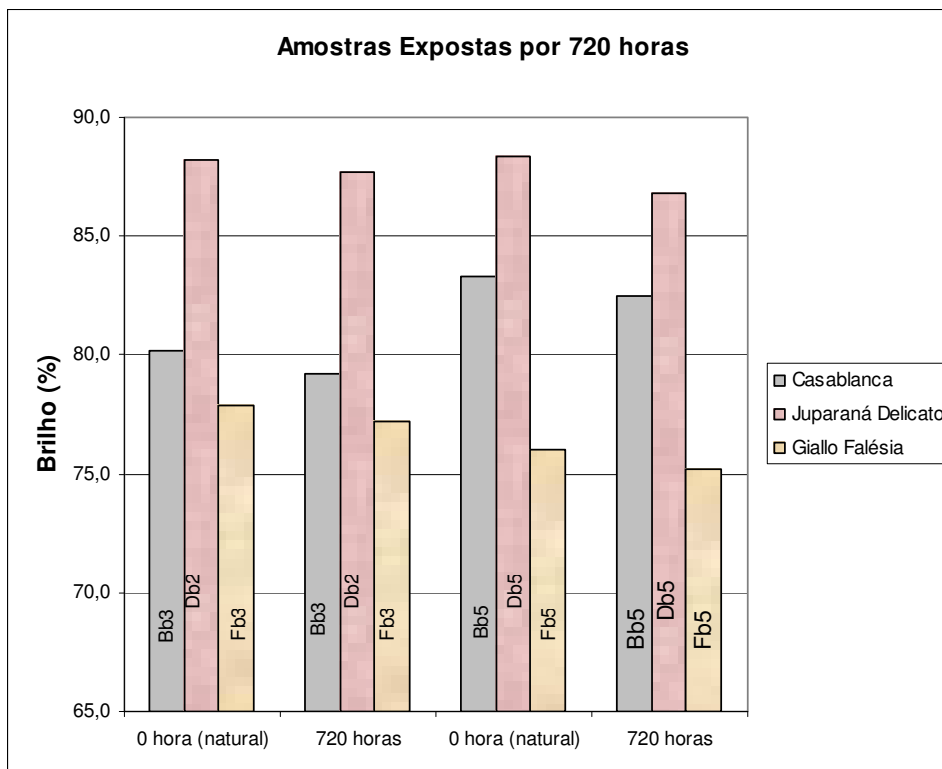
refletor ao natural dentre os três gnaisses estudados é o que apresenta as maiores porcentagens de perda de brilho perante o ataque da névoa salina utilizada.

Dentre os dois tipos de ensaios acelerados realizados, o ensaio cíclico afetou mais intensamente o brilho dos gnaisses, apresentando uma perda de brilho inicial em média superior a 3,6% para um número de horas de exposição (540 horas).



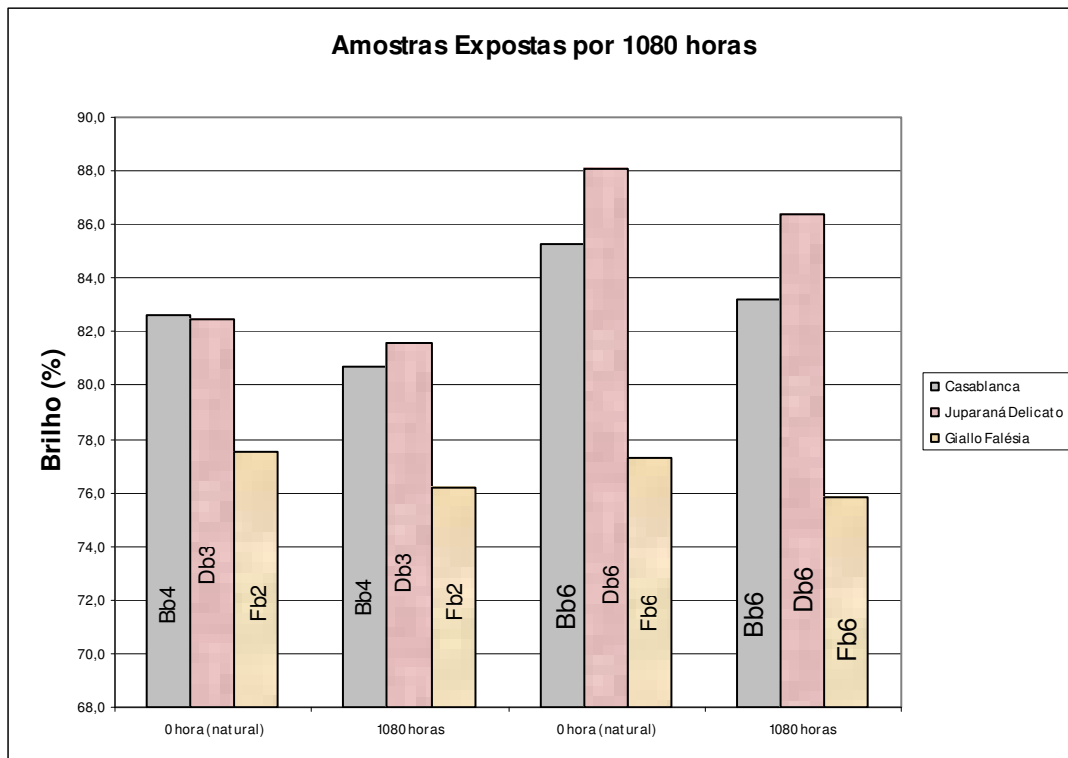
AMOSTRAS	natural	360 horas	natural	360 horas
Casablanca	83,9	83,5	71,1	70,6
Delicato	91,5	91,1	83,5	82,8
Falésia	78,8	78,2	79,0	77,3

Figura 6.11- Medida de brilho ao natural e após 360 horas de exposição à névoa salina.



AMOSTRAS	natural	720 horas	natural	720 horas
Casablanca	80,2	79,2	83,3	82,5
Delicato	88,2	87,7	88,4	86,8
Falésia	77,9	77,2	76,0	75,2

Figura 6.12- Medida de brilho ao natural e após 720 horas de exposição à névoa.



AMOSTRAS	natural	1080 horas	natural	1080 horas
Casablanca	82,6	80,7	85,3	83,2
Delicato	82,5	81,6	88,1	86,4
Falésia	77,5	76,2	77,3	75,8

Figura 6.13- Medida de brilho ao natural e após 1080 horas de exposição à névoa salina.

6.6. DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR

6.6.1. GENERALIDADES

A determinação da dilatação térmica linear está fundamentada na variação de volume que a rocha sofre quando submetida às variações de temperatura, podendo dilatar e ou contrair. Embora, essa dilatação/contração se manifeste de forma tridimensional, a medida é feita de forma linear e expressa através do coeficiente de dilatação térmica (β), cuja unidade de medida é $\text{mm}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

Os valores de (β) foram determinados, no laboratório da UNESP, em corpos-de-prova cilíndricos, com diâmetro de 27mm e comprimento em torno de 90mm. Estes corpos-de-prova foram aquecidos em água a partir de 0°C até 50°C (taxa de

aquecimento de 0,3 °C/min), e resfriados de 50°C até 0°C, de acordo com a norma ABNT NBR –12765.

O ensaio de dilatação térmica foi acompanhado da medida de pulso ultrassônico com o objetivo de verificar se houve a formação de novas fissuras ou expansão daquelas pré-existentes, como resultado da contração e dilatação a que as rochas foram submetidas. Além disso, procurou-se observar a existência de relação entre a velocidade de propagação e a direção de foliação nas amostras, bem como avaliar possíveis alterações dessa velocidade antes e após o ensaio de dilatação.

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras em duas direções, totalizando 6 (seis) corpos-de-prova ao natural;
- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras em duas direções, totalizando 6 (seis) corpos-de-prova retirados ao final de 1080 horas de exposição.

6.6.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

As variações apresentadas nos resultados com as amostras *in natura* podem ser explicadas, principalmente, à luz das informações petrográficas apresentadas no Capítulo 5 – Características Petrográficas.

Os menores valores de velocidade de ultra-sons encontrados para o Casablanca e Falésia podem ser, inicialmente, atribuída a maior concentração de biotitas nessas amostras, feições estas presentes nas porções gnáissicas das mesmas.

Conforme Rzhovsky & Novik (1971 apud Navarro 2002, p.14) a biotita mostra valores de velocidade de propagação de ondas ligeiramente menores que os do quartzo e feldspato.

Os menores valores, dentre todos, foram determinados no Falésia (4664 m/s e 4498 m/s) e são controlados pelos níveis micáceos e pela intensidade de alteração verificada nos feldspatos (sericitização).

Segundo Chevalier et al. (1991), a velocidade de propagação de ondas é maior quando existem mais feldspatos potássicos presentes numa rocha e menos

plagioclásios. Isto explica os valores mais altos do Delicato (5714 e 5702 m/s), uma vez que a análise petrográfica dessa rocha mostra uma mineralogia mais rica em feldspato potássico (37%) do que em plagioclásio (26%). Acresce-se a isto o fato desta rocha ser a que comparativamente apresenta o menor número de fissuras, dentre as demais.

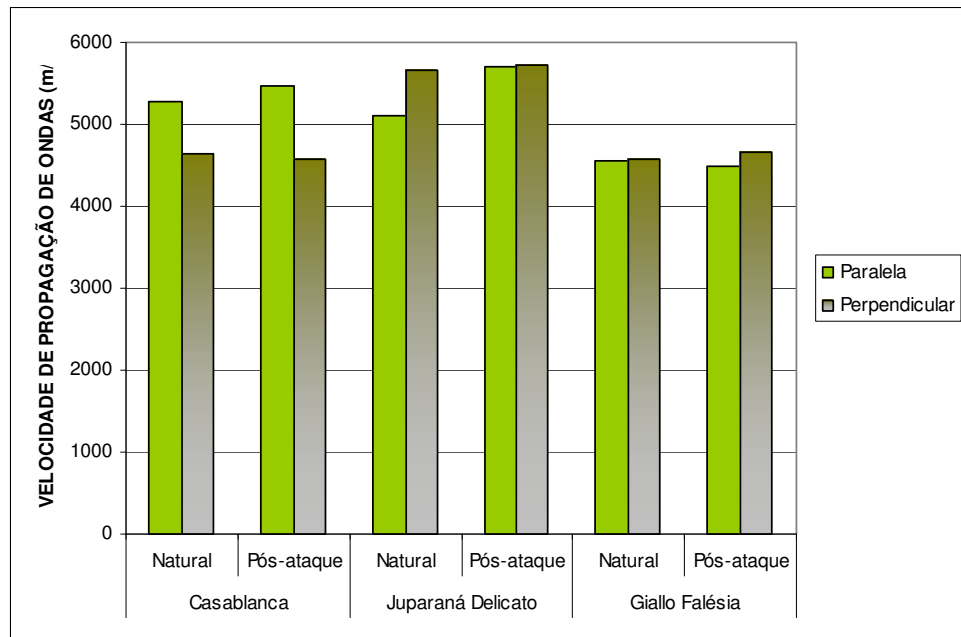
Verificou-se um aumento na velocidade da propagação das ondas ultra-sônicas após os ensaios de dilatação provavelmente devido a uma maior absorção d'água pelos corpos-de-prova durante o tempo em que os mesmos ficaram submetidos aos testes de dilatação, tendo em vista que as determinações das velocidades das ondas ultra-sônicas foram em condições saturadas (Apêndice 6).

Segundo alguns autores existe uma forte influência da porosidade de fissura na propagação de ondas longitudinais, em condições saturadas, resultando num aumento significativo da velocidade (Dionísio, 1997).

Justifica-se, então, o acréscimo ocorrido nos valores de velocidade de onda, uma vez que predomina, principalmente no Casablanca e Falésia, a porosidade de fissuras e que as mesmas tendem a se expandir como resultado da dilatação e contração, aumentando conseqüentemente a absorção d'água ou saturação.

As amostras submetidas a 1080h de ensaio acelerado com névoa salina apresentaram, em média, valores mais elevados de velocidade de ondas do que seus similares ao natural (Figura 6.14). Também é um reflexo do aumento na saturação ou absorção d'água que preencheu novos espaços abertos no interior da rocha, como resultado da pressão de cristalização de sais.

Os valores de dilatação térmica determinados com as amostras no seu estado natural situaram-se entre 5 e 7×10^{-3} mm/(m°C), e portanto próximos daqueles encontrados por Lima (2002) para rochas gnáissicas.



VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (m/s)						
POSIÇÃO	Casablanca		Juparaná Delicato		Giallo Falésia	
	Natural	Pós-ataque	Natural	Pós-ataque	Natural	Pós-ataque
Paralela (//)	5283	5464	5115	5702	4551	4498
Perpendicular (⊥)	4629	4578	5663	5714	4569	4664

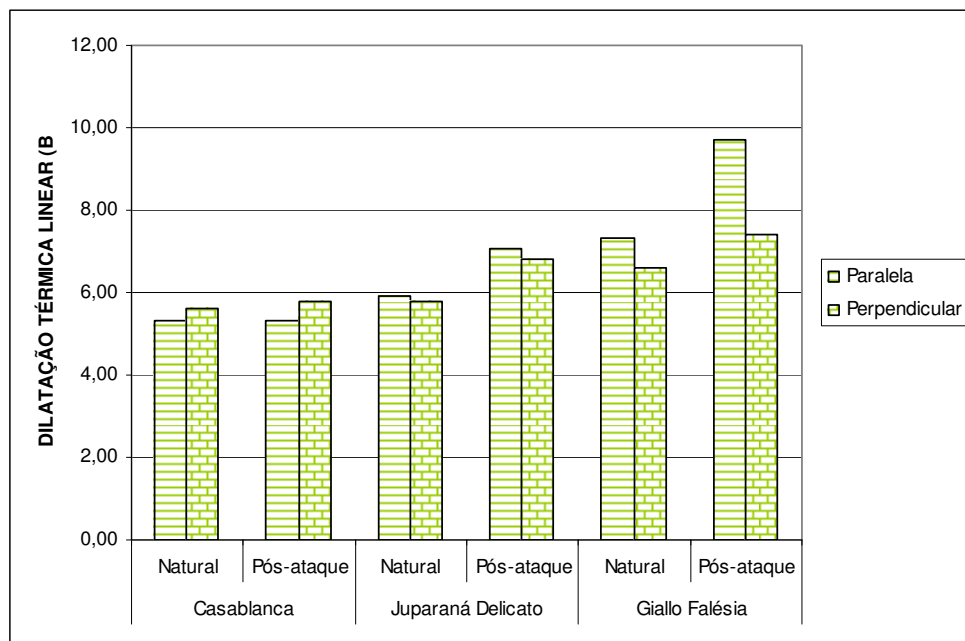
Figura 6.14 – Velocidade de propagação de ondas antes e depois do ensaio de alteração acelerada (1080h)

O Falésia apresentou, comparativamente, os maiores valores de dilatação térmica dentre as três rochas estudadas. A quantidade mais expressiva de biotita neste litotipo favorece a dilatação uma vez que a biotita é mais susceptível a fadiga térmica, incorrendo no alargamento de linhas de clivagem e podendo conduzir ao destacamento generalizado nas superfícies de clivagem.

Os resultados de dilatação mostraram que o Falésia e o Delicato foram os que sofreram variação mais significativa de seus coeficientes, em função do ensaio acelerado (Figura 6.15). Vale salientar que, apesar do incremento observado nos valores pós-ensaio, estes ainda se situam abaixo do limite sugerido por Frazão e Farjallat (1995) que é $\beta \leq 12 \times 10^{-3} \text{mm}/(\text{m } ^\circ\text{C})$.

As rochas gnáissicas sofrem mais com a dilatação devido ao desenvolvimento de tensões internas que provocam a formação de novas fissuras ou aberturas daquelas preexistentes, como resultado da dilatação heterogênea de seus minerais constituintes. A forte anisotropia exibida por estas rochas resulta em diferentes valores de dilatação térmica, segundo suas orientações estruturais, sendo o valor de β sempre maior quando determinado paralelo a gnaissificação e menor quando perpendicular a esta (Lima, 2002).

Os valores de β obtidos neste trabalho seguiram esta tendência, com exceção do Casablanca que apresentou comportamento anômalo. Tal comportamento, também observado na propagação de ondas, pode provavelmente ser explicado pela irregularidade dos bandeamentos presentes nesta rocha, que ora exibe níveis com espessuras reduzidas e/ou descontinuidades.



DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR (β) $\times 10^{-3}$ [mm/(m. °C)]						
POSIÇÃO	Casablanca		Juparaná Delicato		Giallo Falésia	
	Natural	Pós-ataque	Natural	Pós-ataque	Natural	Pós-ataque
Paralela (//)	5,30	5,30	5,90	7,05	7,30	9,70
Perpendicular (⊥)	5,60	5,80	5,80	6,80	6,60	7,40

Figura 6.15 – Dilatação Térmica Linear antes e depois do ensaio de alteração acelerada (1080h)

6.7. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

6.7.1. GENERALIDADES

A condutividade térmica se define como a relação existente entre a quantidade de energia calorífica que atravessa uma superfície na unidade de tempo e o gradiente térmico medido na direção perpendicular a essa superfície. É uma medida de capacidade isolante, ou condutora, de um material e se expressa em $W/m^{\circ}K$, embora possa também ser expressa em $cal/s.cm^{\circ}C$. A condutividade térmica está diretamente relacionada com as características intrínsecas da rocha, especialmente com a composição mineralógica, a textura e a porosidade. Pode ser calculada teoricamente a partir das condutividades individuais dos minerais que formam a rocha e das suas porcentagens modais, embora correntemente se empreguem métodos experimentais. Os valores obtidos teoricamente costumam ser 9% mais elevados que aqueles medidos experimentalmente, devido, sobretudo, aos espaços vazios da rocha (porosidade). A condutividade térmica das rochas é relativamente baixa (entre 2 e 6 $W/m^{\circ}K$), sendo tanto mais baixa quanto maior for a porosidade das mesmas.

Romeo (2005) realizou medidas no Gnaiss Casablanca onde obteve os seguintes valores A1 – 3,03, A2 - 2,83, A3 – 3,49 e A4 – 3,13, próximos pois daqueles encontrados no presente trabalho. Contudo, este autor realizou uma quinta medida na parte superior da amostra, onde está localizada uma porção rica em quartzo (A5 – quartzo), e encontrou um pico de condutividade térmica de 3,7 $W/m^{\circ}K$ reflexo da própria composição mineralógica e indicativo de área menos porosa.

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras, totalizando 3 (três) corpos-de-prova ao natural;

6.7.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

As medidas foram realizadas sempre obedecendo a seqüência 1, 2, 3 e 4, conforme Figuras 6.16, 6.17 e 6.18.

O círculo mais externo corresponde apenas aos limites do sensor que possui formato circular, o intermediário corresponde à área de influência dos resultados e o círculo mais central corresponde ao setor onde ocorre o aquecimento efetivo. Ou seja, a parte mais central aquece (círculo interno), entretanto toda a área que se encontra dentro do círculo intermediário sofre influência do aquecimento do círculo central. Assim sendo, para efeito de avaliação deve-se levar em consideração toda a área contida no círculo intermediário incluindo a parte de aquecimento efetivo. Vale, ainda, salientar que todas as medidas recebem a mesma intensidade de calor.

Os valores encontrados são considerados objeto de discussão quando as diferenças entre as medidas são superiores a $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (watt por metro x graus Kelvin). As diferenças superiores a $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ são consideradas expressivas e acima de $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ muito importantes, evidenciando significativa variação na mineralogia local e/ou grau de porosidade e/ou intensidade da alteração mineral.

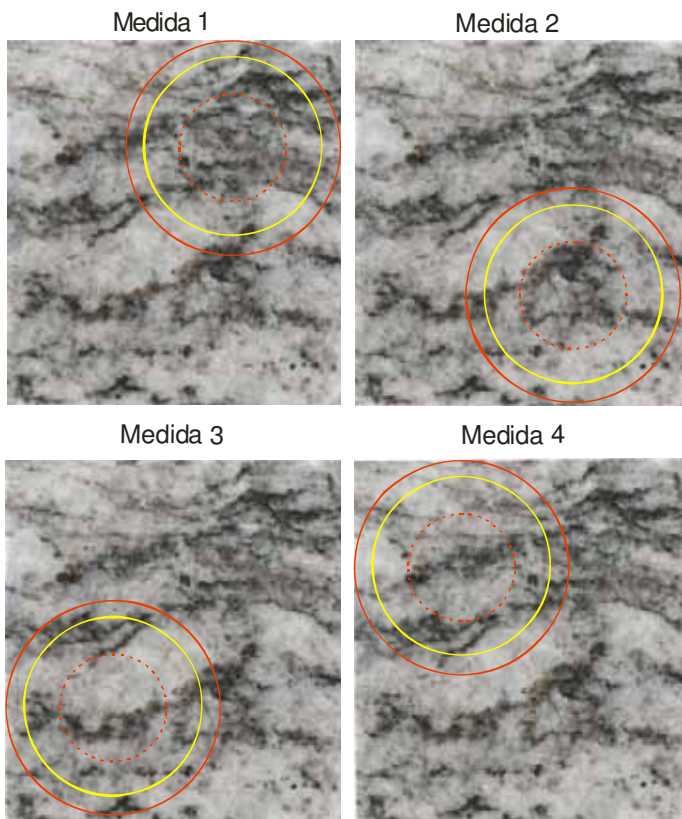


Figura 6.16 - Placas do Gnaiss Casablanca com as respectivas demarcações dos pontos de leitura.

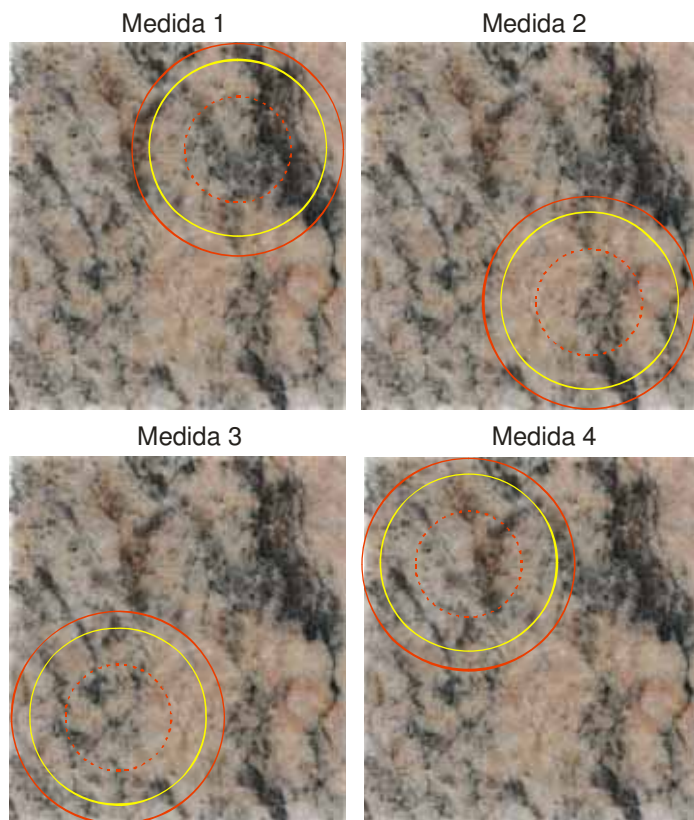


Figura 6.17 - Placas do Gnaiss Juparaná Delicato com as respectivas demarcações dos pontos de leitura.

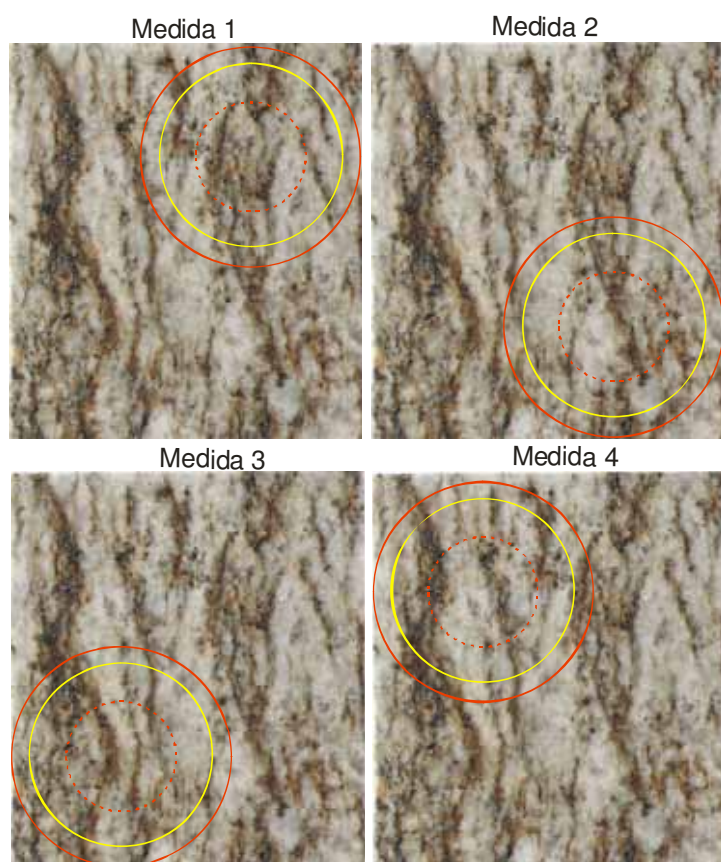


Figura 6.18 - Placas do Gnaiss Giallo Falésia com as respectivas demarcações dos pontos de leitura.

As três amostras se comportam como rochas de média a alta condutividade térmica variando de 2,79 W/m²K, para medida 4 do Falésia, até 4,41W/m²K para medida 1 do Delicato.

O Delicato mostrou os maiores valores de condutividade térmica com média igual a 3,64 W/m²K. As medidas 1, 2 e 4 mostraram-se fortemente influenciadas pela presença de quartzo em quantidade bastante significativas proporcionando valores muito altos. Já para a medida de número 3 nota-se uma considerável diminuição provocada, possivelmente, pelo aumento de feldspato e conseqüente diminuição do quartzo.

Vale destacar o valor de 4,41 W/m²K encontrado para Delicato (medida 1) que se mostrou acima dos valores encontrados na literatura.

O Casablanca mostrou valores de condutividade térmica considerados altos, contudo com média pouco inferior ao delicato. A média do Casablanca ficou em torno de 3,19 W/m²K. Os valores obtidos nas quatro regiões ficaram dentro da margem de erro do equipamento, portanto, inviabilizando qualquer comparação entre as medidas (Tabela 6.1).

Por fim o Falésia mostrou os menores valores com média de 2,99 W/m²K. Especificamente a região de número 4 mostrou uma considerável redução, sendo este decréscimo creditado a ocorrência de microfissuras naquela região.

Acredita-se que estes valores de condutividade térmica podem sofrer significativo aumento se a rocha for exposta a aerossóis marinhos, uma vez que estes aerossóis percolam poros e fissuras carreando e depositando sais como a Halita (NaCl), que apresenta coeficiente de condutividade térmica consideravelmente maior ($\kappa_{\text{NaCl}} = 26,7$).

Tabela 6.1 – Valores de condutividade térmica (κ) dos gnaisses estudados.

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (κ)			
PONTOS DE MEDIÇÃO	AMOSTRA		
	CASABLANCA	DELICATO	FALÉSIA
A - 1	3,28	4,41	3,16
A - 2	3,17	3,55	2,98
A - 3	3,09	3,11	3,03
A - 4	3,22	3,48	2,79
Média	3,19	3,64	2,99

6.8. APTIDÃO DE MOLHAGEM

6.8.1. GENERALIDADES

A aplicação deste ensaio permite, de modo rápido, averiguar o comportamento da superfície polida das rochas frente à deposição ou choque de partículas úmidas e de aerossóis marinhos nas mesmas.

Trata-se de um ensaio puramente qualitativo onde podem ser observados os pontos de mais rápida absorção, levando-se em conta que o polimento aplicado a uma placa de rocha diminui a permeabilidade na sua superfície externa, contudo não obstrui completamente seus poros.

Segundo Aires-Barros (1991), a presença de umidade na superfície das rochas é perigosa. Com efeito, na molhagem das superfícies pétreas, as gotículas de água têm grande força de aderência e as substâncias dissolvidas podem penetrar na rocha até profundidades importantes, função da porosidade e permeabilidade da rocha e da quantidade de solução disponível sobre a superfície.

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras, totalizando 3 (três) corpos-de-prova.

Neste ensaio os corpos-de-prova utilizados para avaliação de microdureza ao natural foram expostos e reutilizados para novas medidas após 1080 horas de exposição, como forma de comparar e observar a degradação.

6.8.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Este ensaio foi efetuado em três placas de rochas, sendo cada uma de um dos litotipos objetos deste estudo. Na superfície das placas foi traçada uma malha de 2cm x 2cm, sendo depositadas nove gotas em cada uma das quadrículas obtendo-se um tp (tempo de absorção de microgotas) para cada uma destas áreas permitindo elaborar o esquema que se observa nas Figuras 6.19, 6.20 e 6.21.

Os resultados salientam a heterogeneidade dessas rochas, coincidindo os valores mais baixos com as zonas mais ricas em minerais micáceos e que

apresentam maior incidência de microfissuras. Essas zonas funcionam como pontos ou áreas de maior fragilidade servindo de porta de entrada para os contaminantes.

A forma ou regime de deposição dos contaminantes na superfície desses materiais dependerá da variação climatológica da região onde se encontram aplicados. Assim, a deposição a seco ocorrerá nos lapsos de tempo em que não ocorrerem precipitações atmosféricas, enquanto a deposição a úmido ocorrerá nos períodos de pluviosidade acentuada.

A deposição úmida provoca a deposição brusca e sincopada de poluentes dissolvidos nas chuvas.

A deposição seca é um processo mais lento, mas mais contínuo do que a deposição úmida sendo realizada por meio de transporte eólico e comandada pelos seguintes fatores:

- de dia o fluxo das partículas será maior nas partes mais frias das superfícies expostas;
- tanto as partículas, como os fluxos gasosos aumentam quando se dá a condensação na superfície e diminuem quando ocorre a evaporação;
- se a superfície estiver úmida, haverá maior possibilidade de aderência das partículas de colisão e de captura dos gases dissolvidos;
- a textura da superfície é muito importante. As superfícies rugosas promovem deposição maior do que as superfícies lisas.

No ensaio realizado com estes exemplares, especificamente, verificou-se que o Falésia em média apresentou os menores valores por conter um percentual maior de minerais micáceos e microfissuras, seguido do Delicato e Casablanca. Isto leva a uma maior aptidão de molhagem dessa rocha em relação às demais, fato que se coaduna com os resultados obtidos nos ensaios de absorção e porosidade.

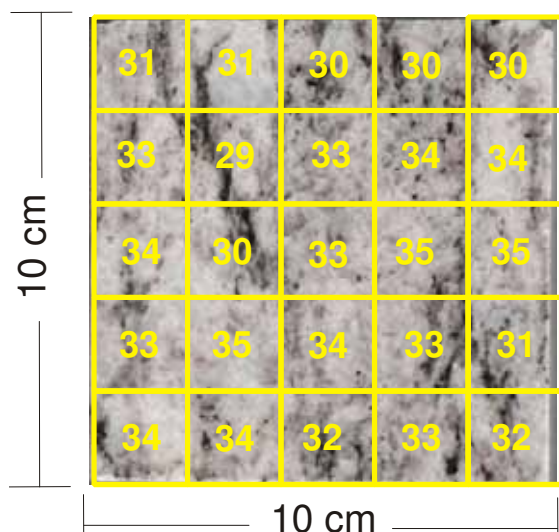


Figura 6.19 – Valores de tp nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Casablanca.

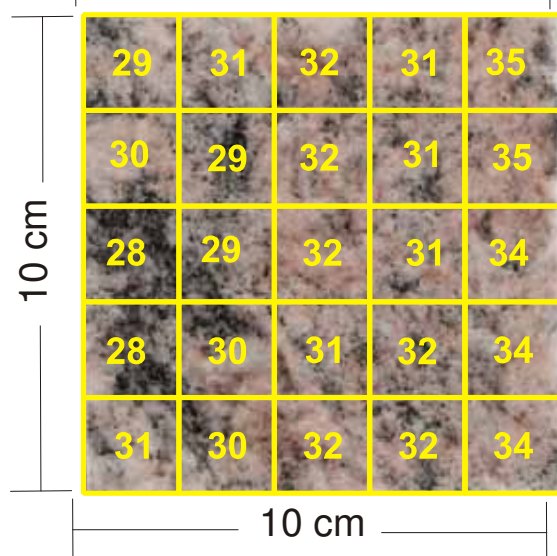


Figura 6. 20 – Valores de tp nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Delicato.

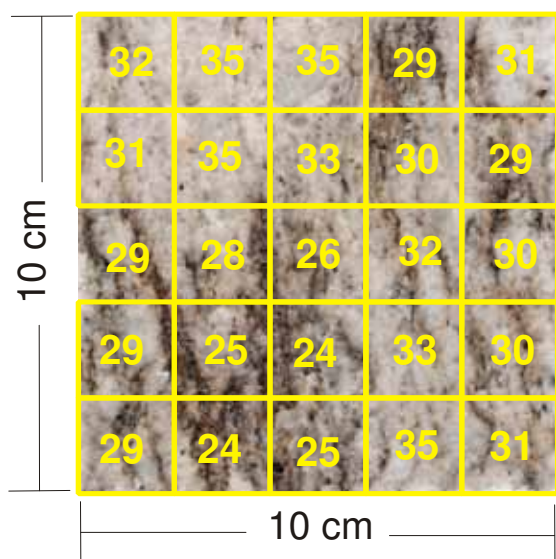


Figura 6. 21 – Valores de tp nas diferentes áreas da placa do Gnaiss Falésia.

6.9. MICRODUREZA *KNOOP*

6.9.1. GENERALIDADES

A aplicabilidade da microdureza *Knoop* no âmbito desta pesquisa está correlacionada, principalmente, com a determinação de um índice de alterabilidade para os litotipos estudados, que é calculado com base na redução do brilho e dureza das rochas quando submetidas a ensaios de envelhecimento acelerado.

A dureza *Knoop* foi determinada através de 40 impressões em cada uma das placas de rocha, sendo medido o comprimento da diagonal em micrometros, após cada impressão, sob a objetiva de 50X, com o auxílio da escala *vernier* no sistema da ocular do aparelho (Figura 6.22).

Para a avaliação desta característica tecnológica foram ensaiados:

- um corpo-de-prova para cada uma das três amostras totalizando 3 (três) corpos-de-prova, cujas medidas foram realizadas ao natural e ao final de 1080 horas de exposição.

6.9.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

A dureza média ($HK_{\text{médio}}$) obtida para os litotipos estudados mostraram valores muito próximos entre os gnaisses Casablanca e Falésia e mais alto para o Delicato, mostrando coerência com as características petrográficas uma vez que este último apresenta um percentual maior de mobilizados anatéticos de composição quartzo-feldspática e níveis micáceos mais reduzidos em relação aos outros dois. O coeficiente de heterogeneidade obtido para amostra do Delicato mostrou-se, ligeiramente, menor que para as outras duas amostras de gnaisses (Tabela 6.2).

Frisa Morandini e Mancini (1982 apud Quitete e Kahn 2002, p.84) sugerem que o valor HK_{25} seria um bom indicador de desgaste por abrasão, onde os minerais de dureza baixa são efetivamente desgastados, enquanto que os minerais mais duros são removidos por escarificação, independentemente de sua dureza.

Seguindo a mesma lógica desses autores, Quitete e Kahn (2002) mostraram que a dureza *Knoop* e o desgaste abrasivo Amsler fornecem dados com tendência à proporcionalidade direta, ou seja, quanto maior a dureza menor o desgaste.

Pode-se, neste trabalho, comprovar esta tendência comparando os dados de dureza encontrados com aqueles obtidos na abrasão Amsler. Desta forma verifica-se que para esses dois ensaios o Delicato apresentou os melhores resultados, ou seja, maior valor de $HK_{25}=7,35$ Gpa e menor desgaste Amsler=0,78mm, seguido do Casablanca e Falésia.

Tabela 6.2 – Resultados da dureza *Knoop*

TIPO LITOLÓGICO	HK ₂₅ (Gpa)	HK ₅₀ (Gpa)	HK ₇₅ (Gpa)	HK _{MÉDIO} (Gpa)	HK ₇₅ / HK ₂₅
CASA BLANCA NATURAL	6,10	7,26	9,60	7,58	1,57
CASA BLANCA PÓS-ATAQUE	5,62	7,16	8,67	7,19	1,54
DELICATO NATURAL	7,35	9,05	10,32	8,99	1,40
DELICATO PÓS-ATAQUE	7,69	8,90	11,16	9,32	1,45
FALÉSIA NATURAL	6,34	7,56	9,80	7,38	1,55
FALÉSIA PÓS-ATAQUE	6,87	8,09	9,76	8,30	1,42



Figura 6.22 – Amostras dos gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia onde foram realizadas as medidas de dureza e brilho para determinação do índice de alterabilidade (Placas 5cm x 5cm x 5cm).

Verifica-se no gnaisse Casablanca uma tendência para redução dos valores de dureza após a exposição à névoa salina, particularmente na primeira metade da distribuição (minerais de menor dureza) indicando maior susceptibilidade das micas e feldspatos à alteração (Figura 6.23).

No gnaisse Delicato praticamente não houve variação nos valores de dureza após a exposição à névoa salina (Figura 6.24).

O aparente aumento de dureza do gnaisse Falésia após a exposição à névoa salina ocorreu devido à subestimação dos valores medidos antes deste ensaio, ocasionados pelo excesso de minerais de baixa dureza (provavelmente micas e feldspato alterado). Nos demais minerais não houve variação significativa da dureza (Figura 6.25). Vale salientar que esse resultado não condiz com os demais ensaios de controle que apontaram o Falésia como o gnaisse mais susceptível a alteração, dentre os três tipos estudados. Por sua vez, esses resultados levam ao questionamento da eficiência deste ensaio para rochas de granulação média a grossa, ou em último caso a necessidade de um procedimento mais apurado a ser aplicado para medidas em rochas similares.

Aires-Barros (1991) reporta estudos realizados por ele e outros pesquisadores onde foram avaliadas modificações do brilho e dureza, como ensaios de controle na previsibilidade da alteração de rochas. Em todos os casos citados, foram verificadas reduções nos valores de ambas as propriedades após ensaios de alteração acelerados, sendo tais valores utilizados, posteriormente, na determinação dos índices de alterabilidade.

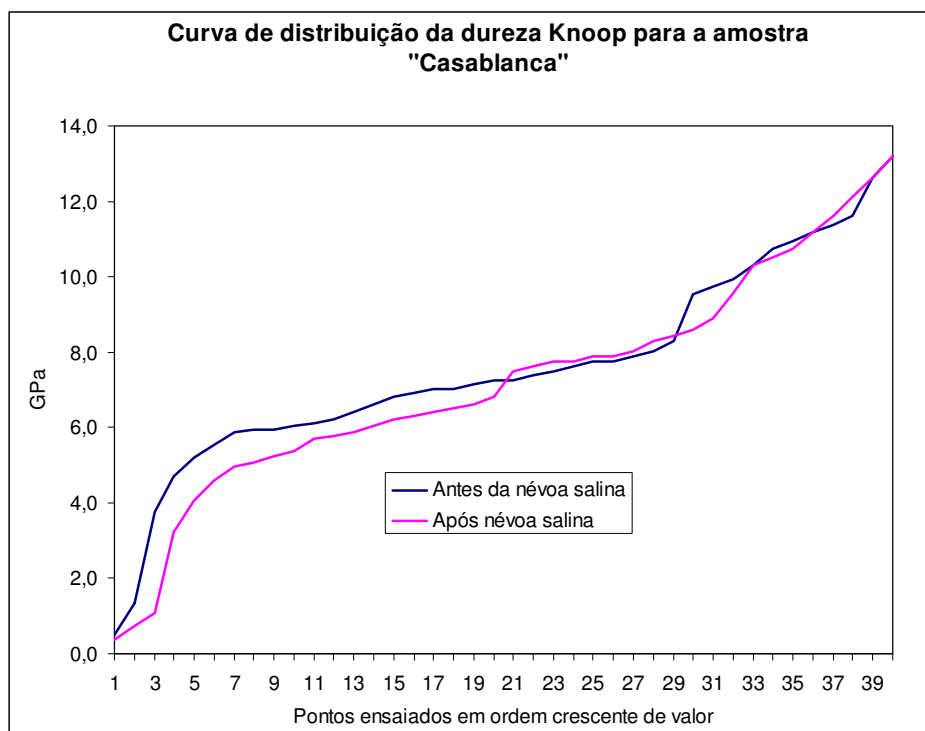


Figura 6.23 – Curva de distribuição da dureza *Knoop* para o gnaiss Casablanca.

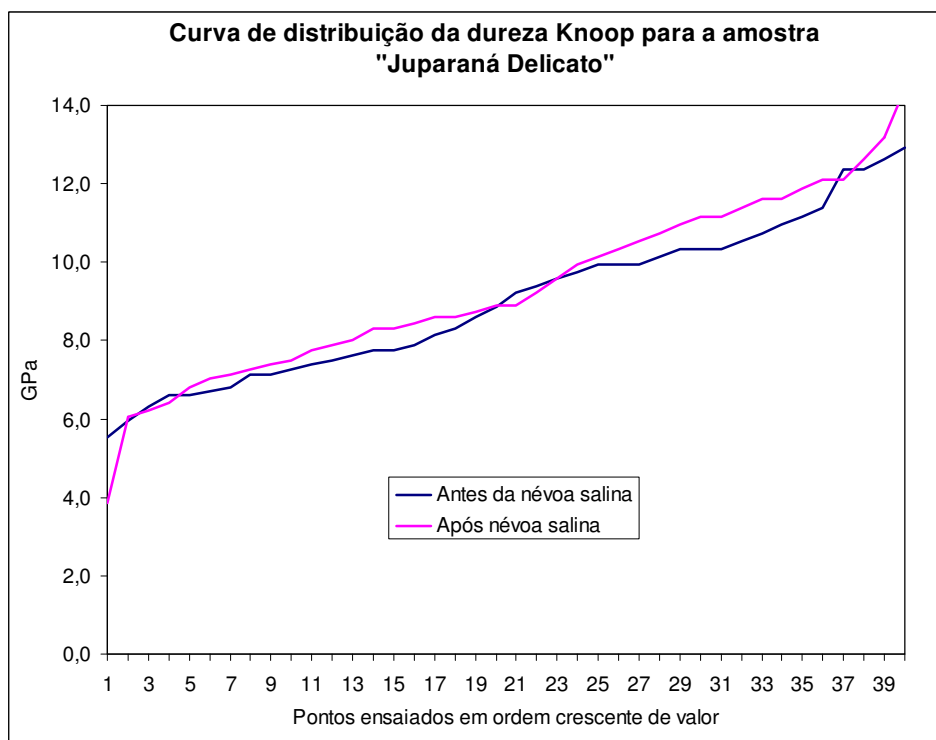


Figura 6.24 – Curva de distribuição da dureza *Knoop* para o gnaiss Delicato.

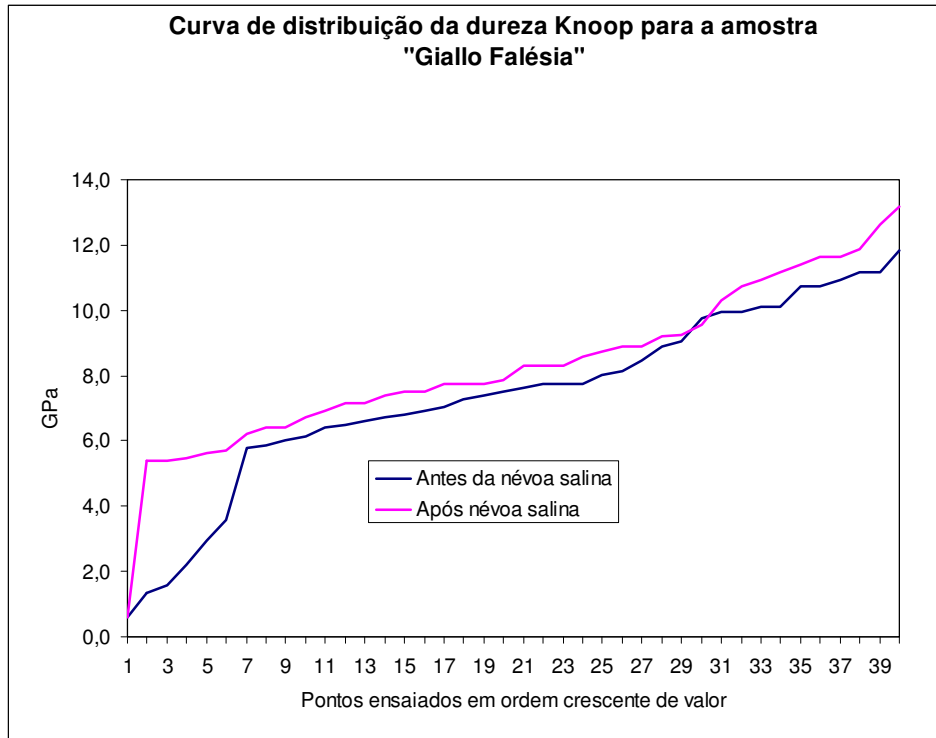


Figura 6.25 – Curva de distribuição da dureza *Knoop* para o gnaiss Falésia.

6.10. ENSAIO CÍCLICO DE ALTERAÇÃO ACELERADA

Seis cubos de cada uma das rochas estudadas foram submetidos ao teste de alteração/envelhecimento acelerado por meio de câmara com atmosfera controlada (*salt spray*). Esta câmara, que se encontra referenciada no item 3.2.1, foi eletronicamente programada para produzir ciclos de 6 horas de névoa salina alternados com 12 horas de secagem por meio de circulação forçada de ar a 40°C.

Considera-se que este ensaio é mais próximo daquilo que se observa na natureza. Assim, às doze horas de secagem representa a exposição diurna onde predominam temperaturas mais altas e menor umidade do ar devido à insolação, enquanto às seis horas de névoa salina representam a exposição noturna com maior umidade do ar e ventos soprando no sentido do mar para terra, carreando um volume maior de aerossóis marinhos.

As mudanças nos pesos das amostras, ao final do último ciclo, estão sumarizados nas figuras 6.27, 6.28 e 6.29, enquanto a figura 6.26 ilustra o padrão de modificação mais representativo.

Ao término de 30 ciclos, correspondendo a 540 horas, verifica-se que o peso final de todos os gnaisses foi menor do que o peso inicial. A força de cristalização dos sais promove a desagregação/destacamento e conseqüente saída de material (partículas ou grãos) das amostras por meio do alargamento e desenvolvimento de novas fissuras.

Dentre os três tipos de rochas estudadas, o Falésia apresentou perda de massa mais significativa, explicada pela maior porosidade e permeabilidade do mesmo que favorece o transporte do *spray* salino para o seu interior e, por conseguinte a migração de uma quantidade maior de sal.

Verificou-se nas amostras comportamento semelhante ao descrito por Frascá (2003), isto é, a presença de sais ao longo das microfissuras superficiais quando no interior das câmaras e que desapareciam após a lavagem que precede a inspeção visual.

A deterioração pode ser observada através do inchamento, deslocamento, esfoliações locais das biotitas e da oxidação de minerais ou intensificação da coloração de hidróxidos de ferro preexistentes, mais fortemente evidenciada nas amostras do Falésia (Figura 6.26).

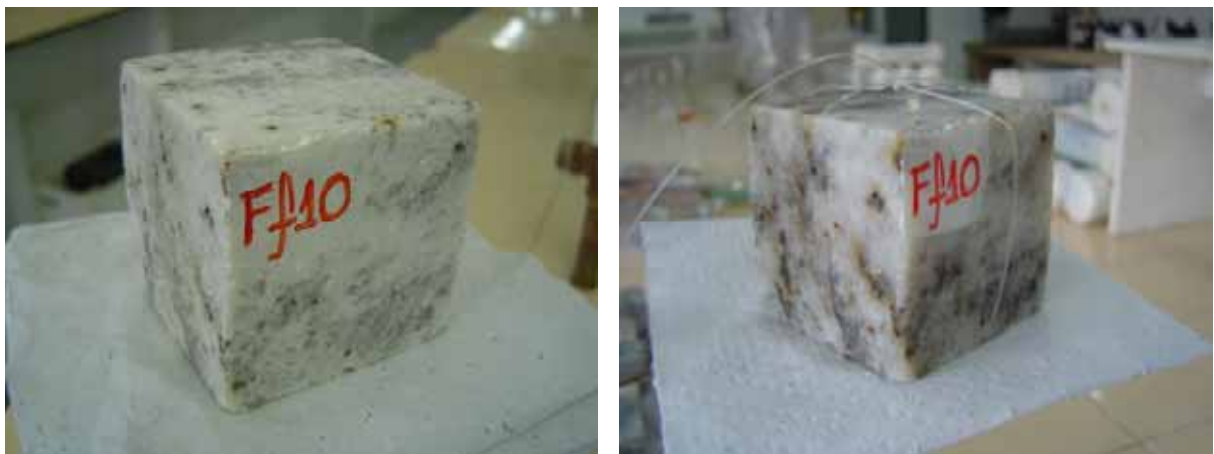


Figura 6.26 – Amostra do Gnaiss Falésia antes e após exposição à névoa salina, podendo-se observar o aumento da oxidação preexistente.

Esta forma de deterioração é característica da presença de sais com higroscopicidade intermediária, como é o caso do cloreto de sódio (Hr = 75,3%), que podem ter ciclos diários de dissolução \longleftrightarrow cristalização provocando a desagregação física por meio de esfoliações, lascas ou escamações.

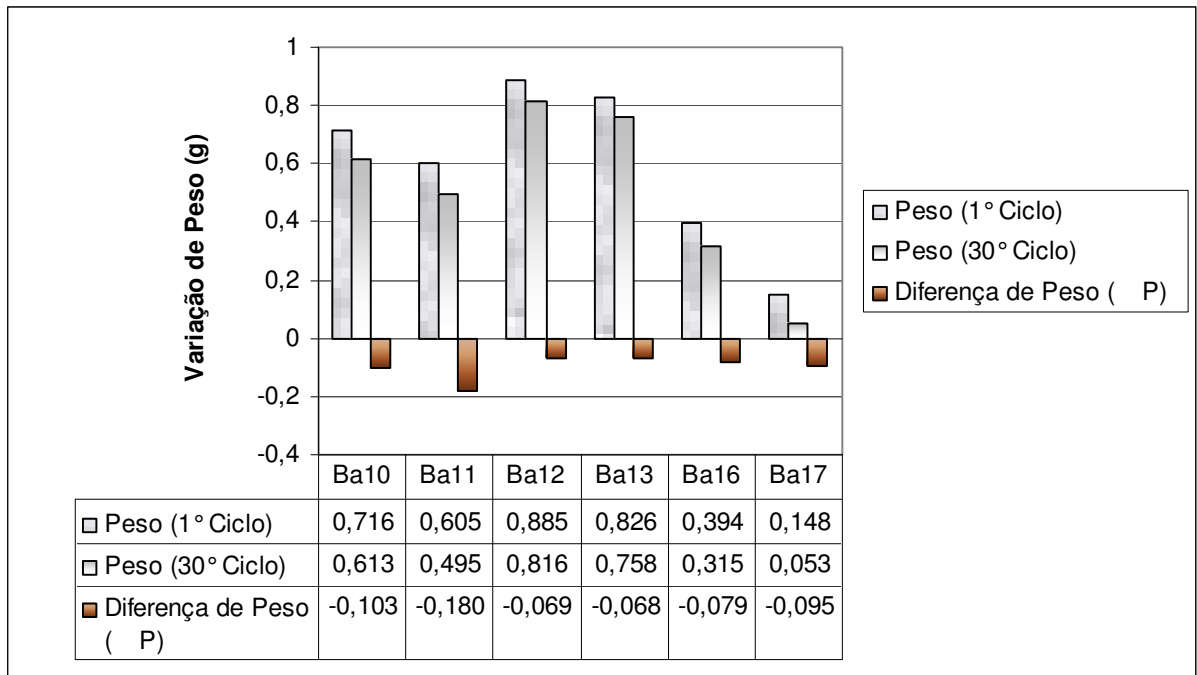


Figura 6.27 – Mudanças no peso do gnaiss Casablanca após ensaio de alteração acelerada.

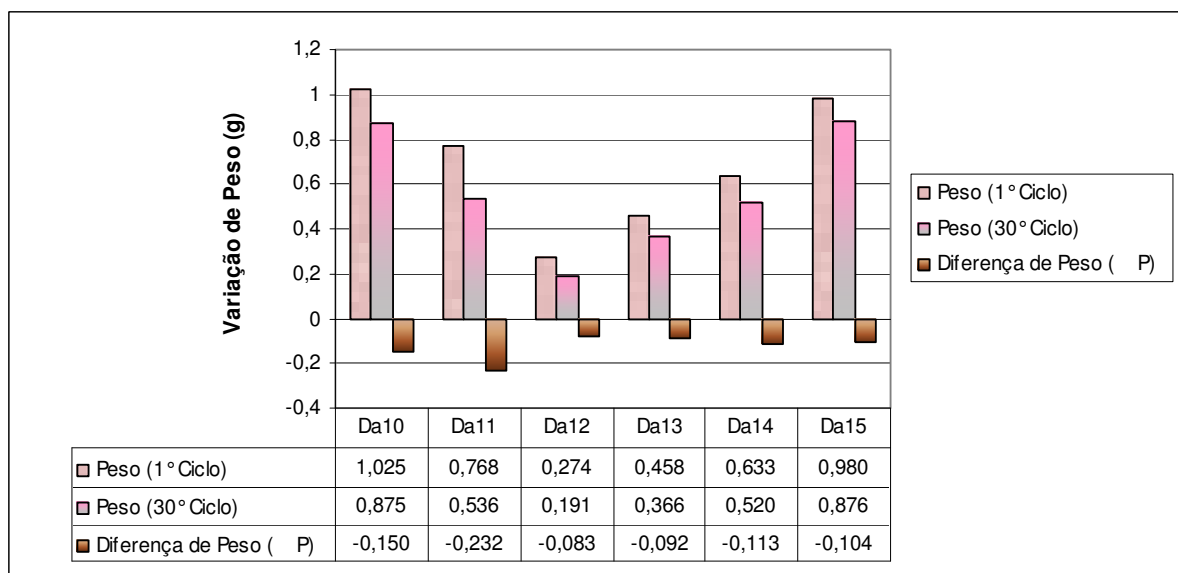


Figura 6.28 – Mudanças no peso do gnaiss Juparaná Delicato após ensaio de alteração acelerada

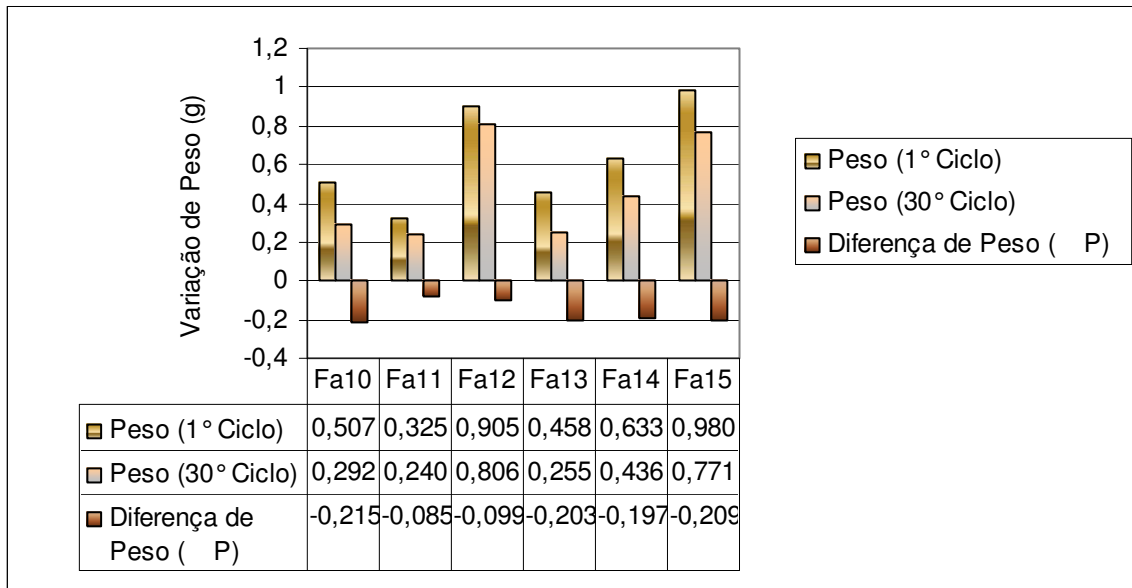


Figura 6.29 – Mudanças no peso do gnaisse Giallo Falésia após ensaio de alteração acelerada

O procedimento de lavagem, no final do ensaio, mostrou-se notadamente importante e, por conseguinte foi realizado com bastante critério para a completa remoção do NaCl, depositado nos níveis mais profundo das amostras, e de pequenos fragmentos/partículas que se desprendem, como resultado do processo de alterabilidade sofrido (Figura 6.29). Tal remoção não seria eficiente se fosse efetuada uma lavagem sem controle o que poderia levar a distorção nos resultados.



Figura 6.30 – Resíduo de filtragem da 4ª lavagem contendo pequenas placas (ou lascas) de biotita, muscovita e hidróxidos de ferro, além de grãos de feldspato e quartzo.

Algum resíduo salino eventualmente presente ao final da quarta lavagem foi considerado desprezível, uma vez que representaria valor muito pequeno em peso e, portanto, não significativo para uma balança com precisão de 0,001g.

O controle de remoção do sal se fez por meio da medida de condutividade elétrica em mili-Siemens por centímetro, que garantiu ao final da quarta lavagem valor muito próximo daquele encontrado na água originalmente utilizada (Figura 6.30).

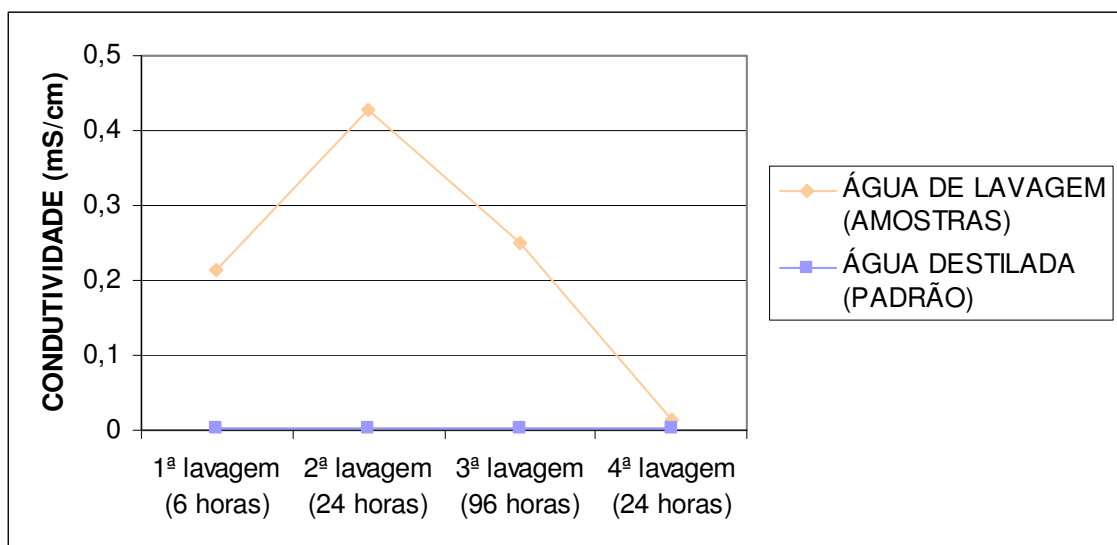


Figura 6.31 – Controle da remoção do sal presente no interior das amostras por meio da medida de condutividade das águas de lavagem.

Procedeu-se a análise química da água de lavagem das amostras de rocha, ao final do ensaio acelerado com névoa salina, e comparada com a análise da água de origem, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 6.3.

Os valores encontrados sugerem a lixiviação de álcalis e sílica. O potássio (K) pode ser proveniente do feldspato potássico, muscovita e biotita, o magnésio (Mg) parece ter sido mobilizado a partir dos minerais ferromagnesianos e o cálcio (Ca) deve ser proveniente do plagioclásio cálcio-sódico e granada.

Tabela 6.3 – Resultados da análise química da água destilada e água de lavagem das amostras de rocha.

ELEMENTOS/COMPOSTOS QUÍMICOS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
	ÁGUA DESTILADA E DEIONIZADA	ÁGUA DE LAVAGEM DAS AMOSTRAS
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	nd	13,6
Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	nd	1,9
Sólidos dissolvidos (mg/L)	4,0	113,0
Sólidos totais (mg/L)	7,5	126,0
Cálcio (mgCa ⁺⁺ /L)	nd	0,4
Magnésio (mgMg ⁺⁺ /L)	nd	0,2
Sódio (mgNa ⁺ /L)	nd	36,0
Potássio (mgK ⁺ /L)	nd	4,5
Cloretos (mgCl ⁻ /L)	2,8	42,9
Bicarbonatos (mgHCO ₃ ⁻ /L)	nd	16,6
Sulfatos (mgSO ₄ ⁻ /L)	nd	11,1
Nitratos (mgN-NO ₃ ⁻ /L)	nd	0,1
Sílica (mgSiO ₂ /L)	5,0	10,0

Análise conforme diretrizes *Standard Methods for the examinations of water and wastewather*
Nd – não detectado

6.11. ÍNDICE DE ALTERABILIDADE

As variações de brilho e da dureza, medidas em placas polidas de rochas, no início e no final do ensaio de alteração acelerada permitem o cálculo do índice de alterabilidade (**K**), proposto por Silva (1982 apud Aires-Barros, p.190).

Segundo este autor, pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$K = \Delta H_V (1 + \Delta B)$$

onde:

ΔH_V representa a variação percentual da microdureza *Vickers* medida antes e após o ensaio;

e ΔB a variação percentual do brilho medida antes e no final do ensaio, admitindo-se que a medida inicial corresponde a 100%;

Neste estudo foi feito uso da mesma expressão, contudo foram empregados os valores de microdureza *Knoop* uma vez que se trata de rochas de composição granítica e conseqüentemente de maior dureza.

As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os valores de brilho e dureza, respectivamente, enquanto a Tabela 6.6 apresenta os valores de $K, \Delta H_K$ e ΔB para os gnaisses estudados.

Tabela 6.4 – Valores de brilho para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia antes e após ensaio de alteração acelerada.

TIPO LITOLÓGICO	Brilho inicial (B_i)	Brilho final (B_f)
CASABLANCA	56,5	48,1
DELICATO	84,0	80,8
FALÉSIA	73,9	71,2

Tabela 6.5 – Valores de microdureza *Knoop* para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia antes e após ensaio de alteração acelerada.

TIPO LITOLÓGICO	Dureza inicial (K_i)	Dureza final (K_f)
CASABLANCA	7,58	7,19
DELICATO	8,99	9,32
FALÉSIA	7,38	8,30

Tabela 6.6 – Cálculo do índice de alterabilidade para os gnaisses Casablanca, Delicato e Falésia.

TIPO LITOLÓGICO	ΔH_K $\Delta H_K = \frac{H_{K_i} - H_{K_f}}{H_{K_i}} \times 100$	ΔB $\Delta B = \frac{B_i - B_f}{B_i} \times 100$	K $K = \Delta H_K (1 + \Delta B)$
CASABLANCA	5,1	14,8	80,5
DELICATO	-3,6	3,8	-17,3
FALÉSIA	-12,4	3,6	-57,0

Procurando ordenar agora as rochas estudadas em função da sua resistência à alteração temos:

CASABLANCA > DELICATO > FALÉSIA

Apesar das discrepâncias encontradas em algumas medidas de microdureza (H_K), a ordenação dessas rochas obedeceu à seqüência esperada. Este resultado vem corroborar com aquele obtido no item 6.10 onde se verificou que o Falésia foi, dentre os três gnaisses ensaiados, o que apresentou maior perda de massa sugerindo uma redução mais expressiva da resistência mecânica e da dureza dessa rocha como reflexo da exposição ao ensaio acelerado.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, procurou-se estudar o comportamento de rochas gnáissicas de composição granítica em atmosfera salina, com a preocupação de compreender os mecanismos condicionantes e os fatores que contribuiriam para o surgimento de alterações.

Os ensaios utilizados foram escolhidos de maneira a dar o melhor e maior volume de informações possíveis, em que pese às limitações impostas pelo tempo de duração da pesquisa e pela carência de equipamentos específicos no país que permitam a obtenção de informações relevantes acerca dos mecanismos de atuação no interior das placas de rochas.

A impossibilidade da obtenção de amostras perfeitamente idênticas para serem utilizadas, como parâmetros comparativos (ou duplicatas), na realização de ensaios destrutivos explicam algumas distorções de resultados encontrados em algumas destas modalidades.

Vale, ainda, ressaltar que no início desta pesquisa não se tinha disponibilidade de informações sistematizadas quanto ao monitoramento de rochas submetidas a ensaios de alteração acelerada, principalmente em se tratando de rochas graníticas. Este fato motivou, inicialmente, a aplicação de norma existente para avaliação da corrosão de materiais metálicos por exposição à névoa salina, utilizando ensaios tecnológicos como forma de controle qualitativo das alterações resultantes (ensaio contínuo). Posteriormente, foi adquirida a norma que trata especificamente da determinação da resistência das rochas naturais ao envelhecimento por exposição à névoa salina (ensaio cíclico), sendo aplicada na sua íntegra e tendo os cálculos de perda de massa, redução de brilho e dureza como parâmetros de controle das alterações resultantes.

As duas abordagens de ensaio acelerado, tanto contínuo quanto cíclico, permitem concluir que os três gnaisses em estudo sofrem alteração com perda de

massa e redução do brilho, quando expostas à atmosfera salina. Essas reduções têm reflexos diretos na diminuição da resistência mecânica dessas rochas, como um todo.

Dentre os três litotipos estudados o Falésia foi aquele que sofreu mais evidente processo de alteração, consequência do seu intemperismo natural e sistema poroso mais favorável à percolação do *spray* salino e cristalização dos sais.

As amostras Casablanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia submetidas ao ensaio acelerado apresentaram valores de resistência comparativamente mais baixos do que o seu similar ensaiado ao natural. A queda da resistência mecânica dessas rochas pode ser atribuída à ação da solução salina usada no teste.

Os gnaisses expostos à névoa salina em ensaio contínuo apresentam perda de brilho inicial decrescente obedecendo sempre a mesma seqüência, formada pelo Falésia, Casablanca e Delicato. Dentre as duas abordagens de ensaio acelerado, o ensaio cíclico foi aquele que afetou mais intensamente o brilho desses materiais apresentando uma redução média superior a 3,6%, para um menor número de horas de exposição (540 horas).

Os menores valores de velocidade de ondas ultra-sônicas, dentre todos, foram determinados no Falésia (4551 e 4569 m/s) e são controlados pelos níveis micáceos e pela intensidade de alteração verificada nos feldspatos (sericitização). Os valores mais elevados para essa propriedade foram do Delicato (5115 e 5663 m/s), justificados pela menor porosidade e maior percentual em feldspato potássico (37%).

Os resultados de dilatação mostram que o Falésia ($7,40$ e $9,70 \times 10^{-3}$ [mm/(m.°C)]) e o Delicato ($6,80$ e $7,05 \times 10^{-3}$ [mm/(m.°C)]) foram os que sofreram variações mais significativas de seus coeficientes, com aumento da dilatação em função do ensaio acelerado.

As três amostras se comportam como rochas de média a alta condutividade térmica com valores médios de $3,19$ W/m²K para o Casablanca e $3,64$ W/m²K para o Delicato. O Falésia apresenta o menor valor médio que é de $2,99$ W/m²K, sendo este resultado creditado a ocorrência de microfissuras e a maior intensidade de alteração dos minerais que compõem esta rocha.

No ensaio de aptidão de molhagem verificou-se que o Falésia apresentou os menores valores de t_p (tempo de absorção de microgotas), por conter um percentual maior de minerais micáceos e microfissuras dispostos em sua superfície, em comparação aos demais gnaisses estudados. Isto implica numa maior aptidão de molhagem dessa rocha em relação às outras, fato que se coaduna com os resultados obtidos nos ensaios de absorção e porosidade.

O gnaiss Casablanca apresentou, para o ensaio de microdureza, uma tendência de redução nos valores após a exposição à névoa salina (7,58 – 7,19 GPa). No Delicato praticamente não houve variação (8,99 – 9,32 GPa). Contudo, o Falésia mostrou um aparente aumento de dureza após a exposição à névoa salina, que parece ser devido à subestimação dos valores medidos antes deste ensaio, ocasionada pelo excesso de minerais de baixa dureza no exemplar ensaiado (7,38 – 8,30 GPa).

O ensaio cíclico se mostrou mais eficiente em relação ao ensaio contínuo apresentando resultados representativos e confiáveis, uma vez que simula condições mais próximas da realidade e possui uma metodologia mais adequada aos materiais rochosos. Ao término de 30 ciclos, correspondendo a 540 horas, verifica-se que o peso final de todos os gnaisses foi menor do que o peso inicial. A força de cristalização dos sais promove a desagregação/destacamento e conseqüente saída de material (partículas ou grãos) das amostras por meio do alargamento, propagação ou provavelmente pelo desenvolvimento de novas fissuras.

Os resultados obtidos permitem inferir que:

- Neste estudo o processo de degradação física foi mais evidente;
- As amostras intempericamente alteradas responderam mais rapidamente aos ataques de degradação;
- A susceptibilidade dos gnaisses à alteração foi determinada por três fatores: a porosidade, que tem influência sobre a forma de penetração da solução salina e quantidade de sal que migra para o interior da rocha, a dimensão dos grãos (média a grosseira), que aumenta a susceptibilidade à degradação na presença de sal, e ao sistema de poro, que determina em grande parte a pressão de cristalização exercida pelo sal e, por conseguinte, a deterioração produzida.

A discrepância encontrada em alguns dados reflete as estruturas muito heterogêneas dessas rochas, o que dificultou e praticamente impossibilitou a obtenção de corpos-de-prova representativos das diferenças estruturais e mineralógicas observadas em afloramentos e amostras maiores. Esta conjuntura, associada ao cunho inovador do tema desenvolvido, imprimiu um caráter qualitativo à pesquisa que deixa como legado dados e referências que poderão contribuir para a realização de trabalhos posteriores de enfoque similar, porém com abordagem estatística.

Acredita-se que os efeitos verificados nestas condições atmosféricas possam ser atenuados com a utilização de películas protetoras, principalmente nos materiais que desempenham função de revestimento externo. Para tanto, sugere-se a realização de estudos que possam avaliar a eficácia destes produtos nas condições atmosféricas específicas da região, face ao seu peculiar grau de agressividade salina.

Apesar das condições dos ensaios simulados, utilizados neste estudo, terem sido mais severas e, conseqüentemente, as deteriorações resultantes mais intensas e rápidas, as condicionantes naturais vigentes na região são mais complexas acrescentando-se fatores como variações térmicas, radiação solar, força dos ventos, efeito abrasivo de particulados, incidência de chuvas e variações de umidade do ar somadas à composição mais rica dos aerossóis marinhos, que atuam em conjunto e promovem lentamente, porém de forma contínua, o decaimento das rochas e demais materiais expostos a tais condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L.A. 1991. **Alteração e alterabilidade de rochas**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica, 384p.
- ALMEIDA, F.F.M., BRITO NEVES, B.B. and FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. Atas... Campina Grande, 1977. p. 363-391.
- ARTHAUD, M.H.; VASCONCELOS, A.M.; NOGUEIRA NETO, J.A.; OLIVEIRA, F.V.C.; PARENTE, C.V.; MONIÉ, P.; LIEGEOIS, J.T.; CABY, R.; FETTER, A. Main structural features of Precambrian domains from Ceará. (NE Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS, 14, 1998, Ouro Preto. Abstracts... Ouro Preto: UFOP, 1998, p. 84-85.
- ARTUR, A.C.; MEYER, A.P.; WERNICK, E. Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, I SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2, 2001, Salvador, Anais... Salvador: Museu Geológico da Bahia, 2001, p. 13-19.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1983b) NBR 8094/83: **Material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição à névoa salina**. Rio de Janeiro.
- _____. (1992a) NBR 12768/92: **Rochas para revestimento – análise petrográfica**. Rio de Janeiro.

_____. (1992b) NBR 12766/92: **Rochas para revestimento – determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente.** Rio de Janeiro.

_____. (1992c) NBR 12767/92: **Rochas para revestimento – Determinação da resistência à compressão uniaxial.** Rio de Janeiro.

_____. (1992d) NBR 12042/92: **Materiais inorgânicos. Determinação do desgaste por abrasão.** Rio de Janeiro.

_____. (1992e) NBR 12765/92: **Rochas para revestimento – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear.** Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. (1997) B 117/97: **standard practice for operating salt spray; fog; apparatus.** Philadelphia.

_____. (2000) D 2845/00: **standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks.** Philadelphia.

ARTHAUD, M. H., VASCONCELOS, A. M., OLIVEIRA, F. V. C. As seqüências metassedimentares do Ceará Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. p.16.

AZZONI A., BAILO F., RONDENA E., FANINETTI A. Valutazione con prove meccaniche, chimico-fisiche e petrografiche del degrado indotto su alcune rocce mediante varie tecniche di laboratorio. **Boll. Ass. Min. Subalp.**, XXIX, 2-3, 1992, 209-221.

BRITO NEVES, B.B. **Regionalização geotectônica do Precambriano nordestino.** 1975. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975, 198p.

- BRITO NEVES, B.B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R. **Tectonic history of the Borborema province, Northeastern Brazil**. In: Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro, 2000. p.151-182.
- CABY, R.; ARTHAUD, M. H. Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceara, Northeast Brazil. **Geology**. n.14, p.871-874, 1986.
- CABY, R.; ARTHAUD, M. H.; ARCHANJO, C. J. Lithostratigraphy and petrostructural characterization of supracrustal units in the brasiliano belt of Northeast Brazil: geodynamic implications. **Journal of South American Earth Sciences**. n.8, p.235-246, 1995.
- CARDELL, C.; RIVAS, T.; MOSQUERA, M.J.; BIRGINIE, J.M.; MOROPOULOU, A.; PRIETO, B.; SILVA, B.; VAN GRIEKEN, R. Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. **Earth Surface Processes and Landforms**. n. 28, p.1-14, 2003.
- COOPER, T.P.; DUFFY, A.; O'BRIEN, P.; BELL, E.; LYONS, F. Conservation of historic buildings at Trinity College Dublin. In: ALTERACIÓN DE GRANITOS Y ROCAS AFINES, 1991, Ávila. **Deterioro de monumentos históricos**. Ávila: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1991. p. 59-65.
- CAVALCANTE, J.C.; FERREIRA, C.A., ARMESTO, R.C.R.; RAMALHO, R.; BRAUN, R.P.G.; BATISTA, M.B.; CUNHA, H.C.S. **Mapa Geológico do Estado do Ceará. Escala 1:500.000**. Fortaleza: MME/DNPM/CEMINAS/SUDENE, 1983.
- CEARÁ (1992). Clima.
- CHEVALIER, Y.; BECH, J.; LAUTRIDOU, J.P.; DEJOU, J. Influence of mineralogical and mechanical characteristics of granitoid weatherability in the provence basement (S.E. France). In: ALTERACION DE GRANITOS Y ROCAS AFINES,

1991, Ávila. **Deterioro de monumentos históricos**. Ávila: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1991. p. 167-171.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. (2003) EN 14147/03: **Natural stone test methods – Determination of resistance to ageing by salt mist**. Brussels.

DIONÍSIO, M. A. A. R. **A pedra de Ançã: características minero-químicas e petrofísicas**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1998, 165p.

FASSINA, V.; STEVAN, A.G. **Pioggia e nebbia acida a Venezia in relazione al degrado dei manufatti lapidei**. Atti 3º Congr. Int. “Prove Non Distruttive”, Viterbo, 1992, p. 950-955.

FETTER, A.H. **U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana**. 1999. PhD Thesis, Department of Geology, Kansas University, Lawrence, USA, 1999, 164p.

FIGUEIREDO, P.M.S.L.R.; **Estudo tecnológico de rochas calcárias da região de Lisboa (Jurássico e Cretácico)**. 1997. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1997, 179p.

FIGUEIREDO, P.; AIRES-BARROS, L; TORQUATO, J. R.; BESSA, M.F.; LIMA, M.A.; FERNANDES, A.H. 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. 2001, p. 384-387.

- FITZNER, B. **Porosity properties and weathering behavior of natural stones. Methodology and examples. Stone material in monuments: diagnosis and conservation.** Second Course, 1993, p. 43-54.
- FLAIN, E.P. Recomendações para revestimentos de fachadas de rochas ornamentais. São Paulo: **Rochas de Qualidade.** n. 132, p. 76-92, 1997.
- FRASCÁ, M.H.B.O. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento.** 2003. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003, 264p.
- FRAZÃO, E.B.; FARJALLAT, J.E. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL, 1, 1995, Lisboa, Anais... Lisboa, 1995, p. 47-58.
- GOMES, J.R.C.; GATTO, C.M.P.P.; SOUZA, G.M.C.; LUZ, D.S.; PIRES, J.L; TEIXEIRA, W.; FRANÇA, F.A.B.; CABRAL, E.M.A.; MENOR, E.A.; MONTEIRO, N. 1981. Geologia. In: **Radambrasil: Levantamento de Recursos Naturais.** Rio de Janeiro, MME/SG. p.27-198.
- HANEEF, S.J., DICKINSON, C., JOHNSON, J.B., THOMPSON, G.E., WOOD G.C. Degradation of coupled stones by artificial acid rain solution. In: SCIENCE, TECHNOLOGY AND EUROPEAN CULTURAL HERITAGE, Proceedings Symposium, Bologna, 1989, Butterworth-Heinemann Ltd, 469-473.
- ISO/DIS 9223 – **Corrosion of metals and alloys – classification of corrosivity of atmospheres.** Philadelphia.
- LE MAITRE, R.W. **A classification of igneous rocks and glossary of terms.** London: Blackwell, 193 p., 1989.

- LIMA, J.J.C. **Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em revestimento de edificações**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002, 121p.
- MARINI P. **Determinazione quantitativa del degrado delle pietre da decorazione e messa a punto do prove di invecchiamento accelerato per la previsione della loro durabilit **. Dottorato – Dipartimento de Georisorse e Território, Politécnico di Torino, Torino, 1994, 132p.
- MESQUITA, M.P.S. **Composi o, estruturas, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**. 2002. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002, 169p.
- MONIÉ, P.; CABY, R.; ARTHAUD, M.H. The Neoproterozoic Brazilian orogeny in Northeast Brazil: Ar^{40}/Ar^{39} and petrostructural data from Ceará. **Precambrian Research**, v. 81, p.241-264, 1997.
- MONTENEGRO, I.N.S. **Corrosão atmosférica nos materiais utilizados no setor elétrico em Fortaleza-Ce**. 1996. Disserta o (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1996, 251p.
- MONTENEGRO, I.N.S.; FILGUEIRA, A.R.M.; LUNA, A.M.; PEREIRA, N.A. 2002/2003. **Corrosão e Degrada o Atmosférica dos Materiais Elétricos-Ciclo I**. Fortaleza, Programa de P&D COELCE/ANEEL.
- MONTENEGRO, I.N.S.; FILGUEIRA, A.R.M.; LUNA, A.M.; PEREIRA, N.A. 2004/2008. **Corrosão e Degrada o Atmosférica dos Materiais Elétricos-Ciclo II**. Fortaleza, Programa de P&D COELCE/ANEEL.

- NAVARRO, F.C. Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: CONGRESSO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2, 1998, Montevideo, Actas... Montevideo, 1998, p. 103-107.
- NAVARRO, F.C. Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas como ferramenta para a previsão de parâmetros mecânicos em granitos ornamentais. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 3, 2002, Recife, Anais... Rio de Janeiro: CETEM, 2002, v. 1, p. 20-23.
- NOGUEIRA NETO, J.A. **A tectônica da região de Tróia**. In: SEMINÁRIO UNESP, 1993, Rio Claro, Seminário ministrado na disciplina: O Pré-Cambriano do Brasil.
- PESSOA, R.R.; ARCHANJO, C.J. 1984. Tectônica de empurrão na Região de Tróia-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984, v. 4, p. 1721-1728.
- RIVAS, T.; PRIETO, B.; SILVA, B.; BIRGINIE, J.M. Weathering of granitic rocks by chlorides: effect of the nature of the solution on weathering morphology. **Earth Surface Processes and Landforms**. n. 28, p.425-436, 2003.
- RODRIGUES E.P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J.M.V. Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. Lisboa: **Rochas e Equipamentos**. v. 47, 2p. 1997.
- RODRIGUES E.P.; COUTINHO, J.M.V., CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. São Paulo: **Rochas de Qualidade**. n. 127, p. 80-84, 1996.

- RODRIGUES E.P.; MORAES M.C. Exemplo de aplicação de coloração seletiva de feldspatos potássicos e cálcicos, como técnica auxiliar no estudo de rochas. São Paulo: **Cerâmica**. n. 97, p. 32-35, 1978.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.E.; ASMUS, H.E. **Geologia do Brasil: Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais**. Escala: 1: 2.500.000. Brasília, MME/DNPM, 1984, 501p.
- STRECKEISEN, A. To each rock its proper name. **Earth Sciences Review**. v. 12, p. 1-33, 1976.
- TORQUATO, J. R.; BESSA, M.F.; LIMA, M.A.; FERNANDES, A.H. Uso do PUNDIT na determinação de anomalias ultra-sônicas em blocos rochosos. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 3, 2002, Recife, Anais... Rio de Janeiro: CETEM, 2002, v. 1, p. 20-23.
- TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana, Pan-African – Brasiliano aggregation of South America and Africa**. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1994, 350p.
- TRUJILLANO, R.; IÑIGO, A.C.; RIVES, V.; VICENTE, M.A. Behaviour of three different types of granite under forced alteration. **Degradation and conservation of granitic rocks in monuments**. Protection and conservation of European cultural heritage. Salamanca: European Commission, Final Report n. 05, Project STEP-CT-90-0101, 1994. p. 89-93.
- VIDAL, F.W.H. **Estudo dos elementos abrasivos de fio diamantado para a lavra de granitos do Ceará**. 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, 173p.

ZANIBONE, E.; QUEIROZ, M.A. **Relatório final de pesquisa de gnaiss em Barra do Riachão, Distrito de Tróia, Município de Pedra Branca-CE.** Fortaleza: DNPM, Relatório, n. 800.134/99, 2001.

WINKLER, E.M. **Stone in architecture: properties, durability.** 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

APÊNDICE 1

DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS, AO NATURAL.

CASA BLANCA - NATURAL				
AMOSTRA	MASSA ESP. APARENTE SECA	MASSA ESP. APARENTE SATURADA	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
1	2.639	2.644	0,44	0,17
2	2.660	2.665	0,41	0,16
3	2.655	2.660	0,40	0,15
4	2.670	2.674	0,38	0,14
5	2.647	2.653	0,47	0,18
6	2.633	2.638	0,41	0,16
7	2.615	2.620	0,44	0,17
8	2.635	2.640	0,44	0,17
9	2.662	2.667	0,40	0,15
10	2.667	2.672	0,39	0,14
MÉDIA	2.648	2.654	0,42	0,16

DELICATO - NATURAL				
AMOSTRA	MASSA ESP. APARENTE SECA	MASSA ESP. APARENTE SATURADA	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
1	2.648	2.653	0,39	0,14
2	2.646	2.651	0,34	0,13
3	2.644	2.649	0,44	0,17
4	2.651	2.657	0,50	0,19
5	2.642	2.647	0,42	0,16
6	2.646	2.652	0,59	0,23
7	2.645	2.651	0,48	0,18
8	2.649	2.655	0,51	0,19
9	2.630	2.637	0,58	0,22
10	2.650	2.655	0,41	0,15
MÉDIA	2.645	2.650	0,46	0,18

FALÉSIA - NATURAL				
AMOSTRA	MASSA ESP. APARENTE SECA	MASSA ESP. APARENTE SATURADA	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
1	2.631	2.635	0,34	0,13
2	2.627	2.633	0,47	0,18
3	2.619	2.625	0,50	0,19
4	2.640	2.645	0,40	0,15
5	2.637	2.642	0,43	0,16
6	2.632	2.640	0,67	0,25
7	2.592	2.598	0,55	0,21
8	2.657	2.664	0,62	0,23
9	2.593	2.602	0,80	0,31
10	2.646	2.653	0,64	0,24
MÉDIA	2.627	2.634	0,54	0,21

APÊNDICE 2

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS ROCHAS ESTUDADAS

DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (h)	DIMENSÃO DAS ARESTAS (cm)		ÁREA DE CARGA (mm ²)	CARGA DE RUPTURA (Kgf)	TENSÃO DE RUPTURA		
		A1	A2			Kgf/mm ²	MPa	
JUPARANA DELICATO	Dc1	360	69,9	69,8	4.879	53.180	10,89	106,9
	Dc2	720	71,2	70,2	4.998	51.150	10,23	100,3
	Dc3	1080	69,7	71,6	4.990	30.750	6,16	60,4
	Dc4	360	67,7	69,5	4.705	52.700	11,2	109,8
	Dc5	720	68,3	70,2	4.791	31.190	7,13	69,9
	Dc6	1080	68,1	70,4	4.794	29.630	6,18	60,6
	Dc7	360	67,7	67,8	4.590	48.570	10,58	103,7
CASABLANCA	Bc1	360	68,5	68,2	4.672	46.879	10,03	98,4
	Bc2	720	69,3	69,4	4.809	48.840	10,15	99,6
	Bc3	1080	70,1	69,2	4.851	28.000	5,77	56,6
	Bc4	360	71,0	70,5	5.005	50.810	10,15	99,5
	Bc5	720	70,9	71,4	5.062	33.810	6,68	65,5
	Bc6	1080	71,1	69,2	4.920	27.960	5,68	55,7
	Bc7	360	71,3	71,1	5.069	44.320	8,74	85,7
GIALLO FALÉSIA	Fc1	360	67,8	68,2	4.624	25.530	5,52	54,1
	Fc2	720	68,1	68,6	4.671	32.770	7,01	68,8
	Fc3	1080	69,8	69,3	4.837	22.500	4,65	45,6
	Fc4	360	68,9	69,2	4.768	25.660	5,38	52,7
	Fc5	720	69,8	69,8	4.872	26.130	5,36	52,5
	Fc6	1080	67,1	69,0	4.630	17.890	3,86	37,8
	Fc7	360	70,1	72,1	5.051	28.890	5,71	56,1

**APÊNDICE 3
MEDIDAS DE DESGASTE AMSLER DAS ROCHAS ESTUDADAS**

DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA		TEMPO DE EXPOSIÇÃO	LEITURA INICIAL- cm		LEITURA APÓS 500M		LEITURA APÓS 1000M		DESGASTE AMSLER (mm)	
			INDIVIDUAL	MÉDIA	INDIVIDUAL	MÉDIA	INDIVIDUAL	MÉDIA	500m	1000m
Casablanca	Bd1	360	3,46	3,46	2,95	2,91	2,50	2,41	0,55	1,05
			3,53		2,90		2,44			
			3,42		2,82		2,20			
			3,43		2,98		2,40			
	Bd2	720	3,71	3,75	3,26	3,27	2,87	2,87	0,48	0,88
			3,91		3,32		2,94			
			3,75		3,29		2,88			
			3,66		3,23		2,79			
	Bd3	1080	3,94	3,82	3,52	3,44	2,99	3,02	0,38	0,80
			3,91		3,55		3,12			
			3,66		3,32		2,92			
			3,78		3,38		3,07			
Juparaná Delicato	Dd1	360	3,37	3,38	2,84	2,87	2,52	2,49	0,51	0,89
			3,44		2,92		2,40			
			3,35		1,86		2,44			
			3,37		2,87		2,60			
	Dd2	720	3,24	3,23	2,88	2,83	2,62	2,51	0,40	0,72
			3,19		2,90		2,57			
			3,26		2,83		2,39			
			3,23		2,71		2,49			
	Dd3	1080	2,70	2,66	2,35	2,29	1,95	1,85	0,37	0,81
			2,56		2,44		1,93			
			2,59		2,19		1,78			
			2,70		2,20		1,77			
Giallo Falésia	Fd1	360	3,18	3,19	2,56	2,60	2,19	2,11	0,59	1,08
			3,37		2,59		2,32			
			3,17		2,59		1,98			
			3,06		2,57		1,95			
	Fd2	720	3,13	3,07	2,41	2,36	1,71	1,60	0,71	1,47
			3,11		2,56		1,61			
			2,98		2,26		1,46			
			3,08		2,22		1,63			
	Fd3	1080	3,28	3,17	2,62	2,57	1,94	1,73	0,60	1,44
			3,25		2,57		1,70			
			3,05		2,52		1,58			
			3,09		2,57		1,71			

APÊNDICE 4

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS NAS ROCHAS ESTUDADAS

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	DIREÇÃO DE MEDIDAS	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (m/s)				
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	$\Delta VP(\%)$
CASABLANCA	Bc1	x	3960	4053	—	—	2
		y	5447	5678	—	—	4
		z	4316	4703	—	—	9
	Bc2	x	4052	—	3960	—	-2
		y	6638	—	6514	—	-2
		z	5257	—	4853	—	-7
	Bc3	x	3453	—	—	3651	5
		y	4704	—	—	4768	1
		z	4407	—	—	4436	1
	Bc4	x	4356	4702	—	—	8
		y	4733	4930	—	—	4
		z	4325	4462	—	—	3
	Bc5	x	4487	—	4431	—	-1
		y	4570	—	4347	—	-5
		z	4993	—	4519	—	-9
	Bc6	x	4182	—	—	4443	6
		y	4978	—	—	4978	0
		z	4805	—	—	4839	1

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	DIREÇÃO DE MEDIDAS	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (m/s)				
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	$\Delta VP(\%)$
JUPARANÁ DELICATO	Dc1	x	6351	6472	—	—	2
		y	6541	6990	—	—	7
		z	5865	6177	—	—	5
	Dc2	x	6592	—	6357	—	-3
		y	5958	—	5766	—	-3
		z	6000	—	5801	—	-3
	Dc3	x	6514	—	—	6168	-5
		y	6158	—	—	5899	-4
		z	5917	—	—	5682	-4
	Dc4	x	4153	4483	—	—	8
		y	4620	4812	—	—	4
		z	4290	4398	—	—	2
	Dc5	x	6443	—	6266	—	-3
		y	6424	—	6364	—	-1
		z	6560	—	6382	—	-3
	Dc6	x	6305	—	—	5870	-7
		y	6187	—	—	5873	-5
		z	6342	—	—	5916	-6

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	DIREÇÃO DE MEDIDAS	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (m/s)				
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	$\Delta VP(\%)$
GIALLO FALÉSIA	Fc1	x	4035	4291	—	—	6
		y	3937	4077	—	—	3
		z	3444	3726	—	—	8
	Fc2	x	3081	—	3013	—	-2
		y	4058	—	3988	—	-1
		z	4035	—	3769	—	-6
	Fc3	x	2759	—	—	3187	15
		y	3447	—	—	3893	13
		z	3746	—	—	4277	14
	Fc4	x	2812	3265	—	—	16
		y	3590	3937	—	—	9
		z	3495	3977	—	—	13
	Fc5	x	3261	—	3231	—	-1
		y	4298	—	4298	—	0
		z	4417	—	4205	—	-5
	Fc6	x	2784	—	—	3257	17
		y	3626	—	—	4227	16
		z	3709	—	—	4107	10

APÊNDICE 5
MEDIDAS DE BRILHO DAS ROCHAS ESTUDADAS

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	POSIÇÃO DE LEITURA	MEDIDAS DE BRILHO				Perda de Brilho (%)
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	
CASABLANCA	Bb1	1	81,6	81,2	—	—	0,5
		2	84,0	83,6	—	—	0,5
		3	81,7	81,2	—	—	0,6
		4	88,3	87,9	—	—	0,4
		5	84,1	83,7	—	—	0,5
		X	83,9	83,5	—	—	0,5
	Bb2	1	82,1	81,6	—	—	0,6
		2	70,2	69,7	—	—	0,7
		3	67,1	66,6	—	—	0,7
		4	66,4	65,7	—	—	1,0
		5	70,0	69,4	—	—	0,8
		X	71,1	70,6	—	—	0,7
	Bb3	1	83,4	—	82,6	—	0,9
		2	75,2	—	74,1	—	1,5
		3	81,3	—	80,5	—	0,9
		4	80,9	—	79,7	—	1,5
		5	80,3	—	79,0	—	1,6
		X	80,2	—	79,2	—	1,2
	Bb4	1	86,7	—	—	84,5	2,5
		2	88,3	—	—	86,4	2,1
		3	84,9	—	—	83,6	1,5
		4	75,5	—	—	73,7	2,4
		5	77,6	—	—	75,5	2,7
		X	82,6	—	—	80,7	2,2
	Bb5	1	81,0	—	80,2	—	0,9
		2	83,4	—	82,5	—	1,0
		3	81,0	—	80,3	—	0,8
		4	87,7	—	87,1	—	0,7
		5	83,5	—	82,6	—	1,1
		X	83,3	—	82,5	—	0,9
Bb6	1	87,4	—	—	83,4	4,5	
	2	85,2	—	—	82,6	3,0	
	3	80,3	—	—	79,1	1,4	
	4	87,5	—	—	84,3	3,6	
	5	88,1	—	—	86,2	2,1	
	X	85,3	—	—	83,2	2,4	

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	POSIÇÃO DE LEITURA	MEDIDAS DE BRILHO				
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	Perda de Brilho (%)
JUPARANÁ DELICATO	Db1	1	92,2	91,8	—	—	0,4
		2	92,6	92,0	—	—	0,6
		3	90,4	90,1	—	—	0,3
		4	91,2	90,8	—	—	0,4
		5	91,3	90,8	—	—	0,5
		X	91,5	91,1	—	—	0,4
	Db2	1	89,1	—	88,3	—	0,8
		2	86,1	—	85,6	—	0,5
		3	89,0	—	88,4	—	0,6
		4	88,0	—	87,6	—	0,4
		5	89,0	—	88,6	—	0,4
		X	88,2	—	87,7	—	0,5
	Db3	1	77,5	—	—	76,8	0,9
		2	83,1	—	—	82,3	0,9
		3	82,5	—	—	81,8	0,8
		4	84,6	—	—	83,4	1,4
		5	84,8	—	—	84,1	0,8
		X	82,5	—	—	81,6	1,0
	Db4	1	80,6	80,6	—	—	0,0
		2	85,3	84,9	—	—	0,4
		3	85,2	83,1	—	—	2,4
		4	82,9	82,6	—	—	0,3
		5	83,7	83,2	—	—	0,6
		X	83,5	82,8	—	—	0,8
	Db5	1	89,1	—	86,7	—	2,7
		2	92,0	—	89,1	—	3,1
		3	86,1	—	85,0	—	1,2
		4	90,6	—	89,8	—	0,8
		5	84,3	—	83,5	—	0,9
		X	88,4	—	86,8	—	1,8
Db6	1	88,7	—	—	87,6	1,2	
	2	86,5	—	—	84,4	2,4	
	3	88,9	—	—	86,3	2,9	
	4	87,3	—	—	86,4	1,0	
	5	89,1	—	—	87,5	1,8	
	X	88,1	—	—	86,4	1,9	

DENOMINAÇÃO DA ROCHA	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	POSIÇÃO DE LEITURA	MEDIDAS DE BRILHO				
			0 hora (natural)	360 horas	720 horas	1080 horas	Perda de Brilho (%)
GIALLO FALÉSIA	Fb1	1	78,2	77,6	—	—	0,7
		2	79,8	79,0	—	—	1,0
		3	82,0	81,4	—	—	0,7
		4	77,2	76,4	—	—	1,0
		5	76,9	76,5	—	—	0,5
		X	78,8	78,2	—	—	0,7
	Fb2	1	76,5	—	—	75,7	1,5
		2	76,3	—	—	74,5	2,3
		3	74,2	—	—	73,0	1,6
		4	80,1	—	—	78,9	1,5
		5	80,6	—	—	79,1	1,8
		X	77,5	—	—	76,2	1,7
	Fb3	1	64,8	—	64,2	—	0,9
		2	86,0	—	85,3	—	0,8
		3	81,3	—	80,7	—	0,7
		4	80,4	—	79,5	—	1,1
		5	77,1	—	76,6	—	0,6
		X	77,9	—	77,2	—	0,9
	Fb4	1	85,7	81,8	—	—	4,5
		2	82,9	82,4	—	—	0,6
		3	66,1	65,7	—	—	0,6
		4	75,0	74,3	—	—	0,9
		5	85,4	82,2	—	—	3,7
		X	79,0	77,3	—	—	2,1
	Fb5	1	75,2	—	74,1	—	1,4
		2	78,9	—	78,0	—	1,1
		3	74,1	—	73,6	—	0,7
		4	75,1	—	74,5	—	0,8
		5	76,6	—	75,9	—	0,9
		X	76,0	—	75,2	—	1,0
Fb6	1	78,6	—	—	77,1	1,9	
	2	77,7	—	—	76,2	1,9	
	3	77,8	—	—	76,4	1,8	
	4	75,8	—	—	74,0	2,3	
	5	76,8	—	—	75,3	1,9	
	X	77,3	—	—	75,8	1,9	

APÊNDICE 6

DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR DAS ROCHAS ESTUDADAS

JUPARANÁ DELICATO Natural // (Dt ₂)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,00	0,0 x 50,0	50,0	1,000 x 0,024	0,024	β ₁ = 5,4	5.115	5.266
	50,0 x 0,0	50,0	1,002 x -0,974	0,028	β ₂ = 6,3		
Média					β = 5,9		

JUPARANÁ DELICATO Pós-ataque // (Dt ₂)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,52	0,0 x 50,0	50,0	1,000 x 1,029	0,029	β ₁ = 6,5	5.702	5.738
	50,0 x 0,0	50,0	1,008 x 0,974	0,034	β ₂ = 7,6		
Média					β = 7,05		

JUPARANÁ DELICATO Natural \perp (Dt_1)							
L_0 (mm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10^{-3} mm/m $^{\circ}\text{C}$)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré-Ensaio	Pós-Ensaio
90,04	0,0 x 50,0	50,0	1,002 x 0,026	0,024	$\beta_1 = 5,3$	5.663	5.663
	50,0 x 0,0	50,0	1,004 x 0,976	0,028	$\beta_2 = 6,2$		
Média					$\beta = 5,8$		

JUPARANÁ DELICATO Pós-ataque \perp (Dt_1)							
L_0 (mm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10^{-3} mm/m $^{\circ}\text{C}$)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré-Ensaio	Pós-Ensaio
87,43	0,0 x 50,0	50,0	1,000 x 1,032	0,032	$\beta_1 = 7,3$	5.714	5.714
	50,1 x 0,0	50,1	1,017 x 0,990	0,027	$\beta_2 = 6,2$		
Média					$\beta = 6,8$		

GIALLO FALÉSIA Natural // (Ft ₂)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré-Ensaio	Pós-Ensaio
89,65	0,0 x 50,0	50,0	1,001 x 1,035	0,034	β ₁ = 7,6	4.551	4.574
	50,0 x 0,0	50,0	1,013 x 0,982	0,031	β ₂ = 6,9		
Média					β = 7,3		

GIALLO FALÉSIA Pós-ataque // (Ft ₂)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré-Ensaio	Pós-Ensaio
89,96	0,0 x 50,5	50,5	1,000 x 1,045	0,045	β ₁ = 9,9	4.498	4.595
	50,2 x 0,0	50,2	1,001 x 0,958	0,043	β ₂ = 9,5		
Média					β = 9,7		

GIALLO FALÉSIA Natural \perp (Ft ₁)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,56	0,0 x 50,0	50,0	1,000 x 1,026	0,026	$\beta_1 = 5,8$	4.569	4.616
	50,0 x 0,0	50,0	1,006 x 0,973	0,033	$\beta_2 = 7,4$		
Média					$\beta = 6,6$		

GIALLO FALÉSIA Pós-ataque \perp (Ft ₁)							
L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,55	0,0 x 50,5	50,5	0,999 x 1,032	0,033	$\beta_1 = 7,3$	4.664	4.815
	50,2 x 0,0	50,2	1,003 x 0,969	0,034	$\beta_2 = 7,5$		
Média					$\beta = 7,4$		

CASABLANCA Natural // (Bt₂)							
L₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,29	0,0 x 50,0	50,0	1,004 x 1,028	0,024	β ₁ = 5,4	5.283	5.283
	50,0 x 0,0	50,0	0,996 x 0,973	0,023	β ₂ = 5,2		
Média					β = 5,3		

CASABLANCA Pós-ataque // (Bt₂)							
L₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
90,16	0,0 x 50,1	50,1	0,999 x 1,023	0,024	β ₁ = 5,3	5.464	5.779
	50,1 x 0,0	50,1	0,998 x 0,974	0,024	β ₂ = 5,3		
Média					β = 5,3		

CASABLANCA Natural \perp (Bt₁)							
L₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,81	0,0 x 50,0	50,0	0,999 x 1,023	0,024	$\beta_1 = 5,4$	4.629	4.828
	50,0 x 0,0	50,0	1,002 x 0,976	0,026	$\beta_2 = 5,8$		
Média					$\beta = 5,6$		

CASABLANCA Pós-ataque \perp (Bt₁)							
L₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		Coefic. Dilatação Térmica Linear (10⁻³ mm/m °C)	Velocidade Propagação Ondas Ultra-sônicas (m/s)	
	Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL		Pré- Ensaio	Pós- Ensaio
89,73	0,0 x 50,1	50,1	1,004 x 1,030	0,026	$\beta_1 = 5,8$	4.578	4.850
	50,1 x 0,0	50,1	1,000 x 0,974	0,026	$\beta_2 = 5,8$		
Média					$\beta = 5,8$		