



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AOS PROCESSOS
DE DETERIORAÇÃO DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DA
FORMAÇÃO LA TAMPÁ USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL
DE MEDELLÍN - COLÔMBIA**

AUTOR: Javier Eduardo Becerra Becerra

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa

Nº 15

**BELO HORIZONTE
DATA (27/03/2009)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AOS PROCESSOS DE
DETERIORAÇÃO DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DA
FORMAÇÃO LA TAMPA USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL DE
MEDELLÍN - COLÔMBIA**

Este trabalho é parte integrante do Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, válido para obtenção do grau de Doutor em Geologia Econômica e Aplicada.

B389a
2009

Becerra, Javier Eduardo Becerra.
Avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários ornamentais da Formação La Tampa usados na construção civil de Medellín - Colômbia [manuscrito] / Javier Eduardo Becerra Becerra. – 2009.
xix, 180 f. enc.: il. (color.); tabs.

Orientador: Antônio Gilberto Costa.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2009.
Inclui anexos.
Bibliografia: f. 170-179.

1. Geologia econômica – Teses. 2. – Calcário - Teses. 3. Calcário – Deterioração – Teses. 4. Porosidades – Teses. I. Costa, Antônio Gilberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 553.551

Aos meus pais, exemplo de perseverança e esforço, que desde o céu guiaram-me e ajudaram a fazer realidade este projeto de vida

AGRADECIMENTOS

A Deus que permite que aconteça tudo aquilo que sonhamos e desejamos.

Aos meus pais Feliciano (*in memoriam*) e Maruja (*in memoriam*), meus irmãos Aura Ligia, Blanca Nieves, Rosa Mélida, Maria Eugenia y Edilberto. Aos meus sobrinhos, os filhos dos meus sobrinhos e todos aqueles parentes que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG) pela oportunidade de realizar este curso de doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado, sem a qual não teria sido possível realizar este curso e à Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio concedido através dos projetos CRA 247/97, CRA 898/05 e CRA-APQ 3322-5.02/07.

Ao Programa ALFA-FARO (Formação Avançada para o Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento) financiado pela EUROPAID-ALFA, e coordenado pelo Professor Roberto Bruno da Universidade de Bologna, pela valiosa oportunidade de ter feito o estágio no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Engenharia Química, Mineral e da Tecnologia ambiental (DICMA) da Universidade de Bologna (Itália).

Ao meu orientador, Professor Antônio Gilberto Costa (IGC-UFMG) pelo seu constante apoio e incentivo a trilhar pelos caminhos da pesquisa e por facilitar toda a infra-estrutura e os materiais que fizeram possível o desenvolvimento dos trabalhos de laboratório. Também pelas discussões e o apoio incondicional na realização do estágio na Universidade de Bologna e na participação dos eventos de divulgação científica no Brasil e na Itália.

Ao Professor e amigo Marco Del Monte, professor da Universidade de Bologna e pesquisador em processos de deterioração, pelos documentos fornecidos, pelas discussões, revisões, conselhos e a infinita paciência que sempre teve comigo.

À Professora Vitória Regia (IGC-UFMG), pela sua ajuda fundamental na pesquisa dos minerais neoformados durante os ensaios de alteração acelerada realizados ao longo da minha pesquisa.

Ao Professor Alexandre Uhlein (IGC-FMG) pelas discussões sobre petrografia e métodos de ensaios.

À Professora Karin Elise Bohns Meyer (IGC-UFMG) pela ajuda fundamental na identificação da fauna constituinte dos bioclastos dos calcários pesquisados.

Ao Professor Heinrich Adolf Horn (IGC-UFMG) pela ajuda logística prestada para o bom sucesso dos trabalhos de laboratório.

Ao professor Luiz Antônio Cruz Souza, do Centro de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis (CECOR) pela ajuda na descrição morfológica e nas fotografias das eflorações salinas.

Ao Professor Juan David Pérez da Universidade Nacional da Colômbia, sede Medellín e à geóloga Ana Tatiana Montoya pela ajuda valiosíssima com os contatos iniciais e a colaboração nos trabalhos de campo.

Ao Professor e amigo Jorge Martín Molina da Universidade Nacional da Colômbia, sede Medellín e sua esposa Liliana Betancurth por terem me hospedado na sua casa em Medellín quando fiz o trabalho de campo.

À Professora Aura Leticia Chaves Romero da Universidade Pedagógica e Tecnológica da Colômbia (UPTC), Faculdade de Sogamoso, pelo estímulo permanente ainda nos momentos difíceis, pelos contatos com o pessoal científico da universidade e pela colaboração no uso das instalações e laboratórios da UPTC para realização de alguns trabalhos.

Ao Professor e Diretor da Escola de Engenharia Geológica da Universidade Pedagógica e Tecnológica de Colômbia (UPTC), Faculdade de Sogamoso, Jorge Mariño, pela ajuda e as discussões sobre a petrografia dos calcários.

Ao empresário colombiano Rodrigo Mejía, proprietário da empresa Canteras de Los Andes pelo fornecimento desinteressado dos materiais que foram o objeto da minha pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologia e Caracterização de Rochas LABTEC do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC-IGC) e ao técnico Helvio Junio Barcelos pela colaboração na execução de ensaios.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), especialmente ao geólogo Walter de Brito, pela execução das análises de Difração de Raios-X e pela boa disposição nas discussões dos resultados.

Ao Laboratório de Micro-análise do Instituto de Ciências Exactas (ICEX-UFMG), e em especial a Luis García e a Ana, pela ajuda na execução das análises de Microsonda e de Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Aos companheiros do Departamento de Engenharia Química, Mineira e da Tecnologia Ambiental (DICMA) da Universidade de Bologna, em especial ao Fausto Peddis, Bárbara Ravaglia e Fulvio Gritti, pela ajuda durante a pesquisa dos métodos de caracterização de rochas.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Geologia (IGC-UFMG), Maria Paula Borges Berlando pela colaboração nas inúmeras vezes que precisei da sua ajuda.

Às funcionárias do Laboratório de Difração de Raios-X (CPMTC-UFMG), Kácia Maria Morais Monteiro e Amanda Lucia da Silva pela valiosíssima ajuda com o empréstimo de materiais necessários para a execução dos ensaios, por disponibilizarem espaço físico para a execução dos ensaios e pelo apoio incondicional na execução das análises de difração.

Aos técnicos do Laboratório de Laminação Fernando Soares de Souza e Wenceslau Rodrigo dos Santos pela diligência na confecção das lâminas que precisei para a minha tese.

Ao técnico William Figueiredo do Laboratório de Via Úmida (CPMTC-UFMG) pela ajuda na preparação das soluções analíticas e a colaboração no monitoramento de ensaios.

Aqueles, que mais do que amigos, são meus irmãos do coração: Marcus Manoel Fernândes e Rosaline Cristina Figueiredo de Silva. Obrigado pela solidariedade sem fim, pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela sinceridade, pela autenticidade e por todos aqueles detalhes que têm feito a minha vida imensamente feliz no Brasil.

Ao meu amigo Padre Lauro Antônio Esteves Lima e seus sobrinhos Julio e Diva Neves por terem me acolhido generosamente nas suas casas, aqui no Brasil e na Itália nos momentos felizes e nos momentos adversos.

Aos amigos e colegas do doutorado, em especial à Leila Benítez e o Sérgio Melo pelo carinho, a colaboração e por aquelas reuniões noturnas que alegraram tanto as nossas vidas.

Aos amigos Luedson Manduca e Mario Iglesias pela ajuda, pelo esforço e a disponibilidade mostrada sempre que precisei.

À minha amiga colombiana Cruz Esther Villamizar, sempre solidária e carinhosa, por ter demonstrado que quando as amizades são verdadeiras não importa o tempo e a distância, elas perduram.

RESUMO

Os calcários ornamentais da Formação La Tampa são extraídos em duas frentes de lavra localizadas perto da cidade de Montería, capital do departamento de Córdoba, região do Caribe colombiano. Nos processos de lavra e beneficiamento são produzidas quatro variedades comerciais de grande utilização na arquitetura contemporânea de Medellín. Na frente de lavra 1, o calcário extraído e beneficiado é biosparítico com predomínio de bioclastos de foraminíferos. A rocha apresenta diversas tonalidades, relacionadas com o grau de alteração intempérica devida à circulação de água através de poros e fissuras. Em função do grau de alteração são produzidas três variedades comerciais, conhecidas como Royal Verde, Royal Veta e Royal Bronze, todos eles com a mesma composição mineralógica, mas com sutis diferenças, em relação à presença da goethita como mineral de alteração. Na Frente de Lavra 2, o calcário extraído e beneficiado é biomicrítico, com maior diversidade de fragmentos bioclásticos e denominado Royal Dorado. Dados obtidos por difração de raios X (DRX), espectrômetro de massa (ICP) e microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS), indicam a natureza calcítica dos calcários e a presença de pequenas quantidades de óxidos de sódio, potássio, magnésio e alumínio, além de alguns elementos traços como o bário, todos eles passíveis de participarem nos processos de deterioração. Alguns sulfetos identificados por MEV-EDS, como pirita, arsenopirita e calcopirita, são a fonte do ferro que ocasiona manchado superficial nos calcários usados em ambientes externos. A avaliação da porosidade por porosimetria de mercúrio indica que os calcários são altamente porosos e que a distribuição de poros e as dimensões dos raios de acesso aumentam em função do grau de alteração nos calcários da frente de lavra 1, e em função da diversidade dos componentes bioclásticos no calcário Royal Dorado da frente de lavra 2. O calcário Royal Bronze é o mais poroso da frente de lavra 1 e apresenta os maiores raios de acesso de poros. O calcário Royal Dorado é o mais poroso de todo o conjunto com os maiores raios de acesso. Os calcários Royal Dorado e Royal Bronze apresentam os maiores coeficientes de absorção por capilaridade e de evaporação, fazendo-os susceptíveis aos processos de deterioração decorrentes dos processos capilares. Os resultados dos ensaios de cristalização de sais, de exposição aos vapores de ácido sulfuroso e de imersão em solução acidulada de ácido sulfúrico, confirmam a maior susceptibilidade face aos processos de deterioração do calcário Royal Dorado, seguido do Royal Bronze. Os dois apresentam as maiores perdas de massa, a geração de eflorescências salinas e a neoformação de sulfatos como produtos das reações. As eflorescências salinas formadas são constituídas de sulfatos como gesso, thenardita, bassanita e anidrita. Considerando alguns indicadores de durabilidade e as condições ambientais de Medellín onde estes calcários são utilizados, estabelece-se que os calcários Royal Verde e Royal Veta apresentam as melhores características para uso em pisos e revestimentos, externos e internos. O uso dos calcários Royal Dorado e Royal Bronze deve ser evitado em ambientes externos sem estratégias apropriadas para sua conservação.

Palavras-chave: calcário, porosidade, deterioração, durabilidade.

ABSTRACT

The ornamental limestones of the La Tampa Formation are mined from two stope faces located near Montería, capital of Department of Córdoba in the Caribbean region of Colombia. Four commercial products are obtained from this mining activity and they are widely used in the contemporaneous architecture of Medellín city. In the stope face 1, the rock is a biosparitic limestone with predominance of foraminifers bioclasts. There are three commercial varieties so-called Royal Verde, Royal Veta and Royal Bronze, all of them showing same mineral composition, but some differences related to the presence of goethite as mineral of alteration. In the stope face 2, the rock is a biomicritic limestone, with high diversity of bioclastic fragments and named Royal Dorado. The analyses X-ray diffraction (DRX), inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS) and scanning electron microscope (MEV-EDS), confirm the calcite nature of the studied limestones and the presence of small amounts of sodium, potassium, magnesium and aluminum oxides and also some trace elements such as barium. All of these elements play an importance role in the deterioration processes of the limestones. Sulfides identified by MEV-EDS, such as pyrite, arsenic pyrite and chalcopyrite, are probably the source of iron and responsible for the patch development in these limestones, when exposed in external environments. The evaluation of porosity by mercury porosimetry shows that all analyzed limestones are highly porous. The pore distribution and the pore entry sizes increase in function of the alteration degree in the limestone of stope face 1, whereas in the stope face 2, the porosity of Royal Dorado limestone is related to the diversity of bioclastic components. Royal Bronze limestone is the most porous and has the largest pore entry sizes in the stope face 1. Royal Dorado limestone is the most porous and has the largest pores entry sizes of all ornamental limestones of the La Tampa Formation. Royal Dorado and Royal Bronze limestones have the higher capillarity and desorption coefficients. The results of the accelerated ageing tests, such as salt crystallization, resistance to sulfurous acid and immersion in acidulated solution of sulfuric acid, show the highest susceptibility of Royal Dorado and Royal Bronze limestones to the deterioration processes. Both of them show the highest mass loss, efflorescence development and sulfates crystallization as reaction products. The saline efflorescence is constituted of sulfates such as gypsum, thenardite, bassanite and anhydrite. Considering some indicators of durability and the environmental conditions of use of the studied limestones, it is established that the Royal Verde and the Royal Veta limestones show better characteristics for their use in externals and internal pavements and revetments. Royal Dorado and Royal Bronze limestones cannot be used in external environments without appropriate strategies of conservation.

Keywords: limestone, porosity, deterioration, durability.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos gerais	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificativa	2
CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS	4
2.1 Materiais utilizados	4
2.2 Método de trabalho	4
2.2.1 Levantamento bibliográfico	4
2.2.2 Trabalhos de campo	5
2.2.2.1 Observações nas frentes de lavra	5
2.2.2.2 Visita aos centros de beneficiamento	5
2.2.2.3 Visita aos locais de utilização na cidade de Medellín	5
2.2.3 Trabalhos de laboratório	6
2.2.3.1 Análise petrográfica	6
2.2.3.2 Determinação da composição mineralógica e química por técnicas analíticas (DRX, ICP, Microsonda)	8
2.2.3.3 Determinação das características relacionadas com a porosidade	9
a) Exame microscópico de lâminas impregnadas com resinas coloridas	10
b) Determinação de índices físicos	10
c) Determinação da porosidade por Porosimetria de Intrusão de Mercúrio (MIP)	11
2.2.3.4 Determinações relacionadas com a dinâmica de circulação de fluidos	12
a) Determinação da absorção por capilaridade	13
b) Ensaio de desorção ou perda de água por evaporação	15

2.2.3.5 Ensaio de caracterização físico–mecânica	19
a) Determinação da resistência à compressão (NBR 12767)	19
b) Determinação da resistência à abrasão (NBR 12042)	19
2.2.3.6 Ensaio de avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração	20
a) Ensaio de Cristalização de Sais (Norma EN 12370)	20
b) Ensaio de resistência aos vapores de ácido sulfuroso (H ₂ SO ₃)	22
c) Ensaio de imersão parcial em solução acidulada de H ₂ SO ₄	23
CAPÍTULO 3 – ROCHAS SEDIMENTARES CARBONÁTICAS E SEU USO	
COMO ROCHAS ORNAMENTAIS	24
3.1 Ambientes de formação dos calcários	24
3.2 Diagênese das rochas calcárias	26
3.2.1 Compactação	26
3.2.2 Cimentação	26
3.2.3 Recristalização	27
3.2.4 Substituição	28
3.3 Textura das rochas calcárias	29
3.3.1 Lama fina granular ou micrita	29
3.3.2 Calcita espática (esparita)	30
3.3.3 Partículas de grão grosso ou aloquímicos	30
3.3.3.1 Bioclastos	30
3.3.3.2 Intraclastos	30
3.3.3.3 Pellets	30
3.3.3.4 Oólitos	31
3.4 Composição mineralógica e química dos carbonatos	31
3.4.1 Mineralogia dos calcários	31
3.4.1.1 Minerais carbonáticos	31
a) Calcita e aragonita	31
b) Dolomita	31
c) Siderita, ankerita e magnesita	32
3.4.1.2 Minerais acessórios	32
a) Sílica	32
b) Argilominerais	32
3.4.1.3 Minerais raros	32
a) Glauconita	32

b) Colofana	33
c) Pirita e marcasita	33
d) Gipsita e anidrita	33
3.4.2 Composição química dos calcários	33
CAPÍTULO 4-PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS	34
4.1 Fatores Intrínsecos	34
4.1.1 Composição mineral	34
4.1.2 Porosidade	34
4.1.3 Estratificação	37
4.1.4 Estilólitos	39
4.1.5 Dinâmica de circulação de fluidos	39
4.1.6 Dilatação hídrica	40
4.2 Fatores Extrínsecos	40
4.2.1 Condições ambientais	40
4.2.1.1 Efeito da deposição seca de SO ₂ e NO ₂	42
4.2.2 Fatores associados às técnicas de aplicação	45
4.2.2.1 Incompatibilidade entre rochas ou argamassas usadas nos processos de restauração	45
4.2.2.2 Localização das peças de rocha nas construções	45
4.2.3 Intervenção antrópica	46
4.3 Formas de deterioração nas rochas calcárias	47
4.3.1 Formação de manchas	47
4.3.2 Eflorescências	47
4.3.3 Arenização e alveolização	48
4.3.4 Esfoliação e lascagem	49
4.3.5 Fissuração e Fraturamento	50
4.3.6 Depósitos superficiais ou sujeiras	50
4.3.7 Crostas negras	50
CAPÍTULO 5 - CONTEXTO GEOLÓGICO E PROCESSOS DE LAVRA, BENEFICIAMENTO E USO DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO LA TAMPA	52
5.1 Localização	52
5.2 Contexto geológico regional	53
5.2.1 Bacia de Urabá	54
5.2.2 Cordilheira Ocidental	54
5.2.3 Cordilheira Central	54

5.2.4 Cinturão Sinú	54
5.2.5 Cinturão de San Jacinto	55
5.3 Geologia local	55
5.3.1 Frente de Lavra 1 (FL 1)	57
5.3.1.1 Nível Inferior	58
5.3.1.2 Nível Intermediário	59
5.3.1.3 Nível Superior	61
5.3.2 Frente de Lavra 2 (FL 2)	61
5.4 Processos de beneficiamento e acabamento dos materiais	62
CAPÍTULO 6 – CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DA FORMAÇÃO LA TAMPA	67
6.1 Textura e composição dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	68
6.1.1 Aloquímicos principais	68
6.1.1.1 Foraminíferos	69
6.1.1.2 Moluscos	69
6.1.1.3 Algas coralinas	69
6.1.2 Fragmentos terrígenos	71
6.1.3 Matriz	71
6.1.4 Cimento	71
6.1.5 Minerais de Alteração	72
6.2 Identificação de minerais carbonáticos e não carbonáticos por coloração seletiva	73
6.3 Determinação da composição mineralógica e química por técnicas analíticas (DRX, ICP, Microsonda)	74
6.3.1 Difração de Raios-X	74
6.3.2 Espectrometria de emissão por plasma (ICP)	78
6.3.3 MEV com análise química qualitativa micro-localizada por EDS (MEV-EDS)	83
CAPÍTULO 7 – POROSIDADE, DINÂMICA DA CIRCULAÇÃO DE FLUIDOS E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA	84
7.1 Determinação da porosidade dos calcários da Formação La Tampa	84
7.1.1 Avaliação da porosidade e do microfissuramento por observação de lâminas impregnadas	85
7.1.2 Determinação de índices físicos (Norma NBR12766 e EN1936)	85
7.1.3 Determinação da porosidade pela técnica de Porosimetria de Mercúrio (MIP)	89
7.2 Propriedades relacionadas com a circulação de fluidos	99
7.2.1 Absorção capilar (Norma EN1926)	99

7.2.1.1 Mecanismo de penetração de água nos capilares	99
7.2.1.2 Comportamento face à absorção capilar dos calcários pesquisados	101
7.2.2 Cinética do processo de evaporação	104
7.3 Caracterização geomecânica	110
7.3.1 Resistência aos esforços compressivos	110
7.3.2 Resistência ao desgaste abrasivo Amsler	113
CAPÍTULO 8 – AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO LA TAMPA AOS PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO POR MEIO DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA	116
8.1 Introdução	116
8.2 Os sais e seus mecanismos de ação nos processos de deterioração de calcários ornamentais	116
8.2.1 Processo de cristalização de sais e deterioração da estrutura da rocha	119
8.3 Ensaio de cristalização de sais (Norma EM 12370)	122
8.3.1 Variação da massa ao longo do ensaio de cristalização de sais	122
8.3.1.1 Calcário Royal Verde (RV)	123
8.3.1.2 Calcário Royal Veta (RVT)	125
8.3.1.3 Calcário Royal Bronze (RB)	129
8.3.1.4 Calcário Royal Dorado (RD)	131
8.3.2 Efeito do processo de cristalização de sais nos índices físicos	135
8.3.3 Mudanças na distribuição e características do sistema poroso	135
8.3.4 Efeito da cristalização de sais nas propriedades hídricas	141
8.3.5 Efeitos da cristalização salina na resistência aos esforços compressivos	146
8.3.6 Mudanças na resistência ao desgaste abrasivo Amsler	148
8.4 Ensaio de exposição aos vapores de SO ₂ (Norma EN13919)	149
8.5 Ensaio de imersão parcial em soluções aciduladas	151
8.5.1 Formação de eflorescências superficiais	152
8.5.2 Neoformação de minerais	152
8.5.3 Observações no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	155
CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO USO DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO LA TAMPA NA CIDADE DE MEDELLÍN	157
CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	165
CAPÍTULO 11 – BIBLIOGRAFÍA	169
ANEXOS	180
CURRICULUM VITAE	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Modelo do equipamento de porosimetria de mercúrio do DICMA e corpos de prova para ensaio do calcário Royal Verde	12
FIGURA 2. Montagem do ensaio de absorção por capilaridade	13
FIGURA 3. Curvas representando as diferenças na cinética de embebição de poros	15
FIGURA 4. Estados de secagem para sistema poroso	17
FIGURA 5. Cinética geral de evaporação nas rochas	18
FIGURA 6. Ensaio de resistência à compressão	20
FIGURA 7. Disposição dos corpos de prova para o ensaio de exposição aos vapores de ácido sulfuroso (H_2SO_3)	22
FIGURA 8. Diversos usos de calcários como rochas ornamentais	27
FIGURA 9. Estratificação convoluta típica do arenito Pietraforte	37
FIGURA 10. Alteração diferenciada ao longo do muro devido à intercalação de lâminas de argilito com camadas finas de arenito	38
FIGURA 11. Geração de relevos e cavidades devido a diferenças de resistência entre matriz carbonática e fragmentos bioclásticos	39
FIGURA 12. Deterioração diferenciada por escolha errada de materiais no processo de restauração	45
FIGURA 14. Uso do mesmo tipo de calcário em locais diferentes, gerando-se processos diferenciados de degradação	47
FIGURA 15. Perda de massa por patologias em rochas calcárias	49
FIGURA 16. Patologias em rochas calcárias	51
FIGURA 17. Localização geográfica da área de lavra no Departamento de Córdoba	52
FIGURA 18. Características da área de lavra	53
FIGURA 19. Regiões geotectônicas do Departamento de Córdoba	56
FIGURA 20. Coluna estratigráfica do Anticlinório de São Jerônimo	57
FIGURA 21. Mapa geológico da área de pesquisa	58
FIGURA 22. Vista do nível inferior na frente de produção do calcário Royal Verde	59
FIGURA 23. Nível intermediário (produtivo) na lavra de calcário Royal Verde	60
FIGURA 24. Algumas feições do nível intermediário do calcário Royal Verde	60
FIGURA 25. Feições características do calcário Royal Veta (nível intermediário)	60
FIGURA 26. Nível superior da Frente de Lavra 1	61
FIGURA 27. Generalidades da Área de Lavra 2, produtora do calcário Royal Dorado	62

FIGURA 28. Variedades obtidas dos processos de beneficiamento dos calcários da Formação La Tampa	63
FIGURA 29. Processos de beneficiamento do calcário na mineração Canteras de los Andes	64
FIGURA 30. Processos de acabamento e produtos resultantes	65
FIGURA 31. Peças artesanais elaboradas a partir de calcário	66
FIGURA 32. Características dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	68
FIGURA 33. Bioclastos dos calcários da Formação La Tampa	70
FIGURA 34. Cristais euhedrais de quartzo (Qtz). Calcário Royal Dorado	71
FIGURA 35. Cimento espático dos tipos	72
FIGURA 36. Diferenças entre os calcários RV e RVT	73
FIGURA 37. Imagens do tingimento com red-alizarine para distinção entre calcita e dolomita	74
FIGURA 38. Difratoograma do calcário RV	75
FIGURA 39. Difratoograma corresponde ao resíduo por dissolução de carbonato de cálcio. Calcário RV	75
FIGURA 40. Difratoograma para amostra típica do calcário RVT	76
FIGURA 41. Difratoograma de calcário RVT mostrando a composição da rocha de calcita e quartzo	77
FIGURA 42. Difratoograma correspondente ao Calcário RB	77
FIGURA 43. Difratoograma do calcário RD	78
FIGURA 44. Determinação do conteúdo de sílica por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP	79
FIGURA 45. Determinação do conteúdo de alumina por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP	80
FIGURA 46. Determinação do conteúdo de óxidos de ferro (Fe ₂ O ₃) por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP	80
FIGURA 47. Nódulos de ferro (goethita) visíveis...	81
FIGURA 48. Determinação do conteúdo de óxidos de cálcio (CaO) por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP	82
FIGURA 49. Caracterização mineralógica dos calcários da Formação La Tampa por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP	82
FIGURA 50. Siderita (FeCO ₃) associada a minerais metálicos na matriz de rocha carbonática	83
FIGURA 51. Porosidade intergranular (it), intragranular (ig), móldica (mo) e estilólitos (es) dos calcários da Formação La Tampa	86
FIGURA 52. Índices físicos dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	88

FIGURA 53. Comparação da massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$) com a densidade esquelética (d_{skel}) nos calcários pesquisados	89
FIGURA 54. Relação entre porosidade aparente (Φ_a) e absorção de água aparente (α_a)	89
FIGURA 55. Comparação dos valores de massa específica aparente ($\rho_{a_{sec}}$) obtidos por MIP e por determinação de índices físicos (NBR 12766)	90
FIGURA 56. Comparação da densidade esquelética (d_{skel}) obtida por porosimetria de mercúrio e por determinação de índices físicos (NBR 12766)	91
FIGURA 57. Comparação da porosidade (Φ_a) obtida por porosimetria de mercúrio e a porosidade aparente (Φ_a) obtida na determinação dos índices físicos (NBR 12766)	91
FIGURA 58. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Verde (RV)	92
FIGURA 59. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Veta (RVT)	93
FIGURA 60. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Bronze (RB)	93
FIGURA 61. Diferenças no espectro de porosidade segundo a técnica de porosimetria de mercúrio para as rochas RV, RVT e RB	94
FIGURA 62. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário RD	95
FIGURA 63. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para as quatro variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa	97
FIGURA 64. Imagens MEV do calcário Royal Verde	98
FIGURA 65. Imagens MEV do calcário Royal Dorado	99
FIGURA 66. Diferenças observadas na cinética de ascensão capilar para as quatro variedades de calcários pesquisadas depois de duas horas de ensaio	103
FIGURA 67. Ensaio de absorção por capilaridade nos calcários ornamentais da Fm. La Tampa	104
FIGURA 68. Conteúdo de água residual (W_t) e grau de saturação em função do tempo (S) avaliados após uma hora e sete dias de evaporação	105
FIGURA 69. Curvas do processo de evaporação para os calcários pesquisados	105
FIGURA 70. Curva do processo de evaporação no calcário RD	106
FIGURA 71. Curvas do processo de evaporação dos calcários RV, RVT e RB da FL 1	106
FIGURA 72. Curvas do processo de evaporação dos calcários RV e RVT da FL 1	107
FIGURA 73. Gráfico comparativo da resistência aos esforços compressivos dos calcários da Formação La Tampa	110
FIGURA 74. Corpos de prova e resistência aos esforços compressivos do calcário Royal Verde	111
FIGURA 75. Resistência à compressão do calcário Royal Veta (RVT)	111
FIGURA 76. Resistência à compressão do calcário Royal Bronze (RB)	112

FIGURA 77. Ruptura do corpo de prova do calcário Royal Bronze (RB) contornando o fragmento fóssil	112
FIGURA 78. Relação entre a resistência à compressão uniaxial (RMpa), porosidade (Φ_a e Φ_{Hg}) e absorção de água aparente α_a nos calcários pesquisados	113
FIGURA 79. Corpos de prova do calcário Royal Dorado (RD), de caráter mais homogêneo e granulação fina	113
FIGURA 80. Relação direta entre a porosidade (Φ_a) e a resistência ao desgaste amsler (D) para percursos de 500 e 1000m	114
FIGURA 81. Sequência de migração e cristalização de sais em paredes úmidas...	118
FIGURA 82. Domínios de estabilidade do sulfato de sódio	121
FIGURA 83. Evolução diferenciada do processo de deterioração no ensaio de cristalização de sais	124
FIGURA 84. Evolução da massa média dos corpos de prova (CP) do calcário RV no ensaio de cristalização salina	125
FIGURA 85. Variação da massa dos diferentes corpos de prova (CP) do calcário RV no ensaio de cristalização salina	125
FIGURA 86. Diferentes graus de alteração nos corpos de prova do calcário RVT para a execução do ensaio de cristalização de sais	126
FIGURA 87. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RVT no ensaio de cristalização de sais	127
FIGURA 88. Comportamento da massa dos diferentes corpos de prova do calcário RVT no ensaio de cristalização salina	128
FIGURA 89. Deterioração diferenciada dos corpos de prova do calcário RVT	129
FIGURA 90. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RB no ensaio de cristalização de sais	130
FIGURA 91. Mudanças no calcário RB (corpo de prova 14) no ensaio de cristalização de sais	131
FIGURA 92. Perda de massa e mudanças estéticas no calcário RD durante o ensaio de cristalização de sais	132
FIGURA 93. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RD no ensaio de cristalização de sais	133
FIGURA 94. Comportamento da massa dos corpos de prova do calcário RD no ensaio de cristalização de sais	133

FIGURA 95. Avaliação da perda de massa durante o ensaio de cristalização de sais Calcários FL 1	134
FIGURA 96. Gráfico comparativo da perda de massa dos calcários da Fm. La Tampa	134
FIGURA 97. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para o calcário RV após seis e quatorze ciclos do ensaio de cristalização de sais	137
FIGURA 98. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para o calcário RD após seis e quatorze ciclos do ensaio de cristalização de sais	138
FIGURA 99. Imagens via MEV de diferentes tipos de cristalização de thenardita nas estruturas bioclásticas...	140
FIGURA 100. Absorção por capilaridade para os calcários ornamentais da Formação La Tampa após o ensaio de cristalização de sais	144
FIGURA 101. Mudanças no conteúdo de água residual (Wt) e e o grau de saturação (St) após o ensaio de cristalização de sais	145
FIGURA 102. Curvas de evaporação para os calcários Royal verde (RV) e Royal Dorado (RD) após o ensaio de cristalização de sais	146
FIGURA 103. Avaliação da resistência aos esforços compressivos após diferente número de ciclos de cristalização de sais	147
FIGURA 104. Mudanças na resistência aos esforços compressivos após o ensaio de cristalização de sais	148
FIGURA 105. Mudanças nos corpos de prova após o ensaio de exposição aos vapores de SO ₂	150
FIGURA 106. Difratoograma do material raspado nas crostas negras do calcário RD	151
FIGURA 107. Formação de eflorescências no ensaio de imersão parcial em HCl	153
FIGURA 108. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RB por ação da solução acidulada de H ₂ SO ₄	153
FIGURA 109. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RD por ação da solução acidulada de H ₂ SO ₄	154
FIGURA 110. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RVT por ação da solução acidulada de H ₂ SO ₄	154
FIGURA 111. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RV por ação da solução acidulada de H ₂ SO ₄	155
FIGURA 112. Imagens via MEV das eflorescências salinas formadas no ensaio de imersão parcial em solução acidulada de H ₂ SO ₄	156
FIGURA 113. Uso dos calcários ornamentais da Formação La Tampa em Medellín	162

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Subdivisão das classes porosimétricas adotadas no Centro “CNR Opere d’Arte di Firenze	36
TABELA 2. Concentração média (ppm) de metais pesados medidos em crostas negras de monumentos pétreos em diferentes cidades.	44
TABELA 3. Óxidos de elementos maiores e elementos traços nos calcários ornamentais da Fm. La Tampa determinados por espectrometria de emissão por plasma (ICP)	79
TABELA 4. Índices físicos das variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa	88
TABELA 5. Comparação dos valores de massa específica aparente ($\rho_{a_{sec}}$), densidade esquelética (d_{skel}) e porosidade Φ_a obtidos por MIP e índices físicos	90
TABELA 6. Porosidade e raios de poro principais para os calcários ornamentais da Fm. La Tampa	96
TABELA 7. Coeficientes de absorção por capilaridade (C) para quatro corpos de prova dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	102
TABELA 8. Características do processo de evaporação dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	104
TABELA 9. Coeficientes de evaporação (C_{ev}) dos calcários da Fm. La Tampa	107
TABELA 10. Resumo das propriedades relacionadas com a porosidade dos calcários da Fm. La Tampa	109
TABELA 11. Resultados do ensaio de Resistência à compressão para os calcários ornamentais da Formação La Tampa	110
TABELA 12. Resistência à abrasão dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	114
TABELA 13. Correlação de valores de algumas propriedades dos calcários ornamentais da Formação La Tampa com especificações de valores para rochas destinadas a revestimento	115
TABELA 14. Umidade relativa de equilíbrio a 25°C e solubilidade de alguns sais higroscópicos encontrados nas rochas usadas na construção civil	117
TABELA 15. Exemplos para equilíbrio de hidratação e volumes de expansão associados	120
TABELA 16. Perda de massa para o calcário RV ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais	123
TABELA 17. Perda de massa para os corpos de prova do calcário RVT ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais	127
TABELA 18. Perda de massa para o calcário RB ao final dos quinze ciclos do ensaio de	

cristalização de sais	130
TABELA 19. Perda de massa para o calcário RD ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais	131
TABELA 20. Índices físicos das variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa	135
TABELA 21. Porosidade obtida por porosimetria de intrusão de mercúrio...	136
TABELA 22. Evolução da porosidade nos calcários RV e RD após seis e quatorze ciclos de cristalização de sais	139
TABELA 23. Mudanças na absorção capilar devidos à presença de sais nos calcários da Formação La Tampa	142
TABELA 24. Características de evaporação após o ensaio de cristalização de sais dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	145
TABELA 25. Evolução da resistência aos esforços compressivos avaliados após diferentes ciclos do ensaio de cristalização de sais	148
TABELA 26. Resistência à abrasão dos calcários ornamentais da Formação La Tampa	149
TABELA 27. Variação da massa $\Delta m(\%)$ dos corpos de prova (CP) dos calcários RV, RVT, RB e RD após o ensaio de exposição aos vapores de ácido sulfuroso	150
TABELA 28. Comparação de algumas propriedades dos calcários da Formação La Tampa com outros calcários usados como rochas ornamentais e de revestimento	158
TABELA 29. Classes de calcários segundo a perda de massa no ensaio de cristalização de sais e usos relacionados em diferentes condições ambientais	161
TABELA 30. Concentrações de Dióxido de enxofre (SO ₂) e Óxidos de nitrogênio (NO ₂) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Janeiro-maio 2005	163
TABELA 31. Concentrações de monóxido de carbono (partes por milhão). Fevereiro-abril 2005	163
TABELA 32. Resultados médios do monitoramento da qualidade do ar do material particulado em suspensão e PM10...	163
TABELA 33. Comparação da qualidade do ar urbano da cidade de Medellín (Colômbia) com a cidade de Veneza (Itália)	164
TABELA 34. Registro de substâncias poluentes e material particulado nas vizinhanças de alguns prédios de utilização dos calcários da Formação La Tampa	164

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Os processos de alteração das rochas ornamentais têm se constituído em matéria de pesquisa muito importante ao redor do mundo, considerando a gravidade dos processos que afetam as rochas que por séculos permaneceram impassíveis às ações do tempo. Muitos dos monumentos que constituem patrimônio da humanidade conseguiram manter-se em ótimo estado de conservação até finais do século XIX quando, por efeito da revolução industrial, aumentou a emissão de substâncias poluentes nocivas para o meio ambiente e por tanto para as rochas. Os processos de deterioração das rochas são ainda mais graves, considerando que a emissão de substâncias poluentes aumenta a cada dia, afetando não só às rochas dos monumentos históricos, mas também àquelas instaladas em prédios de recente construção.

Esta tese de doutorado permitiu dar continuidade ao estudo dos processos de alterações de rochas de revestimento iniciado com a Dissertação de Mestrado intitulada “Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental. Procedimentos analíticos para sua avaliação” (Becerra-Becerra, 2004), na qual foram pesquisados os processos de alteração ocorrentes em seis tipos de rochas graníticas de grande aceitação no mercado brasileiro, por meio de vários ensaios simuladores dos processos aos quais são submetidas nas suas diferentes aplicações.

Neste trabalho, foi ampliada a pesquisa envolvendo o estudo das características que influenciam a susceptibilidade aos processos de alteração, agora aplicada às rochas calcárias da Formação La Tampa (Eoceno Médio), que afloram na região Caribe Colombiana, e utilizadas em prédios importantes na arquitetura recente da cidade de Medellín, com enfoque aos fatores estratigráficos e mineralógicos (texturais e composicionais) e simulações laboratoriais de algumas condições à que estas rochas estariam submetidas quando em uso.

O trabalho foi realizado no âmbito do Programa Alfa (Formação Avançada em Rochas Ornamentais e Geo-processamento), parceria que envolve a Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil), a Universidade de Bolonha (Itália), a Universidade de Barcelona (Espanha), a Universidade Nova de Lisboa (Portugal), o Instituto Tecnológico de Michoacán (México) e a Universidade de La Plata (Argentina). Os ensaios de laboratório foram realizados no Laboratório de Rochas Ornamentais do Núcleo de Rochas do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no Brasil e no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Engenharia Química, Mineral e Ambiental (DICMA) da Universidade de Bologna (Itália).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Caracterizar e determinar a susceptibilidade à deterioração de calcários da Formação La Tampa quando usados como rochas ornamentais e de revestimento considerando, entre outros aspectos: a avaliação dos fatores composicionais e texturais incidentes na alterabilidade destas rochas; os processos de alterações ocorrentes na frente de lavra (material bruto) e nos prédios urbanos, onde estas rochas são usadas como revestimentos e peças decorativas; e, a sua susceptibilidade face os processos de cristalização salina e de exposição a substâncias nocivas presentes no ar urbano por meio de ensaios de simulação no laboratório.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar os processos de deterioração que afetam os calcários ornamentais da Formação La Tampa nas frentes de lavras e nas construções civis onde foram utilizados,
- Determinar as propriedades relacionadas com as características petrográficas (mineralogia, textura, natureza da matriz, arcabouço e cimento) e com a composição química que influem na deterioração das rochas quando usadas em obra.
- Conhecer as características relacionadas com o sistema poroso e a dinâmica da circulação dos fluidos, que regem os processos de absorção e evaporação de fluidos na rocha quando expostas ao meio ambiente urbano.
- Avaliar a susceptibilidade aos processos de cristalização salina e à exposição às substâncias poluentes presentes no meio ambiente urbano, determinantes na deterioração dos materiais pétreos na cidade de Medellín por meio de ensaios de simulação no laboratório.
- Interpretar e estabelecer o significado dos resultados obtidos em relação à susceptibilidade dos calcários ornamentais da Formação La Tampa selecionados, aos processos de deterioração, considerando os tipos e os ambientes onde foram aplicados.

1.3 Justificativa

O plano de desenvolvimento do setor da mineração do governo colombiano estabeleceu que o desenvolvimento do setor de rochas ornamentais deve ser primordial, considerando a importância deste segmento econômico em países produtores como o Brasil e as grandes possibilidades que a Colômbia apresenta em virtude das suas características geológicas. A pesquisa geológica de novos materiais que possam ser interessantes para incursionar nos mercados internacionais deve ser acompanhada de informações sobre as características tecnológicas e a alterabilidade destes materiais em função das suas características. Igualmente é necessário conhecer os materiais pétreos

usados na construção do patrimônio histórico colombiano e aqueles que estão definindo as faces da arquitetura recente do país.

Esta tese de doutorado constitui-se na primeira pesquisa realizada com materiais utilizados na construção civil colombiana e comercializados em outros países, especialmente os Estados Unidos e países da América Central. O trabalho pretende servir de base e estímulo para futuras pesquisas visando o conhecimento das rochas ornamentais do país, suas características e o seu comportamento relacionado com a durabilidade em diferentes usos para assim orientar melhor a destinação dada a estes materiais e prevenir problemas futuros.

A nível de contribuição pessoal, a presente tese deve ser entendida como um grão de areia no desenvolvimento científico e tecnológico do setor das rochas ornamentais na Colômbia. Tem-se por expectativa que seus resultados não só contribuam com este desenvolvimento, mas que acrescentem o interesse das instituições públicas e privadas do meu país, para assim estabelecer pontes que permitam consolidar projetos conjuntos de pesquisa, parcerias e alianças junto com instituições de pesquisa do Brasil, Itália e outros países produtores.

CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os calcários escolhidos para este trabalho são os lavrados e beneficiados pela empresa “Canteras de los Andes” no Departamento de Córdoba, região Caribe Colombiana. Sua escolha foi feita levando-se em conta a importância destes materiais na construção civil da cidade de Medellín, Departamento de Antioquia. Foram utilizados os materiais produzidos em duas pedreiras, aqui identificadas como Frente de Lavra 1 (FL 1) e Frente de Lavra 2 (FL 2). Na FL 1 é extraída uma rocha calcária que apresenta diferenças setoriais relacionadas com o grau de alteração intempérica e que permitem obter, no processo de beneficiamento, três variedades comerciais, diferenciadas pela intensidade ou grau de alteração e conhecidas comercialmente como: Royal Verde (RV), Royal Veta (RVT) e Royal Bronze (RB). Na FL 2 é produzido somente um material, homogêneo e conhecido pelo nome comercial de Royal Dorado (RD).

A coleta do material para as análises petrográficas foi realizada nas frentes de lavra, enquanto que os materiais usados na caracterização e a avaliação da alterabilidade foram coletados na unidade de beneficiamento localizada na cidade de Montería, Departamento de Córdoba. Foi feita a coleta de amostras de todas as variedades obtidas no processo de beneficiamento (RV, RVT, RB e RD). Os materiais foram preparados nas formas e dimensões apropriadas para a execução dos ensaios de caracterização tecnológica e de alterabilidade, segundo as normas européias e brasileiras, adotadas nesta pesquisa.

2.2 Método de trabalho

2.2.1 Levantamento bibliográfico

Em uma primeira etapa foi realizado o levantamento bibliográfico sobre o histórico do uso de calcários na construção de monumentos históricos e como materiais de construção civil. Foram consultados documentos referentes ao diagnóstico de patologias realizados em monumentos históricos e edifícios de construção recente, dados sobre caracterização tecnológica e ainda documentos existentes sobre processos de restauração. Textos de normas internacionais de caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de técnicas de ensaios de alteração acelerada foram igualmente consultados.

Para melhor compreensão dos processos de deterioração ocorrentes nos calcários da Formação La Tampa, utilizados em Medellín, foram consultadas as revistas informativas da “Red de Vigilancia de la Calidad del Aire en Antioquia REDAIRE”, com informação sobre a qualidade do ar urbano. Nesta consulta, a busca concentrou-se especialmente nas informações relacionadas com a

concentração de substâncias contaminadoras do ar urbano: CO₂, SO₂, NO_x e de material particulado em suspensão, produzido pela combustão automotiva e pela atividade industrial da cidade.

2.2.2 Trabalho de campo

2.2.2.1 Observações nas frentes de lavra

Foram visitadas as duas frentes de lavra ativas FL 1 e FL 2, observando os seguintes aspectos:

- Morfologia do afloramento;
- Estratificação: tipos, espessuras das camadas, laminação interna, tipos de contatos, intercalações argilosas, espessuras etc;
- Alteração superficial e processos de karstificação;
- Fraturamento. Densidade de fraturas, espaçamento e abertura. Preenchimentos;
- Características da rocha: cor, tamanho de grão, textura, recristalizações, dobras internas, homogeneidade (mudanças faciais, variações de cor, veios e concreções e impurezas).

Além das observações sob o ponto de vista geológico, foi efetuado o acompanhamento do processo extrativo, com coleta de amostras no seu estado natural, para posterior análise petrográfica.

2.2.2.2 Visita aos centros de beneficiamento

Foi visitado o centro de beneficiamento da empresa Cantera de los Andes, na cidade de Montería (Córdoba), para conhecer os processos de desdobramento dos blocos em chapas aptas para a sua utilização. Foi realizado o acompanhamento dos processos de transformação de blocos em peças acabadas e das várias técnicas de acabamento, aplicadas tanto na elaboração de chapas quanto na fabricação de peças artesanais, amplamente requisitadas no mercado. Nos centros de beneficiamento, foi realizada amostragem de peças elaboradas em variadas dimensões e espessuras para a execução posterior dos ensaios de caracterização tecnológica e de alteração acelerada.

2.2.2.3 Visita aos locais de utilização na cidade de Medellín

Para conhecer os tipos de utilização dos calcários na construção civil e a observação dos processos de deterioração dos materiais em obra foram visitados em Medellín, os prédios conhecidos como: “Centro de Convenciones”, “Parque de los Pies Descalzos”, Biblioteca Virtual, “Parque de Las Luces” e Planetário Jesús Emilio Ramírez. Neste conjunto de edificações foram utilizados os materiais em estudo, em parte apresentando problemas de deterioração causados pelo uso das chapas em dimensões, espessuras e formas de instalação inadequadas e, pelas adversas condições do meio ambiente da cidade de Medellín.

Além do registro de patologias, foram também observadas e documentadas evidências inequívocas da atividade biológica (presença de micro e macro-organismos, raízes de vegetais etc) e da ação antrópica (atos de vandalismo, pichações e outros), considerados importantes nos processos de deterioração de rochas usadas com fins ornamentais.

2.2.3 Trabalho de Laboratório

A avaliação em laboratório da susceptibilidade à alteração ou alterabilidade dos calcários foi realizada em várias etapas, nas quais foram levantados dados das rochas, em relação às suas características petrográficas e mineralógicas, à porosidade, ao comportamento com relação à cinética da circulação de fluidos na estrutura rochosa e ainda das suas propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência ao desgaste por abrasão). Com estas informações, procedeu-se à execução dos ensaios de alteração acelerada, sendo efetuados, o ensaio de resistência à cristalização de sais (Norma EN12370), o ensaio de resistência à exposição aos vapores de ácido sulfuroso (Norma EN13919) e o ensaio de imersão parcial em soluções aciduladas de baixa concentração. Todos os parâmetros inicialmente avaliados para o conhecimento das rochas, foram reavaliados para estabelecer as mudanças que aconteceram ao longo dos ensaios de alteração acelerada, em relação à porosidade, o comportamento da dinâmica de circulação de fluidos e com a sua resistência mecânica, visando a definição e quantificação da alterabilidade ou da susceptibilidade das rochas estudadas, com relação aos processos de alteração.

2.2.3.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica foi a primeira técnica utilizada nos processos de caracterização dos calcários ornamentais, feita em duas vias: a análise macroscópica e a análise microscópica. O objetivo foi a descrição, não somente para estabelecer a classificação petrográfica, mas também para destacar as características que poderiam ser importantes na avaliação da alterabilidade dos calcários. A caracterização da rocha considerou os minerais constituintes, a textura e características como cor, presença de veios, fósseis ou descontinuidades etc.

Para o caso das rochas calcárias analisadas, a descrição petrográfica compreendeu os seguintes aspectos:

- a) Identificação e descrição de aloquímicos:** bioclastos, pellets, oólitos, oncoides, pisoides, agregados de grãos, minerais terrígenos, minerais autigênicos e extraclastos;
- b) Identificação e descrição de ortoquímicos microcristalinos:** micrita (material calcário microcristalino ou matriz) e esparita (cimento calcário).
- c) Descrição da textura.** Descreveram-se entre outros os seguintes aspectos:

- Tamanho de partículas;
- Forma das partículas: aplicando-se aos bioclastos (angular, subangular etc), considerando que há bioclastos arredondados ou sub-arredondados por natureza;
- Seleção de partículas;
- Homogeneidade: identificando se a rocha é maciça, laminada (espessura e tipo), imbricada, bioturbada (grau), se apresenta orientação de partículas, etc;
- Relação matriz/partículas: estabelecendo se a rocha é lama-suportada ou clasto-suportada;
- Tipo de contato entre partículas: pontual, flutuante, tangencial, longitudinal etc;
- Estruturas de bioturbação.

d) Identificação e descrição de processos diagenéticos

- **Cimentação:** descreveu-se o tamanho dos cristais de esparita utilizando a escala de Folk (1962) e a forma e distribuição dos mesmos na rocha, assim: **fibroso**, ao redor de bioclastos ou outras partículas; **granular**, similar a um mosaico de cristais subhedrais inequigranulares, em forma de drusa; **micrítico**, em forma de sobrecrecimentos em continuidade ótica com bioclastos etc.
- **Neomorfismo ou transformação de carbonatos pré-existent:** descrevendo tamanho, forma, distribuição e efeitos produzidos pelas transformações minerais, transformação de calcita a dolomita, recristalização de micrita a microesparita etc.

e) Identificação de carbonatos por técnicas de coloração seletiva

Para auxiliar a identificação de diferentes tipos de carbonatos no microscópio petrográfico foi feito o tingimento de lâminas com solução de red-alizarine em HCl (2%). Este é um método auxiliar que permite a distinção entre calcita (CaCO_3) e dolomita (CaMgCO_3) nas observações ao microscópio petrográfico. Quando uma lâmina é tingida com red-alizarine, os cristais de calcita passam a apresentar tonalidades avermelhadas enquanto que os cristais de dolomita permanecem sem mudanças de cor (Scholle, 1978).

A classificação das rochas foi feita seguindo a Classificação de Folk (1959, 1962) e a classificação textural de Dunham (1962). A classificação de Folk baseia-se nos constituintes principais da rocha que são: aloquímicos: (intraclastos, pellets, oolitos, fósseis e bioclastos), micrita (matriz) e esparita (cimento). Se as rochas contêm terrígenos >10% se adiciona o sufixo “arenítico”, “siltoso” ou “argiloso” (p.e, bioesparito arenítico). Também são utilizados outros sufixos como “glauconítico”, “pirítico” etc e inclusive mais de um sufixo, dependendo de qual domine, como

“arenítico dolomitizado” etc. Se um ou dois tipos de fósseis são dominantes, este fato se reflete no nome, por exemplo, bioesparito de braquiópodos e foraminíferos; biomicrito de crinóideos etc.

A diferença de Folk, a classificação de Dunham (1962) é baseada no arranjo da rocha (textura + estrutura) e não na classe de partícula, fazendo distinção entre rochas clasto-suportadas (grãos em contato um com outro) e lama-suportadas (grãos flutuando em lama calcária). Para rochas clasto-suportadas, nem sempre é evidente o contato entre os grãos em seção delgada devido à perspectiva em duas dimensões. Os critérios que permitiram decidir se a rocha era clasto-suportada foram basicamente a presença de contatos entre partículas côncavo-convexos e a presença de cimento espático (Terraza, 1999).

O nome da rocha é obtido combinando os tipos de fábrica com o nome dos grãos, p.e. grainstone de oolitos e peloides, packestone de bioclastos, mudstone de ostrácodos, wackestone de foraminíferos etc.

2.2.3.2 Determinação da composição mineralógica e química por técnicas analíticas (DRX, ICP, Microsonda)

Para determinar a composição química e mineralógica dos calcários e a identificação de minerais argilosos, minerais metálicos, minerais de alteração e elementos químicos eventualmente envolvidos com as diferentes reações que acontecem nos processos de deterioração, foram utilizadas conjuntamente várias técnicas analíticas tais como a análise de difração de Raios-X (XDR), ICP e Microsonda.

A análise mineralógica por difração de Raios-X foi realizada no equipamento de difratometria PANanalytical XPertPRO com fendas 0,6mm e tubo de raios-X de cobre ($\lambda = 0,1540619$) como fonte de Raios-X com incrementos angulares de $0,020^\circ$ e posições finais e iniciais de 2θ de $5,0100^\circ$ e $69,9900^\circ$ respectivamente. As condições de operação foram introduzidas por meio do programa Highscore. O programa de leitura é o X'pert Data Collector. A voltagem empregada foi 40Kv e a corrente 40mA.

Para a execução da análise por difração de Raios-X foram preparadas amostras representativas de cada uma das variedades analisadas, moendo a rocha até ficar do tamanho 200 Mesh. Foram preparadas amostras tanto da rocha inalterada, assim como também das porções que mostram algum tipo de alteração para a observação de possíveis diferenças composicionais existentes entre elas.

Uma fração de material moído foi submetida à ação de HCl em concentração de 10%v/v para a dissolução do carbonato de cálcio. O resíduo resultante do processo de dissolução foi analisado para a identificação dos minerais não solúveis.

Análises de Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas também após os ensaios de alterabilidade (cristalização de sais e imersão parcial em solução acidulada de H₂SO₄) para determinar a composição das eflorescências salinas formadas. Essas análises foram realizadas no difratômetro de raios-X de fabricação Rigaku, modelo Geigerflex, semi-automático e tubo de raios-X de cobre. As condições de operação do difratômetro foram: fator de escala (8×10^3), constante de tempo (0,5 s), velocidade do registrador (40 mm/mim), velocidade do goniômetro ($8^\circ 2\theta/\text{min}$), intensidade de corrente (30 mA) e tensão (40 KV).

As análises dos calcários por Espectrometria de Massa por ICP, foram realizadas no laboratório ACME Labs Analytical Laboratories Ltda, em Vancouver (Canadá). Foi determinado teor total dos óxidos maiores e elementos traços por ICP após fusão e digestão em ácido nítrico de 2g de amostra, para visualizar a presença de outros elementos que, ainda que em pequena quantidade, podem ter influência nos processos de alteração dos calcários pesquisados. Para o calcário RVT foram tomadas e analisadas duas amostras, uma delas correspondente à porção “inalterada” ou menos alterada da rocha (RVTN) semelhante ao calcário RV e a outra a porção alterada da rocha (RVTA) de características semelhantes ao RB. O calcário RB também foi analisado tomando duas amostras diferentes: uma correspondente à rocha sã (RBN) e a outra de porção de rocha com presença de estilólitos e aparentemente alterada (RBA). Dos calcários RV e RD foi analisada só uma amostra de cada. As perdas por ignição ou perdas ao fogo (LOI) foram calculadas por diferenças de peso após aquecimento a 1000°C.

Os estudos de microscopia eletrônica de varredura com análise química qualitativa micro-localizada por EDS (MEV/EDS) foram realizados em lâminas delgadas dos quatro tipos de calcários estudados e tiveram por objetivo identificar minerais, que mesmo em pequenos conteúdos, pudessem ter influência na susceptibilidade das rochas aos processos de alteração. As observações de MEV e a análise qualitativa por microsonda foram realizadas no equipamento Jeol modelo JXA 8900, acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva EDS NORAN/voyager pertencente ao consórcio dos Departamentos de Física, Química e Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

2.2.3.3 Determinação das características relacionadas com a porosidade

Após o levantamento das características petrográficas e das composições química e mineralógica, passou-se à pesquisa das propriedades do sistema poroso dos calcários estudados, visando conhecer os tipos de poros, as suas dimensões e a dinâmica da circulação dos fluidos através do arranjo poroso, considerando a porosidade como o principal elemento facilitador da

circulação de substâncias responsáveis pela deterioração das rochas. Para cumprir com este fim foram aplicadas varias técnicas:

a) Exame microscópico de lâminas impregnadas com resinas coloridas

Para visualizar e identificar os tipos de poros existentes nos calcários, amostras de rocha foram impregnadas com resinas epóxi coloridas, assegurando uma boa penetração na rocha com ajuda de uma bomba do vácuo do laboratório de laminação do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa do Instituto de Geociências (CPMTC-IGC). Das amostras impregnadas, foram confeccionadas lâminas petrográficas para observação ao microscópio, visando a determinação do(s) tipo(s) de porosidade presente(s) na amostra: primária (intergranular, intragranular) ou secundária (intercristalina, móldica, fenestral, “vuggy” etc) e descontinuidades como fissuras e estilólitos.

b) Determinação de índices físicos

A porosidade aberta foi determinada seguindo as normas européias (EN1936,1999) e brasileiras (NBR12766, 1992), por meio do método das três pesagens ou determinação de índices físicos: massa específica aparente seca, massa específica aparente saturada, absorção de água aparente e porosidade aparente (Norma NBR 12766). Corpos de prova de forma cúbica de 7cm de lado e representativos de cada tipo de rocha foram pesados em estado seco (m_{sec}), logo saturados em água (m_{sat}) e finalmente foi registrada a massa saturada e imersa (m_{im}), considerando a diferença ($m_{sat}-m_{im}$) como representando o peso da água que ocupa o mesmo volume do corpo de prova. Esta diferença é conhecida como flotação ou força ascensional. Sendo d_w a densidade da água à temperatura do experimento foram consideradas as seguintes equações:

$$m_{sat} - m_{seca} = d_w V_{poros} \quad (a)$$

$$m_{sat} - m_{im} = d_w V_{rocha} \quad (b)$$

A porosidade aberta à água Φ_a do corpo de prova corresponde ao volume de poros dividido pelo volume total do corpo de prova. Foi calculada segundo a equação:

$$\Phi_a = \frac{V_{poros}}{V_{rocha}} = \frac{\frac{m_{sat} - m_{seca}}{d_w}}{\frac{m_{sat} - m_{im}}{d_w}} = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \quad (c)$$

Sendo a equação (c) o valor da porosidade acessível à água no vácuo; também é possível determinar a massa específica aparente seca ($\rho_{a,sec}$) também conhecida como *bulk density* e a

densidade esquelética d_{skel} pelo método da tripla pesagem. Estas correspondem às equações (d) e (e) respectivamente.

$$\rho_{asec} = \frac{m_{seca}}{(m_{sat} - m_{im})} = \frac{m_{seca}}{(m_{sat} - m_{im})} \quad (d)$$

$$d_w$$

$$d_{skel} = \frac{m_{seca}}{(m_{seca} - m_{im})} = \frac{m_{seca}}{(m_{seca} - m_{im})} \quad (e)$$

$$d_w$$

considerando d_w como 1g/cm^3 .

O coeficiente de absorção de água se determina segundo a equação:

$$\alpha_a = \frac{(m_{sat} - m_{seca})}{m_{seca}} 100 \quad (f)$$

c) Determinação da porosidade por Porosimetria de Intrusão de Mercúrio (MIP)

Este é um método destrutivo indireto usado para obter a distribuição das entradas de poros do meio poroso. Fornece informações relacionadas com geometria, diâmetro de poros e porosidade total, permitindo, desta forma, estabelecer a proporção de macroporos e mesoporos como elementos facilitadores dos processos de degradação dos materiais rochosos, especialmente os relacionados com a absorção capilar (Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Manganelli del Fà, 2002; Steiger, 2003). A técnica é baseada no modelo de poros cilíndricos e na Equação de Washburn. Esta equação descreve o fluxo capilar em meios porosos (Angeli, 2007). Se considerarmos que os poros em uma rocha possuem forma cilíndrica, a pressão capilar PC em um poro de raio r é definida como:

$$PC = \frac{2\gamma}{r \cos \theta} \quad (f)$$

Onde θ é o ângulo de contacto Hg-sólido e γ é a tensão superficial do mercúrio ($0,480\text{N/m}$). Usualmente θ tem valor de 130° , considerado este como o valor médio para a maioria das rochas (Good & Mikhail, 1981). O ensaio foi realizado colocando pequenos corpos de prova (volume aproximado de 10cm^3) (Fig. 1) ao vácuo, injetando mercúrio a pressões crescentes (de 3×10^{-3} até 200MPa) e medindo-se o volume injetado em cada nível de pressão. Esta pressão está associada com raios de poro segundo a equação de Washburn. Os poros maiores são os primeiros em serem preenchidos com o mercúrio e os menores os últimos. Porém, grandes poros com uma pequena área

de entrada ou colo, podem ser preenchidos com a pressão correspondente ao raio da área de entrada e assim, aparecer no espectro como um poro de tamanho menor. Este fenômeno conhecido como “*ink bottle effect*” constitui uma desvantagem para o modelo de poro cilíndrico.

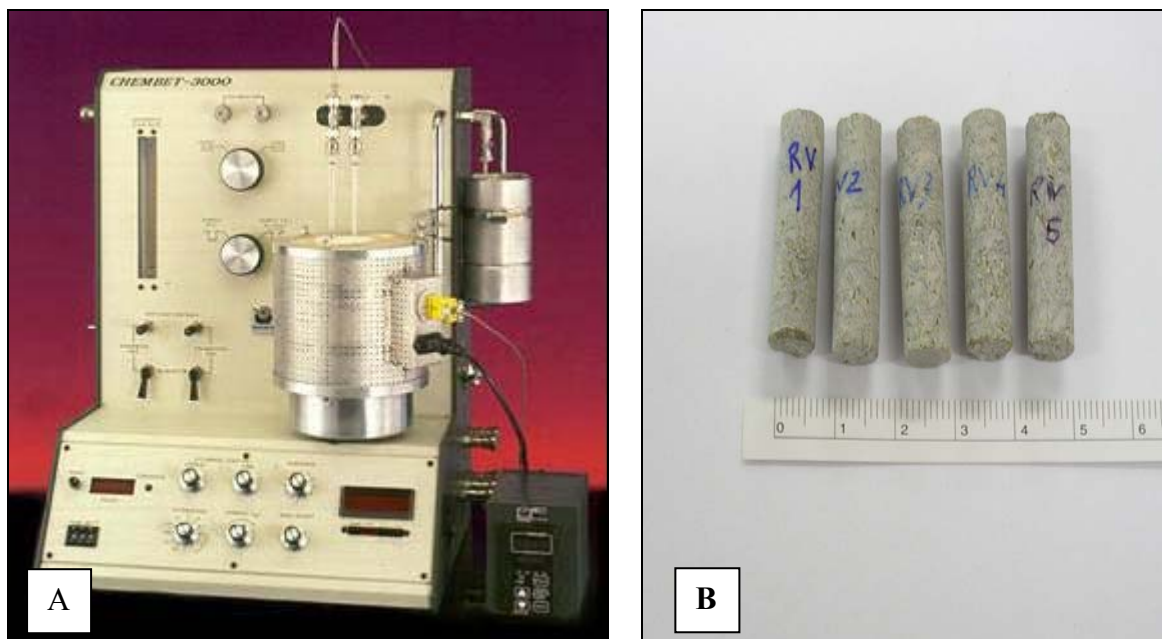


FIGURA 1. Modelo do equipamento de porosimetria de mercúrio do DICMA – Universidade de Bologna (A) e corpos de prova para ensaio do calcário Royal Verde RV (B).

Com o uso desta técnica foi possível obter o espectro por intrusão de mercúrio (MIP) com o volume de poros associado à determinada entrada de poros (raio de poro) para os quatro tipos de calcário avaliados. Obteve-se assim uma boa informação sobre a distribuição de poros (unimodal ou multimodal). Também foi possível obter valores precisos de bulk density, a média dos raios de poros e a porosidade aberta. As limitações desta técnica estão relacionadas com o modelo de poros; nenhum modelo natural de poros está constituído 100% por poros de geometria cilíndrica, mas para efeitos práticos, a equação de Washburn, considerando os poros de geometria cilíndrica, é mundialmente utilizada.

A porosimetria ao mercúrio foi realizada no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Engenharia Química, Mineraria e de Tecnologia do Meio Ambiente (DICMA) da Universidade de Bologna (Itália). O equipamento é um porosímetro PASCAL 240, o qual consta de três partes principais: o dilatômetro que contém o corpo de prova a analisar, o sistema de injeção de pressão e um sistema de medida da intrusão de mercúrio dentro do corpo de prova e da pressão de intrusão correspondente.

2.2.3.4 Ensaios relacionados com a dinâmica de circulação de fluidos

a) Determinação da Absorção por capilaridade

Os estudos sobre o comportamento das rochas pesquisadas em relação à ascensão capilar foram realizados por meio do Ensaio de Determinação do Coeficiente de Absorção por Capilaridade (Norma EN1925), nos quais os corpos de prova de forma cúbica e com sete cm de lado para cada uma das variedades analisadas, foram apoiados sobre papel de filtro e colocados em contato com uma lâmina de água (Fig. 2). Foram realizadas medições sucessivas das variações dos pesos para os corpos de prova, devidas à absorção da água. Inicialmente, os intervalos de tempo de pesagem foram muito curtos (1', 3', 5', 10', 15', 30', 60') e, em seguida, a cada hora, até completar 10 horas. O processo continuou com a avaliação da massa a cada 24 horas até conseguir a condição de saturação. Segundo a norma utilizada, esta saturação acontece, quando as diferenças entre dois pesos sucessivos não é superior a 1% da massa de água absorvida pelo corpo de prova. Determinou-se tanto a cinética do processo, quanto a quantidade de água absorvida. O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura controlada, visando manter constantes as condições do ensaio.



FIGURA 2. Montagem do ensaio de absorção por capilaridade. Os corpos de prova são colocados sobre papel de filtro saturado em água a nível constante.

Os resultados obtidos para a absorção por capilaridade são expressos como a relação entre a massa absorvida e a área da base em contato com a água, em função da raiz quadrada do tempo. A representação gráfica consta de duas partes: a primeira indica a absorção da água; portanto, a partir da sua inclinação é possível calcular o coeficiente de absorção por capilaridade (C) e a segunda, indica a saturação.

O cálculo da absorção capilar se expressa em $\frac{g}{m^2 s^{0.5}}$

onde:

g = massa absorvida

m = área da base do corpo de prova

s= tempo

O coeficiente de absorção por capilaridade se obtém a partir da tangente da linha de ascensão capilar, determinada até conseguir a estabilização do processo. As curvas de ascensão e estabilização seguem a tendência mostrada no gráfico superior da Fig. 3. Neste caso pode se calcular a absorção por capilaridade para cada ponto seguindo a fórmula:

$$C = \frac{m_i - m_d}{A t_i^{1/2}}$$

Onde

C = coeficiente de absorção por capilaridade

m_i = massas sucessivas do corpo de prova em gramas (g)

m_d = massa do corpo de prova seco em gramas (g)

A = área da face imersa, em metros quadrados (m^2)

t_i = tempo ocorrido desde o começo do ensaio até o final (s)

O coeficiente de absorção por capilaridade permite estabelecer a cinética da absorção da rocha por capilaridade. Este fenômeno é devido à tensão superficial na interface dos dois fluidos, ar (fluido seco) e água (fluido úmido). A tensão movimenta o fluido úmido em direção ao fluido seco (Rousset Tournier, 2001; Thomachot, 2002). Estas medidas têm sido normalizadas pela norma EN1925. O princípio é que, de acordo com a equação de Washburn e para uma superfície dada exposta à água, o ganho de peso é diretamente proporcional à raiz quadrada do tempo. O aspecto geral do arranjo poroso pode ser facilmente deduzido do gráfico da absorção, considerando que existem três tipos de cinética de absorção (Mertz, 1991; David *et al.*, 1993), conforme representados na Fig. 3.

No primeiro tipo (Fig. 3A), o ganho de peso apresenta somente um ponto de inflexão. Este comportamento é característico para uma distribuição unimodal de poros, a qual é regular no corpo de prova. Este ponto de inflexão ocorre aproximadamente para o conteúdo de peso correspondente à capacidade de absorção de água que a rocha apresenta em condições de pressão atmosférica.

No segundo tipo, o gráfico apresenta dois pontos de inflexão (Fig. 3B), indicando que o ganho de peso da rocha se deve à distribuição bimodal de poros, seja microporos e macroporos. O preenchimento dos poros acontece sucessivamente nas duas famílias principais de poros, sendo os poros da segunda, geralmente mal conectados.

Finalmente, o terceiro tipo de gráfico (Fig. 3C) é obtido quando a evolução do peso não segue nenhum padrão. Este comportamento acontece para rochas com porosidade muito baixa ou com

muito baixa conectividade devido a heterogeneidades petrofísicas. Porém é muito difícil estabelecer claras diferenças entre as últimas duas famílias.

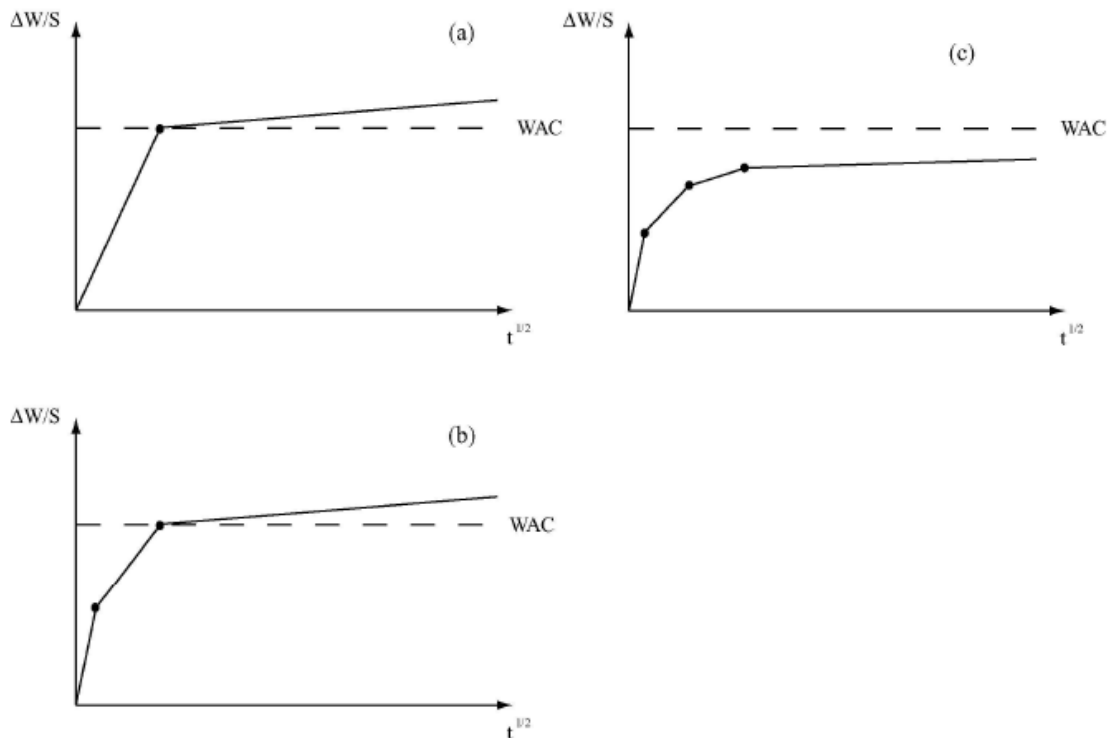


FIGURA 3. Curvas representando as diferenças na cinética de absorção capilar em poros de materiais rochosos (Mertz, 1991; David *et al*, 1993).

b) Ensaio de desorção ou perda de água por evaporação

O ensaio de perda de água por evaporação foi realizado segundo a norma italiana Normal 29/88 chamada “Misura della perdita per evaporazione dell’acqua assorbita dal materiale”, formulada para caracterizar materiais pétreos, avaliar a sua degradação e os efeitos dos tratamentos de conservação. O ensaio foi realizado uma vez alcançado o estado de saturação para os corpos de prova, depois do ensaio de absorção por capilaridade. As medições de massa foram avaliadas nos mesmos intervalos de tempo usados para o ensaio de absorção por capilaridade até que as perdas de massa cumprissem a equação:

$$1,0 \geq \frac{(m_0 - m_{i-1})}{(m_0 - m_i)} \geq 0,90 \text{ (h)}$$

Onde m_0 = massa (g) do corpo de prova no tempo t_0 (horas)

m_{i-1} = massa (g) do corpo de prova no tempo t_{i-1} (horas)

m_i = massa (g) do corpo de prova no tempo t_i (horas)

O conteúdo de água residual Q_i no tempo t_i é calculado segundo a fórmula:

$$Q_i = \frac{(m_i - m_{of})}{m_{of}} 100 \quad (i)$$

Onde

Q_i = conteúdo de água no tempo t_i , expressado em porcentagem em relação à massa seca final.

m_i = massa (g) do corpo de prova no tempo t_i (horas)

m_{of} = massa (g) do corpo de prova seco depois do final da prova

Foram construídas as curvas representando os valores de Q_i em função do tempo t_i ; também foram determinados os parâmetros: a) conteúdo de água, para um tempo dado (W_t) e b) grau de saturação, para um tempo determinado (S_t).

A evaporação é um parâmetro extremamente importante nos processos de deterioração. Foi escolhida a sua avaliação especialmente pela relação direta com o processo de cristalização de sais. A localização e o desenvolvimento de cristais de sais são dependentes da taxa de evaporação e sua correlação com a capilaridade. Assim, é muito importante entender o fenômeno da evaporação e quais são os parâmetros que o afetam. A cinética da secagem é dependente de numerosos parâmetros extrínsecos (umidade relativa, temperatura, circulação do ar, conteúdo de água), mas também das características do sistema poroso (forma, tamanho, conectividade e tortuosidade) e da superfície exposta (Rousset Tournier, 2001).

A transferência de água no sistema poroso pode acontecer tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Dependendo da umidade relativa, estas duas fases podem coexistir. A sucessão dos diferentes estados é apresentada nas Figuras 4 e 5. Para exemplificar consideremos um corpo de prova saturado com água. O gráfico clássico da evaporação é mostrado na Fig.5 (Pearse *et al.*, 1949; Jouany, 1981; Rousset Tournier, 2001). Neste gráfico observa-se que no começo, o fluxo da evaporação é rápido e depende somente de parâmetros ambientais: umidade relativa, temperatura e velocidade do vento.

Na Fase I (Fig. 5) a água flui em forma líquida para a superfície evaporativa que permanece sempre molhada (Fig. 4A e 4B). Isto é possível porque o fornecimento de água capilar é alto o suficiente para compensar a perda de água em forma líquida na superfície. Esta etapa finaliza quando o CP perde o seu estado de saturação. Isto se deve principalmente à insuficiência do fornecimento de água pelo fenômeno de capilaridade. A saturação de água no corpo de prova no fim deste estágio é chamada Saturação Crítica “ S_c ”. O fim desta fase é determinado pela ruptura da continuidade da água através do corpo de prova.

Depois, durante a fase II (Fig. 5), a perda de peso deixa de ser linear em função do tempo. Durante este período, a superfície evaporativa aparece seca e parâmetros externos são menos influentes na cinética de evaporação. A evaporação ocorre neste momento por fluxo capilar através das paredes do poro e na forma da difusão de vapor de água pela rede porosa (Fig. 4C e 4D). A velocidade da secagem diminui progressivamente nesta fase e os processos de difusão se constituem como mais importantes do que o fluxo capilar. A perda de peso em relação com a raiz quadrada do tempo tem um comportamento linear.

Finalmente, a fase III (Fig. 5) é caracterizada pela constante, mas muito baixa perda de peso. Ainda há água nos corpos de prova, mas esta não flui mais por capilaridade. A superfície evaporativa aparece completamente seca e a evaporação ocorre unicamente na forma de difusão de vapor de água. A perda de peso finaliza quando o conteúdo de água no corpo de prova está em equilíbrio com a umidade relativa HR do ambiente (Fig 4E e 4F).

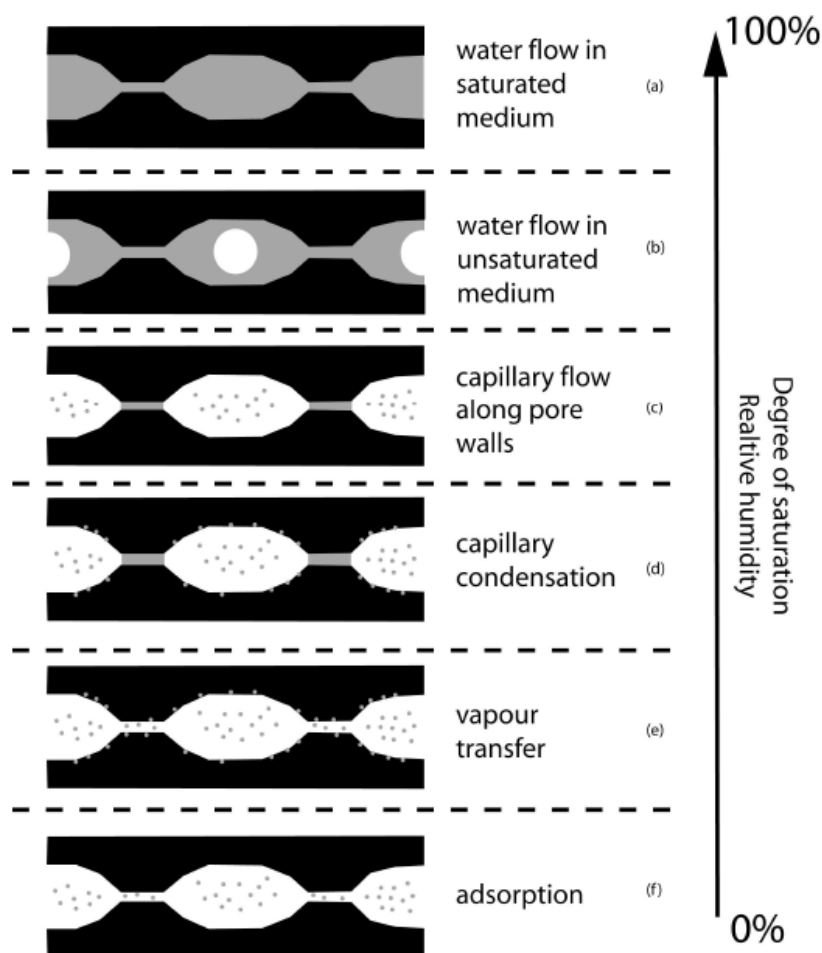


FIGURA 4. Estados de secagem para sistema poroso (Beck *et al*, 2003).

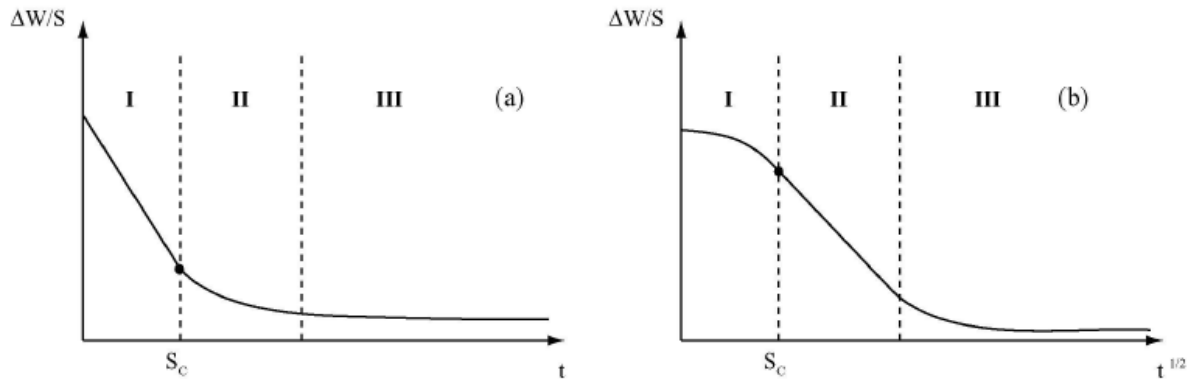


FIGURA 5. Cinética geral de evaporação nas rochas em função do tempo (a) e a raiz quadrado do tempo (b) (Hammecker, 1993).

O coeficiente de evaporação (C_{ev}) foi determinado seguindo dois métodos:

a) Segundo a norma Normal 29/88, que considera para o cálculo do índice intervalos de tempo desde o início do processo de evaporação até o final, aplicando a fórmula:

$$IA = \frac{\int_{t_0}^{t_f} t(Q_i) dt}{Q_{max} t_f}$$

O cálculo da integral da curva foi realizado pelo método de Simpson:

$$\frac{t_f - t_0}{3n} (Q_{max} + Q_f + 2(Q_2 + Q_4 + \dots + Q_{n-2}) + 4(Q_1 + Q_3 + \dots + Q_{n-1}))$$

Onde

Q_{max} = conteúdo de água no tempo inicial t_0 expressado em percentagem em relação à massa seca final;

Q_f = conteúdo de água no tempo final t_f , expressado em percentagem em relação à massa seca final;

t_0 = tempo inicial do ensaio = 0

n = número de intervalos estabelecidos para o cálculo

t_f = tempo final do ensaio.

b) Considerando a inclinação da curva da cinética da evaporação na fase II.

Geralmente, o parâmetro usado para quantificar as propriedades de evaporação numa rocha é a taxa de perda de peso durante a fase I. Porém, levando em conta que durante esta fase as perdas são influenciadas não só pela natureza do processo de circulação de fluidos na estrutura de poros, mas também pelas condições do meio ambiente, considera-se que os resultados obtidos não são ainda o suficientemente representativos. Como o que se procura é um parâmetro dependente apenas das características da microestrutura da rocha, a inclinação da curva da fase II que representa a perda de peso como função da raiz quadrada do tempo, melhor indica o desenvolvimento deste processo

segundo pesquisas já realizadas (Hammecker 1993; Benavente, 2004; Angeli, 2007) e por tanto foi também utilizada para o cálculo do coeficiente de evaporação (C_{ev}).

2.2.3.5 Ensaio de caracterização físico-mecânica

Os ensaios de caracterização físico-mecânica foram realizados antes e depois dos ensaios de alteração acelerada para determinar algumas das características das rochas e as mudanças ocorridas após os ensaios de alteração acelerada. Foram escolhidos dois parâmetros para caracterização dos materiais pesquisados:

a) Determinação da resistência à compressão (NBR 12767)

A resistência à compressão foi avaliada usando sete corpos de prova de sete (7) cm de lado, de cada uma das quatro variedades de calcário pesquisadas (Fig. 6A). No caso do calcário RVT os corpos de prova utilizados foram escolhidos de tal forma a apresentarem graus de alteração semelhantes, considerando que esta rocha mostra mistura de áreas inalteradas com áreas alteradas, devido à circulação de fluidos através do sistema poroso e das fissuras (Fig. 6B). No caso do calcário RB, a resistência à compressão foi avaliada aplicando esforços compressivos em duas direções, uma segundo a direção da laminação, deduzida a partir da orientação dos fragmentos bioclásticos e, outra, em direção perpendicular a este plano (Fig. 6C e 6D), para determinar se existia alguma diferença em relação à resistência aos esforços compressivos.

b) Determinação da resistência à abrasão (NBR12042)

O ensaio de desgaste Amsler foi realizado utilizando dois corpos de prova de cada variedade de calcário pesquisada, os quais foram submetidos a atrito entre a superfície de uso da rocha e a um anel de ferro fundido com superfície plana e lisa (pista de desgaste) e dureza Brinell entre 160 e 190, disposto horizontalmente, abastecido com um material abrasivo. Os corpos de prova utilizados foram paralelepípedos regulares com os lados da base medindo 70 ± 2 mm e com uma altura entre 25mm e 50mm. Os resultados, expressados como a redução de altura dos corpos de prova (mm) foram calculados após 500 e 1000 voltas.

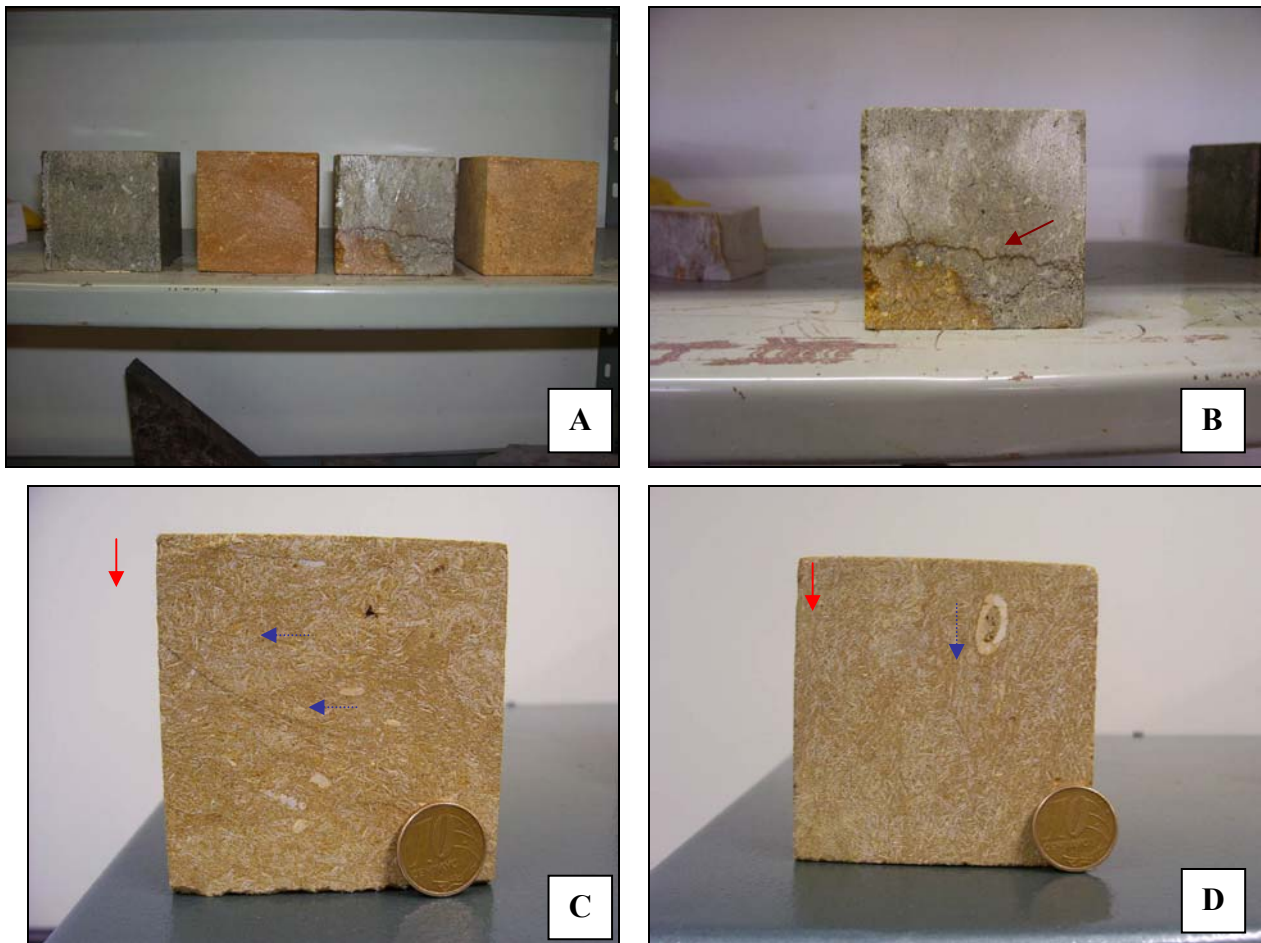


FIGURA 6. Ensaio de resistência à compressão. (A) CP utilizados. (B) calcário RVT com fissuramento e áreas alteradas e inalteradas (→). (C) calcário RB, o esforço compressivo (→) aplicado perpendicular à direção de orientação dos bioclastos (→). (D) calcário RB, o esforço compressivo (→) aplicado paralelo à direção de orientação dos bioclastos (→).

2.2.3.6 Ensaios de avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração

Neste trabalho foram consideradas duas normas que representam muito bem os processos de alteração das rochas em ambientes urbanos e, especificamente os que ocorrem na cidade de Medellín, relacionados com as características do clima e da qualidade do ar urbano: a) ensaio de cristalização de sais (EN12370) e b) ensaio de resistência aos vapores de ácido sulfuroso (EN13919). Também foi realizado um ensaio de imersão parcial em solução acidulada, para simulação dos processos de formação de eflorescências originadas no processo de cristalização de sais (Frasca & Yamamoto, 2008).

a) Ensaio de Cristalização de Sais (Norma EN12370)

O ensaio de cristalização de sais permite estabelecer os processos que governam o decaimento ocasionado pela presença de sais solúveis em rochas porosas e assim avaliar a influência deste processo na estética das rochas, nas suas propriedades tecnológicas e na deterioração com a intenção de determinar sua durabilidade. Para simplificar o estudo dos aspectos gerais do decaimento por cristalização de sais, foi utilizado somente o sulfato de sódio nos corpos

de prova das quatro variedades analisadas, escolhendo, em cada conjunto de corpos de prova, aqueles que representassem melhor as características das rochas tanto na frente de lavra, como aquelas utilizadas nos ambientes urbanos de Medellín.

O ensaio foi executado usando corpos de prova de forma cúbica de 7cm de lado aproximadamente, correspondentes a cada uma das variedades comerciais dos calcários avaliados (RV, RVT, RB, RD). Inicialmente os corpos de prova foram pesados e secos em estufa a 105°C até atingirem a massa constante, condição que é alcançada quando a diferença entre dois pesos sucessivos realizados em um intervalo de 24 horas é menor do 0,1%.

De acordo com a norma EN12370, o ensaio se realizou em 15 ciclos, cada um de 24 horas dividido nas seguintes etapas:

- 2h de imersão em solução de sulfato de sódio decaidratado ou mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em concentração de 14% em massa;
- 16h de secagem em estufa a 105°C com o objetivo de prevenir a cristalização da mirabilita durante a secagem dos corpos de prova;
- 7h de secagem a temperatura ambiente (20-25°C). Os corpos de prova foram pesados depois de duas horas durante este período.

A cada ciclo a solução salina foi renovada; ao final dos ciclos completos do ensaio, os sais foram retirados dos corpos de prova, mergulhando-os em água deionizada a 50°C e logo secados e pesados até atingir massa constante. A susceptibilidade da rocha face o processo de cristalização de sais é representada pela perda de peso dos corpos de prova depois dos quinze ciclos.

Foram utilizados no ensaio de cristalização de sais quatorze corpos de prova, dividindo-os em dois grupos para observações específicas.

O primeiro conjunto de sete corpos de prova foi utilizado para observação das possíveis mudanças estéticas e para a avaliação do comprometimento das características geomecânicas dos calcários pesquisados. Assim foi realizado o ensaio de resistência aos esforços compressivos retirando um cubo após diferentes ciclos do ensaio assim: 3 ciclos, 5 ciclos, 7 ciclos, 9 ciclos, 11 ciclos, 13 ciclos e 15 ciclos.

Os sete corpos de prova restantes foram submetidos aos 15 ciclos completos de cristalização de sais, avaliando-se o comportamento da massa em termos de ganhos ou perdas, tendo por base sempre a massa inicial. Foi realizado o controle fotográfico para documentar o início das perdas de massa ou das mudanças estéticas em relação à forma e às dimensões das superfícies da rocha.

As características hidromecânicas (coeficiente de absorção por capilaridade e coeficiente de evaporação) foram também consideradas como parâmetro de avaliação dos efeitos da cristalização de sais nos calcários pesquisados.

Foi avaliada também a macro e meso porosidade por meio do ensaio de porosimetria de mercúrio em dois tipos de calcários (RV e RD), para constatar eventuais mudanças da porosidade relacionadas com o processo de deterioração ocasionadas pela cristalização de sais.

Após a finalização do ensaio foram realizadas observações ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) dos corpos de prova retirados em diferentes ciclos do ensaio, para verificar a eventual cristalização de sais no sistema poroso.

As eflorescências formadas ao longo do tempo após a finalização do ensaio de cristalização de sais foram analisadas por difração de Raios-X para determinar a natureza dos sais formados e relacioná-los com os processos de deterioração.

b) Ensaio de resistência aos vapores de ácido sulfuroso (H_2SO_3)

O objetivo básico deste ensaio foi similar a exposição dos calcários a ambientes poluídos, especialmente como revestimentos e pavimentos internos. O ensaio (Norma EN13919) consiste em atacar os materiais com vapores de SO_2 , produzidos pelo ácido sulfuroso (6% de concentração), em amostras acondicionadas dentro de um recipiente fechado, de 5000 cm^3 de volume. Foram utilizadas seis amostras ($7 \times 7 \times 2\text{ cm}$) de cada grupo dos calcários pesquisados, isolando-as do ácido por uma plataforma de plástico resistente (Fig. 7). Foram preparadas duas soluções, segundo o procedimento recomendado pela norma, com diferentes concentrações:

- Solução A: diluindo 500 ml de ácido sulfuroso (H_2SO_3) em 150 ml de água deionizada;
- Solução B: diluindo 150 ml de ácido sulfuroso (H_2SO_3) em 500 ml de água deionizada.

Os corpos de prova foram imersos em água deionizada a 20°C durante 24 horas. Em seguida três corpos de prova foram colocados no recipiente plástico que continha a solução A e os outros três no recipiente com a solução B. Os corpos de prova foram colocados em posição vertical sobre a plataforma.

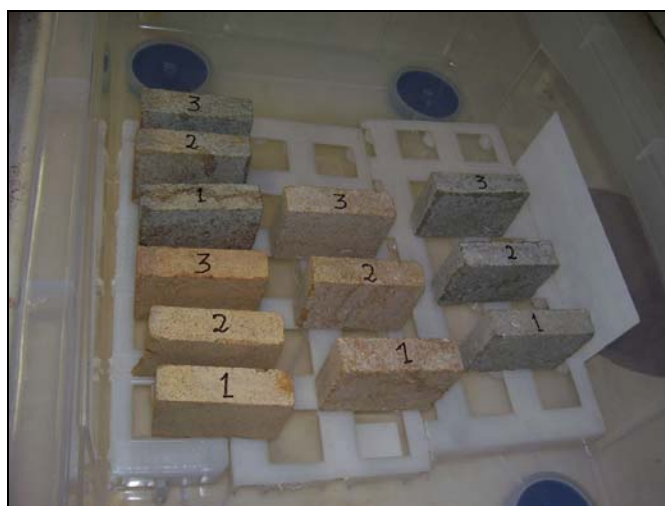


FIGURA 7. Disposição dos corpos de prova para o ensaio de exposição aos vapores de ácido sulfuroso (H_2SO_3).

Depois de 21 dias os corpos de prova foram removidos dos recipientes, lavados com água deionizada e secos ($T=60^{\circ}\text{C}$) até massa constante. A massa final dos corpos de prova secos foi registrada e se compararam visualmente com corpos de prova deixados como referência.

Foi efetuado o registro fotográfico das alterações observadas, as mudanças de cor e qualquer outra mudança física que as rochas pudessem apresentar.

Os resultados se expressam segundo a equação:

$$\Delta m(\%) = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0}$$

Onde

m_0 = massa do CP seco antes do ensaio

m_1 = massa do CP seco após o ensaio

Δm = mudança de massa em %.

c) Ensaio de imersão parcial em solução acidulada de H_2SO_4 (Frasca & Yamamoto, 2008)

Para reproduzir a deterioração das rochas devido à ação das substâncias nocivas presentes no meio ambiente urbano, três CP foram colocados em contato com solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 -1%), em pH ácido entre 1 e 1,5. A escolha do ácido sulfúrico baseou-se no fato de ser o SO_2 um dos poluentes atmosféricos que causam maior degradação nas rochas ornamentais, responsável pela formação de sais, como o gesso, que conduzem à degradação associada à sua ação destrutiva na rocha.

O ensaio foi realizado colocando-se em imersão parcial uma das faces dos CP das rochas em estudo, com altura de imersão de 0,5cm, em recipientes plásticos com a mencionada solução (Fig. 8). O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura controlada (22°C), visando manter constantes as suas condições.

Os CP ficaram expostos à solução por 30 dias, e nesse período foram efetuados registros diários das mudanças ocorridas na solução e na aparência das rochas. Após esse período, a solução foi removida e os CP colocados em condições ambientais por outros 30 dias, monitorando a formação de eflorescências e sub-eflorescências.

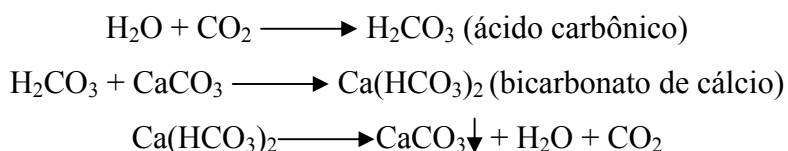
Após os 30 dias de exposição a condições ambientais, as eflorescências formadas foram retiradas cuidadosamente dos CP e enviadas para análise de difração de Raios-X no laboratório do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), visando a identificação dos sais neoformados no processo. Outra parte do material coletado como eflorescências, foi analisada via MEV para a determinação das formas cristalinas associadas à formação dos sais.

CAPÍTULO 3 - ROCHAS SEDIMENTARES CARBONÁTICAS E SEU USO COMO ROCHAS ORNAMENTAIS

Os calcários são rochas sedimentares de origem fundamentalmente química ou organogênica, constituídas por pelo menos 50% de carbonato de cálcio. Os calcários de origem bioquímica são formados pela ação dos seres vivos que afixam o cálcio dissolvido na água e o utilizam para construir seus esqueletos em forma de calcita ou aragonita. Quando eles morrem, seus esqueletos dão origem a calcários formados por calcita, já que a aragonita sempre é instável e transforma-se em calcita. Também são depositados calcários nos fundos marinhos como consequência indireta do metabolismo dos seres vivos. Assim por exemplo, as algas ao realizar fotossíntese, consomem bióxido de carbono (CO_2); este consumo de dióxido de carbono varia as características do meio, com a consequente precipitação do carbonato de cálcio (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

3.1 Ambientes de formação dos calcários

A precipitação do carbonato de cálcio em meio aquoso é um processo inorgânico e/ou bioquímico. O cálcio que é proveniente da meteorização de minerais que o contém (piroxênios, anfibólios ou plagioclásios), junto ao anidrido carbônico da atmosférica, dão lugar às seguintes reações que dependem da pressão e da temperatura:



A solubilidade do cálcio e dos íons carbonato na água é função da quantidade de dióxido de carbono (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). Uma pequena redução de dióxido de carbono na água acelera o processo de precipitação de carbonato de cálcio.

A maior parte dos calcários procede da intervenção de organismos que tomam das águas os elementos para formar suas conchas e carapaças (corais, algas, foraminíferos etc.). Ao morrer, produz-se uma acumulação destas partes que se unem por um cimento calcário, gerado no processo de sedimentação ou por processos diagenéticos.

As maiores acumulações de calcários formaram-se no mar, nas plataformas continentais, em águas rasas, quentes e afastadas de zonas emersas que podem aportar sedimentos detríticos. Estes carbonatos de águas rasas acham-se amplamente representados geologicamente, mas hoje em dia

ocorrem em áreas relativamente restritas da terra, como o Grande Banco das Bahamas, representado por um platô submerso de 300 a 700 km de superfície.

Nas bacias oceânicas profundas não se formam calcários devido à dissolução do carbono se fazer maior ao aumentar a pressão e diminuir a temperatura.

Os calcários marinhos de água profunda podem ser de origem turbidítica ou depósitos pelágicos de águas profundas. Os depósitos turbidíticos exibem menor extensão, porém são mais comuns no registro geológico antigo. Os depósitos pelágicos são muito mais extensos nos mares atuais, cobrindo mais de um terço do fundo oceânico, com vasas contendo mais de 30% de CaCO_3 , mas são mais raros no passado geológico. Os depósitos pelágicos são compostos de vasas de pterópodes (gastrópodes) que ocorrem a cerca de 3600m de profundidade e as de globigerina (foraminíferos), que se distribuem mais comumente a mais ou menos 2000m de profundidade. As vasas de globigerina são mais abundantes em baixas latitudes, onde as águas superficiais caracterizam-se por salinidades e temperaturas mais altas (Flügel, 1982).

Nos ambientes continentais, o meio sedimentar típico de formação de calcários é o dos lagos, embora também existam extensas formações calcárias associadas a solos (caliches), a surgências de água (travertinos) e a cavernas karsticas. Os caliches correspondem a solos endurecidos por cristalização da calcita e outros minerais nos interstícios e são comuns em regiões desérticas. Eles formam-se em solos de climas semi-áridos a áridos, onde o sentido predominante de movimentação da umidade dos solos é ascendente, em virtude do excesso de evaporação e da ação da capilaridade. Quando a água se evapora na superfície do solo, a calcita e outras substâncias (nitrato, sulfato etc) podem precipitar-se entre as partículas minerais do solo (Flügel, 1982).

O travertino é um calcário formado por precipitação de cálcio, em lagos e riachos de águas quentes. Os sais de cálcio (bicarbonatos), dissolvidos nestas águas são provenientes da dissolução de rochas carbonatadas (mármore e rochas calciosilicáticas) presentes em profundidade e percoladas pelas águas em sua ascensão à superfície. A precipitação do carbonato de cálcio ocorre pela perda de pressão e temperatura da água. O calcário travertino tanto pode ser compacto como poroso, quando recebe o nome de tufo calcário. Sua coloração pode variar em função da presença de outros metais na água, indo do branco ao amarelo, até mesmo marrom ou preto. Vestígios da flora e fauna local podem ser encontrados no interior destes calcários (Guerrero Hernández, 2001).

A marga é um tipo de calcário constituído por mistura de calcita (menos freqüentemente dolomita) e minerais argilosos, que podem representar 35% a 60% da composição da rocha, com vestígios de quartzo, micas e resíduos carbonosos. Apresenta freqüentemente estruturas sedimentares, fósseis e concreções. São frequentes nódulos de gesso, calcita e pirita. Sua origem está relacionada a depósitos marinhos e lacustres de material clástico, que se afundaram

progressivamente e se misturaram com resíduos de precipitação química ou resíduos orgânicos (Guerrero, 2001; Flügel, 1982).

Todos os tipos de calcários mencionados têm sido utilizados largamente como rochas ornamentais ao longo da história da humanidade. Assim por exemplo, o calcário conhecido com o nome de Pietra Forte Colombino ou Pietra Serena, relacionado geneticamente com depósitos turbidíticos da Formação Marnoso-Arenácea (Bargossi *et al.*, 2002), tem sido fundamental na construção dos principais monumentos arquitetônicos da região da Toscana (Itália) (Fig. 8A), sendo ainda muito utilizado na construção civil (Fig. 8B). Calcários travertinos foram utilizados na construção das colunas do Coliseu Romano (Fig. 8C) e também são muito utilizados na construção de fachadas de prédios modernos (Fig. 8D). Calcários bioclásticos formados em ambientes marinhos de águas rasas, e ricos em microfósseis, como o conhecido com o nome de Rosa Istria, foram elementos importantes na construção medieval nas cidades como Ferrara (Fig. 8E e 8F), na província da Emilia-Romagna (Itália).

3.2 Diagênese das rochas calcárias

Os processos diagenéticos incluem compactação, recristalização, cimentação e substituição. Durante estes processos, a calcita pode ser dissolvida e algumas vezes removida, gerando mudanças em relação com a porosidade (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

3.2.1 Compactação

Este processo pode ser definido como a consolidação parcial do sedimento devido a pressões exercidas pelos sedimentos subjacentes. Os sedimentos carbonáticos micríticos experimentam máxima compactação pela tendência dos sedimentos finos a se empacotarem.

3.2.2 Cimentação

É o processo de cristalização da calcita entre os grãos. Esta calcita cristalizada é chamada esparita. A calcita espática encontra-se especialmente em calcários aloquímicos onde o sedimento parental é grão-suportado, isto é, a estrutura mecânica é suportada por grãos em contato com outros. A solução mineral contida nos poros em sedimentos ricos em aloquímicos constitui a fonte da calcita. Uma pequena quantidade de cimento microsparítico pode ser também encontrada em rochas micríticas, ou lama-suportadas.

3.2.3 Recristalização

O termo recristalização refere-se a mudanças no tamanho e/ou forma dos cristais, mas sem modificações na composição mineralógica. Os processos de recristalização mais frequentes durante a diagênese são as transformações calcita-calcita ou dolomita-dolomita. Estas transformações são

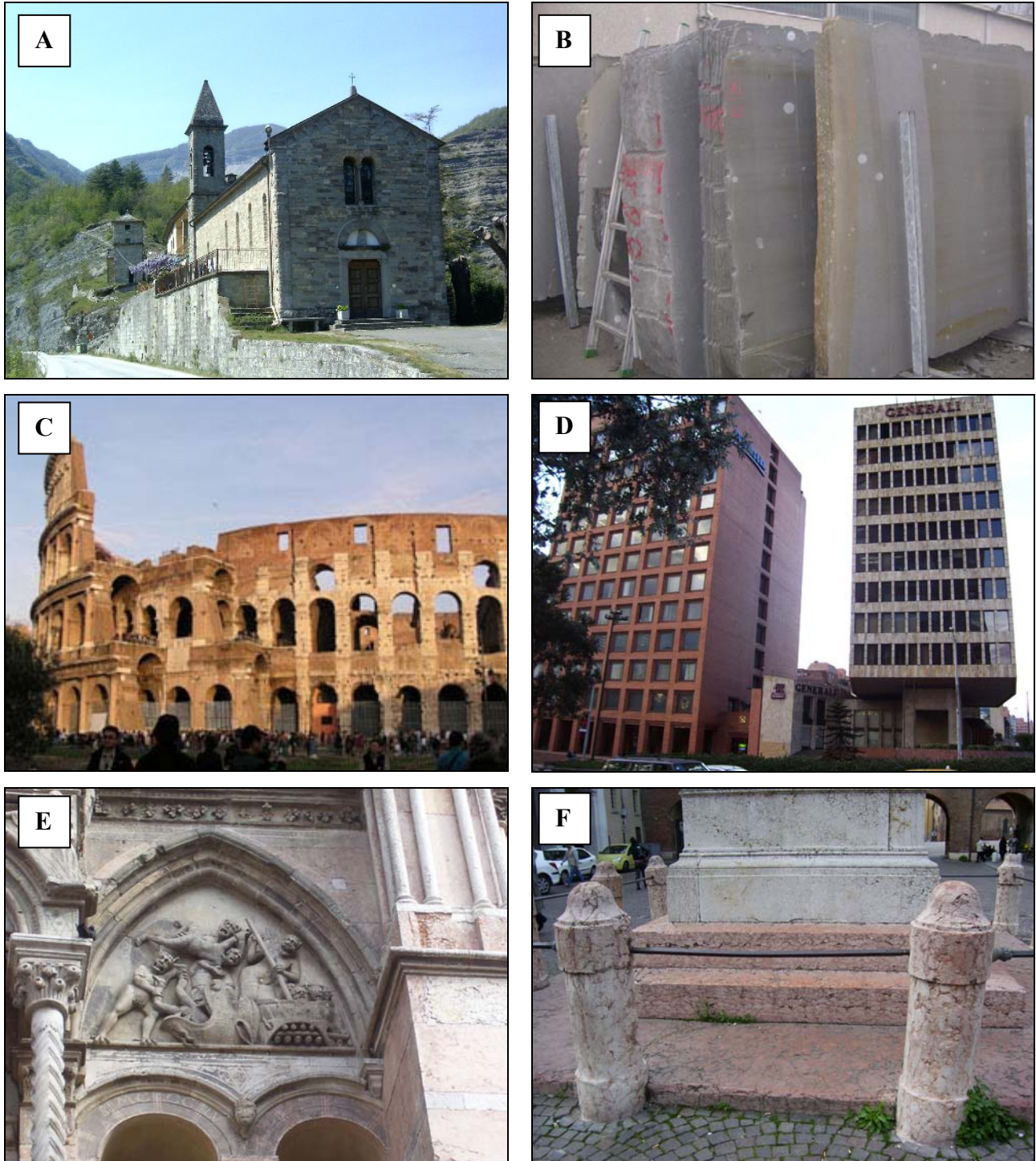


FIGURA 8. Diversos usos de calcários como rochas ornamentais. (A) Calcarenito “Pietra Serena” usado na Igreja San Pellegrino. (B) Chapas para uso na construção civil. (C) Travertino usado nas colunas do Coliseu Romano e (D) na fachada de prédio recente em Bogotá. (E e F) Uso de calcários fossilíferos na construção medieval de Ferrara.

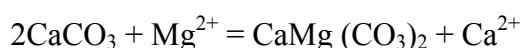
acompanhadas de um aumento no tamanho dos cristais (recristalizações agradativas), embora tenham sido descritos casos de recristalizações degradativas (Folk, 1974), normalmente em condições de diagênese. (Railsback, 1993).

A transformação da calcita magnesiana em calcita sem magnésio pode ser considerada como uma recristalização, já que a composição mineral (calcita) não varia durante o processo. O mecanismo preciso que governa esta transformação não é conhecido com exatidão, mas poderia consistir na dissolução seletiva dos domínios cristalográficos metaestáveis de $MgCO_3$ e a subsequente precipitação de $CaCO_3$ em núcleos de carbonato cálcico já presentes no próprio cristal (Moore, 1989).

No caso da lama micrítica dos sedimentos carbonáticos tropicais, que é formada por uma mistura complexa de pequenos cristais, a maioria de agulhas de aragonita e calcita magnesiana, a sua transformação em micrita implica tanto processos de recristalização calcita-calcita como de substituição (calcitização) de aragonito a calcita. O processo de transformação de lama em micrita tem sido considerado tradicionalmente como uma recristalização agradativa (Folk, 1975). Uma vez obtida a micrita (4 μ m), esta pode recristalizar para gerar microesparita ou inclusive esparita (pseudoesparita). O processo de recristalização da micrita a microesparita ou seudoesparita está controlado pelo conteúdo em magnésio no meio, sendo favorecido na sua ausência (Folk, 1974).

3.2.4 Substituição

É um processo análogo ao de recristalização (Bathurst, 1975). Porém, este implica na substituição parcial de cálcio na calcita, por magnésio, resultando na formação da dolomita, $CaMg(CO_3)_2$. Este processo chamado também de dolomitização, ocorre quando o $CaCO_3$ (calcita ou aragonita) de um sedimento ou rocha, mediante reação com soluções ricas em Mg^{++} , é substituído por uma nova espécie mineral, a dolomita, segundo a reação:



Este processo de substituição é acompanhado freqüentemente de variações do tamanho dos cristais (recristalização) e da porosidade.

A dolomitização pode ser seletiva, afetando somente alguns componentes determinados do sedimento ou rocha ou indiscriminada. Em ambos os casos, a dolomitização pode destruir as texturas prévias ou preservá-las parcialmente, sendo possível reconhecer os componentes originais (fantasmas). Os cristais de dolomita podem ser desde anédricos até euédricos, dando lugar por tanto

a mosaicos desde xenotópicos até idiotópicos, com limites entre os cristais planares ou não planares (Silvey & Gregg, 1987).

A dolomitização pode acontecer em uma grande variedade de ambientes diagenéticos e a partir de águas de composição muito variada. As características mineralógicas e texturais dependem, entre outros fatores, da salinidade do meio e da relação Mg^{2+}/Ca^{2+} .

3.3 Textura das rochas calcárias

Os componentes texturais das rochas calcárias são: lama fino granular, cimento cristalino e partículas de grão grosso (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

3.3.1 Lama fino granular ou micrita

Corresponde ao material calcário microcristalino (“matriz sindeposicional ou singenética”), formado na bacia de sedimentação, fazendo parte do suporte da rocha ou que está ocupando espaço entre grãos aloquímicos. De acordo com Folk (1959) a micrita pode se apresentar nas formas de calcita e aragonita, geralmente acompanhadas de impurezas detríticas e silicosas, por serem sedimentadas em águas tranquilas, onde as lamas calcárias “lime muds” tendem a ser precipitadas. Outras possíveis origens admissíveis para as lamas calcárias são mecanismos de abrasão mecânica ou biológica, além da aragonita acicular originária dos tecidos de algas calcárias.

Podem-se distinguir três categorias em relação ao tamanho:

Minimicrita (Folk, 1974): tamanho $<1\mu m$.

Micrita (Folk, 1959): $1-4\mu m$.

Microsparita (Folk, 1959): $5-10\mu m$.

Quando na rocha calcária estão presentes partículas de grão grosso, a micrita geralmente aparece como matriz.

A micrita pode se originar de várias formas (Terraza, 1999):

- Exclusivamente por precipitação química;
- Atividade de bactérias e decomposição de substâncias orgânicas;
- Atividade de algas;
- Sedimentação bioclástica de fragmentos de algas;
- Desintegração de partes duras de invertebrados (pelecípodos, braquiópodos etc);
- Produto da atividade perfuradora de invertebrados, fungos, algas etc;
- Sedimentação de nanofósseis (foraminíferos, terópodos etc).

Usa-se o termo microesparita freqüentemente para descrever micritas recristalizadas devido à remoção dos íons de Mg^{++} causada por ambientes salubres, por entrada de água doce ao meio marinho normal ou por adsorção de magnésio por argilas ou por águas de chuva.

Petrograficamente, a micrita e a minimicrita caracterizam-se por serem cristais anedrais e subhedrais de calcita com contatos planos e curvos. Na microesparita, os cristais de calcita são subédricos e euédricos e mais ou menos equigranulares.

3.3.2 Calcita espática (esparita)

Muitos calcários contêm calcita cristalina grossa (de 0,02 a 0,10mm), exibindo limites nítidos entre os cristais e com linhas de clivagem bem delineadas, que recebe o nome de calcita espática ou esparita. Ela ocorre como cimento de preenchimento dos espaços porosos e dos interstícios entre os bioclastos, oólitos etc. A calcita espática constitui a matriz pós-deposicional ou epigenética.

3.3.3 Partículas de grão grosso ou aloquímicos

São partículas de carbonatos de diversos tamanhos, geralmente maiores de 10 μm . As fontes destas partículas são fragmentos de conchas (bioclastos), intraclastos, pellets e oólitos (Terraza, 1999).

3.3.3.1 Bioclastos

Os materiais esqueléticos são predominantes em alguns calcários. Os bioclastos podem ser conchas de moluscos, corais, algas calcárias e outros organismos (crinóides, briozoários, braquiópodes etc). Além disso, podem estar presentes entre os bioclastos, foraminíferos (quase sempre menores de 1mm e, predominantemente, calcíticos), espículas de esponjas e fragmentos diversos.

3.3.3.2 Intraclastos

Este termo foi introduzido por Folk (1959) para designar partículas carbonáticas fracamente litificadas e de idade penecontemporânea à sedimentação, que foram erodidas e redepositadas como sedimento clástico, formando um arcabouço diferente do original. Podem apresentar laminações internas e podem ou não estar desgastados. Em geral, esta designação é restrita aos fragmentos de calcários e não de outros sedimentos originados de modo semelhante.

3.3.3.3 Pellets

São partículas esféricas com tamanho variável entre 10 e 30µm, de carbonato microcristalino sem fábrica interna. Geralmente são excrementos de invertebrados, especialmente em sedimentos marinhos.

3.3.3.4 Oólitos

São partículas esferoidais ou elipsoidais de calcita ou aragonita, cujos diâmetros variam desde microscópicos até 2mm, formadas genericamente ao redor de um núcleo (germe de cristalização), havendo casos nos quais se apresentam com texturas radiais, que são de origem secundária diagenética. O núcleo quando presente pode ser composto por grãos de quartzo, fragmentos líticos diversos, pedaços de conchas de moluscos ou oólitos menores ou fragmentados.

3.4 Composição mineralógica e química dos carbonatos

3.4.1 Mineralogia dos calcários

3.4.1.1 Minerais carbonáticos

a) Calcita e aragonita

Esses minerais formam mais da metade do volume total de carbonatos existentes na natureza, ocorrendo sob várias formas: vasa microcristalina, cristais xenomorfos, mosaicos cristalinos, crostas e revestimentos fibrosos e veios, além de cimentos de muitos arenitos.

A aragonita é um polimorfo da calcita, isto é, apresenta a mesma composição química da calcita, mas difere desta no sistema de cristalização (ortorrômbico bipiramidal) e possui índices de refração levemente mais altos. A calcita, que cristaliza no sistema trigonal, é muito mais comum do que a aragonita, que apresenta baixa estabilidade nos processos diagenéticos.

Várias formas e gerações de calcita podem estar presentes em calcários: componentes primários de fragmentos de conchas, produtos de recristalização da aragonita e cimentos precipitados em várias etapas. Estas diferentes gerações de cimentos de calcita podem ser distinguidas pelas diferenças de textura cristalina (Bricker, 1971).

b) Dolomita

Este mineral, cuja composição é de carbonato de cálcio e magnésio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], pode ocorrer como vasa de precipitação direta em cristais de 2 a 20 µm ou mesmo como cristais grossos idiomórficos ou xenomórficos, substituindo a calcita e, ocasionalmente, como preenchimento de veios ou cimentos em arenitos. As rochas calcárias possuem quantidades variáveis de carbonato de magnésio; quando este aparece em quantidade inferior a 5% diz-se que o calcário é magnesiano.

Um calcário com 30 a 49% de carbonato de magnésio se classifica como calcário dolomítico. Os dolomitos estão compostos pelo mineral dolomita em proporções iguais ou superiores a 50%.

Em geral, a dolomita não tem uma origem primária, mas resulta da substituição da calcita. Segundo Friedman *et al.* (1981), as condições físico-químicas que controlam o processo de formação são ainda pouco conhecidas, mas sugere-se que a formação da dolomita primária seja favorecida pela alta temperatura, pH baixo e salinidade seis a oito vezes superior à da água marinha normal. Deste modo, nenhuma estrutura de concha é originalmente dolomítica, mas ela resulta da substituição pós-deposicional.

c) Siderita, ankerita e magnesita

Do mesmo modo que a dolomita, a siderita FeCO_3 e a ankerita $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$ podem ser formadas por substituição, como vasas de precipitação direta ou como concreções. A siderita tem sido encontrada, com certa frequência, em sedimentos lacustres. A magnesita MgCO_3 sedimentar, embora mais rara, ocorre em depósitos lacustres e lagunares.

3.4.1.2 Minerais acessórios

a) Sílica

Aparece em várias formas. A sílica microcristalina ou calcedônia é a forma mais comum, que ocorre disseminada ou segregada em nódulos nos calcários e dolomitos. Ela pode ser encontrada também como esferulitos com estruturas fibrorradiadas. Cristais euédricos de quartzo podem aparecer cortando as estruturas primárias de calcário, tais como de conchas e oólitos, por exemplo, indicando sua origem autigênica. O quartzo também aparece como fragmentos na rocha por transporte e deposição na bacia carbonática.

b) Argilominerais

Os argilominerais constituem uma das principais impurezas, em geral invisíveis ao microscópio petrográfico, devido aos seus tamanhos reduzidos. Eles formam um dos componentes insolúveis dos carbonatos, que são estudados após a dissolução do carbonato por técnicas analíticas como a difração de Raios-X (DRX), a análise térmica diferencial (ATD), entre outras.

3.4.1.3 Minerais raros

a) Glauconita

Aparece na forma de grânulo esverdeado, de forma arredondada e localmente pode ser abundante.

b) Colofana

É um mineral amorfo com a mesma composição da apatita, que aparece como fragmento esquelético fosfático.

c) Pirita e marcassita

Apresentam-se como pequenos grãos disseminados em calcários de ambiente redutor (Eh negativo) e podem originar limonita por oxidação.

d) Gipsita e anidrita

Esses minerais são relativamente comuns e aparecem especialmente em dolomitos.

A composição mineralógica condiciona a cor dos calcários usados como rocha ornamental. A presença de impurezas, geralmente origina as cores claras (cremes, rosas etc.); quando aparecem em proporções variadas fragmentos de quartzo, filosilicatos, hidróxidos de ferro e manganês, os calcários geralmente apresentam tons vermelhos. Calcários com sulfetos de ferro e matéria orgânica são de cores cinza e preta (Lopez *et al.*, 1996).

3.4.2 Composição química dos calcários

Sendo a calcita o carbonato mais comum, os principais constituintes químicos dos carbonatos são CaO e CO₂. Entre outros componentes químicos, o MgO é um dos mais frequentes e, quando surge com teores de 1 a 2%, já sugere a provável presença da dolomita. Entretanto, podem também ocorrer calcários com teores relativamente altos de Mg, que permanece fora da estrutura cristalina, constituindo então, a calcita magnésiana. A maioria dos calcários tem menos de 4% ou mais de 40% de MgCO₃, sendo mais raras as composições intermediárias.

Entre os resíduos insolúveis, o componente mais comum é a sílica, mais freqüente na forma de quartzo, sendo mais raros sulfetos (pirita), sulfatos (gipsita), apatita, hematita e magnetita.

CAPÍTULO 4 – PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS

Os mecanismos de degradação de materiais utilizados nas construções, tais como rochas, concretos e argamassas, são classificados em mecanismos físicos e químicos, incluindo os processos bioquímicos e biofísicos (Steiger, 2002). O intemperismo químico faz referência à dissolução ou alteração dos constituintes minerais dos materiais por reações químicas. O intemperismo físico inclui todos os processos que geram mudanças mecânicas sejam a escala microscópica, sejam na macroscópica. Há uma série de processos químicos e físicos que causam danificações nas rochas como desagregação granular, esfoliação, escamação e decaimento estrutural.

No estudo dos processos de alteração das rochas naturais, considera-se um conjunto de fatores que determinam o seu desenvolvimento, classificados em fatores intrínsecos, que dependem da natureza da rocha (resistência mecânica, porosidade, composição química etc.), e extrínsecos, aqueles que não estão relacionados com as características da rocha. Estes fatores extrínsecos podem ser fatores naturais, relacionados com parâmetros ambientais (chuva, direção do vento, contrastes de temperatura, poluentes atmosféricos etc.), ou fatores relacionados com atividade antrópica (procedimentos errôneos de restauração e instalação, intervenções inadequadas) e outros (Aires-Barros, 2001).

4.1 Fatores Intrínsecos

4.1.1 Composição mineral

O conhecimento da composição mineral da rocha é decisivo no entendimento dos padrões de alteração que aparentemente não estão relacionados com condições ambientais. Primeiro, os minerais não têm a mesma durabilidade face os processos de intemperismo. Por exemplo, a calcita é facilmente dissolvida em água, a diferença do quartzo que é muito mais inerte. A substituição de calcita por dolomita ou vice versa é importante considerando as mudanças na porosidade que este processo de substituição ocasiona. O decaimento pode estar também relacionado com a presença de minerais deletérios; assim, o abundante conteúdo na rocha de nódulos de pirita ou outros minerais alteráveis ou solúveis, tais como carbonatos de ferro, podem gerar formas de alteração que não são exclusivamente associadas a fatores climáticos ou à ação de agentes externos.

4.1.2 Porosidade

A porosidade (Aires-Barros, 2001) de uma rocha consiste na razão entre o volume de vazios (V_p) e o volume aparente de uma amostra representativa da rocha, ou seja, o seu volume total (V_t). Esta porosidade é devida à presença na rocha de cavidades, que segundo a sua forma e origem, se

classificam em poros e fissuras. Os poros são cavidades de forma irregular, aproximadamente equidimensionais. Podem ser meros interstícios entre cristais ou grupos de cristais. Estas cavidades comunicam entre si desempenhando papel relevante na permeabilidade da rocha. A sua origem pode ainda dever-se a abertura provocada por dissolução parcial do mosaico cristalino ou por fluidos ascendentes, hipogênicos ou ainda, por águas meteóricas.

As fissuras são vazios estreitos, com duas direções particularmente desenvolvidas em relação à terceira. Podem desenvolver-se inter ou intragranularmente. A sua gênese pré-supõe uma transferência de energia que pode ser fornecida à rocha por variações térmicas do ambiente (dilatações e contrações) com desenvolvimento de tensões internas. A gênese de uma fissura supõe a concentração de esforços em um ponto do agregado. Esta concentração produz-se geralmente, na vizinhança de defeitos presentes ao longo das juntas dos grãos ou no contato com impurezas (Aires-Barros, 2001).

A porosidade está estreitamente relacionada com o tamanho e distribuição do tamanho de grão (homogênea ou heterogênea); forma dos grãos e tipo de contato entre eles. Na discussão sobre porosidade devem distinguir-se dois termos: a porosidade aberta, que se refere aos vazios intercomunicantes e a porosidade fechada, que dá conta dos vazios fechados, isolados, não comunicantes entre si.

No estudo da alterabilidade de rochas, apenas a porosidade aberta tem importância de relevo, pois se refere aos vazios que facilitam a circulação dos fluidos (ar e água). Podem ser utilizados dois métodos gerais para a avaliação da porosidade aberta:

- a) Petrografia: neste método, após conveniente impregnação da rocha por produto corado com grande poder penetrante, faz-se análise modal micropetrográfica contabilizando todas as microdescontinuidades;
- b) Porosimetria: neste método emprega-se um porosímetro (comumente de mercúrio) avaliando-se o volume de mercúrio intrudido na amostra, equivalente ao ar extraído da amostra. Aqui se obtém a porosidade fazendo o quociente entre o volume de ar extraído da amostra e o seu volume aparente.

A porosidade absoluta, soma da porosidade aberta com a fechada, pode ser avaliada determinando os pesos específicos do pó e da amostra da rocha.

Na pesquisa da porosidade, independentemente dos seus valores absolutos, é muito importante para sua classificação também estabelecer as dimensões dos poros. Não existem limites dimensionais estritamente reconhecidos e definidos, mas pesquisas recentes (Angeli, 2207) indicam que podem se considerar mais eficazes nos processos de alteração os poros com dimensões maiores de 0,001 micra (μm). No entanto, poros menores que 0,001 μm , também intervêm na degradação da

rocha, devido à facilidade que apresentam para a entrada de vapor de água e uma série de outros gases diversos (Manganelli del Fà, 2002).

O Centro “CNR Opere d’Arte di Firenze” tem adotado uma classificação aceita pelas instituições de pesquisa em restauração de monumentos pétreos, que classifica os tipos de porosidade em microporosidade, mesoporosidade e macroporosidade (Tab. 1).

TABELA 1. Subdivisão das classes porosimétricas adotadas no Centro “CNR Opere d’Arte di Firenze.

Dimensão	Porosidade Total	Classe de Porosidade		
		Microporosidade	Mesoporosidade	Macroporosidade
Método de determinação		$r < 0,0037 \mu\text{m}$	$0,0037 \mu\text{m} < r < 150 \mu\text{m}$	$r > 150 \mu\text{m}$
	Picnómetro de hélio ou porosímetro de mercúrio	Porosímetro de Hélio	Porosímetro de mercúrio	Microscópio petrográfico

As rochas calcárias possuem porosidade muito variável, encontrando-se desde rochas não porosas até rochas com porosidade maior que 20%. A porosidade está controlada pela textura deposicional e pelos processos diagenéticos (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). Assim, as lamelas micríticas possuem uma alta porosidade devido à abundância de partículas de grão fino. Esta porosidade é reduzida por compactação. Em sedimentos calcários aloquímicos, a porosidade inicial é do tipo construcional, isto é, resultante do acomodamento das partículas durante o processo de deposição. Esta porosidade pode ser reduzida durante a diagênese por precipitação de cimento nos poros.

Além destes processos de redução da porosidade, há outros que a incrementam. Quando o material de natureza micrítica predomina na rocha, a circulação de água subterrânea doce através dos poros pode dissolver o carbonato de cálcio da matriz. Em rochas constituídas por aloquímicos, uma mudança similar de porosidade pode ocorrer, quando carapaças ricas em Mg ou carapaças aragoníticas são dissolvidas, dando lugar à formação de porosidade móldica. Também, incrustação de algas e organismos pode formar cavidades nas carapaças, conectando poros esqueléticos com poros construcionais. Este processo resulta na formação de poros *ink-bottle* os quais são importantes em relação à durabilidade da rocha (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). Nesta classe de poros, com forma de colo muito estreito, capilar, a água não pode entrar em forma líquida, mas somente em forma de vapor, o qual está sempre presente na atmosfera externa dos materiais lapídeos. Estes vapores podem sucessivamente condensar no interior dos poros, ocasionando assim uma ação prejudicial na rocha.

Justamente pela importância da porosidade como fator facilitador da degradação, faz-se necessário o conhecimento de parâmetros relacionados, como porosidade total, porosidade efetiva e o coeficiente de absorção, pois todos estes são fatores que permitem avaliar a capacidade de

“impregnação” e circulação dos fluidos na rocha. Ao nível macroscópico e microscópico é importante avaliar a densidade dos grãos (a relação porcentual da componente granular em relação aos componentes matriz+cimento+espaços vazios) e o índice de proximidade dos grãos (tipo e número de contatos entre os grãos) para a identificação da textura aberta ou compacta (Rosignoli, 1994).

4.1.3 Estratificação

A energia de fluxo do ambiente de depósito incide diretamente no tipo de estrutura sedimentar formada nos calcários. Assim, uma baixa energia de depósito, característica de águas calmas, permite o depósito de carbonatos de granulação fina. A estratificação resultante deste tipo de sedimentação consiste na sua maior parte de camadas com estratificação paralela. Os sedimentos de grão grosso, pelo contrário, são depositados por águas turbulentas, nas quais, com um adequado balanço de velocidade de corrente e tamanho de partícula, podem produzir outros tipos de estratificação como a estratificação cruzada.

A estratificação tem influência na durabilidade. Um exemplo típico acontece no Palazzo Strozzi, em Florença (Fig. 9), construído em arenito Pietraforte (arenito com matriz calcária), que apresenta estratificação convoluta. Este tipo de descontinuidade apresenta vários pontos de entrada e desta forma a circulação de água favorece a degradação da rocha. Nas proximidades desta laminação se verifica uma maior intensidade do processo de alteração, que se evidencia pelo ataque e dissolução do cimento carbonático, facilitando os processos de desagregação e arenização (Manganelli Del Fà, 2002). Um calcário maciço resulta, em geral, mais duradouro que um calcário laminado, e o padrão de degradação que ocorre nos calcários maciços, é muito diferente daquele apresentado por calcários com laminação paralela ou laminação cruzada.



FIGURA 9. Estratificação convoluta típica do arenito Pietraforte (arenito com matriz calcária). Palazzo Strozzi (Florença – Itália).

A alternância de camadas de rochas resistentes ao intemperismo com camadas não resistentes pode causar decaimento diferenciado tanto nos afloramentos quanto nas peças elaboradas com estas rochas (Fig. 10). O processo pode ser observado em arenitos ou calcários que apresentam intercalações com diferentes características de textura ou composição.

Estas alternâncias devem ser consideradas também nos processos de assentamento. Se a rocha é utilizada com as superfícies de laminação paralelas à superfície de ancoragem (por exemplo, nas paredes de um prédio), pode ocorrer a escamação das rochas segundo estes planos. Quando posicionadas com o plano de laminação horizontal, como acontece nos pisos, é possível a formação de alvéolos que tendem a se aprofundar com o passar do tempo. Em geral, considera-se que uma rocha sedimentar, seja arenito ou calcário, deve ser usada nas obras com a laminação ou estratificação normal à pressão que deve suportar.

A presença de estruturas como bioturbação também ocasiona diferenças face os processos de alteração; assim os calcários compactos de grão homogêneo apresentam maior durabilidade que os calcários bioturbados.



FIGURA 10. Alteração diferenciada ao longo do muro devido à intercalação de lâminas de argilito (depressões de relevo) com camadas finas de arenito. Fonte: Angeli, 2007.

Nos calcários bioclásticos a heterogeneidade é estabelecida pela existência de grandes fósseis. Geralmente os fósseis são mais resistentes que a matriz carbonática circundante, originando pelos processos de degradação relevos que se destacam da superfície da rocha deixando em seu lugar cavidades de notáveis dimensões que favorecerão a degradação ulterior (Fig. 11). No interior destas cavidades poderão acumular-se, por ação do vento, partículas destacadas da mesma rocha, dando

lugar a um fenômeno de corrosão que tende com o tempo a alargar e aprofundar as cavidades (Del Monte, 2006).



FIGURA 11. Geração de relevos e cavidades devido a diferenças de resistência entre matriz carbonática e fragmentos bioclásticos. Base da escultura de Girolamo Savoranola (Ferrara – Itália)

4.1.4 Estilólitos

Os estilólitos são estruturas produzidas por dissolução da calcita por pressão ao longo dos planos de estratificação. Considera-se que heterogeneidades no estrato rochoso causam pressões verticais desiguais em pontos adjacentes por cima e por baixo da superfície do estilólito. Esta superfície freqüentemente tem uma película de material argiloso, o qual é considerado como o resíduo insolúvel resultante do processo de dissolução e remoção do carbonato de cálcio (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

Chapas de calcário com estilólitos são usados freqüentemente em revestimentos internos devido ao padrão estético que estas estruturas imprimem nos materiais acabados. Porém, quando usados em revestimentos externos, a presença dos estilólitos constitui-se em um fator que facilita a migração dos fluídos no seu interior, deteriorando e chegando a destruir a rocha, especialmente se o ambiente está submetido a mudanças bruscas de temperatura.

Os fatores anteriormente mencionados condicionam as chamadas propriedades hídricas das rochas, fundamentais para compreender os mecanismos de degradação. Estas propriedades são a dinâmica da circulação de fluídos e a dilatação hídrica.

4.1.5 Dinâmica de circulação de fluídos

As propriedades hídricas das rochas são parâmetros decisivos para valorar a durabilidade da rocha. A água é a maior fonte de alteração porque transporta os poluentes para o interior do arranjo

poroso e a sua cinética de secagem determina a localização da cristalização (Del Monte, 2006; Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Angeli, 2007). Geralmente rochas com baixa ascensão capilar são menos sensíveis ao decaimento porque a água pode apenas entrar na rede porosa. Rochas com alto fluxo capilar são mais sensíveis, seja ao decaimento por cristalização de sais (por apresentar alta cinética de evaporação com saturação residual baixa) ou ao decaimento causado por processos de congelamento-degelo (baixa cinética de evaporação com alta saturação residual).

4.1.6 Dilatação hídrica

Algumas rochas são muito sensíveis ao fluxo de água pura através da rede porosa. Rochas sedimentares que contêm pequenos níveis de argilas higroscópicas (ex. esmectitas) podem ser mais susceptíveis a este processo (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). Quando as argilas se expandem em qualquer direção devido à assimilação de água, podem facilmente criar tensões interiores que causam esfoliação ao longo dos planos de acamamento. A repetição de ciclos de embebição-secagem com água pura pode causar também o enfraquecimento na interface água-ar, possibilitando a descamação das rochas susceptíveis a este processo.

4.2 Fatores Extrínsecos

4.2.1 Condições ambientais

Os processos de alteração incluem processos como a ação química do ar e da chuva ácida e a ação mecânica da água, onde queira que as rochas se encontrem expostas à atmosfera, ocorrendo alteração com formação de novos produtos ou desintegração da rocha em fragmentos (Frasca, 2003).

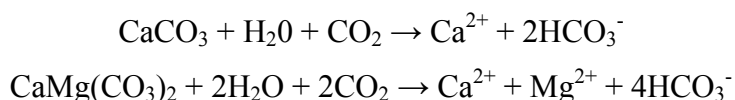
A poluição atmosférica, nas regiões urbanas, tem aumentado devido à crescente atividade industrial e ao aumento do número de veículos motorizados em circulação. A qualidade do ar urbano tem causado sérios problemas de deterioração em rochas tanto de prédios novos quanto de monumentos antigos, que têm sido seriamente danificados pelas substâncias nocivas presentes no ar (Frasca, 2003). A poluição do ar resulta de uma transferência de quantidades nocivas de materiais sintéticos e naturais na atmosfera, como consequência direta ou indireta da atividade humana (Kumpchella & Hylland, 1992 *apud* Frasca, 2003).

Elevadas concentrações de poluentes advindos de atividades industriais e do processo de descarga da combustão de veículos automotores, partículas sólidas em suspensão, gotículas de óleo expelidas pelos motores, altas concentrações de CO, CO₂ e SO₂ e compostos de F e Cl são algumas das causas da baixa qualidade do ar. Estes poluentes provêm de várias fontes, algumas emitidas

diretamente de veículos automotores e atividade industrial, outras formadas indiretamente por meio de reações fotoquímicas no ar.

Os poluentes podem ser encontrados 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. O ar normal contém aproximadamente 78% de N₂ e 21% de O₂; o restante é constituído de argônio, dióxido de carbono e traços de gases.

As rochas calcárias são constituídas pelos minerais calcita CaCO₃ e dolomita (CaMg(CO₃)₂). Em ambientes naturais, o dióxido de carbono é o único gás que reage com estes minerais. Quando a rocha está submetida a ambientes poluídos, os minerais carbonáticos são dissolvidos na chuva ácida rica em dióxido de carbono, segundo as seguintes reações:



Os íons cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e bicarbonato (HCO₃⁻) são lixiviados, causando a erosão superficial da rocha em um curto período de tempo.

A partir da segunda metade do século XIX, quando começou a era da industrialização, e especialmente depois da segunda guerra mundial, os mecanismos de deterioração das rochas carbonáticas têm aumentado de forma muito acelerada. Isto é devido ao incremento do uso de combustíveis fósseis como o carvão e os derivados do petróleo, os quais contêm minerais como a pirita (FeS₂). A combustão dos sulfetos produz dióxido de enxofre (SO₂), o qual é fortemente reativo com os minerais carbonáticos. Além disso, como resultado da combustão a altas temperaturas, o nitrogênio atmosférico é convertido em dióxido de nitrogênio (NO₂), o qual também é fortemente reativo. Como resultado das reações do SO₂ e o NO₂, os monumentos feitos de rochas calcárias que têm sobrevivido por milênios expostos ao meio ambiente, têm experimentado processos intensos de deterioração no último século (Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Del Monte, 2006).

Antes da influência dos poluentes em países industrializados, o único composto ativo era o dióxido de carbono (CO₂). Porém, o CO₂ só pode reagir com as rochas quando está dissolvido na água. Então, este gás tem um mínimo efeito em objetos protegidos da chuva, mas eles são atacados pela deposição seca de SO₂ e NO₂. Superfícies não protegidas da umidade podem experimentar dissolução em ambientes de chuva ácida, sendo a taxa de dissolução incrementada devido ao baixo pH de cerca de 4 para as chuvas ácidas, comparada com o pH de 5,6 da chuva normal.

4.2.1.1 Efeito da Deposição Seca de SO₂ e NO₂

Na atmosfera contaminada, o ar apresenta dispersão coloidal de partículas sólidas e líquidas em uma mistura de gases. As partículas sólidas ou “fly ash” são especialmente esferas carbonosas, ou seja, constituídas por carvão, com estrutura rica em cavidades, de baixo peso específico, muito porosas e que contém SO₂ nos poros, além de muitas partículas metálicas. Sua cor é negra e apresentam dimensões que variam desde sub-micrônicas até aquelas com diâmetro máximo de 60-70 microns, sendo 6-8µm a média do diâmetro (Del Monte, 2006, Del Monte et.al., 1984). Estas partículas experimentam reações ácidas contendo ácido sulfúrico e assim seu efeito não se limita a enegrecer a superfície, mas também a corroê-la.

São numerosas as substâncias gasosas sejam orgânicas ou inorgânicas. As substâncias inorgânicas são aquelas que mais danos causam na estrutura da rocha. As principais são o dióxido de enxofre (SO₂) e o óxido de azoto (NO_x). O primeiro encontra-se na atmosfera como produto da queima de combustíveis. O segundo ao contrário deriva da oxidação do azoto (N₂), que é o principal constituinte do ar limpo (78,08% em volume).

Os gases contaminantes e as partículas podem reagir com a superfície da rocha e, neste caso, ocorre a chamada deposição seca ácida. O SO₂ e o NO_x, por meio de diversas reações de oxidação e combinação com gotículas de água de chuva ou mesmo de névoa, transformam-se em ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido nítrico (HNO₃), dois dos mais potentes ácidos inorgânicos. Essa nevoa ácida é também extremamente agressiva e age a nível local. As gotículas acidificadas podem entrar nas nuvens, e por meio dos movimentos da atmosfera, podem ser transportadas a longas distâncias, dando lugar ao fenômeno da chuva ácida. A deposição ácida, seca e oculta conduz à “acidificação do ambiente” (Frasca, 2003).

Como se mencionou, a má qualidade do ar ocasiona dois efeitos diferentes nas rochas ornamentais. O primeiro é o enegrecimento da superfície, que pode se transformar com o tempo nas crostas negras. A crosta negra representa uma acumulação de partículas, de origem antrópica (sobretudo carbonosas da combustão) ou de origem natural (provenientes dos processos erosivos e de transporte de material pulverulento). O segundo efeito é a corrosão superficial da rocha compacta e a desagregação ou arenização da rocha (Del Monte, 2006).

Quando estão protegidas da chuva, as rochas carbonáticas reagem com SO₂, NO₂ e aerossóis ácidos produzindo as crostas, constituídas de gipso (CaSO₄.2H₂O). Depois de exposições prolongadas, as crostas experimentam um processo de esfoliação causando remoção dos produtos da reação, bem como de camadas de rocha, de pequena espessura (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

As crostas são de cor negra ou marrom devido à natureza carbonosa das partículas constituintes. Estas partículas carbonosas, como antes mencionado, são muito porosas e contêm SO₂

nos poros, além de muitas partículas metálicas que são depositadas pela poeira urbana podendo servir de catalisadores nos processos de oxidação do SO_2 a SO_3 , facilitando assim, o processo de formação das crostas (Del Monte, 2006).

Até meados da década de 80, a atmosfera apresentava uma menor concentração de SO_2 em relação à concentração de NO_2 . As crostas negras estavam constituídas quase em sua totalidade por gesso. As crostas modernas estão constituídas de gesso e de nitrocalcita ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), sendo o gesso o mineral predominante. As crostas em rochas expostas de ambientes externos apresentam deficiência de nitrocalcita, devido à sua solubilidade e ao fato desta substância ser usada no processo de oxidação de SO_2 para SO_3 , o qual por sua vez facilita as reações de sulfatação.

As deteriorações observadas em monumentos construídos de calcários e mármore são diretamente relacionadas à ação da água de chuva sobre a superfície, mostrando uma alternância entre zonas brancas e negras. As zonas brancas aparecem onde o processo de lavagem por água de chuva predomina sobre a acumulação de partículas. Nestas áreas predomina o processo de dissolução dos carbonatos constituintes da rocha. As zonas negras aparecem em zonas umedecidas pela ação da água, mas protegidas da ação constante da chuva, permitindo a acumulação de poluentes atmosféricos, assim como dos produtos de reação entre a rocha e os gases e aerossóis atmosféricos (Sabbioni, 2003).

Aparentemente, a zona branca seria a área melhor preservada por ser constantemente lavada com remoção dos particulados acumulados. Porém, é justamente o contrário. A água de chuva não se limita a remover as partículas depositadas, mas corrói lentamente a superfície do calcário sobre o qual escorre. As áreas negras são aquelas não sujeitas à ação da água de chuva. Aqui, as partículas procedentes da combustão de carvão ou de derivados do petróleo, interagem com a rocha por meio de uma reação química que implica a transformação do carbonato de cálcio do substrato em sulfato de cálcio bihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou gesso.

Quando o calcário é compacto, a transformação alcança uma espessura de poucas dezenas, ou no máximo, algumas centenas de microns. Em um primeiro momento, a superfície se “areniza”. Com o passar do tempo, a película negra se transforma em uma verdadeira crosta negra, a qual, em um ambiente de alta poluição ambiental, pode alcançar uma espessura de alguns milímetros ou até centímetros (Del Monte, 2006).

O processo de sulfatação, isto é, a transformação do carbonato de cálcio em gesso, pode ocorrer por dois tipos principais de reações (Sabbioni, 2003):

- O SO_2 é adsorvido pela rocha e reage com o carbonato de cálcio e água para formar sulfito de cálcio como produto intermediário, o qual é rapidamente transformado em gesso;

- O SO₂ pode também transformar-se em ácido sulfúrico (H₂SO₄), diretamente no ar, e logo este ácido ataca os carbonatos conduzindo à produção de crostas de gesso.

Em relação ao carbono presente em níveis deteriorados em monumentos construídos em calcários, se considera que tem quatro origens possíveis:

- Carbonato de cálcio, derivado exclusivamente da rocha (Zappia et al., 1993);
- Deposição de partículas atmosféricas contendo carbono elementar e orgânico, como poluentes primários e secundários (Saiz-Jiménez, 1993; Turpin & Huntizcker, 1995);
- Meteorização biológica devida à ação de microrganismos como fungos e líquens, os quais são grandes produtores de ácido oxálico, o qual reage com o material rochoso, levando à produção de oxalatos de cálcio (Sabbioni & Zappia, 1992; Saiz-Jiménez, 1995);
- Tratamentos superficiais (azeites, ceras, proteínas etc.) freqüentemente usados no passado para a proteção de monumentos e edifícios históricos (Rossi Manaresi, 1996).

O carbono total (C_t) presente nas crostas negras pode se considerar como constituído de duas frações:

$$C_t = C_c + C_{nc},$$

$$\text{Com } C_{nc}, \text{ composto por: } C_{nc} = C_e + C_o$$

Onde C_c é o carbono carbonático, basicamente devido à rocha, e C_{nc} é o carbono não carbonático, o qual inclui o carbono orgânico C_o de origem biogênica e antropogênica e o carbono elementar C_e produzido predominantemente nos processos de combustão. Medidas realizadas em crostas negras em monumentos de Bolonha e Roma permitiram determinar um predomínio do carbono não carbonático (90% do C_t), do qual 40% é formado por carbono elementar (C_e). A fração orgânica remanescente é composta de oxalatos e outros componentes orgânicos como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e etil-ésteres, cujas fontes são antropogênicas típicas de áreas urbanas, como exaustores de veículos, combustão industrial e sistemas de calefação (Sabbioni, 2003).

Amostragem realizada em crostas negras de diversos monumentos em calcário tem permitido determinar a existência de um número significativo de metais (Tab. 2).

TABELA 2. Concentração média (ppm) de metais pesados medidos em crostas negras de monumentos pétreos em diferentes cidades. (Fonte: Sabionni, 2003).

Mármore e calcário	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
Milão	72	236	18796	13	50	258	883
Veneza	29	58	3779	38	11	59	123
Roma	44	133	8061	22	195	118	532
Bologna	58	113	14090	<10	49	177	427
Eleusis	20	200	9000	40	40	300	300

4.2.2 Fatores associados às técnicas de aplicação

4.2.2.1 Incompatibilidade entre rochas ou argamassas usadas nos processos de restauração

No caso de instalação de rochas com características diferentes em obras civis ou em processos de restauração (substituição de peças), pode-se originar um processo diferenciado de alteração. Quando os materiais são escolhidos erroneamente, pode acontecer alteração acelerada em um dos tipos de rochas em contato (Beck, 2006) (Fig. 12).

Este processo de deterioração acontece geralmente pela incompatibilidade nas propriedades hídricas das duas rochas. Quando o avanço capilar é muito mais rápido em uma rocha que em outra, este fato interrompe a continuidade capilar na construção, ocasionando a acumulação de água na rocha com maior capilaridade, a qual geralmente experimenta uma aceleração no processo de decaimento (Beck, 2006). Este decaimento pode ser também causado pela escolha inapropriada de material de rejunte das peças de rochas (argamassas). Se o material eleito apresenta propriedades capilares muito diferentes, ocorre o mesmo problema do uso de rochas incompatíveis ou de propriedades capilares diferentes. Daí a importância da seleção de rochas ou argamassas que apresentem propriedades semelhantes para prevenir o destacamento das rochas e assim garantir a durabilidade nas construções.



FIGURA 12. Deterioração diferenciada por escolha errada de materiais no processo de restauração. As rochas apresentam diferenças nas propriedades hídricas, que aceleram a degradação das mais antigas e ainda das novas. Fonte: Angeli, 2007.

4.2.2.2 Localização das peças de rocha nas construções

Este aspecto é determinante na durabilidade das rochas. Geralmente nas construções não são utilizadas rochas de um tipo somente. Assim, por exemplo, rochas com baixa absorção capilar são

escolhidas para a construção de bases ou colunas, enquanto que a construção de detalhes ornamentais pode ser feita com qualquer rocha indistintamente. A durabilidade de um mesmo tipo de rocha pode ser diferente, em função da sua localização na construção (ambiente externo ou interno, altura na construção etc.) e a sua exposição às condições climáticas (vento, chuva, sol) (Fig. 13). As eflorescências, por exemplo, ocorrem somente nas partes baixas das construções que são alcançadas por ascensão capilar, enquanto que as sub-eflorescências que causam no mesmo prédio ou monumento processos de deterioração como desintegração granular, ocorrem justamente acima do limite de ascensão capilar.

As rochas podem também sofrer os efeitos de cargas mecânicas relacionadas com o peso que a rocha deve suportar por ancoragem usada para a sustentação da rocha. Isto causa fraturas paralelas à direção de carga. As zonas que estão mais expostas a este tipo de danos são aquelas onde um peso elevado é concentrado em pequenas partes.

4.2.3 Intervenção antrópica

Os efeitos da ação antrópica nas rochas usadas em monumentos e na construção civil são de grande interesse na avaliação dos processos de deterioração. Por exemplo, as rochas usadas no revestimento de pavimentos exteriores são gradualmente deterioradas pelo tráfego de pedestres, enquanto que muitas rochas usadas em revestimento de paredes em monumentos aparecem danificadas por riscaduras ou pichações, especialmente quando os monumentos são construídos em rochas macias como calcários ou arenitos com matriz argilosa (Ponce, 2003).

Processos inadequados de restauração trazem também danos às rochas, geralmente pela escolha de argamassas para assentamento, feitas de materiais incompatíveis com a rocha. A interação da rocha com os materiais inadequadamente selecionados gera problemas como erosão diferencial, mas também efeitos mais graves como escamação severa ou desintegração quando os cimentos são usados para fixação superficial das rochas.



FIGURA 13. Uso do mesmo tipo de calcário em locais diferentes, gerando-se processos diferenciados de degradação, intenso por exposição permanente à corrente de água (A) e insignificante quando usado em muros internos (B).

4.3 Formas de deterioração nas rochas calcárias

4.3.1 Formação de manchas

A formação de manchas é um tipo freqüente de alteração, especialmente nos calcários que possuem minerais ricos em ferro como sulfetos e óxidos. A formação de manchas é facilitada pelo processo de migração de fluidos e acontece especialmente nas rochas usadas como revestimentos externos (Fig. 14A).

4.3.2 Eflorescências

As eflorescências são cristais de sais que se formam na superfície dos materiais pétreos por evaporação. Os sais mais comumente encontrados nas eflorescências (Goudie & Viles, 1997) são cloretos (NaCl, KCl), sulfatos (Na₂SO₄, MgSO₄, CaSO₄), carbonatos (CaCO₃, MgCO₃) ou nitratos (KNO₃, NaNO₃). A formação de eflorescências está diretamente relacionada com a ascensão capilar e não pode ocorrer em construções onde este fluxo é limitado por rochas com baixa capilaridade, ou bloqueadas por barreiras anticapilares (por exemplo, argilas).

As eflorescências têm aspecto de manchas de cor branca acinzentada na superfície das rochas, freqüentemente na parte mais baixa dos prédios, justamente por cima da margem capilar. Estas aparecem somente quando a cristalização de sais solúveis ocorre na superfície das rochas, devido a que o fornecimento de sal por absorção capilar é maior que a evaporação (Del Monte, 2006). Podem ser encontradas em vários tipos de rochas, mas são bem mais freqüentes em rochas porosas com rápido fluxo capilar. São encontradas tanto no interior quanto no exterior dos prédios, não sendo limitadas às fachadas, mas atingindo outras estruturas como escadas e pisos (Fig. 14B).

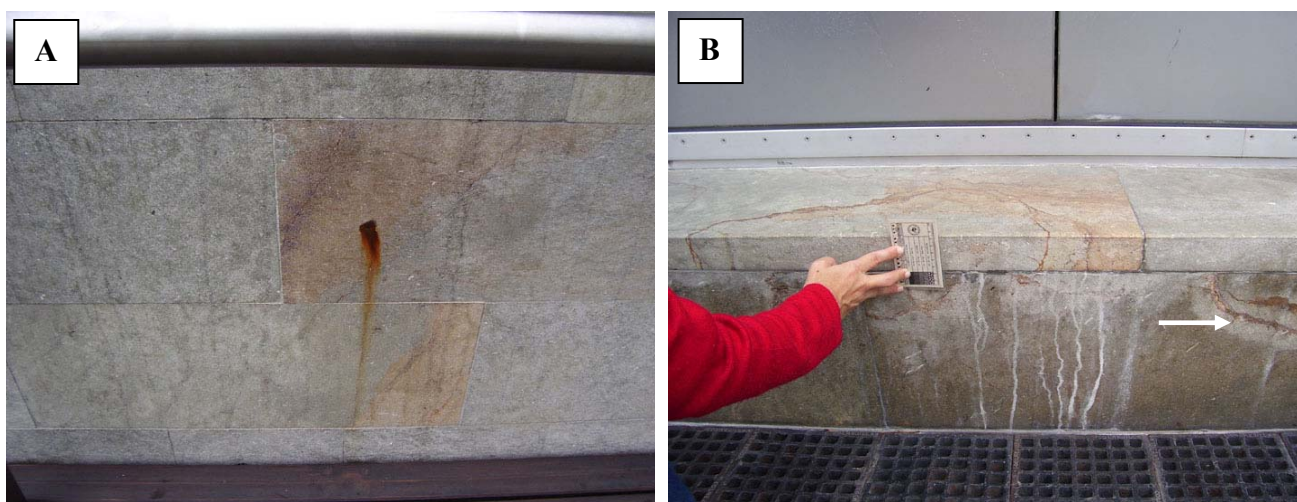


FIGURA 14. Formação de manchas em muro exterior (A) e de eflorescências salinas (B) em espelho de degrau nas escadas exteriores do *Centro de Convenciones* (Medellín). Calcário Royal Veta.

4.3.3 Arenização e alveolização

A arenização, também conhecida como desintegração granular, é o estado avançado de perda de coesão, caracterizado pelo destacamento de grânulos ou de cristais à menor solicitação mecânica; está acompanhada de uma sensível deterioração das características mecânicas originais e de um notável aumento da porosidade.

A desintegração granular ou arenização ocorre em lugares úmidos onde a rocha não é lavada pela chuva ou por fluxo de água na superfície. Neste caso sais solúveis cristalizam perto da superfície e causam o desprendimento de grãos (Fig 15A). Este tipo de erosão pode causar a perda de vários centímetros de rocha em superfícies expostas.

A alveolização (Fig. 15B) é um caso especial de desintegração granular. Acontece quando a erosão dos grãos ocorre diferencialmente na superfície da rocha. Os alvéolos são nucleados por zonas de fraqueza na rocha, como planos de acamamento. Uma vez formado o alvéolo, as modificações induzidas pela evaporação podem causar o decaimento nestes locais.

4.3.4 Esfoliação e lascagem

A esfoliação (Fig. 15B) é uma forma de degradação que se manifesta com um levantamento seguido por destacamento, de uma ou mais camadas superficiais finas, paralelas entre si, ditas folhas. Cada folha tem uma espessura uniforme, geralmente da ordem dos poucos milímetros. São constituídas quer por material aparentemente íntegro, quer por material alterado. A lascagem (Fig. 15B), se manifesta pelo destacamento total ou parcial de partes, lascas, freqüentemente conforme soluções de continuidade, no material original. As lascas têm formas e espessuras irregulares e dimensões variáveis, apresentando, de preferência, texturas mais maciças e compactas ao longo das bordas e em relação com estas. São constituídas geralmente por materiais com aparência inalterada. Por baixo delas podem existir eflorescências e microrganismos.

Nas zonas onde a evaporação é mais rápida do que o fluxo capilar, na parte superior dos prédios, por exemplo, a solução salina não migra com a velocidade suficiente para sair na forma dissolvida e cristalizar na superfície antes de evaporar. A evaporação e por tanto a cristalização de sais, acontece dentro do arranjo poroso, gerando tensões que podem ser prejudiciais para a rocha. Esta cristalização interna causa fraturas debaixo da superfície, e a perda de materiais em escamas de diferentes espessuras.

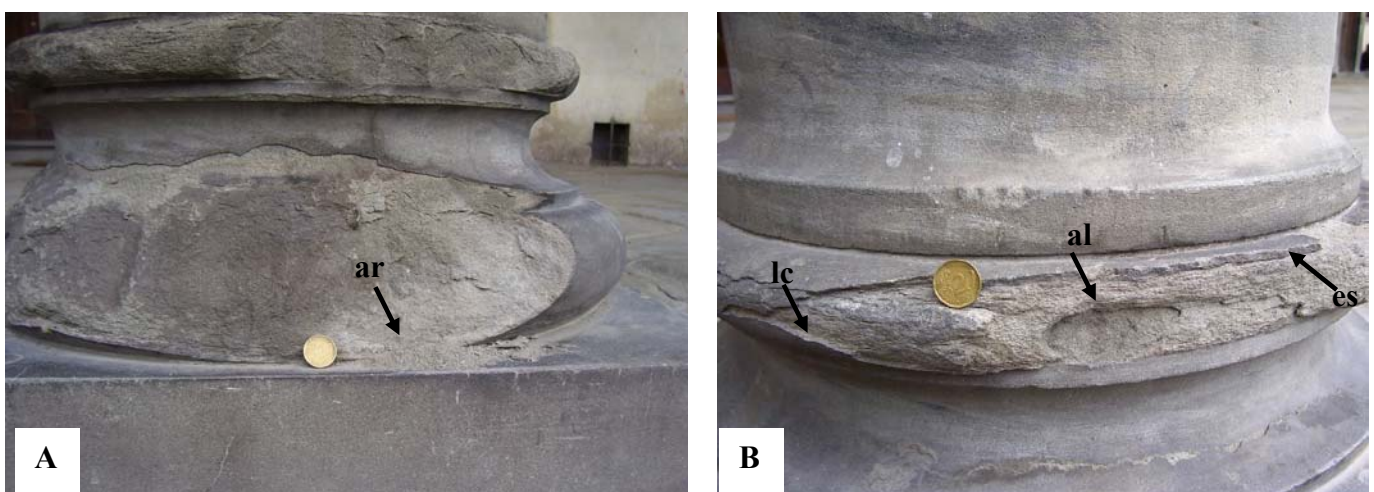


FIGURA 15. Perda de massa por patologias em rochas calcárias. (A) arenização (ar). (B) Alveolização (al), lascagem (lc) e esfoliação (ES) nas bases das colunas do prédio do Museu Marino Marini (Florença-Itália). Calcarenito Pietraforte ou *Pietra Serena*.

4.3.5 Fissuração e Fraturamento

A fissura é a degradação que se manifesta pela formação de aberturas na rocha, com espaçamento reduzido, que nem sempre atingem os limites dos corpos considerados. A fratura é por sua vez, uma abertura com dimensões maiores do que as fissuras, podendo implicar o afastamento recíproco das partes fraturadas. A superfície de rotura divide o corpo considerado em partes distintas. Os dois processos podem acontecer isoladamente ou estar associados (Fig. 16A).

4.3.6 Depósitos superficiais ou sujeiras

Acumulações de materiais estranhos de natureza diversa, tais como poeiras, microrganismos, etc. Têm espessuras variáveis, geralmente com escassa coesão e aderência ao material subjacente. Além do efeito estético, a formação desses depósitos pode ter influência nas propriedades hidráulicas da rocha, pois a fraca tensão superficial das partículas pode incrementar a hidrofobia da rocha e, por tanto, a impermeabilidade da mesma.

4.3.7 Crostas Negras

Estas crostas são o produto das transformações superficiais da rocha, visivelmente distinguíveis das partes subjacentes pelas suas características morfológicas e, freqüentemente, pela sua cor. A sua natureza química e mineralógica e as suas características físicas são, na totalidade ou em parte, diferentes das do material do que deriva e do qual se pode destacar. Podem ser encontradas em partes de monumentos ou esculturas isoladas do fluxo de água (por exemplo, partes internas ou partes baixas das estatuas).

A espessura das crostas pode chegar a 3cm. Mesmo sendo o gesso translúcido, a cor preta (Fig. 16B) é devida às partículas presentes na atmosfera devido à atividade humana e industrial (cinzas, hollín). A cristalização do gesso causa danificações à superfície da rocha. Esta cristalização cria uma interface frágil entre o gesso e a parte inerte da rocha, onde está presente, tanto a calcita quanto o gesso (Jeanette 1994; Gauri 1999). Esta zona frágil age como uma descontinuidade mecânica e as crostas se destacam periodicamente da rocha formando um mosaico preto e branco.

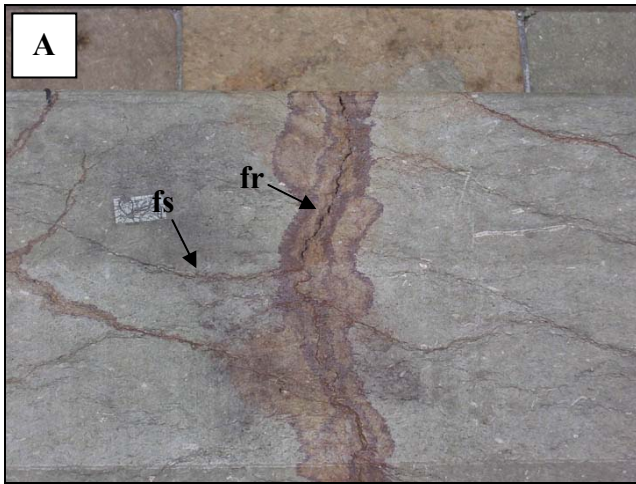


FIGURA 16. Patologias em rochas calcárias. (A) Desenvolvimento de fissuras (fs) e fraturas (fr) conectadas em calcário usado como piso externo. (B) Crostas negras (cr) desenvolvidas nas áreas protegidas da lavagem por chuva, estátua de Girolamo Savonarola (Ferrara).

CAPÍTULO 5 – CONTEXTO GEOLÓGICO E PROCESSOS DE LAVRA, BENEFICIAMENTO E USO DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO “LA TAMPA”

5.1 Localização

A área de lavra dos calcários da Formação La Tampa, localiza-se cerca de 10 km ao sul da cidade de Montería, capital do Departamento de Córdoba, região caribe da República da Colômbia. O Departamento de Córdoba está localizado entre os 7°, 23' e 9°, 26' de latitude Norte e os 74°, 52' e 76°, 32' de longitude ao Oeste de Greenwich (Fig. 17). Sua extensão territorial é de 25.020 km². Limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, a leste com os departamentos de Sucre e Antioquia e ao sul e para o oeste com o departamento de Antioquia.

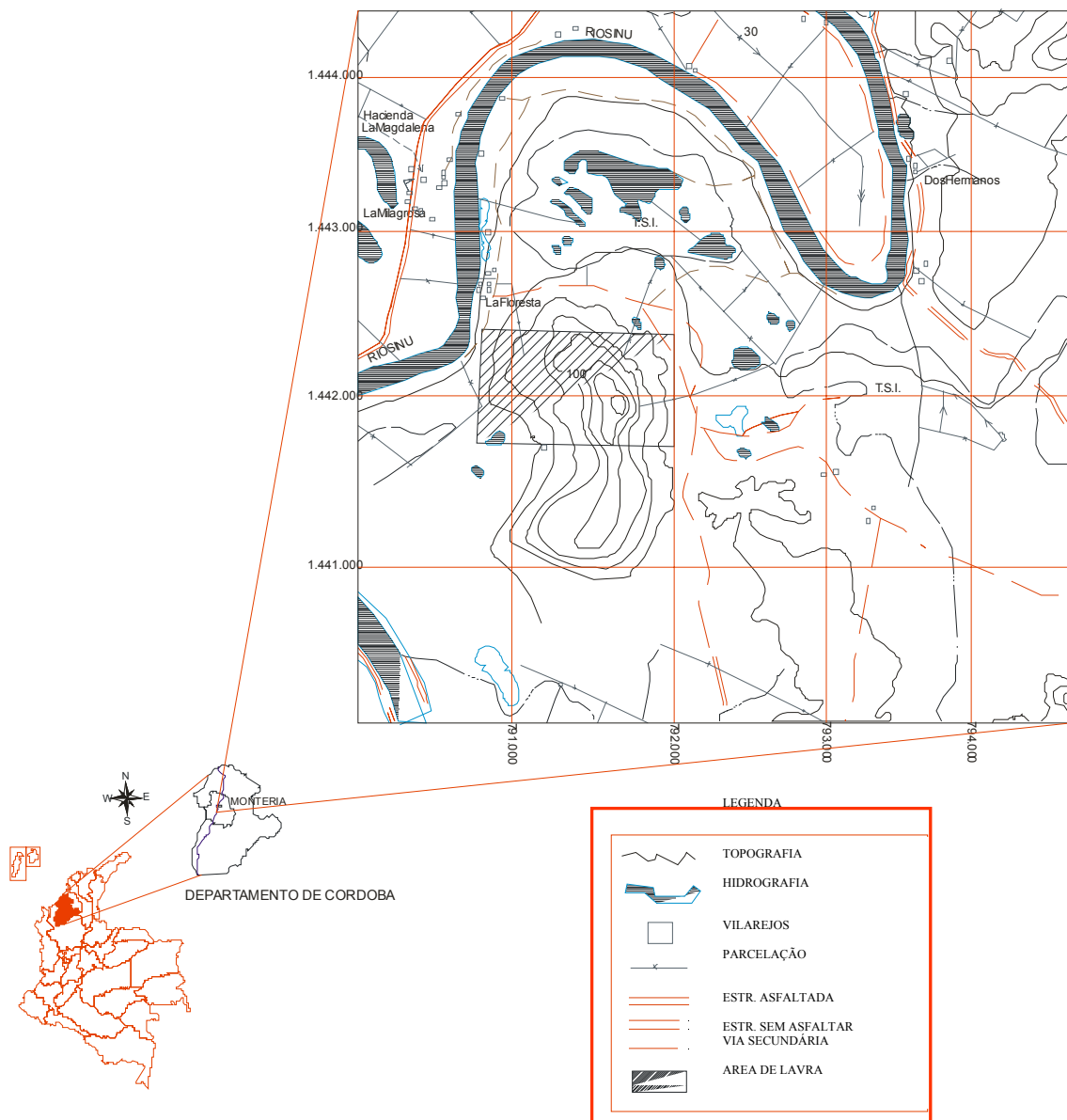


FIGURA 17. Localização geográfica da área de lavra no Departamento de Córdoba. Escala aproximada 1:435.000.

A extração dos calcários ocorre em duas frentes de lavra distribuídas por uma área de 7,4km² aproximadamente, delimitadas por um polígono formado pelas seguintes coordenadas (origem das coordenadas: Pacífico Colombiano):

Norte: 1.441.737,45 e 1.442.387,45; Leste: 790.883,00 e 792.033,00

O acesso à área de lavra é feito por meio de estrada de terra, que parte da via principal asfaltada, que liga as cidades de Montería e Sincelejo. O calcário é extraído e beneficiado pela empresa “Canteras de los Andes”. Devido à proximidade do porto de carga marítima de “Cartagena de Índias”, uma boa parte da produção é comercializada em mercados internacionais da América do Norte, América Central e Europa.

Para os processos de extração são utilizados os recursos hídricos do rio Sinú (Fig. 18), um dos mais importantes rios do litoral Caribe da República da Colômbia, que também provê a água necessária para o processo de beneficiamento na planta de transformação e benefício dos materiais, localizada no perímetro urbano da cidade de Montería.



FIGURA 18. Características da área de lavra. À esquerda, vista geral da área de lavra de calcário da empresa “Cantera de los Andes”. À direita, imagem do rio Sinú, que fornece a água necessária para os processos de lavra e beneficiamento.

Os materiais produzidos e beneficiados pela empresa “Canteras de los Andes” provenientes dos calcários da Formação La Tampa, são conhecidos no mercado colombiano e internacional com os nomes Royal Verde (RV), Royal Dorado (RD), Royal Bronze (RB) e Royal Veta (RVT). Após o processo de extração, os calcários são submetidos a processos de beneficiamento que permitem a obtenção de acabamentos variados, para uso em pisos, revestimentos interiores e exteriores de prédios, escadas, ladrilhos e ainda para a confecção de elementos decorativos e artesanais.

5.2 Contexto Geológico Regional

As unidades de rocha que afloram no Departamento de Córdoba fazem parte dos Cinturões Terciários do noroeste colombiano, do extremo setentrional da Cadeia Andina centro-ocidental e da Bacia de Urabá. A sua evolução esteve controlada pelos diferentes ciclos sedimentológicos e por seus estilos estruturais que imprimiram em cada um deles características diferentes, o que permite separá-los em dois grandes grupos, os cinturões Sinú e São Jacinto.

Para o sul do departamento, as unidades litológicas pertencem ao extremo setentrional da Cordilheira Ocidental e seu limite com a Cordilheira Central, separadas entre si pelo extremo oeste do Sistema de Falhas Romeral, denominado de Falha Cauca-Almaguer. A Cordilheira Ocidental é constituída por rochas vulcânicas de afinidade oceânica, enquanto que a Cordilheira Central está constituída por um complexo polimetamórfico intrudido por stocks gabróides.

A parte oeste do Departamento de Córdoba limita com a Bacia de Urabá e faz parte do Bloco Chocó (Duque, 1984b, 1990), caracterizado por rochas sedimentares marinhas do Oligoceno até o Plioceno, especialmente argilitos e arenitos, e depósitos aluviais do Quaternário (Rojas, 1968).

A seguir será apresentada uma rápida síntese acerca das unidades geotectônicas do Departamento de Córdoba (Fig. 19).

5.2.1 Bacia de Urabá

Encontra-se localizada no Golfo de Urabá, na parte oeste da “Serrania de Abibe” e no flanco oeste da Cordilheira Ocidental, para o Rio Atrato. Está separada do “Cinturão Sinú” pela Falha de Uramita.

5.2.2 Cordilheira Ocidental

Esta cordilheira constitui a ramificação ocidental da cadeia Andina no seu extremo setentrional. No seu extremo norte divide-se em três ramais denominados Serranias de Abibe, São Jerônimo e Ayapel. Para oeste limita-se com as Bacias de Atrato e Urabá e para leste com a Cordilheira Central, ao longo do Vale do rio Cauca.

Litologicamente está constituída no seu extremo norte por rochas cretáceas vulcânicas e vulcano-sedimentares, que constituem parte do embasamento das bacias sedimentares do Caribe Colombiano.

5.2.3 Cordilheira Central

Está constituída por rochas metamórficas com evidências texturais, mineralógicas e geocronológicas de vários eventos metamórficos e cujos afloramentos mais setentrionais encontram-se no limite com o Departamento de Antioquia.

5.2.4 Cinturão Sinú

Esta unidade estrutural está localizada à leste do Bloco Choco (Duque, 1990) em seu extremo oriental. Compreende os anticlinórios de Abibe-Las Palomas e Turbaco na zona continental e a

plataforma e talude continentais da área “*off shore*”. Segundo Duque (1980), para leste está limitado do Cinturão de São Jacinto pelo Lineamento del Sinú.

Geograficamente este cinturão compreende a Bacia do rio Sinú, no Anticlinório de Abibe-Las Palomas, até a linha de costa no departamento de Córdoba e estende-se para o norte formando o Anticlinório de Turbaco.

5.2.5 Cinturão de San Jacinto

Definido por Duque (1979), esta unidade está limitada para oeste e para leste pelos lineamentos estruturais de Romeral e Sinú, respectivamente. Está constituída por uma faixa sedimentar dobrada e falhada como parte de um prisma de acrecionamento, resultado da convergência entre as placas Caribe e Sul-americana (Duque, 1984a; Totto & Kellog, 1992). As falhas principais têm direção N-S e são falhas de empurrão com vergência para o Oeste. No entanto, falhas de rumo N-NE apresentam deslocamentos sinistrais (Ingeominas - Ecopetrol, 1994).

A Formação La Tampa (Duque et.al., 1983), onde se encontram os calcários, objeto desta pesquisa, é constituída por uma seqüência de siltitos quartzosos e calcários compactos que afloram na estrada que interliga as cidades de Montería e Planeta Rica. É uma seqüência de camadas delgadas de calcários compactos de cor cinza e siltitos silícicos com estratificação plano-paralela (Ingeominas-Ecopetrol, 1994), muito intemperizadas e fraturadas. Para o sul, entre os vilarejos de Santa Isabel e Las Palomas, afloram calcários de cor branco-amarelada fossilíferos com macro e micro-fósseis calcários em uma matriz micrítica com glauconita. Esta unidade é sobreposta à Formação San Cayetano e soto-posta à Formação Ciénaga de Oro, sendo os contatos discordantes com as duas unidades (Fig. 20 e 21). Com base na população de foraminíferos A Formação La Tampa tem sido considerada de idade Eoceno Médio (Duque *et. al.*, 1983). É comum encontrar nas rochas desta unidade fragmentos de conchas de bivalvos, além de foraminíferos, radiolários e corais. A fauna de foraminíferos encontrada indica um ambiente de formação em águas tropicais pouco profundas com influência de condições recifais.

5.3 Geologia Local

As duas frentes de lavra exploradas e beneficiadas pela empresa “Canteras de los Andes” aproveitam os calcários da Formação La Tampa. Macroscopicamente, estas rochas têm cores verde, ocre e mistura das duas cores, com geometria plana paralela a ondulosa paralela não contínua, em camadas que variam em espessura de 10cm até 2m na Frente de Lavra 1 (FL 1) e até 6m na Frente de Lavra 2 (FL 2), constituídos por bioclastos de granulação grossa a média, mal selecionados e levemente arredondados, fragmentos de extraclastos e esporádicos minerais terrígenos, dentre os quais se destaca o quartzo.

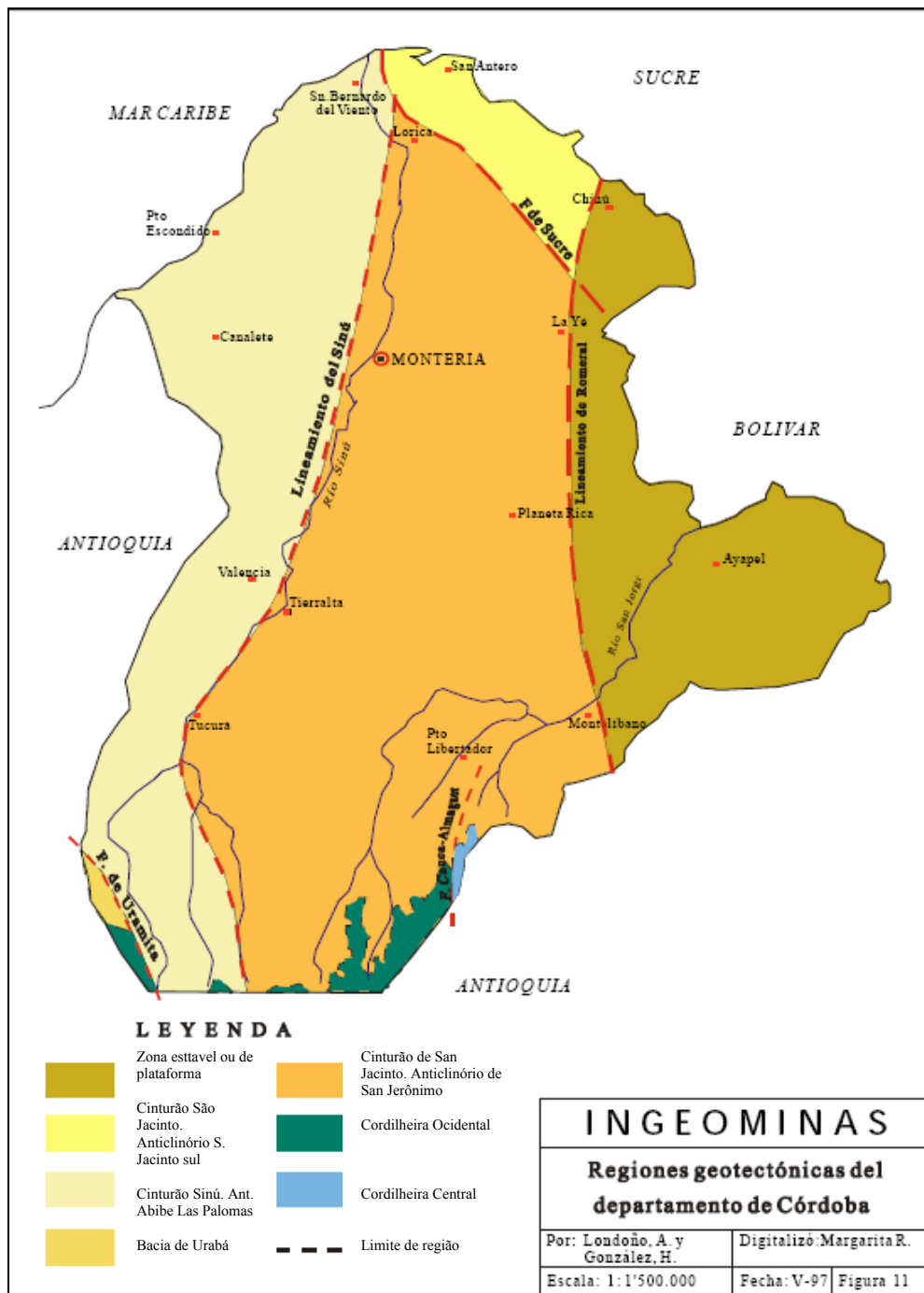


FIGURA 19. Regiões geotectônicas do Departamento de Córdoba. Fonte: Mapa Geológico do Departamento de Córdoba, INGEOMINAS (2001).

A rocha é clasto-suportada, mas infere-se a presença de matriz de grão fino constituída também por calcita. A superfície dos calcários, especialmente na FL 1, apresenta crostas ferruginosas de oxidação; o fissuramento e o fraturamento são notórios; é ainda possível ver superfícies de alteração por circulação de água. A unidade é cortada por vários sistemas de fraturas, cujas direções preferenciais são N15E/84, N4E/77, N35W/70 e N10E/55.

5.3.1 Frente de Lavra 1 (FL 1)

A FL 1 é produtora dos calcários RV, RVT e RB. As coordenadas que definem o polígono do FL 1 são:

N: 1.441.905; E: 1.123.280

N: 1.442.905; E: 1.223.280

Nesta frente de lavra são diferenciados três níveis de aproveitamento econômico da base para o topo, descritos a seguir.

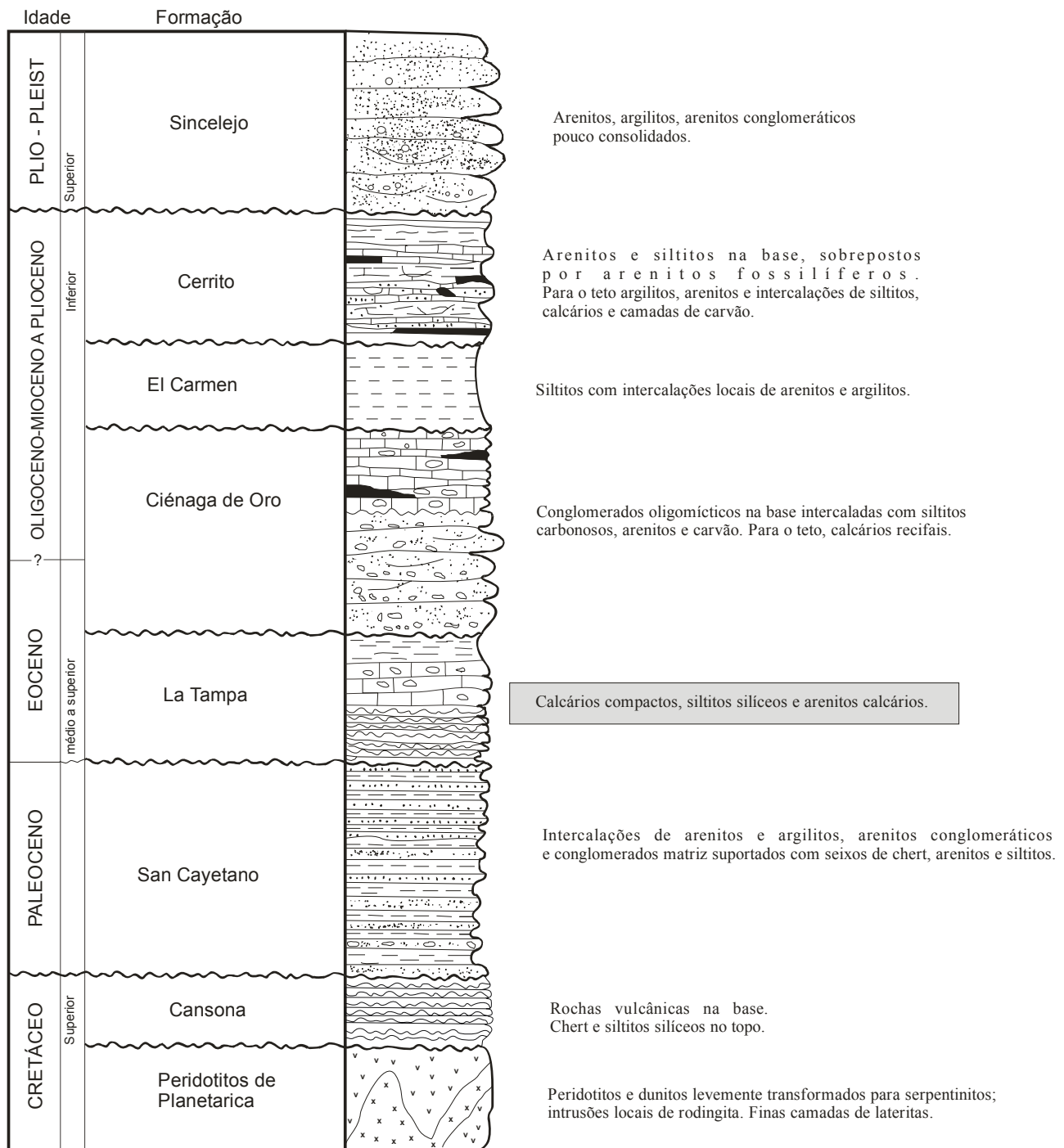


FIGURA 20. Coluna estratigráfica do Anticlinório de São Jerônimo. Fonte: Mapa Geológico do Departamento de Córdoba, INGEOMINAS (2001).

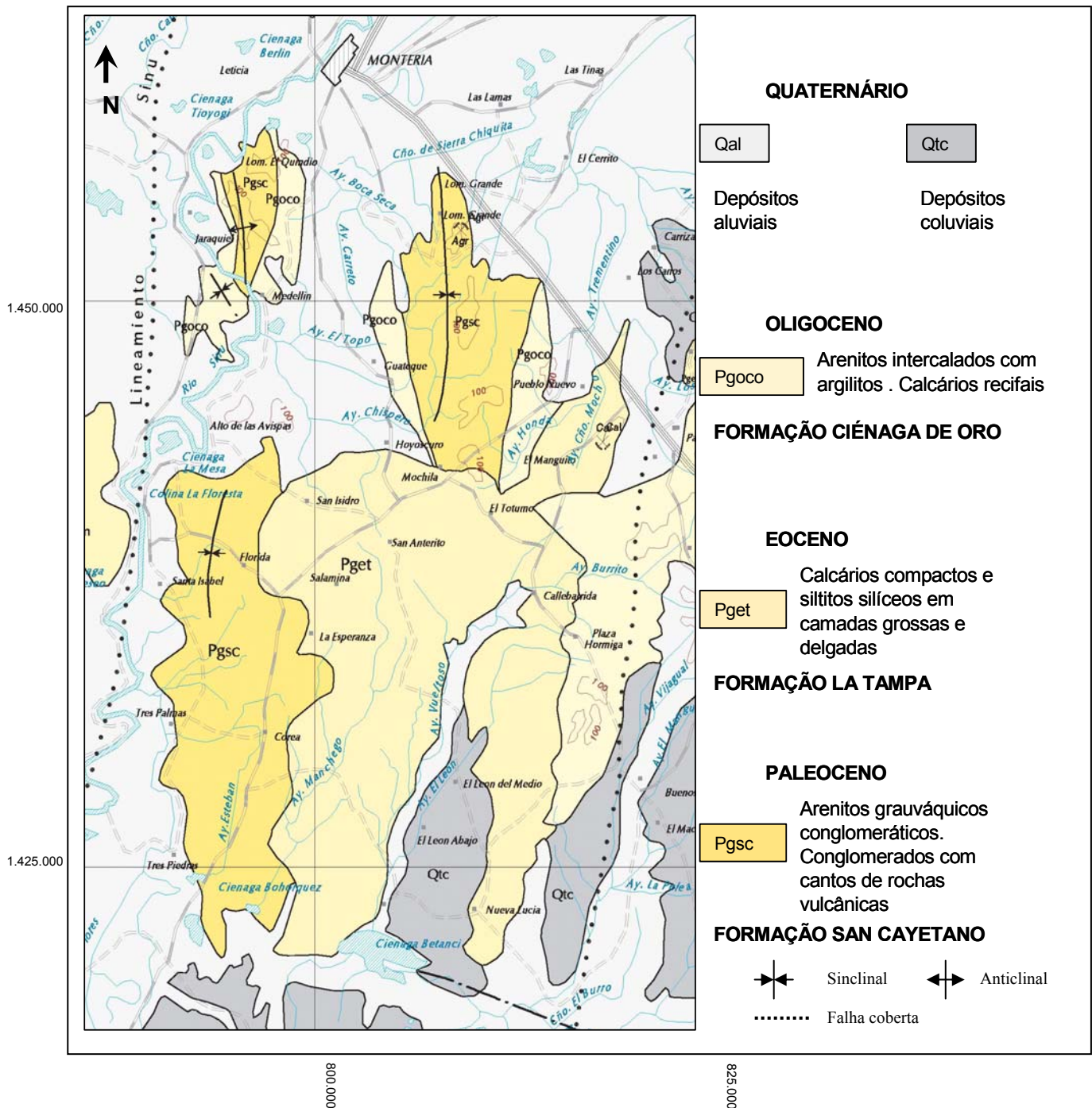


FIGURA 21. Mapa geológico da área de pesquisa. Fonte: Mapa Geológico do Departamento de Córdoba. Escala: 1:100:000.

5.3.1.1 Nível Inferior

Correspondente aos três metros inferiores da frente de lavra (Fig. 22). A rocha é calcária de estrutura maciça, com fraturas sub-horizontais, seguindo as superfícies de estratificação. As camadas apresentam espessuras variáveis entre 30 cm e 50cm, com ampla concentração de material fóssil em fragmentos de tamanho variável, milimétrico até centimétrico de conchas de gasterópodos e espículas de equinodermos. É considerado um nível de baixo rendimento no processo extrativo

pela intensidade do fraturamento e pelas grandes dimensões dos fragmentos fósseis que dificultam o corte e esquadrejamento da rocha.



FIGURA 22. Vista do nível inferior na frente de produção do calcário Royal Verde.

5.3.1.2 Nível intermediário

Considerado o nível produtivo. Tem uma espessura total de 9m desde o contato com o nível inferior até o contato com o nível superior (Fig. 23). O calcário apresenta geometria lenticular, em camadas de grande porte de espessuras variáveis entre 1,5 e 2m e estratificação interna maciça, em contato plano com o nível inferior. Neste nível aparecem intercalações descontínuas de argilitos, com espessuras variáveis entre 1 e 4 cm (Fig. 24A) que não se constituem em inconvenientes para os processos de lavra e de aproveitamento do material.

Na FL 1 o calcário está constituído por fragmentos fósseis sub-arredondados de dimensões de 2mm de comprimento e 1mm de largura. A matriz da rocha é de grão fino, constituída por lama de carbonatos e material terrígeno associado. Alguns veios de calcita aparecem cortando a estratificação. Núcleos ferruginosos (limonita), de forma arredondada aparecem esporadicamente na matriz da rocha (Fig. 24B). Na FL, devido à presença de físsuras e fraturas cortando a rocha calcária, geram-se diferentes tonalidades do material que permitem o aproveitamento de forma diferenciada, considerando o grau de alteração da rocha, seja insignificante, parcial ou total, para a fabricação de chapas com tonalidades diferentes. Assim, chapas fabricadas aproveitando as partes dos blocos extraídos que não apresentam alteração significativa, são conhecidas com o nome de Royal Verde (RV); os produtos elaborados com blocos de rocha que apresentam alteração parcial são conhecidos com o nome de Royal Veta (RVT) (Fig. 25) e aqueles que aproveitam as partes da rocha completamente alterada são denominados de Royal Bronze (RB).



FIGURA 23. Nível intermediário (produtivo) na lavra de calcário Royal Verde. Observa-se o grau de fraturamento com fraturas e diáclases de alto ângulo.

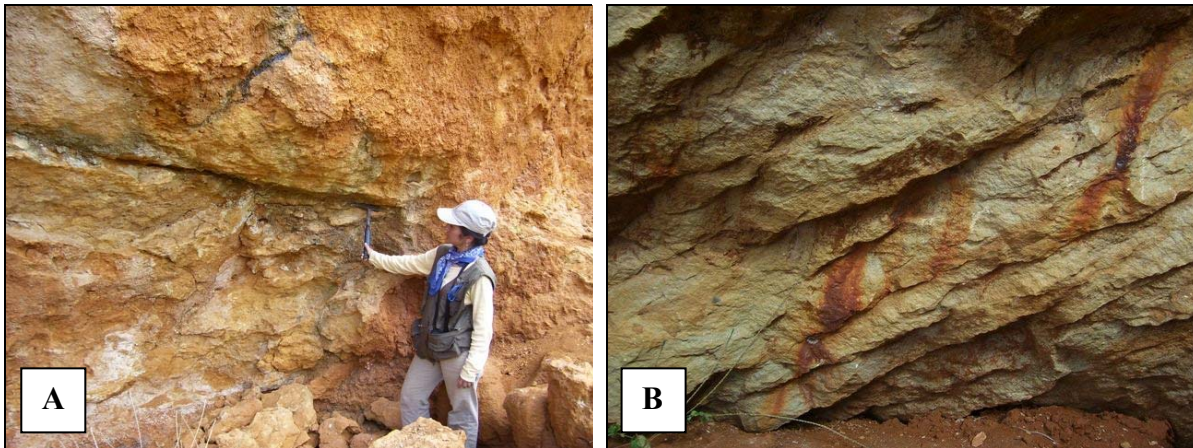


FIGURA 24. Algumas feições do nível intermediário do calcário Royal Verde. (A) Intercalações menores de argilito. B) Superfícies marchadas em decorrência da oxidação de nódulos ferruginosos.



FIGURA 25. Feições características do calcário Royal Veta (nível intermediário). Na superfície da rocha observa-se a crosta de oxidação e a cor de alteração gerada ao redor do fissuramento.

5.3.1.3 Nível Superior

Em contato plano com o nível intermediário (Fig. 26 A), o nível superior tem uma espessura total de 5,80m. O calcário apresenta geometria ondulada não paralela, descontínua, com camadas de espessuras variáveis entre 10cm e 22cm. Internamente apresenta-se finamente laminado, com matriz arenítica. Não são observados fragmentos fósseis. Neste nível aparecem freqüentes intercalações argilosas com espessuras de 5 a 10cm que tornam inviável o aproveitamento econômico do material (Fig. 26 B).

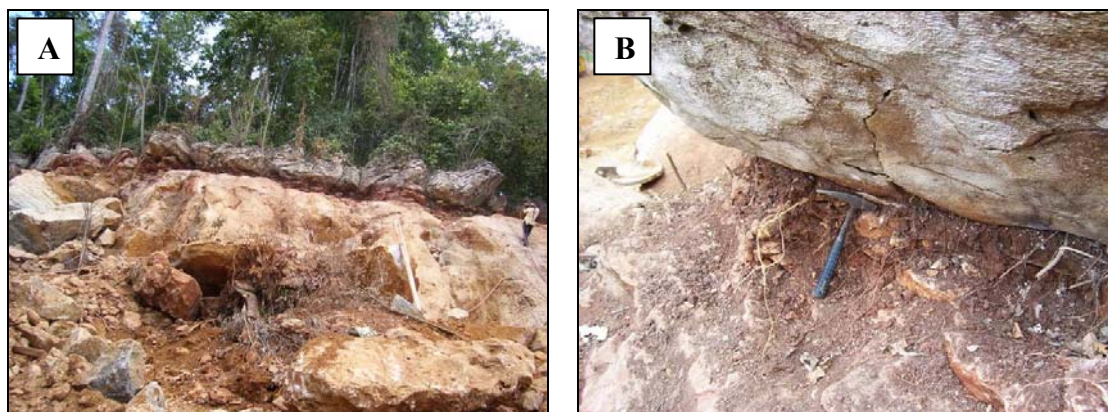


FIGURA 26. Nível superior da Frente de Lavra 1. (A) Superfície de contato neto com o nível intermediário. (B) Intercalações de argilito que impedem o aproveitamento deste nível para trabalhos de lavra e beneficiamento.

5.3.2 Frente de Lavra 2 (FL 2)

A FL 2 é produtora do calcário Royal Dorado (RD). As coordenadas que definem o polígono da FL 2 são:

N: 1.441.147; E: 1.122.997

N: 1.452.147; E: 1.222.997

Nesta frente de lavra, de 9m de altura total, é possível a diferenciação de dois planos de debilidade estrutural, um deles seguindo a estratificação horizontal das camadas de calcário e o outro, um sistema de diáclases e fraturas cortando a estratificação. As fraturas seguem as seguintes direções:

N35E/86SE; E-W/78; N55E/Vertical; N75E/74SE; N10W/Vertical.

A rocha explorada (Fig. 27 A) e beneficiada é um calcário com 6m de espessura, disposto em camadas horizontais, maciças, com alto grau de bio-perturbação. A rocha é de cor amarelo ocre, texturalmente imatura, com matriz arenítica e fragmentos fósseis de tamanho variável, da ordem de milímetros até centímetros. Este nível produtivo é sobreposto por uma camada de argilito calcário de 1,50m de espessura, sem nenhum interesse econômico.

A extração do material conhecido como Royal Dorado (RD) é dificultada pelo fraturamento e pela natureza do material, caracterizado pela menor coesão em relação aos materiais explorados na

Frente 1, devido à natureza do material, caracterizado pela mistura de material terrígeno e calcário. Nesta frente de lavra, devido justamente às dificuldades de extração do material, tem-se implementado o método de extração com fio diamantado (Fig. 27B e 27C), melhorando desta forma o rendimento no processo de extração.



FIGURA 27. Generalidades da Área de Lavra 2, produtora do calcário Royal Dorado. A) Vista geral da Área de Lavra. B) Extração da rocha com fio diamantado na Frente de Lavra. C) Fissuras geradas no processo de extração do calcário Royal Dorado.

5.4 Processos de beneficiamento e acabamento dos Materiais

Os calcários das frentes de lavra FL 1 e FL 2 são aproveitados na elaboração de peças usadas na construção civil como pisos, ladrilhos, chapas para revestimentos de interiores e de exteriores, entre outros, e para fabricação de peças artesanais de grande aceitação no mercado colombiano, além do grande potencial para a comercialização no mercado internacional. O beneficiamento de materiais na fábrica atinge uma produção estimada de 15.000m²/mês. As chapas são muito requisitadas e tem sido muito usadas na construção civil especialmente da cidade de Medellín. As chapas elaboradas refletem claramente a intensidade da alteração da rocha calcária original, conferindo aos materiais, matizes muito variados em função da sua alteração (Fig. 28).

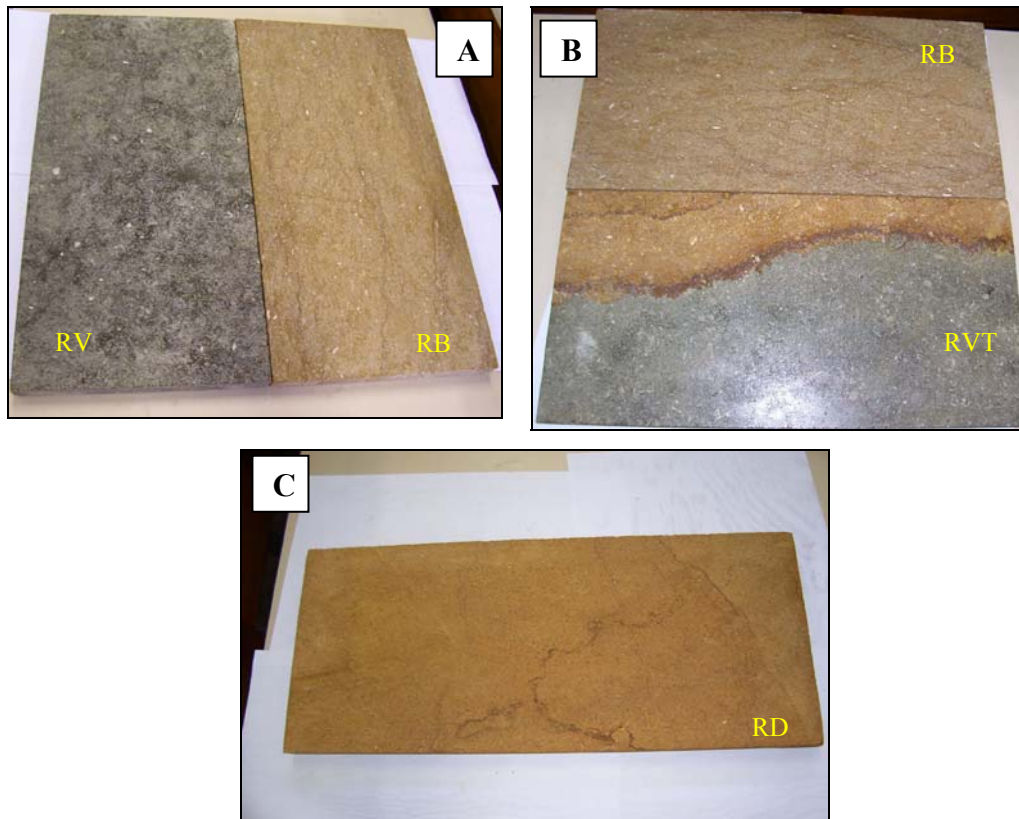


FIGURA 28. Variedades obtidas dos processos de beneficiamento dos calcários da Formação La Tampa. (A) Royal Verde (esq) e Royal Bronze (dir). (B) Royal Bronze (sup) e Royal Veta (inf). (C) Royal Dorado.

Na planta de beneficiamento, localizada no perímetro urbano da cidade de Montería, os materiais produzidos são submetidos a processos de corte, esquadrejamento, dimensionamento e acabamentos variados (Fig. 29). Uma vez beneficiados, os materiais são enviados aos mercados das principais cidades colombianas e, em sua maior parte, enviados para o exterior por meio do porto marítimo de Cartagena de Índias.

Os processos de acabamento realizados pela empresa “Canteras de los Andes” nas rochas calcárias são os seguintes:

- Polimento simples: feito com escovas abrasivas, o que permite a obtenção de chapas polidas muito procuradas para o revestimento de pisos de shoppings e outras obras de engenharia;
- *Abujardamento*: polimento rústico feito com bujarda é um dos mais requisitados e usados especialmente no revestimento de escadas e pisos exteriores (Fig. 30A);
- *Troquelado*: tipo de acabamento caracterizado pela textura irregular, com relevo dos produtos finais. É um acabamento muito usado na elaboração de peças artesanais, tentando simular a aparência da rocha em bruto (Fig. 30B);
- *Atomboramento*: tipo de acabamento que permite a formação de bordas rústicas, sem arestas definidas (Fig. 30C). É usado para a fabricação de tijolos a serem utilizados nas garagens e

caminhos de pedestres, especialmente em áreas rurais, tentando manter a harmonia com o rústico da paisagem.



FIGURA 29. Processos de beneficiamento do calcário na mineração “Canteras de los Andes”. A) Extração de blocos brutos. B) Polimento para elaboração de tampas de mesas. C) Serragem para a obtenção de chapas para revestimento. D) Corte em chapas de diferentes dimensões. (E-H) Exemplos de variedades de chapas produzidas pela empresa Cantera de los Andes do beneficiamento do calcário da Formação La Tampa.

- *Lavagem com ácido nítrico*: tipo de acabamento exclusivo do calcário “Royal Dorado” que permite a acentuação da cor amarela da rocha na peça elaborada. Consiste na exposição da amostra de rocha a uma solução de HNO_3 de concentração 65%v/v.



FIGURA 30. Processos de acabamento e produtos resultantes. A): abujardado; B): troquelado; C): atomorado.

Os processos de beneficiamento, como já expostos, aplicam-se na elaboração de chapas para pisos e revestimento de edificações e a elaboração de produtos artesanais, dentre os quais se destaca

a produção de tampos para mesas, pias, mesas com aplicação de rocha natural e outros (Fig. 31). A elaboração das peças segue os padrões do mercado consumidor e variam em relação à moda imposta pelos arquitetos e profissionais em “design”.



FIGURA 31. Peças artesanais elaboradas a partir de calcário.

CAPÍTULO 6 - CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DA FORMAÇÃO LA TAMPA

As rochas carbonáticas são mineralologicamente simples, mas altamente diversificadas quanto às suas partes constituintes. De forma simplificada, o arcabouço geral das rochas carbonáticas compõe-se de três constituintes principais: aloquímicos, matriz e cimento. Os aloquímicos constituem o arcabouço das rochas e estão constituídos por bioclastos, oólitos, oncólitos, intraclastos, pelóides e agregados. A matriz, também chamada de lama carbonática, representa partículas carbonáticas com tamanho silte e argila ($<62\mu\text{m}$). O cimento, componente cristalino e denominado esparita, se forma por precipitação química.

Os calcários da Formação La Tampa lavrados com fins ornamentais na Frente de Lavra 1, RV, RVT e RB, são biosparitos, constituídos essencialmente por fragmentos bioclásticos, com bom grau de seleção e arredondamento, clasto-suportados e com predomínio de cimento espático sobre a matriz micrítica. Em média, os tipos de contato intergranular predominantes são: longitudinal (80%), tangencial (11%), côncavo-convexo (5%), suturado (3%) e flutuante (1%) (Fig. 32A). A microfauna predominante é de foraminíferos, com quantidades subordinadas de outros tipos de bioclastos como briozoários, esponjas e corais.

Segundo a classificação textural de Dunham (1962), são calcários compactos (*Packstone*). Não existem diferenças composicionais nem texturais entre os calcários RV, RVT e RB, os quais pertencem ao mesmo nível estratigráfico, sendo as suas características definidas só pelo diferente grau de alteração, ocasionado pela circulação de água através de poros e fissuras e que incide na coloração das rochas.

Entretanto, o calcário RD, lavrado na Frente de Lavra 2 é um Biomicrito (classificação de Folk, 1959) ou *Wackestone* (classificação de Dunham, 1962), apresenta maior conteúdo de matriz micrítica e menor grau de seleção e arredondamento dos bioclastos, os quais apresentam formas variadas de angulares a sub-angulares. Os bioclastos são muito mais variados do que os existentes nos calcários da FL 1, sendo notória a presença de esponjas, briozoários, gasterópodos e corais predominando sobre a população de foraminíferos. Os tipos de contato intergranular predominantes neste calcário são: longitudinal (50%), flutuante (20%), tangencial (15%), côncavo-convexo (10%) e suturado (5%) (Fig. 32B).

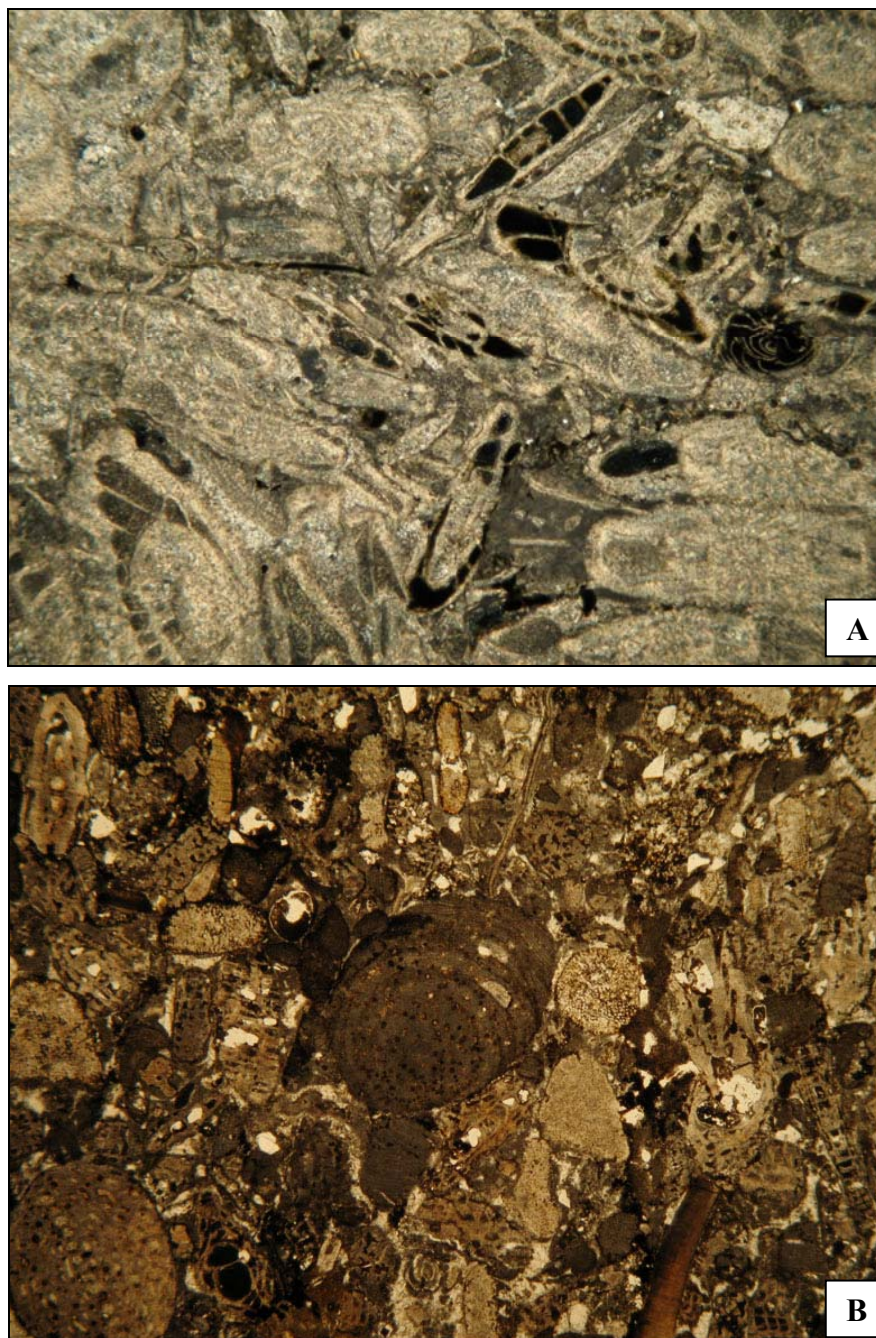


FIGURA 32. Características dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. A) Frente de Lavra1 (RV, RVT e RB), biosparito com foraminíferos, bem compactados, cimentados por esparita e contatos longitudinais e côncavo-convexos. B) Frente de Lavra 2 (RD), biomicrocristo com bioclastos de maior diversidade, menor grau de seleção, matriz micrítica e contatos flutuantes e longitudinais. Aumento 2,5X10.

6.1 Textura e composição dos calcários ornamentais da Formação La Tampa

6.1.1 Aloquímicos principais

Os grãos esqueletais ou bioclásticos são os principais componentes aloquímicos dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. Oólitos, oncólitos, pelóides, intraclastos e agregados não foram identificados.

Os bioclastos são restos fósseis de animais e vegetais, de estrutura calcária, que foram preservados nos sedimentos. O termo bioclastos é usado tanto para fragmentos quanto para carapaças inteiras.

6.1.1.1 Foraminíferos

Nos calcários ornamentais da Formação La Tampa, os foraminíferos bentônicos são os constituintes volumetricamente mais importantes. Encontram-se também em menor proporção fragmentos de briozoários, equinodermas, ostrácodes e braquiópodes.

Os macroforaminíferos bentônicos hialinos, do grupo dos numulítidos, freqüentes nos calcários de Idade Terciária, constituem os bioclastos predominantes nos calcários ornamentais da Formação La Tampa, chegando a perfazer até 70% dos grãos aloquímicos da rocha. Outros foraminíferos bentônicos presentes nos calcários são nodosarídeos, gavelinídeos, buliminídeos e Siphogenerinoides. A ocorrência de foraminíferos planctônicos está constituída por formas globosas incluindo as espécies *Globigerinelloide sp* e *Rugoglobigerina sp*.

6.1.1.2 Moluscos

O filo Molusca reúne animais de corpo mole, com simetria bilateral (exceto os gastrópodes), não segmentados, cobertos por um manto delgado que na maioria das formas segrega uma concha calcária. As classes dos Bivalves e Gastrópodes são as mais expressivas. Por sua mineralogia metaestável, de aragonita e calcita magnésiana, as conchas dos moluscos são normalmente dissolvidas e substituídas por calcita com baixo teor de magnésio. Nos calcários descritos, os bivalves de formas marinhas (ostras), constituídos por fragmentos de conchas delgadas, do gênero *Inosceramus*, são os mais observados.

6.1.1.3 Algas coralinas

Chegam a constituir até 20% dos aloquímicos presentes nos calcários ornamentais da Formação La Tampa. As algas são mais importantes no calcário RD, onde pode representar até 50% dos fragmentos aloquímicos da rocha.

Os principais bioclastos presentes nos calcários avaliados observam-se na Figura 33.

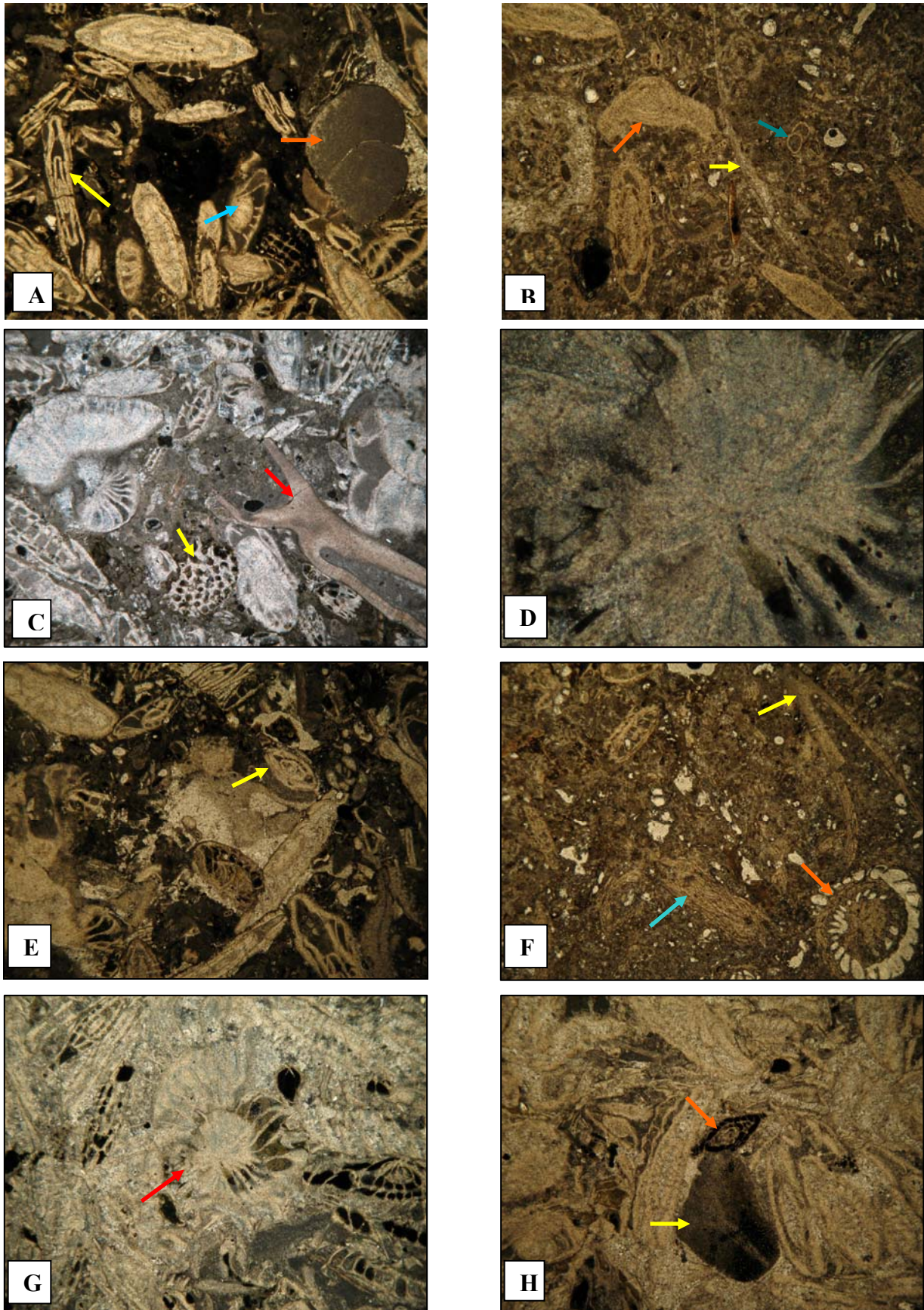


FIGURA 33. Bioclastos dos calcários da Formação La Tampa. A) Foraminíferos: (→) Globigerinoides; (→) nummulítico; (→) Siphogenerinoides sp. B) (→) Algas; (→) carapaça de gasterópodo; (→) globigerinoide. C) (→) alga; (→) carapaça de bivalvo. D) Equinodermo. E) Foram. numulítico. F) (→) carapaça de bivalvo; (→) foraminífero; (→) alga. G) (→) Foram. miliólido. H) (→) foram. numulítico; (→) alga. Aumento 2,5X10.

6.1.2 Fragmentos terrígenos

O quartzo é o único mineral terrígeno identificável ao microscópio (Fig. 34). Aparece muito esporadicamente nos calcários biosparíticos RV, RB e RVT na FL 1, sendo mais freqüente no calcário RD na FL 2. Em geral, os cristais aparecem disseminados na matriz, são de forma angular e granulação não superior aos 3mm de diâmetro.

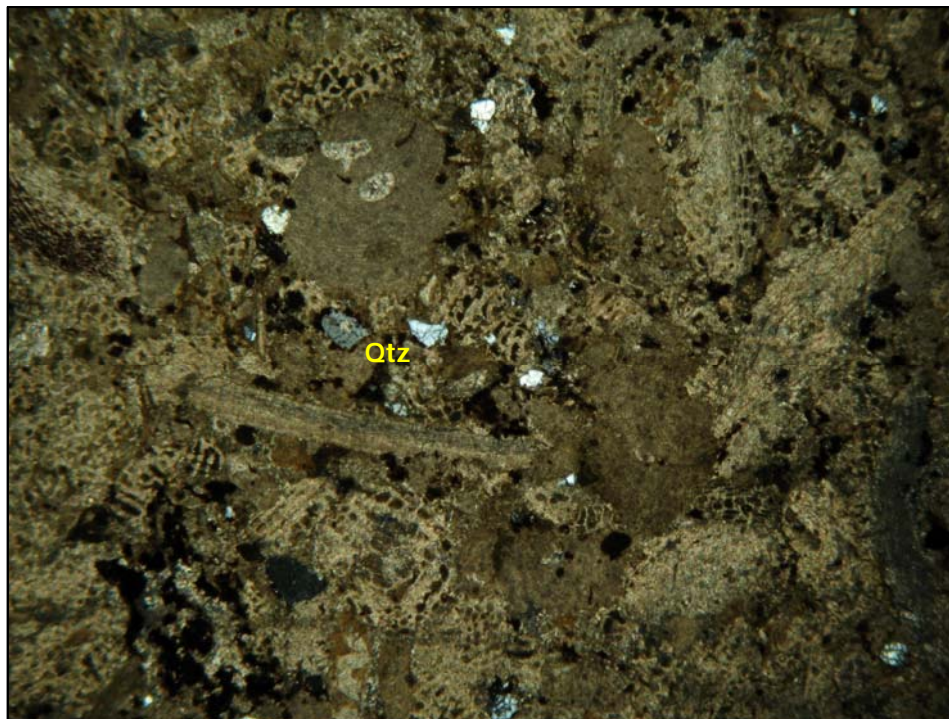


FIGURA 34. Cristais euhedrais de quartzo (Qtz). Calcário Royal Dorado, Frente de Lavra 2. Aumento 2,5X10.

6.1.3 Matriz

A lama carbonática microcristalina, presente nos calcários RV, RVT e RB, constitui menos de 3% da rocha. Aparece finamente disseminada nas cavidades de alguns fragmentos bioclásticos, especialmente em algas coralinas e, em menor proporção, nos clastos de foraminíferos (Fig. 35). No calcário RD, a micrita aparece como matriz da rocha nos espaços intergranulares e também como mineral de preenchimento das cavidades dos bioclastos, sendo mais importante seu conteúdo quando comparado com as outras três variedades de calcários estudadas.

6.1.4 Cimento

Os bioclastos dos calcários RV, RVT e RB apresentam-se cimentados por cristais de esparita (Fig. 35). Esta aparece também como constituinte das carapaças de organismos, na variedade fibrosa, produto da recristalização do aragonito original em calcita. Cristais anédricos e subédricos de esparita formando uma estrutura de mosaico aparecem também nestas rochas.

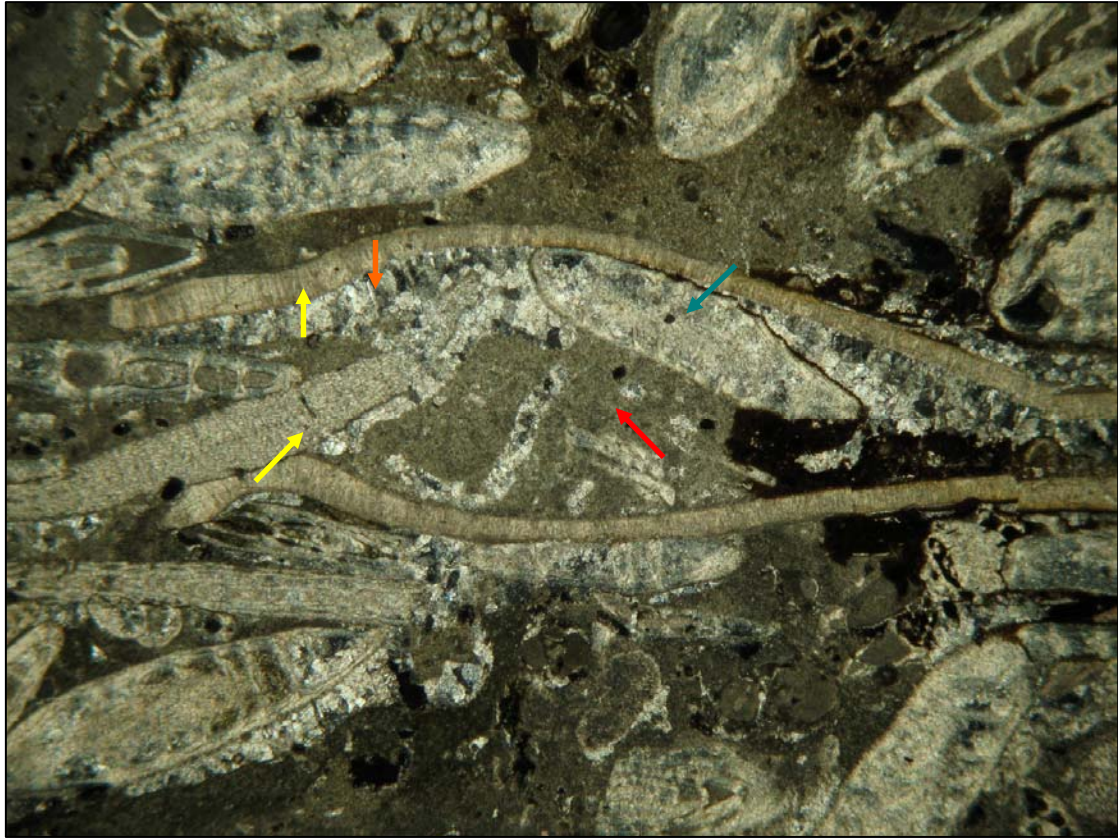


FIGURA 35. Cimento espático dos tipos: Fibroso (→), com crescimento perpendicular às paredes do organismo e granular (→), exibindo cristais euédricos e subédricos. Moldes de bioclastos também cimentados por esparita (→). Lama micrítica (→) finamente disseminada. Nível intermediário produtivo Frente de Lavra 1. Aumento 2,5X10.

6.1.5 Minerais de Alteração

Nas lâminas petrográficas é comum encontrar goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) associada com limonita, como minerais de alteração, especialmente nos calcários RVT, RB e RD (Fig. 36). A goethita ocorre frequentemente como produto de alteração dos minerais de ferro, tais como siderita, magnetita, pirita, etc e aparece preenchendo cavidades e espaços intergranulares. Forma-se normalmente em condições oxidantes e se acumula por precipitação direta a partir de águas marinhas e meteóricas (Deer *et al.*, 2000).

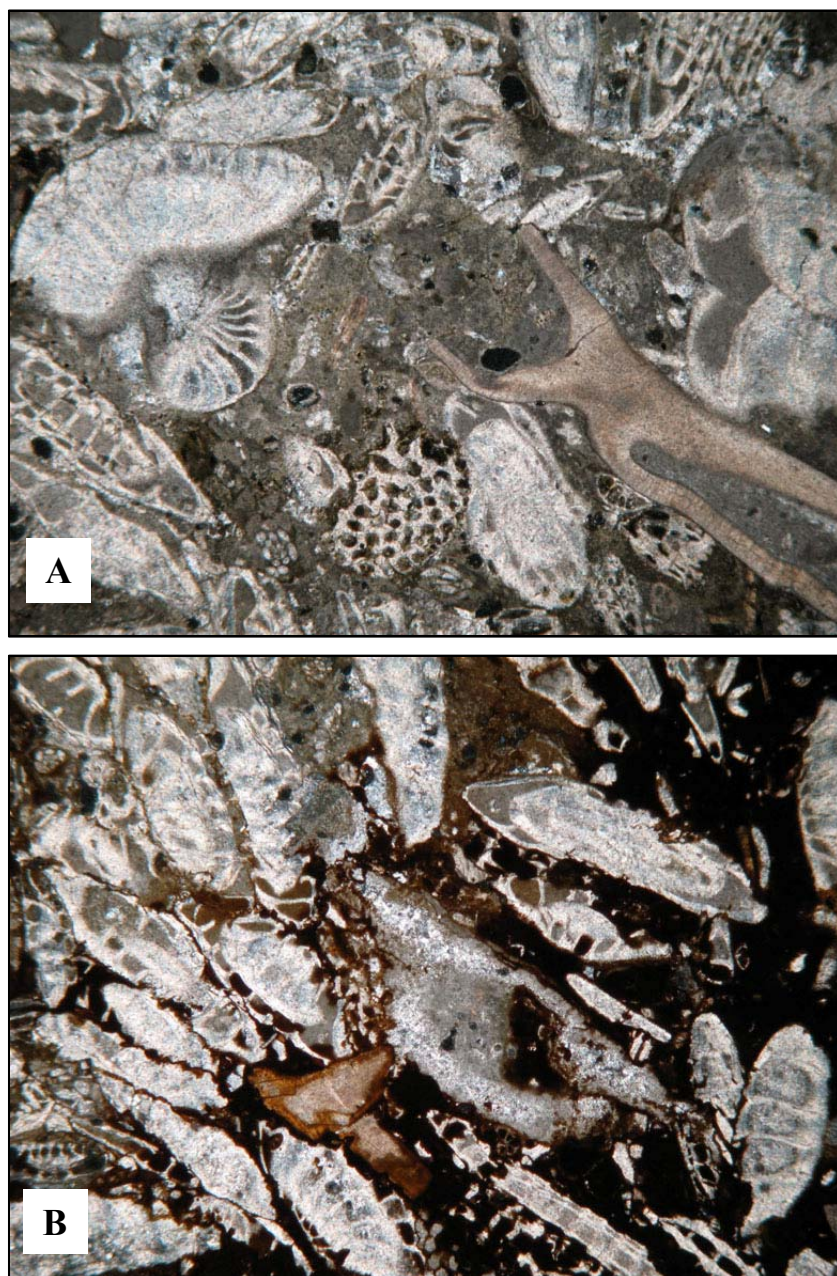


FIGURA 36. Diferenças entre os calcários RV, inalterado e sem conteúdo de goethita (A) e RVT, caracterizado pela goethita como mineral de alteração associada a limonita nos contatos entre os bioclastos constituintes (B).

6.2 Identificação de minerais carbonáticos e não carbonáticos por coloração seletiva

Observações de lâminas tingidas com alizarina vermelha realizadas ao microscópio petrográfico, permitiram determinar a natureza estritamente calcítica dos carbonatos constituintes de todos os litotipos pesquisados. Não se identificaram calcita magnesiana nem dolomita nos calcários por esta técnica. Assim nas lâminas tingidas de calcários RV, RB e RVT (Fig. 37A e 37B) da FL 1 e nas correspondentes ao calcário RD (Fig. 37C e 37D) do FL 2, a coloração adquirida pelos minerais carbonáticos é avermelhada, correspondente ao esperado em calcários de natureza calcítica. Pequenos fragmentos siliciclásticos são também identificados ao não apresentar tingimento com alizarina vermelha.

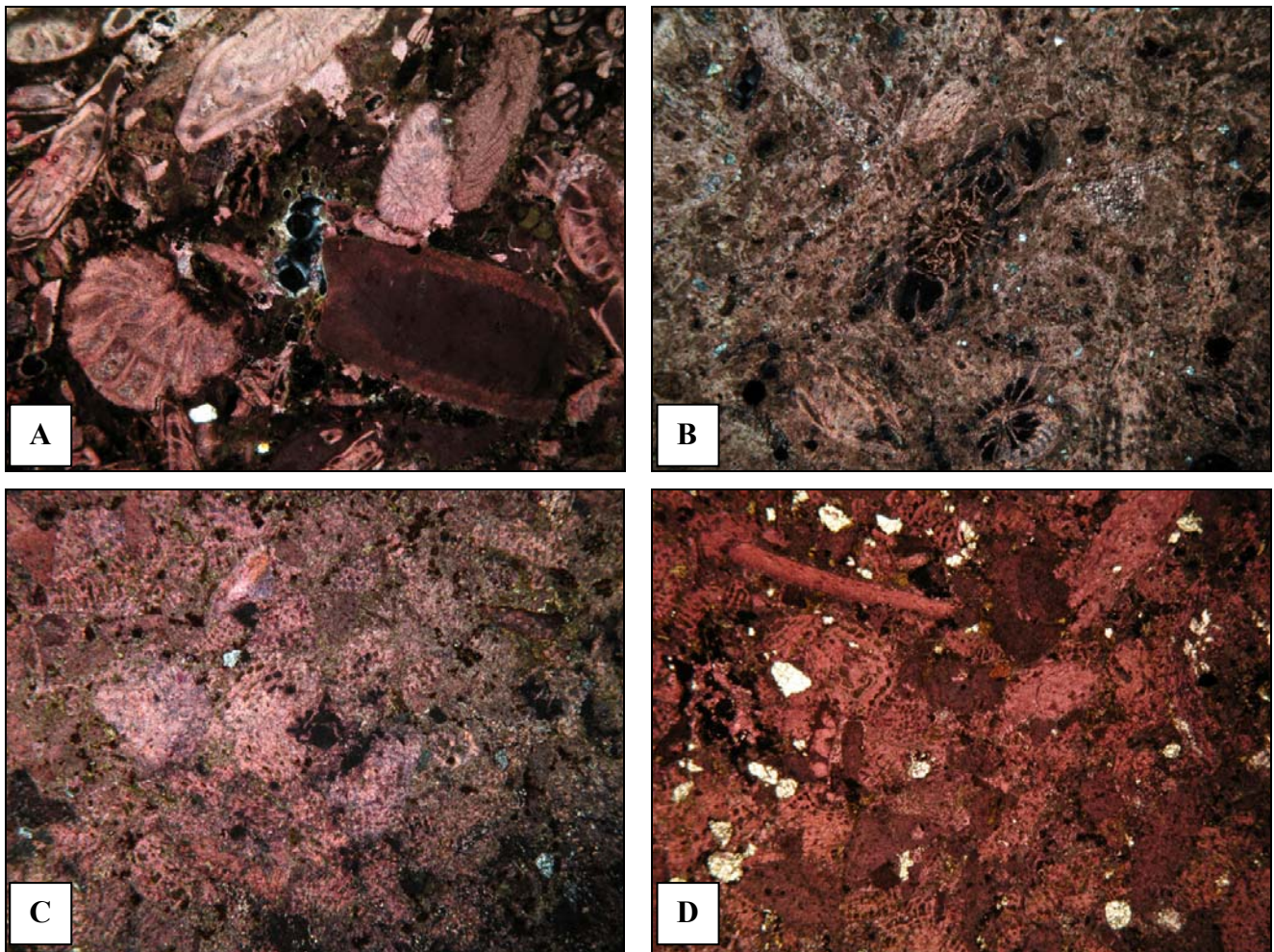


FIGURA 37. Imagens do tingimento com red-alizarine para distinção entre calcita e dolomita. A) Calcário RV. B) Calcário RB. C) e D) Calcário RD. Aumento 2,5X10.

6.3 Avaliação da composição mineralógica e química por técnicas analíticas (RDX- ICP- Microsonda)

6.3.1. Difração de Raios-X

Os resultados da análise de difração de Raios-X permitem corroborar a constituição essencialmente calcítica dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. Os difratogramas realizados em amostras representativas de cada um dos tipos de rochas extraídas na FL 1 (RV, RVT e RB) e do calcário RD, da FL 2, indicam que todos estão constituídos basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3), com mínimas quantidades de outros minerais. Entre estes encontram-se o quartzo (SiO_2), a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), a goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), como produto de alteração e esporádicas quantidades de arsenopirita (FeAsS) e muscovita $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Argilominerais não foram identificados.

Na identificação das fases cristalinas do calcário RV, correspondente ao calcário inalterado, pode se observar que o mesmo é constituído basicamente de calcita (CaCO_3) como fase predominante (>70%) e de calcita magnésiana ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) e quartzo (SiO_2) em proporções

muito baixas (<3%) (Fig. 38). A análise por DRX realizada no resíduo obtido por dissolução do carbonato de cálcio em HCl permite observar, além de calcita e quartzo, a presença de bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) (Fig. 39).

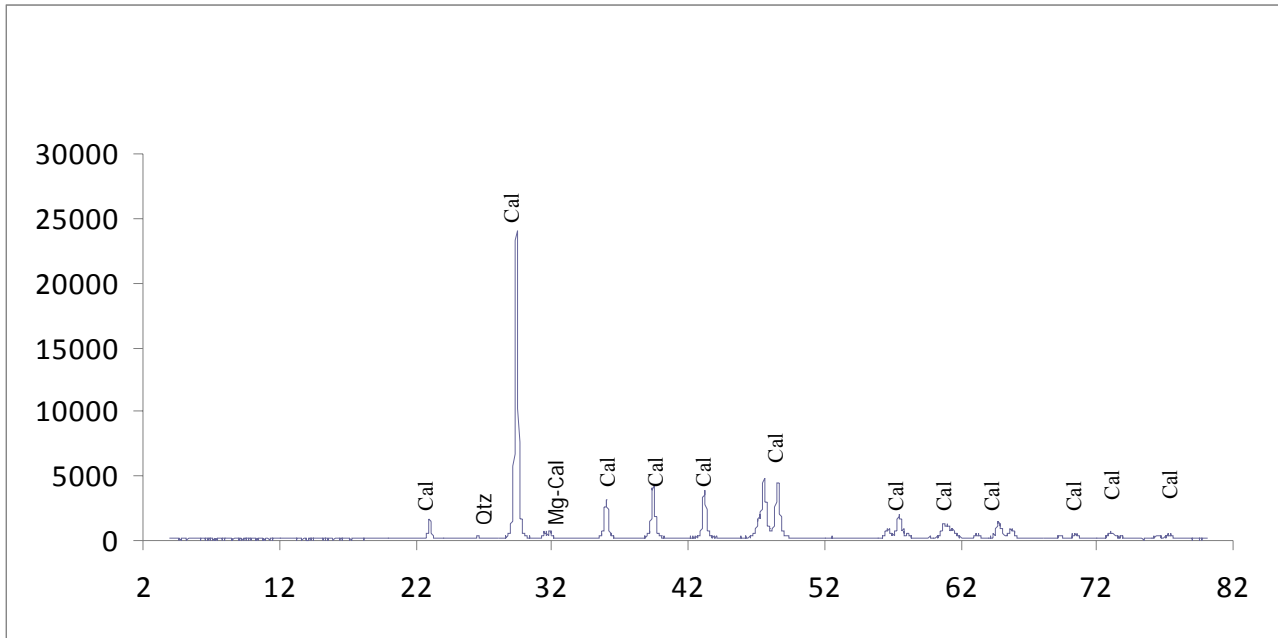


FIGURA 38. Difratoograma do calcário RV. Composição: calcita (Cal), calcita magnésiana (Mg-Cal), quartzo (Qtz).

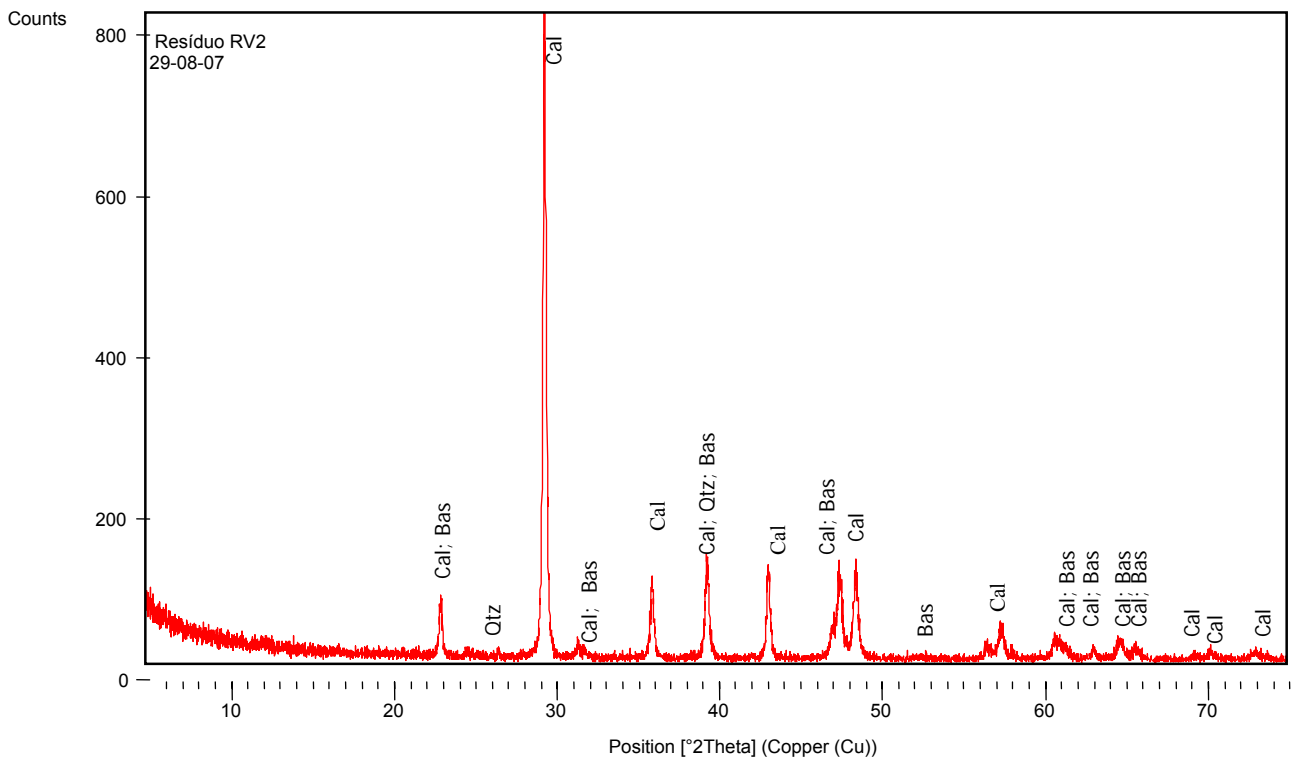


FIGURA 39. Difratoograma corresponde ao resíduo por dissolução de carbonato de cálcio. Calcário RV. Quartzo (Qtz), calcita (Cal), bassanita (Bas).

O calcário RVT, correspondente ao calcário parcialmente alterado pela circulação de fluidos através de poros e fissuras, e o RB, correspondente ao calcário alterado, têm a mesma composição do calcário RV, mas apresentam goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) como mineral de alteração, responsável pela coloração amarela das áreas alteradas, a qual aparece em proporções variáveis de acordo com o grau de meteorização das amostras analisadas. Assim, na amostra JB01, correspondente ao calcário RVT, o difratograma mostra que a rocha apresenta um conteúdo de goethita equivalente a 5% da constituição mineralógica (Fig. 40). No entanto, na amostra JB04, também correspondente ao calcário RVT, mas com menor grau de alteração, a goethita não foi identificada. O quartzo aparece como constituinte destas variedades de rocha em proporções mínimas, geralmente não maiores a 2% do total (Fig. 41). No calcário RB aparecem calcita e goethita como minerais constituintes (Fig. 42).

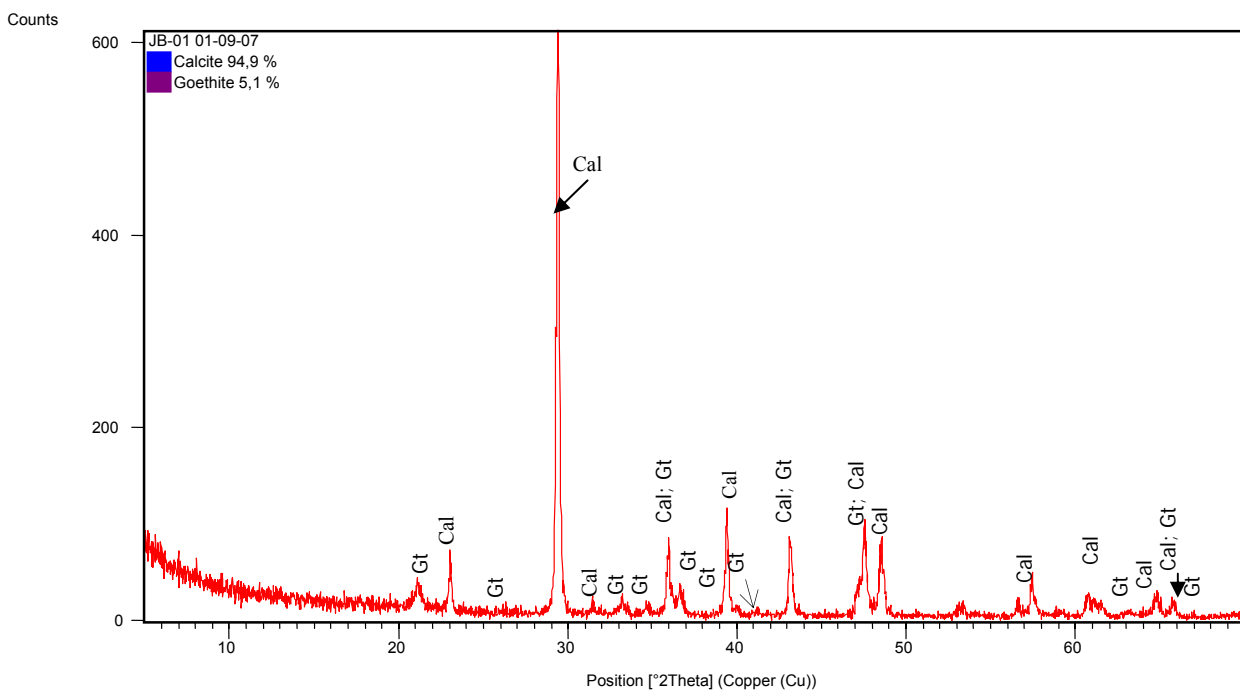


FIGURA 40. Difratograma para amostra típica do calcário RVT, caracterizado pela mistura de áreas inalteradas com áreas alteradas. Cal: calcita; Gt: goethita.

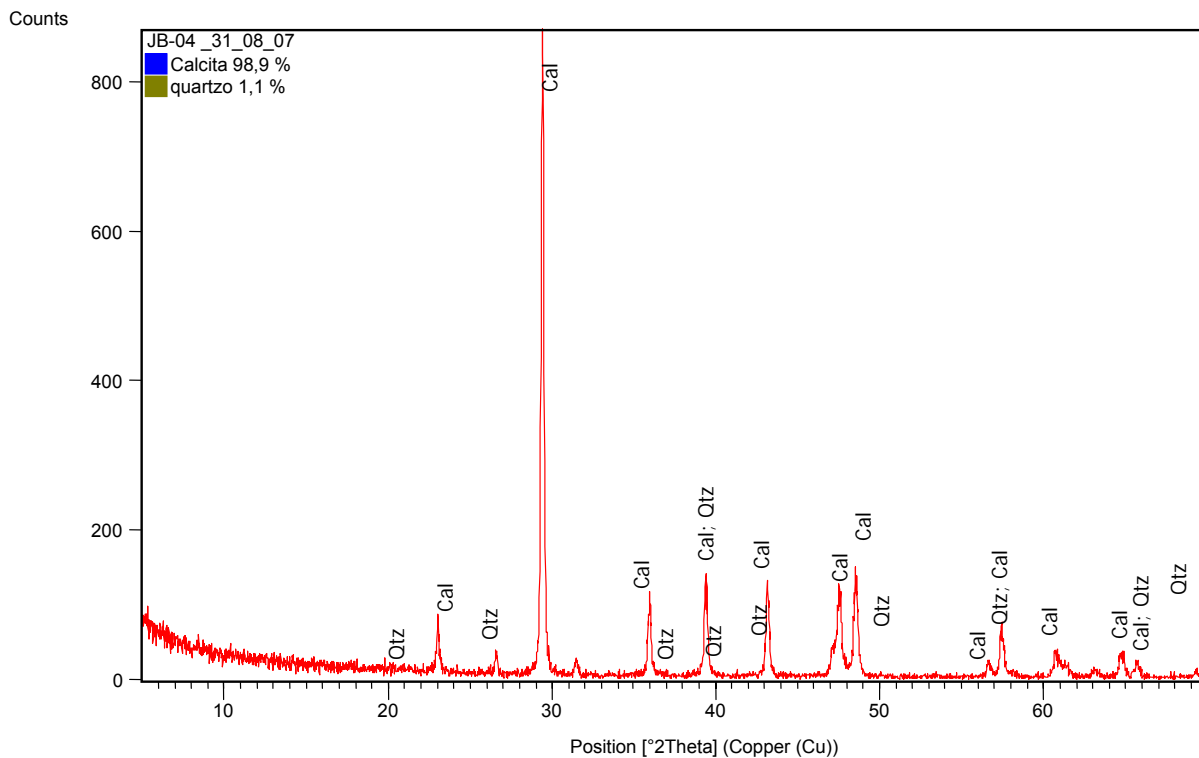


FIGURA 41. Difratoograma de calcário RVT mostrando a composição da rocha de calcita e quartzo. Cal: calcita; Qtz: quartzo.

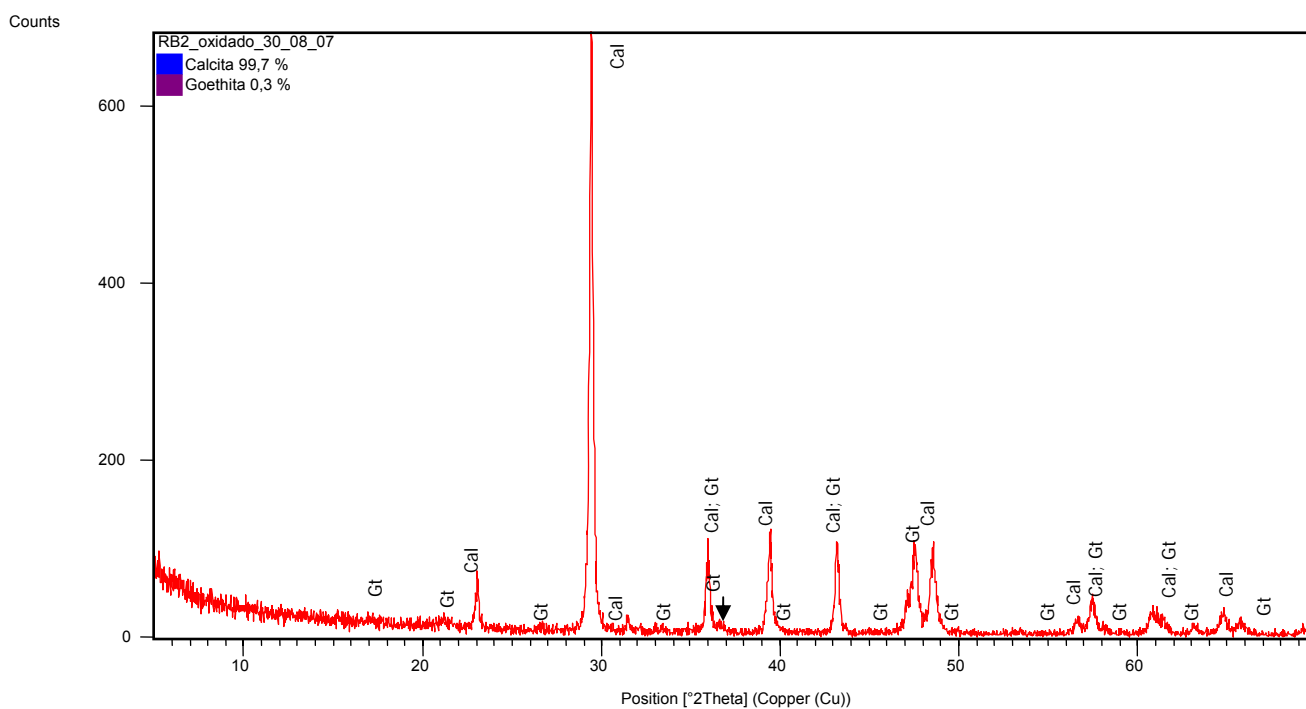


FIGURA 42. Difratoograma correspondente ao Calcário RB, com indicação da presença de calcita acompanhada de quantidades menores de goethita. Cal: calcita; Qtz: quartzo.

Os resultados da análise por difração de Raios-X (DRX) do calcário RD (Fig. 43), mostram basicamente as mesmas características composicionais já encontradas nos calcários da FL 1

(calcários RV, RVT e RB), sendo que as diferenças entre eles estão mais relacionadas com a textura e a granulometria.

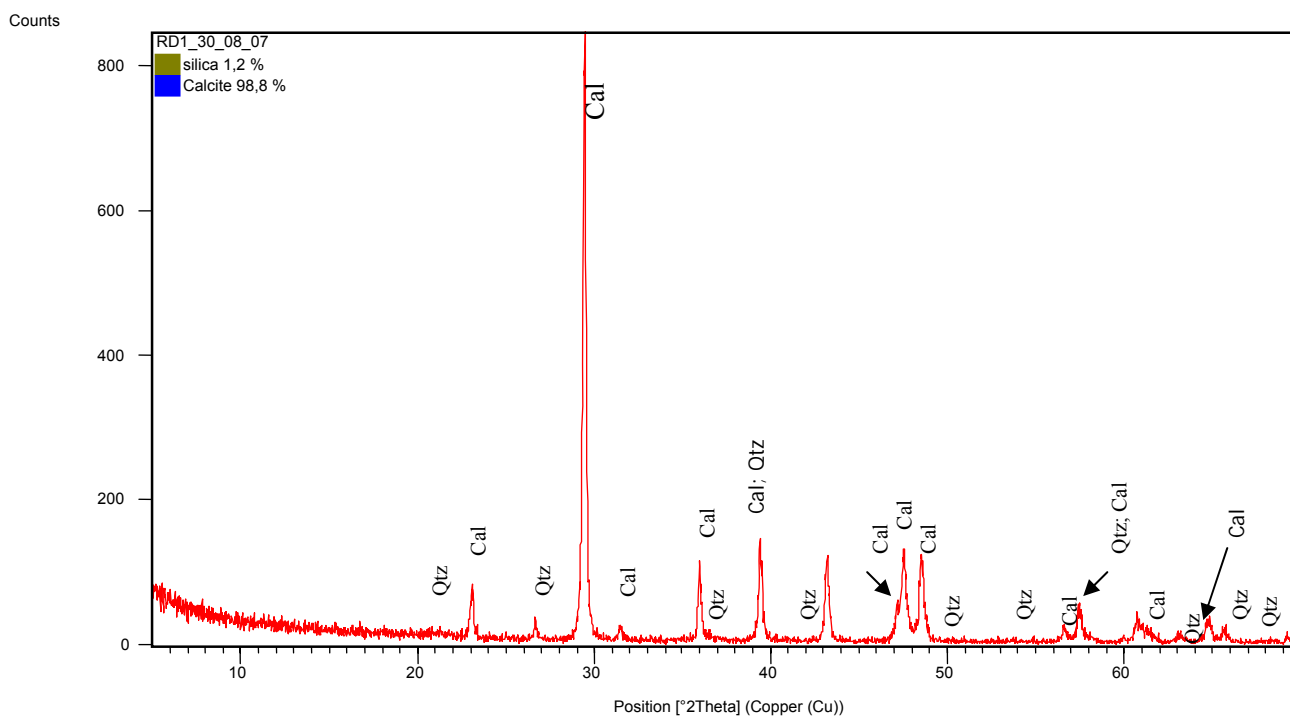


FIGURA 43. Difratoograma do calcário RD. Cal: calcita; Qtz; quartzo.

Os resultados da análise por difração de Raios-X corroboram a composição simples das quatro variedades de calcários da Formação La Tampa, todos constituídos basicamente por calcita (CaCO_3), com pequenas quantidades de outros minerais como calcita magnésiana, quartzo, goethita, como mineral de alteração, e alguns traços de bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) e arsenopirita FeAsS_2 .

6.3.2 Espectrometria de emissão por plasma (ICP)

Os resultados da análise de espectrometria de emissão por plasma (ICP) permitem observar a presença de óxidos maiores e elementos traços em pequena quantidade nos calcários pesquisados (Tab. 3).

Os resultados da análise química por ICP permitem determinar algumas características importantes para a avaliação da alterabilidade dos calcários da Formação La Tampa:

a) A presença de sílica em maior proporção no calcário RD em relação aos outros três calcários. Esta sílica está associada aos cristais de quartzo encontrados com maior frequência no calcário RD em relação aos outros três (RV, RVT, RB). Mesmo com pequena variação, o conteúdo de sílica mostra uma correlação positiva com o grau de alteração intempérica que caracteriza os calcários RV, RVT e RD (Fig. 44).

TABELA 3. Óxidos de elementos maiores e elementos traços nos calcários ornamentais da Formação La Tampa determinados por espectrometria de emissão por plasma (ICP).

Óxido	Unidade	Lim. detecção	RV	RVTN*	RVTA	RBN	RBA	RD	
SiO ₂	%	0,01	1,75	2,09	2,26	1,61	2,44	3,68	
Al ₂ O ₃	%	0,01	0,74	0,74	0,95	0,77	1,14	0,96	
Fe ₂ O ₃	%	0,04	2,37	3,36	5,33	4,07	5,27	3,18	
MgO	%	0,01	1,20	0,80	1,03	0,78	0,84	0,38	
CaO	%	0,01	51,10	50,16	48,83	50,74	48,50	49,92	
Na ₂ O	%	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	<,0,01	
K ₂ O	%	0,01	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	
TiO ₂	%	0,01	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,07	
P ₂ O ₅	%	0,001	0,167	0,142	0,229	0,192	0,260	0,150	
MnO	%	0,01	0,05	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,07	
Cr ₂ O ₃	%	0,002	0,005	0,004	0,006	0,005	0,008	0,010	
Elementos traços	Ba	ppm	5	41	77	62	46	55	50
	Ni	ppm	20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
	Sr	ppm	0,5	393,5	453,7	379,3	382,3	335,4	218,5
	Zr	ppm	5	15	9	17	13	13	51
	Y	ppm	3	10	9	11	12	10	14
	Nb	ppm	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	SC	ppm	1	3	3	3	4	3	5
LOI**	%	-5,1	42,3	41,6	40,4	40,7	41,3	40,9	
Total	%	0,01	99,84	99,05	99,28	99,38	99,89	99,39	

*RVTN: calcário RVT não alterado; RVTA: calcário RVT alterado; RBN: calcário RB não alterado; RBA: calcário RB alterado; **LOI: perdas por ignição.

Esta alteração implica dissolução do CaCO₃ e, por tanto, aumento relativo do conteúdo de sílica, considerando a resistência deste mineral face os processos de alteração. Assim é possível entender como nas fases “inalteradas” da rocha, o conteúdo de sílica é menor que nas porções alteradas equivalentes. Porém, o conteúdo de sílica nos calcários pesquisados não é o suficiente para marcar diferenças consideráveis entre as quatro variedades em relação às correspondentes resistências aos processos de alteração.

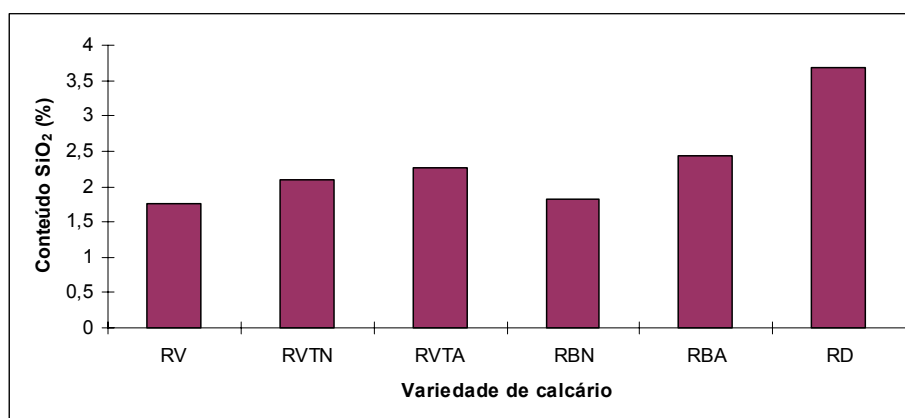


FIGURA 44. Representação gráfica do conteúdo de sílica determinado por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP.

b) A alumina (Al₂O₃) aparece em baixa proporção nos calcários avaliados, mas também apresenta uma correlação positiva com o grau de alteração intempérica. Assim nas rochas da FL 1, a proporção de alumina no calcário RV é menor em relação aos calcários RVT e RB (alterado). O

calcário RD apresenta o maior conteúdo de alumina de todos os calcários pesquisados (Fig. 45), considerando somente às amostras dos calcários não alterados. O comportamento é semelhante ao observado na evolução geoquímica dos perfis geo-pedológicos, caracterizada pela diminuição dos teores de Na, Mg, K e Ca, e a conseqüente acumulação de óxidos de Si e Al (Aires-Barros, 2001). Partindo desta premissa poderia se afirmar que o calcário RD é a rocha mais afetada por processos de alteração intempérica quando comparada com os calcários RV, RVT e RD.

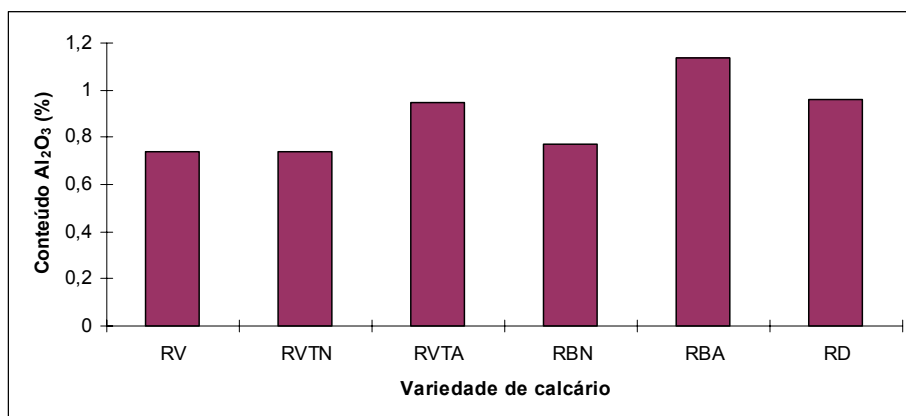


FIGURA 45. Representação gráfica do conteúdo de alumina determinado por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP

c) O conteúdo de óxidos de ferro (Fe₂O₃) é importante nos calcários avaliados (Fig. 46), especialmente nas variedades extraídas na FL 1, apresentando uma correlação direta com a intensidade de alteração da rocha. Assim, por exemplo, o conteúdo de ferro no calcário RV é menos da metade daquele presente no calcário RVT. No calcário RB, o conteúdo de ferro é maior na sua variedade alterada (RBA), devido à concentração deste mineral nas zonas de fraqueza como estilólitos e físsuras.

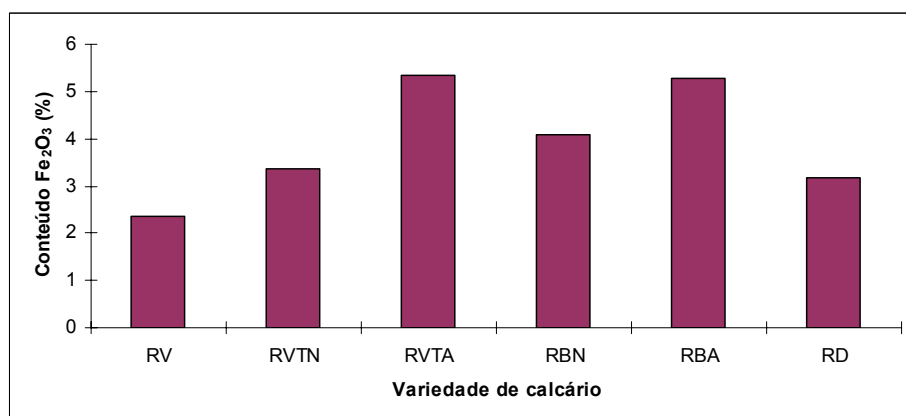


FIGURA 46. Representação gráfica do conteúdo de óxidos de ferro (Fe₂O₃) por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP.

O ferro é o elemento mais importante nos processos de deterioração estética nos locais onde estes calcários têm sido usados na cidade de Medellín, sendo causador de inúmeros casos de

manchamento especialmente nas rochas utilizadas em ambientes externos. Assim é muito comum ver nódulos de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) a partir dos quais geram-se manchas que se espalham ao longo das superfícies das peças das rochas (Fig.47). O Fe também provem das pequenas quantidades de carbonato férrico ou siderita (FeCO_3) presente em todas as variedades dos calcários e de pequenas quantidades de minerais metálicos como a ilmenita (FeTiO_3), pirita (Fe_2S) e pirrotita, identificadas via microsonda eletrônica.



FIGURA 47. Nódulos de ferro (goethita) visíveis tanto no bloco extraído do frente de lava (esquerda) quanto no muro externo do centro de convenções de Medellín (direita).

d) O óxido de magnésio (MgO) não é relevante na composição mineralógica dos calcários pesquisados, corroborando os resultados obtidos por difração de Raios-X (DRX), que estabelecem a composição predominante de carbonato de cálcio (CaCO_3) e os obtidos no processo de tingimento com red-alizarine, que não mostraram cores associadas à presença da dolomita. Geralmente, quando há processos de substituição de calcita por dolomita ou dolomitização, o processo vai acompanhado com um aumento da porosidade devido ao menor raio atômico do magnésio ($159,9\text{\AA}$) que substitui os átomos de calcita de maior raio atômico ($197,4\text{\AA}$) (Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

O calcário RV apresenta o maior conteúdo de MgO (1,20%) e o RD o menor (0,38%) dos calcários da Formação La Tampa. O teor de MgO diminui nos calcários RVT e RB em relação ao RV em função da sua alteração, o qual é considerado normal dentro da evolução do ciclo de meteorização das rochas.

e) O conteúdo de CaO (Fig. 48) apresenta pequenas variações, mas também diretamente relacionadas com o grau de alteração das rochas. Assim, nos calcários da Frente de Lava 1 há uma relação direta entre grau de alteração e remoção de CaO . O conteúdo deste óxido é maior na variedade RV (inalterado), e diminui no RVT e no RB. Nestas duas variedades observa-se também menor porcentagem de CaO nas variedades alteradas. O calcário RD da Frente de Lava 2 apresenta

menor quantidade de CaO em relação às outras três variedades consideradas no estado de inalteradas.

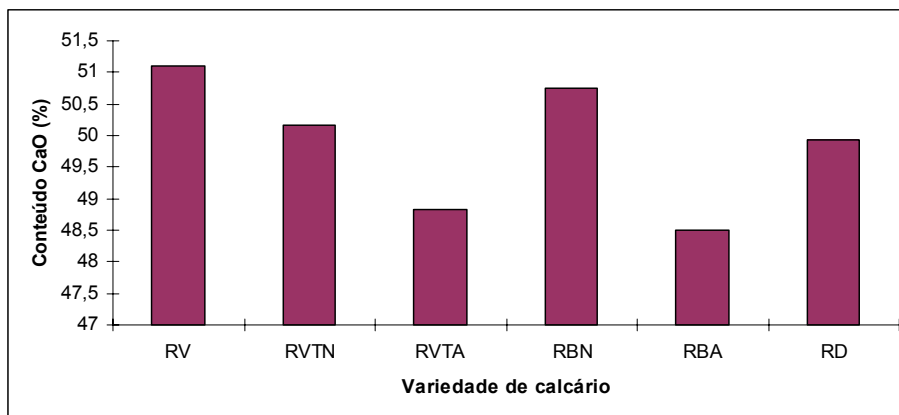


FIGURA 48. Representação gráfica do conteúdo de óxidos de cálcio (CaO) determinado por Espectrometria de Emissão por Plasma ICP

Dentre os elementos traços analisados, o bário chama a atenção por sua concentração, superior a 40ppm em todas as amostras analisadas. Nos calcários é comum acontecerem substituições do cálcio por elementos como ferro, zinco e bário (Deer *et al.*, 2000). Assim, o bário poderia vir a formar sais de sulfatos (Del Monte, 2006). Mas os baixos teores como no caso dos calcários pesquisados, não faz deste elemento um fator importante na susceptibilidade aos processos de alteração.

Na figura 49 apresentam-se os resultados totais de composição química, óxidos e elementos traços dos calcários ornamentais da Formação La Tampa obtidos por espectrometria de massa por ICP-ES.

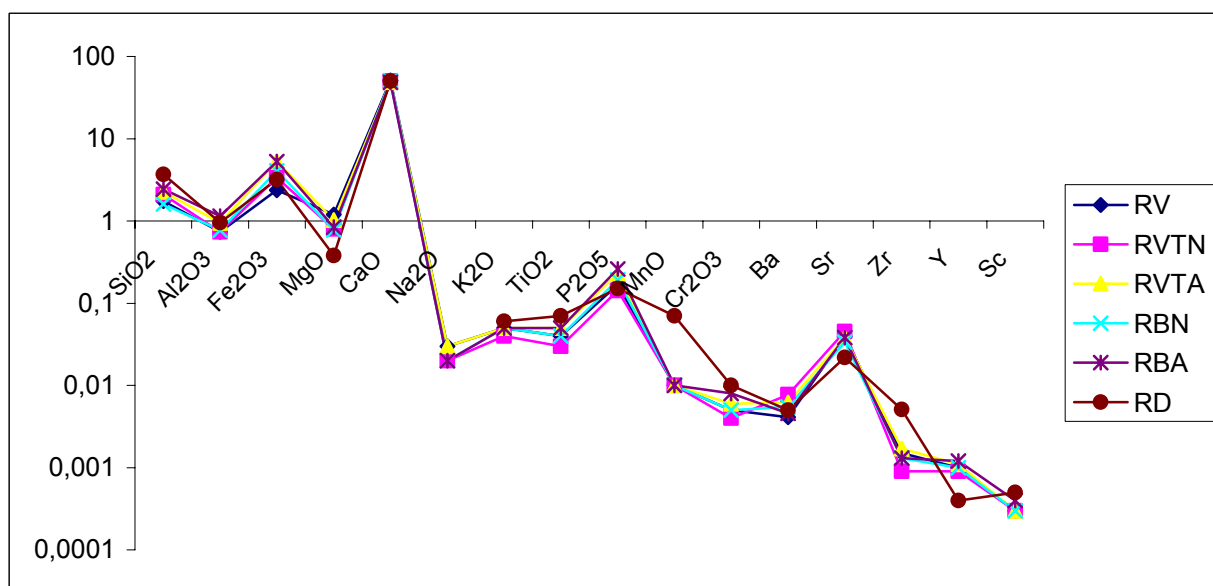


FIGURA 49. Caracterização química dos calcários da Formação La Tampa por Espectrometria de Emissão por plasma ICP.

6.3.3 MEV com análise química qualitativa micro-localizada por EDS (MEV/EDS)

Os dados obtidos através das análises químicas dos minerais constituintes dos calcários pesquisados corroboram a sua composição calcítica, mas também comprovam a presença de pequenas quantidades de siderita (FeCO_3) como carbonato secundário. A siderita aparece como produto da solubilização do ferro férrico presente em minerais como pirita e arsenopirita e sua reação com o carbonato de cálcio original (Van der Meer *et. al.*, 2002) (Fig. 50).

Outros minerais identificados por meio da análise de microsonda eletrônica foram a ilmenita (FeTiO_2) e a goethita (FeO(OH)), esta última considerada como produto de alteração dos minerais de ferro como a siderita, pirita e calcopirita (Deer *et al.*, 2000) e a barita (BaSO_4). Todos os minerais com conteúdo de ferro na sua estrutura são responsáveis pelo manchamento característico dos calcários da Formação La Tampa, especialmente no RVT e RB.

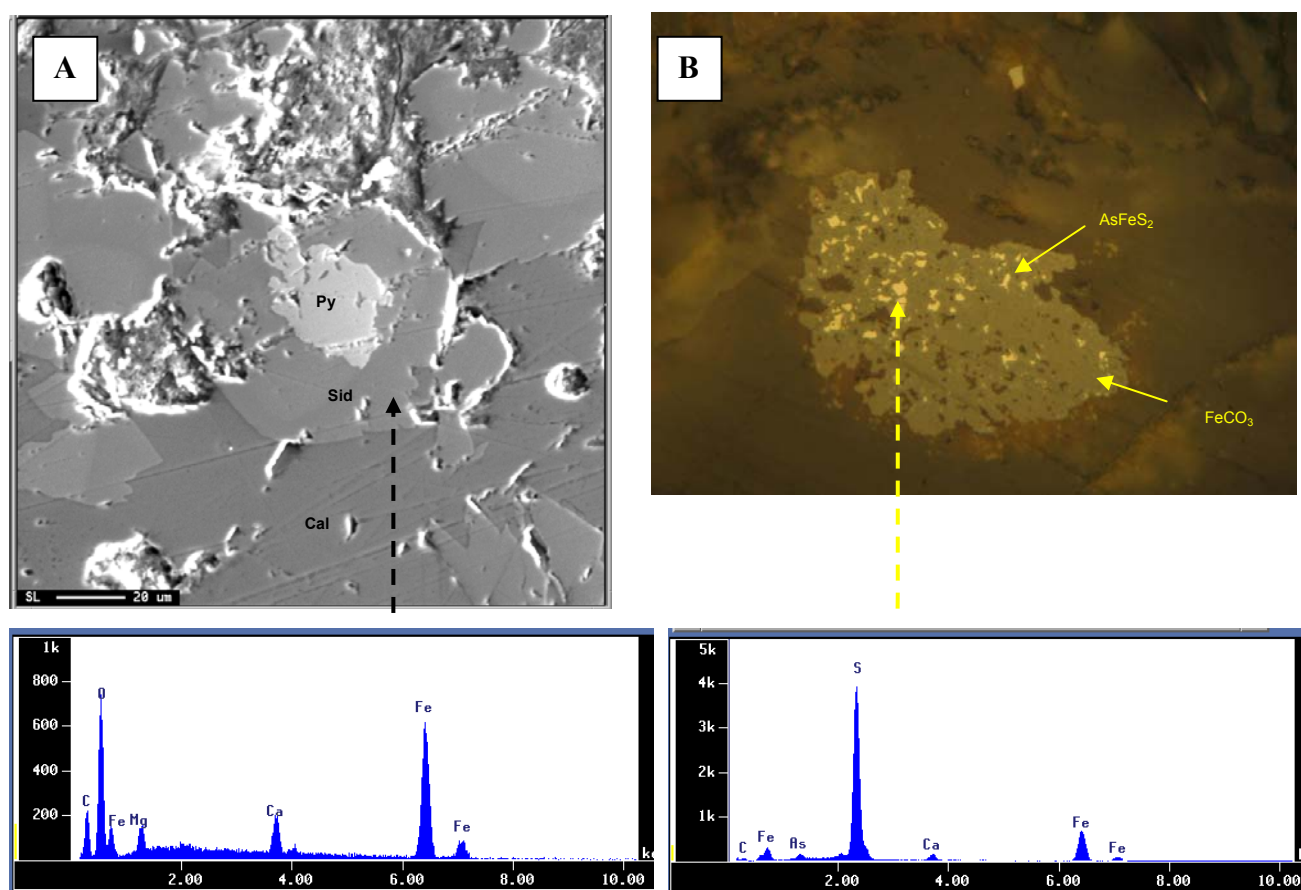


FIGURA 50. Siderita (FeCO_3) associada a minerais metálicos na matriz de rocha carbonática. (A) Cristal de siderita (Sid) com seu espectro característico, associado a pirita (Py) na matriz de calcita (Cal). (B) Associação de siderita (FeCO_3) e arsenopirita (AsFeS_2) mostrando o espectro qualitativo.

CAPÍTULO 7 – POROSIDADE, DINÂMICA DA CIRCULAÇÃO DE FLUIDOS E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

7.1 Avaliação da porosidade dos calcários da Formação La Tampa

A porosidade é um dos parâmetros principais, se não for o mais importante, que intervém no processo de degradação dos materiais lapídeos. O estudo adequado deste parâmetro permite compreender melhor os fenômenos de alteração e dar indicações úteis para a recuperação dos bens artísticos e arquitetônicos.

Para as substâncias poluentes serem eficazes na sua ação agressiva, primeiro elas devem entrar no interior da rocha, sendo obviamente a via de entrada a porosidade existente no material lapídeo. Por exemplo, no caso do anidrido carbônico, a água na qual esta substância está dissolvida pode alcançar a parte interna da rocha, dissolver o carbonato e transformá-lo em bicarbonato. Por meio da sucessiva migração dos fluidos aquosos do exterior para o interior, a sua evaporação e a sua concentração etc, os carbonatos são dissolvidos, transformados e recristalizados, chegando a desenvolver características completamente diferentes em relação ao material inalterado.

A resistência da rocha aos processos de deterioração depende de seu comportamento face a água, seja em forma líquida ou em forma de vapor ou gelo, e portanto, das características do sistema poroso, que vai influir na capacidade de absorver água do exterior e ainda da simples umidade presente na atmosfera. Deve-se considerar também o efeito do beneficiamento da rocha, que contribui muito a desenvolver uma porosidade secundária, induzida mecanicamente, geralmente muito elevada. Pesquisas realizadas sobre rochas sedimentares calcárias e areníticas têm demonstrado que a porosidade superficial de um material acabado pode ser até 50% maior do que a rocha em bruto, constituindo este aumento um problema para a durabilidade da rocha (Manganelli del Fà, 2002).

No caso de tratar-se do mesmo tipo de rocha, como acontece com os materiais calcários da Fm. La Tampa, RV, RVT e RB, extraídos do FL 1, pode-se afirmar que as diferenças existentes nas características texturais entre as diferentes porções do material lapídeo, são as principais responsáveis da degradação. Em outras palavras, tais diferenças texturais, e, portanto, da porosidade, determinam diferentes velocidades de circulação de água, líquida ou em forma de vapor, e diferentes capacidades de retenção na parte interna da rocha, condicionando assim as reações que dão lugar à degradação.

Considerando a importância da porosidade nos processos de deterioração realizou-se a sua avaliação, tentando obter informação sobre as características do sistema poroso (tipos, dimensões etc) com o uso de diferentes técnicas, cujos resultados são expostos a seguir.

7.1.1 Avaliação da porosidade e do microfissuramento por observação de lâminas impregnadas

Em relação à porosidade, nas lâminas petrográficas impregnadas com resina epóxi colorida, foi possível determinar a presença de poros intergranulares (it) e intragranulares (ig), assim como poros móldicos (mo) gerados nos processos de dissolução das carapaças dos bioclastos constituintes (Fig. 51A, B e C).

Os estilólitos (estruturas produzidas por dissolução por pressão da calcita ao longo dos planos de estratificação) foram observados em todas as variedades de calcário pesquisadas (Fig. 51B). As superfícies apresentam uma película de material oxidado, que poderia ser o resíduo insolúvel resultante do processo de dissolução e remoção do carbonato de cálcio (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). A presença de estilólitos facilita os processos de alteração das rochas, especialmente quando usadas em revestimentos externos como acontece na cidade de Medellín, devido a permitirem a migração dos fluidos dentro deles, deteriorando e chegando a destruir a rocha.

7.1.2 Determinação de índices físicos (Norma NBR12766 e EN1936)

No setor de rochas ornamentais, os índices físicos considerados abrangem a massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente. Estes índices definem relações básicas entre a massa e o volume das amostras de um determinado tipo de rocha.

O termo “aparente”, utilizado para a massa específica (densidade) e porosidade, indica que o volume medido para as determinações é relativo ao volume total da amostra analisada, ou seja, o volume de sólidos mais o volume de poros (espaços vazios).

A massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$) também conhecida como densidade de empacotamento (*bulk density*) é a relação entre a massa do corpo de prova seco, incluindo os poros inter e intragranulares, conectados ou isolados e seu volume aparente (Schneider *et. al.*, 2003). Os seus valores são apresentados em g/cm^3 ou kg/m^3 . Este é um parâmetro influenciado pela umidade. Por este motivo, adota-se determinar a massa específica aparente no estado seco e no estado saturado.

A densidade esquelética é definida como a densidade do esqueleto estrutural, sem considerar os vazios. A densidade esquelética aparente de uma partícula é a densidade do esqueleto estrutural em conjunto com os poros não conectados (Schneider *et. al.*, 2003). Os poros não conectados ou isolados são aqueles que não podem ser alcançados pelo fluido de intrusão utilizado, seja água, mercúrio ou hélio. Por exemplo, o gás hélio tem um poder de penetração muito alto, devido ao tamanho reduzido das moléculas, por ser quimicamente inerte e apolar. Já o mercúrio tem uma tensão superficial muito alta e poder de penetração menor do que o do hélio.

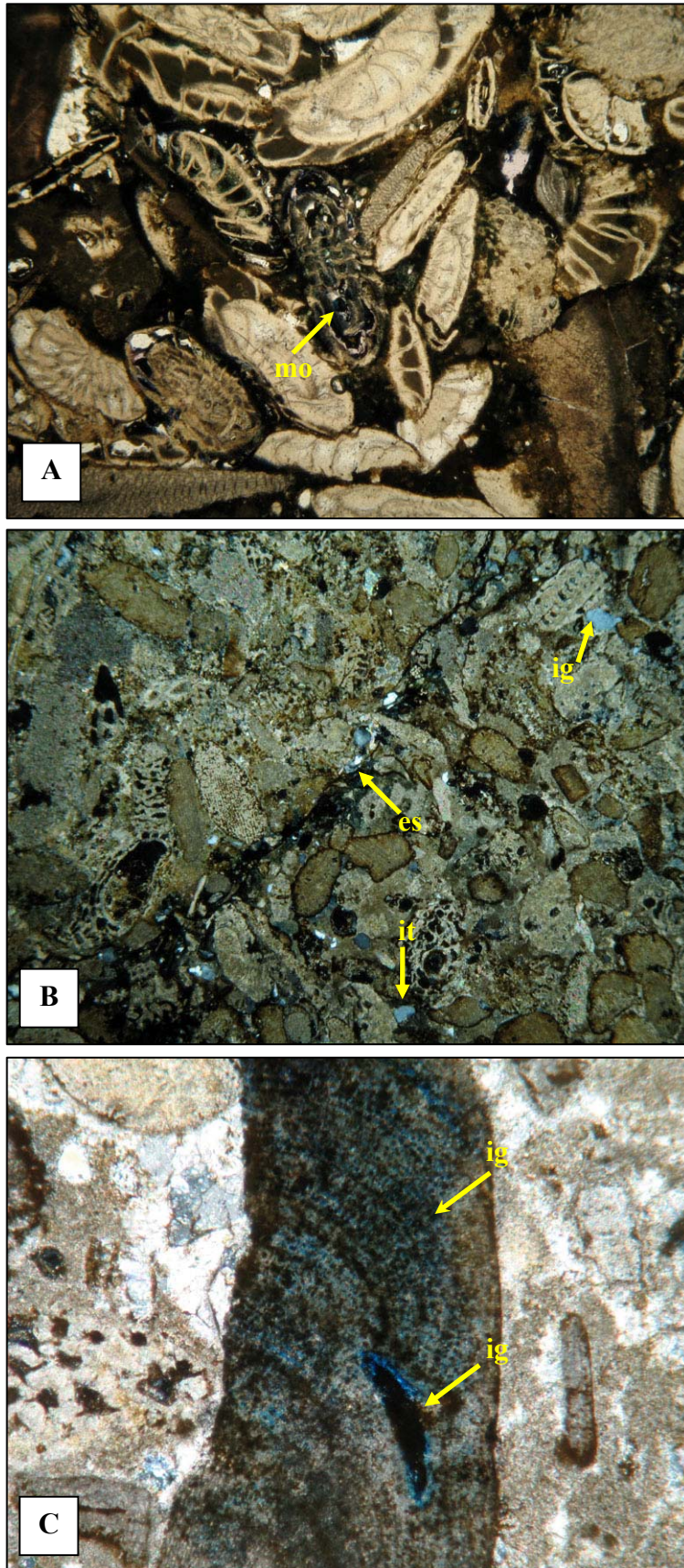


FIGURA 51. Porosidade intergranular (**it**), intragranular (**ig**), móldica (**mo**) e estilólitos (**es**) dos calcários da Formação La Tampa. A) calcário RV; B) calcário RD; C) detalhe de poros em fragmento de bivalvo, calcário RD.

A porosidade aparente e absorção de água são expressas em porcentagem, indicando respectivamente a porcentagem total de espaços vazios em um volume de rocha e a porcentagem de espaços vazios intercomunicados nesse mesmo volume. A absorção será sempre menor que a porosidade absoluta e aparente, porque a água ou outro líquido, não penetrará em todos os poros, pois muitos deles não são acessíveis (Frazão, 2002). Deve ser considerado o fato de que uma rocha com alta porosidade não tem necessariamente alta absorção de água, pois seus poros e cavidades podem não ser comunicantes.

A absorção é sempre determinada para um estado de saturação completa dos poros pela água e corresponde, portanto, ao máximo teor de umidade que a rocha pode alcançar. Em outras palavras, corresponde ao grau de saturação dos poros de 100% (Frazão, 2002).

Rochas com alta absorção de água apresentam aumento na massa específica aparente saturada e na condutividade térmica, dentre outras, enquanto que a resistência aos esforços compressivos e de flexão diminui, pelo enfraquecimento das ligações intergranulares.

Pode-se assim deduzir que os valores dos índices físicos são interrelacionados. Por exemplo, quanto menor a densidade, tanto maior se pode estimar o volume de espaços vazios existentes na rocha. Sendo maior o volume de espaços vazios, maior será a porosidade aparente e, possivelmente a porosidade aberta. Com maior porosidade aberta, que traduz a existência de poros e/ou cavidades intercomunicantes, maior será a absorção de água esperada para a rocha e provavelmente menor a sua resistência físico-mecânica.

Em resumo, a porosidade aparente mostra relação direta com a resistência físico-mecânica das rochas; a absorção de água, com a possibilidade de infiltração de líquidos; e a massa específica aparente, com os aspectos de resistência físico-mecânica, além de permitir calcular o peso individual das placas especificadas no projeto arquitetônico de uma edificação.

Os resultados dos índices físicos (Tab. 4) para os calcários pesquisados permitem observar diferenças entre eles relacionados tanto com massa específica aparente seca ($\rho_{a,sec}$) e saturada ($\rho_{a,sat}$), com a densidade esquelética (d_{skel}) e, portanto, com as propriedades de porosidade (Φ_a) e de absorção de água (α_a). As maiores diferenças entre elas são observadas justamente nas propriedades de porosidade (Φ_a) e de absorção de água (α_a) (Fig. 52). Assim, os maiores valores de porosidade e de absorção de água ocorrem no calcário RB da FL 1 (Φ_a 5,56 e α_a 3,39) e no calcário RD da FL 2 (Φ_a 8,79 e α_a 5,35) que superam largamente os valores destes parâmetros para RV e RVT.

TABELA 4. Índices físicos das variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa.

	Variedade de calcário	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)*	$\rho_{a_{sat}}$ (Kg/m ³)	d_{Skel}	Φ_a (%)	α_a (%)
FL1	RV	1,60	1,63	1,65	2,64	1,73
	RVT	1,61	1,64	1,66	2,92	1,81
	RB	1,63	1,69	1,72	5,56	3,39
FL 2	RD	1,61	1,70	1,77	8,79	5,35

* $\rho_{a_{sec}}$: massa específica seca; $\rho_{a_{sat}}$: massa específica saturada; d_{Skel} : densidade esquelética; Φ_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água aparente.

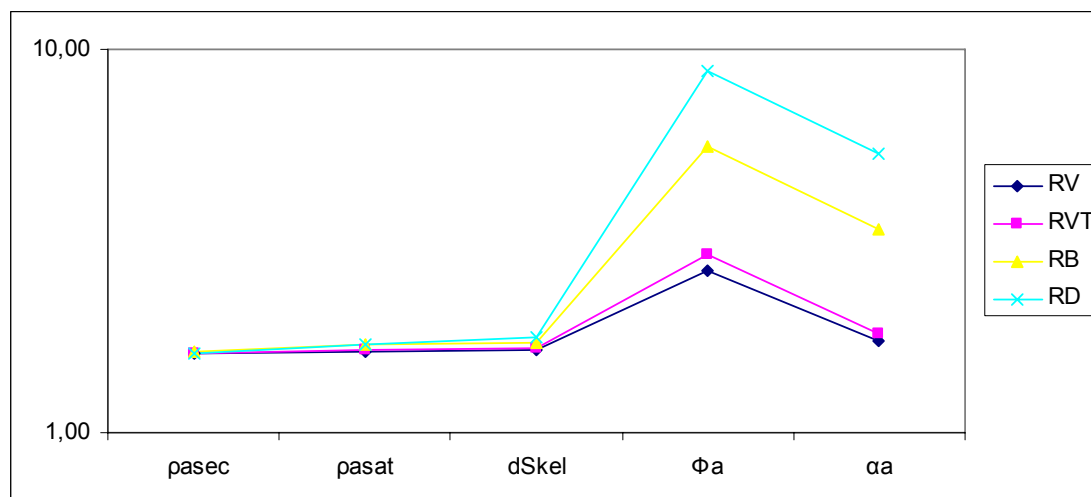


FIGURA 52. Índices físicos dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. $\rho_{a_{sec}}$: massa específica seca; $\rho_{a_{sat}}$: massa específica saturada; d_{Skel} : densidade esquelética; Φ_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água aparente.

Os índices físicos dos calcários da FL 1 aparecem diretamente relacionados com o grau de alteração da rocha. O RVT apresenta valores mais elevados em todos os parâmetros em relação ao RV, mas que variam dependendo do grau de alteração no corpo de prova utilizado no ensaio. Assim os corpos de prova com alteração incipiente apresentam valores que são semelhantes aos do RV, mas um mínimo grau de alteração é suficiente para aumentar os valores de $\rho_{a_{sec}}$, $\rho_{a_{sat}}$, Φ_a e α_a .

O calcário RD extraído na FL 2 apresenta valores de Φ_a (8,79%) e α_a (5,35%) ainda mais elevados do que as três variedades de calcário da FL 1, o que influi diretamente na susceptibilidade à degradação deste material quando usado em ambientes externos.

A densidade esquelética (d_{Skel}) apresenta a mesma tendência observada para os demais parâmetros. Ao comparar os valores médios de $\rho_{a_{sec}}$ e a d_{Skel} para os quatro tipos de calcários (Fig. 53), observa-se que os calcários RB e RD apresentam maior densidade esquelética que os calcários menos porosos RV e RVT. Este tipo de comportamento poderia indicar a presença nos calcários RB e RD de uma maior quantidade de poros não conectados ou de mesoporos e microporos em relação com as variedades RV e RVT, os quais poderiam não ter sido invadidos pela água nas condições do ensaio (ciclo de saturação de 24h).

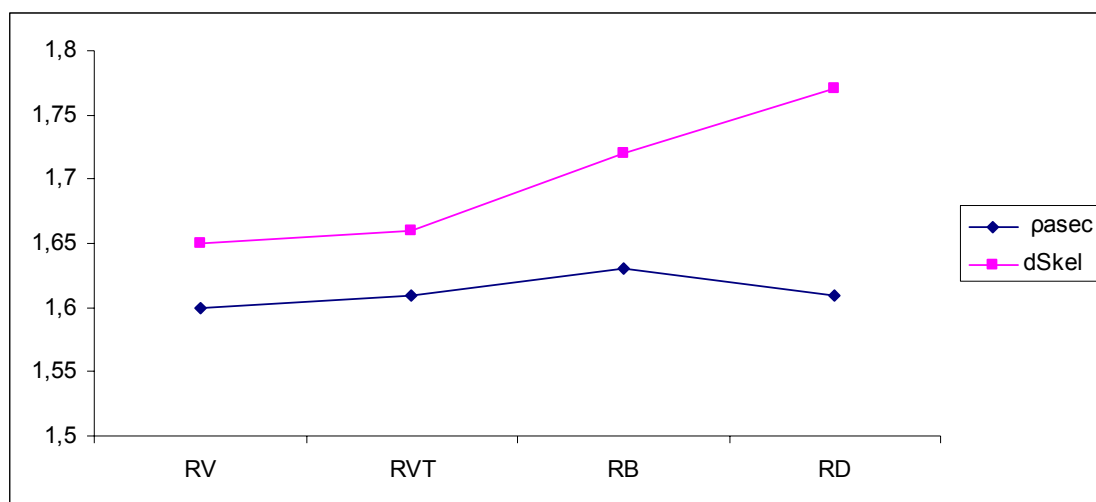


FIGURA 53. Comparação da massa específica aparente seca (ρ_{sec}) com a densidade esquelética (d_{skel}) nos calcários pesquisados.

Ao correlacionar os parâmetros Φ_a e α_a observa-se a relação direta entre porosidade e absorção de água para todos os calcários (RV, RVT, RB e RD), indicando assim alto grau de conexão entre os poros saturados com água nessas rochas (Fig. 54).

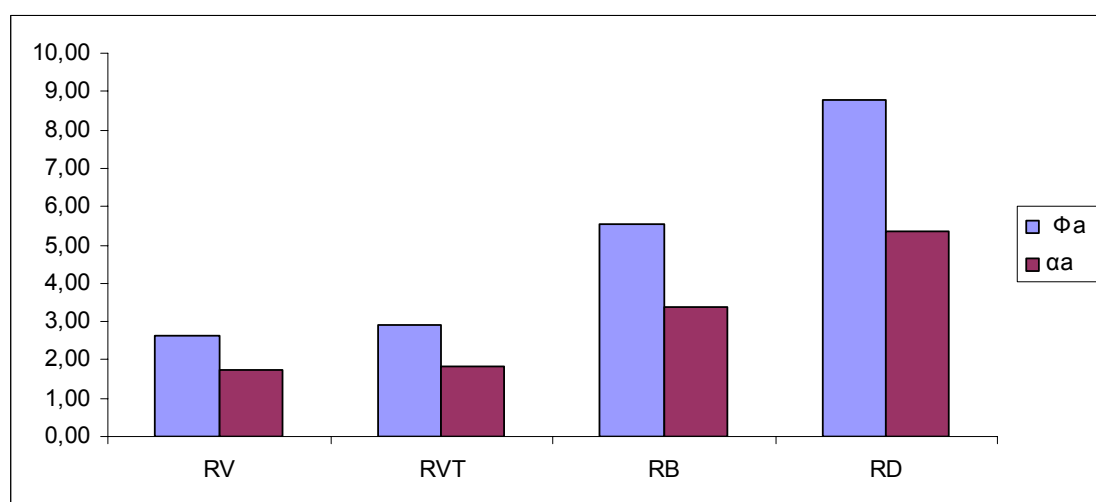


FIGURA 54. Relação entre porosidade aparente (Φ_a) e absorção de água aparente (α_a). RV: calcário Royal Verde; RVT: calcário Royal Veta; RB: calcário Royal Bronze; RD: calcário Royal Dorado.

7.1.3 Avaliação da porosidade pela técnica de Porosimetria de Mercúrio (MIP)

Os resultados obtidos por porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para as quatro variedades de calcários pesquisados, RV, RVT, RB e RD (Anexo A1) permitem determinar diferentes intervalos de raios de poros encontrados nos calcários ornamentais da Fm. La Tampa, identificando os macroporos e mesoporos, importantes como elementos facilitadores dos processos de degradação dos materiais rochosos, especialmente os relacionados com a absorção capilar (Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Manganelli del Fà, 2002; Steiger, 2003).

Ressaltam-se os maiores valores obtidos nos parâmetros $\rho_{a_{sec}}$, d_{skel} e Φ_a quando comparados com os obtidos nos índices físicos nos quais a água é o fluido de intrusão (Tab. 5). Os valores de $\rho_{a_{sec}}$, também conhecida como *bulk density*, são muito maiores na avaliação com a porosimetria de mercúrio em relação à avaliação feita nos índices físicos (Fig. 55). A diferença entre os dois métodos é que a porosimetria de mercúrio não determina as superfícies porosas maiores de 200 μ m aproximadamente (Angeli, 2007). Nesse caso os poros maiores (macroporos), que são identificados através da determinação dos índices físicos e que correspondem àqueles visíveis ao microscópio ótico, não seriam registrados. Então, como são detectados menos poros na porosimetria de mercúrio quando comparados com os determinados por saturação em água, a massa específica aparente seca aparece maior com o MIP (Thomachot, 2002).

TABELA 5. Comparação dos valores de massa específica aparente ($\rho_{a_{sec}}$), densidade esquelética (d_{skel}) e porosidade Φ_a obtidos por MIP e índices físicos.

	Variedade de calcário	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³) água	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³) Hg	d_{skel} água	d_{skel} Hg	Φ_a (%) água	Φ_a (%) Hg
	RV	1,6	2,462	1,65	2,631	2,64	6,409
	RVT	1,61	2,409	1,66	2,589	2,92	6,939
FL1	RB	1,63	3,608	1,72	4,049	5,56	10,894
FL 2	RD	1,61	2,517	1,77	2,658	8,79	15,364

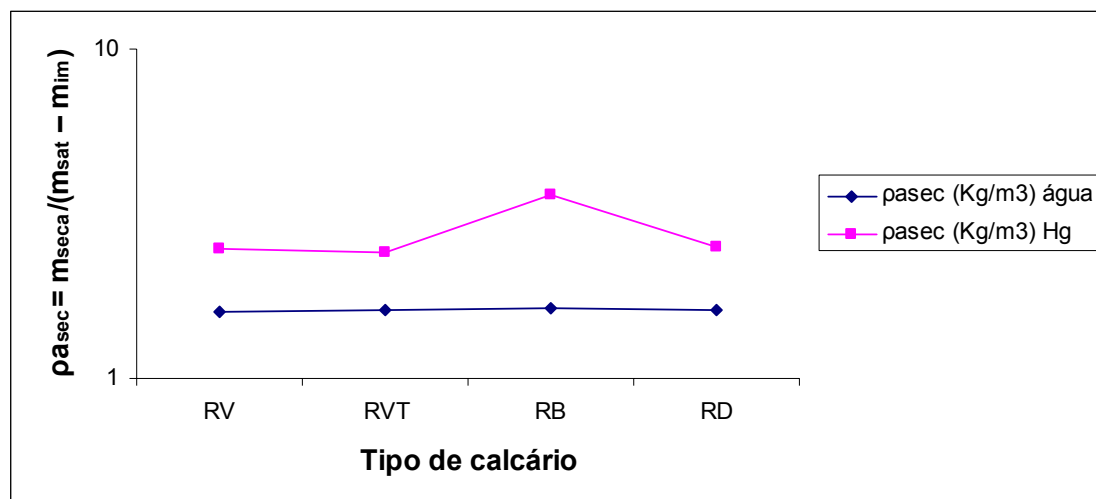


FIGURA 55. Comparação dos valores de massa específica aparente ($\rho_{a_{sec}}$) obtidos por MIP e por determinação de índices físicos (NBR 12766).

A densidade esquelética fornece também uma informação importante sobre a meso e a microporosidade dos calcários pesquisados. O fato do mercúrio penetrar melhor maior quantidade de poros do que a água, permite obter valores mais precisos da densidade esquelética quando comparada com os dados obtidos na execução dos índices físicos (Tab. 5, Fig. 56). Devido à existência de mesoporos detectados por MIP, os valores de densidade esquelética obtida usando esta

técnica são maiores que os obtidos por absorção de água uma vez que a água não tem a capacidade de penetrar nos poros menores (Angeli, 2007).

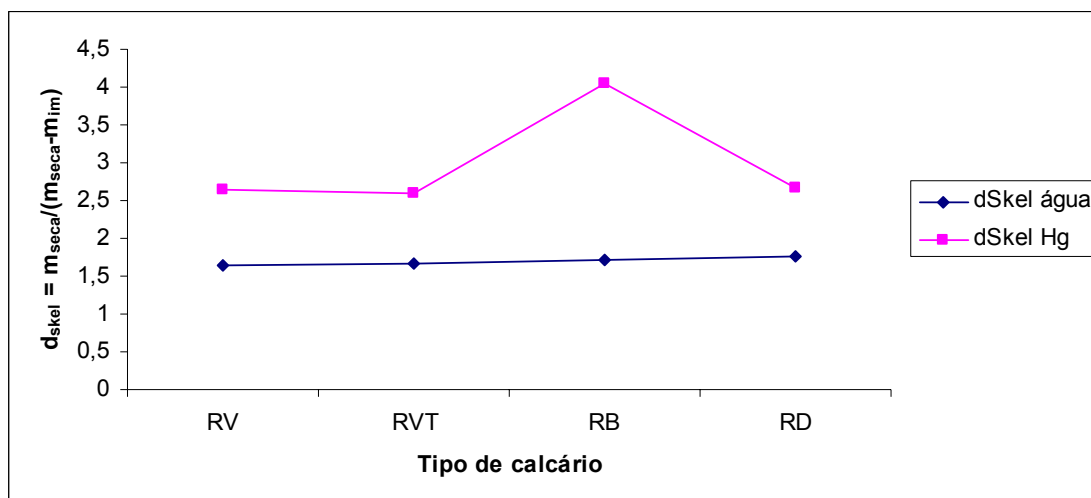


FIGURA 56. Comparação da densidade esquelética (d_{skel}) obtida por porosimetria de mercúrio e por determinação de índices físicos (NBR 12766).

Em relação à porosidade, os resultados obtidos por MIP mostram a mesma tendência dos valores determinados pelos índices físicos, mas com resultados maiores, correspondentes à identificação de um intervalo muito maior de tamanhos de poro do que é possível identificar quando é a água o fluido que circula no sistema poroso da rocha (Fig. 57). Assim, os calcários RB da FL 1 e o RD da FL 2, que já tinham sido identificados como os mais porosos, apresentam um acréscimo superior a 30% nos valores da porosidade obtida por MIP (10,89% e 15,36%), o que indica a abundância de mesoporos que não são identificados quando a avaliação da porosidade é realizada através dos índices físicos.

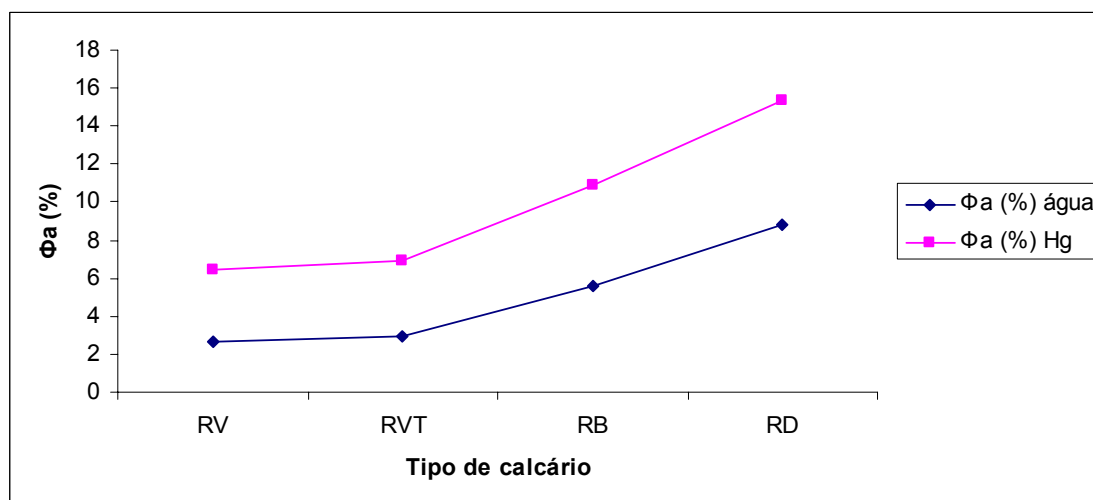


FIGURA 57. Comparação da porosidade (Φ_a) obtida por porosimetria de mercúrio e a porosidade aparente (Φ_a) obtida na determinação dos índices físicos (NBR 12766).

O espectro do calcário RV (Fig. 58) apresenta uma distribuição sub-unimodal de tamanho de entrada de poro. Esta distribuição foi definida como aquela que apresenta um pico característico com um valor determinado, mas também outros tamanhos de entradas de poro, que definem outros picos menos importantes que aquele considerado característico (Angeli, 2007). Os raios de poro do RV têm valores concentrados no intervalo entre 0,01 e 0,1 μ m. Existe um pico em 0,05 μ m, correspondente ao 34,98% do volume de poros da rocha. Outros picos encontrados são: 0,15 μ m, correspondente ao 6,67% do volume de poros, 8 μ m (0,760%), 13 μ m (1,52%) e 30 μ m (0,76%). O resultado do ensaio de porosimetria de mercúrio permite estabelecer que o calcário RV apresenta elementos com diferentes porosidades, sendo que os valores menores estão relacionados ao cimento espático da rocha, enquanto os valores maiores (30 μ m) estariam relacionados aos microfósseis constituintes.

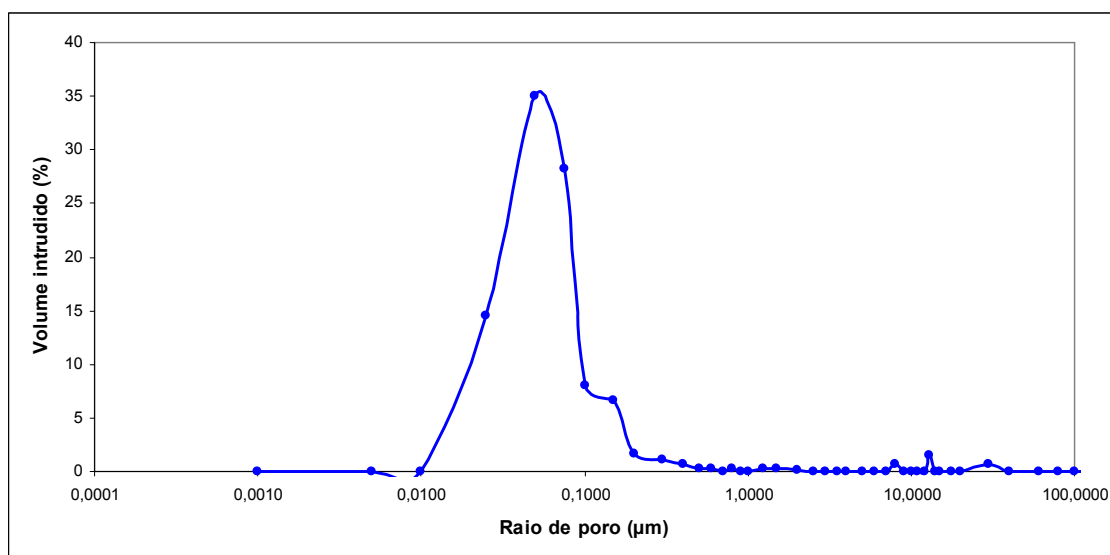


FIGURA 58. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Verde (RV).

O calcário RVT apresenta também uma distribuição sub-unimodal de raio de poro, mas estes ocupam no espectro um intervalo mais amplo que o calcário RV. Os valores situam-se entre 0,001 e 0,6 μ m, com um pico para o valor de raio de acesso de poro de 0,075 μ m, correspondente ao volume de poros de 29%. Aparecem também outros três picos para raio de acesso de poro: 8 μ m (0,550%), 13 μ m (1,1%) e 30 μ m (0,550%) (Fig. 59). O fato de ser mais amplo o intervalo no qual se encontram os raios de acesso dos poros do calcário RVT, quando comparado com o intervalo de porosidade do RV, é um reflexo da existência dos níveis alterados nesta variedade de rocha. Nestes níveis alterados aumenta o valor da porosidade e por tanto dos raios de acesso de poros determinados por essa técnica. Os picos de raio de entrada de poro de maior valor também devem corresponder àqueles relacionados com a porosidade do material bioclástico na rocha.

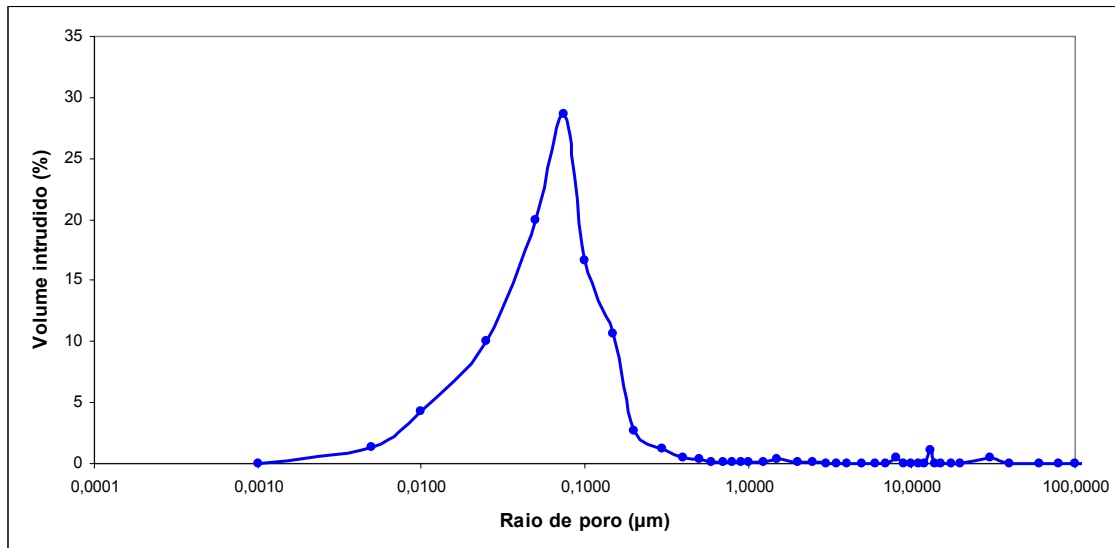


FIGURA 59. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Veta (RVT).

O calcário RB apresenta um espectro de poros muito irregular e diferente dos dois anteriores. Mostra uma distribuição heterogênea do raio de acesso de poro, compreendendo um intervalo muito amplo, entre 0,001 e 30µm (Fig. 60). O raio de acesso mais importante é 0,150 µm o qual ocupa um volume de poros equivalente ao 24,48% do volume total de poros da amostra. Outros raios de acesso de poro encontrados são: 0,075 µm (12,85% do volume de poros), 0,200 µm (12,85%), 0,300 µm (8,57%), 8 µm (0,540%), 13 µm (1,080%) e 30 µm (0,540%). Um fato a considerar e que pode explicar a irregularidade do espectro do MIP para esta variedade, é o grau de alteração desta rocha, que corresponde ao maior dentre as três variedades, que por sua vez tiveram como origem a mesma rocha. Essa alteração ocasionou aumento da porosidade, interconexão maior entre os poros de diferentes raios e certamente a presença de fissuras que vão influir no comportamento da rocha face o MIP.

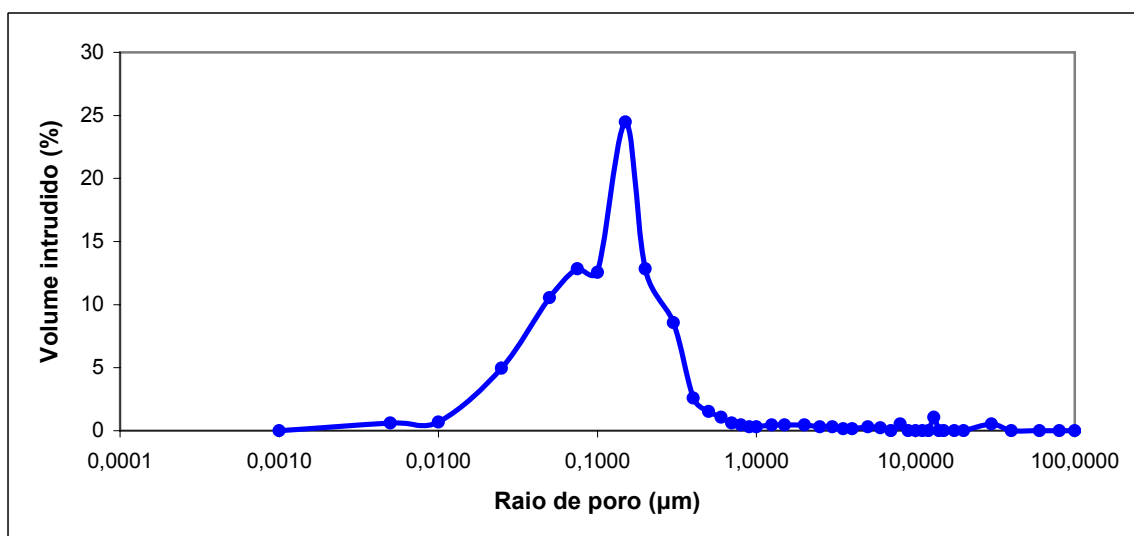


FIGURA 60. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário Royal Bronze (RB).

Comparando os gráficos de MIP correspondentes aos calcários RV, RVT e RB (Fig. 61), todos da FL 1, podem ser observadas as diferenças entre os valores da porosidade, e como o comportamento do espectro de MIP está diretamente relacionado com o grau de alteração da rocha. Assim, o calcário RV apresenta o menor valor de pico de raio de acesso de poro, refletindo o seu menor grau de alteração, enquanto que os picos dos calcários RVT e RB, mostrando um aumento do raio de acesso de poro, explicam os seus maiores estados de alteração parcial (RVT) e total (RB). Também é possível observar que no calcário RV, o intervalo de valores de raio de poro é menor e a sua curva é mais definida, o que não acontece com os calcários RVT e RB, nos quais os raios de poro abrangem um intervalo maior. No caso do RB, os dados obtidos indicam que, além da maior porosidade e do maior raio de entrada de poro, a distribuição dos mesmos é muito heterogênea, o que é de se esperar, considerando o alto grau de alteração que esta rocha apresenta.

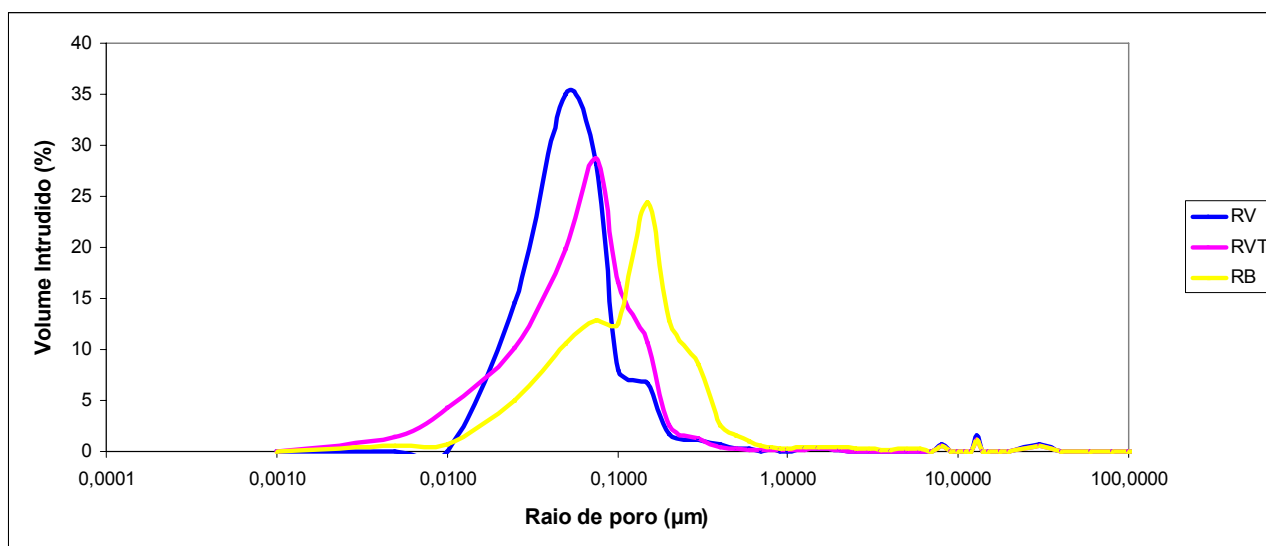


FIGURA 61. Diferenças no espectro de porosidade segundo a técnica de porosimetria de mercúrio para as rochas RV, RVT e RB, relacionadas com seu grau de alteração. RV = 0,050µm. RVT= 0,075; RB=0,150

O calcário RD da FL 2, classificado como Biomicrito (Folk, 1959) ou Wackestone (classificação de Dunham, 1962), apresenta maior conteúdo de matriz micrítica em relação às variedades da FL 1, com fragmentos fósseis de menor tamanho e menor grau de seleção e arredondamento. Macroscopicamente a rocha apresenta uma textura arenítica de grão fino e aparência mais homogênea.

O espectro do calcário RD (Fig 62) apresenta como características a distribuição sub-unimodal de raios de acesso de poros, com tamanhos de raio de poro compreendendo ao maior intervalo entre as quatro variedades analisadas, mas com maior homogeneidade na distribuição de raios de poros principais em relação ao volume do corpo de prova. Os raios de acesso de poro do calcário RD têm valores concentrados no intervalo entre 0,001 e 1µm, mas a maioria deles encontra-se no intervalo

0,075 a 0,4 μm . Assim, o pico do raio de poro principal é 0,2 μm correspondente ao volume de intrusão de 28,48%. Outros raios de poro que são importantes no volume de poros do RD são: 0,30 μm (21,23% do volume de poros), 0,15 μm (18,22%), 0,1 (7,65%).

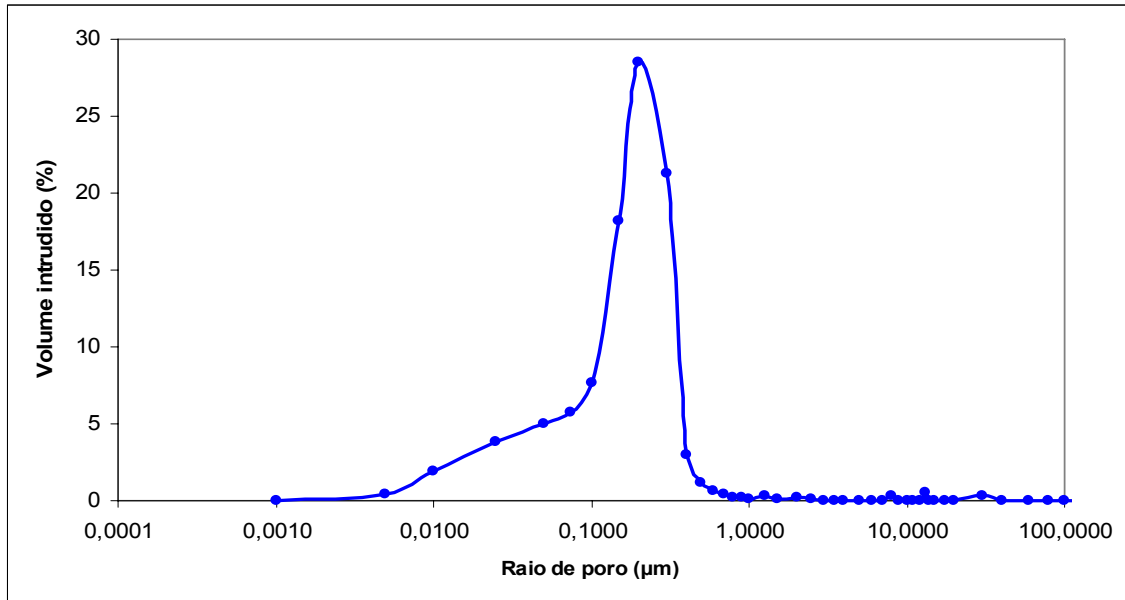


FIGURA 62. Espectro de porosimetria de injeção de mercúrio no calcário RD.

Os resultados resumidos da porosidade obtida por MIP para os calcários ornamentais da Fm. La Tampa são apresentados na Tab. 6.

No caso do calcário RV, apesar deste apresentar a menor porosidade das quatro variedades (6,41%), chama a atenção o fato de possuir o maior volume de poros (34,98%) com as menores dimensões dos raios de acesso de poro (0,05 μm). Esta ordem de dimensão de poros favoreceria a absorção por capilaridade da água ou das substâncias poluentes no meio aquoso e também a absorção de água em fase de vapor. Essa característica permitiria afirmar que mesmo sendo um material com baixa porosidade relativa, ao ser comparado com os outros três materiais, o calcário RV é permeável ao vapor aquoso, podendo ser considerado também como higroscópico, e, portanto vulnerável aos processos de degradação.

A porosidade e os raios de poro dos calcários RVT e RB estão diretamente relacionados com o grau de alteração da rocha, parcial no caso do RVT e total no caso do RB. A maior porosidade destas variedades em relação ao calcário RV e as maiores dimensões dos raios de poro indicariam maior susceptibilidade aos processos de alteração.

TABELA 6. Porosidade e raios de poro principais para os calcários ornamentais da Fm. La Tampa

Calcário	Porosidade total MIP (%)	Raio meio de poro (μm)	Raios de poro principais (μm)	Volume de poros (%)	Porosidade equivalente (%)
RV	6,41	0,05	0,05	34,98	2,24
			0,15	6,67	0,43
			8	0,76	0,049
			13	1,52	0,097
			30	0,76	0,048
RVT	6,94	0,07	0,075	29	2,01
			8	0,55	0,038
			13	1,1	0,076
RB	10,89	0,13	30	0,55	0,038
			0,005	0,61	0,066
			0,075	12,85	1,40
			0,15	24,48	2,67
			0,20	12,85	1,40
			0,30	8,57	0,93
			8	0,54	0,059
RD	15,36	0,20	13	1,08	0,12
			30	0,54	0,059
			0,01	1,91	0,29
			0,025	3,86	0,59
			0,05	5,05	0,78
			0,075	5,7	0,88
			0,1	7,65	1,18
			0,15	18,22	2,80
			0,20	28,48	4,37
RD	15,36	0,20	0,30	21,23	3,26
			0,50	1,14	0,18
			0,60	0,65	0,01

Considerando o conjunto de resultados de porosidade e as características dos espectros de MIP de todos os calcários da Fm. La Tampa, (Fig. 63), é possível observar que o calcário mais poroso é o RD, com valores de porosidade 50% maiores do que o RB, a variedade mais alterada da FL 1. Esse calcário (RD) apresenta também as maiores dimensões de raio de acesso de poro. Assim, enquanto que o pico do calcário RV é de $0,05\mu\text{m}$, no calcário RD é quatro vezes esse tamanho ($0,20\mu\text{m}$). Essas características (maior porosidade e poros de maior tamanho maior variedade), permitem estabelecer que o calcário RD seria o mais susceptível aos processos de deterioração de todos os calcários da Fm. La Tampa.

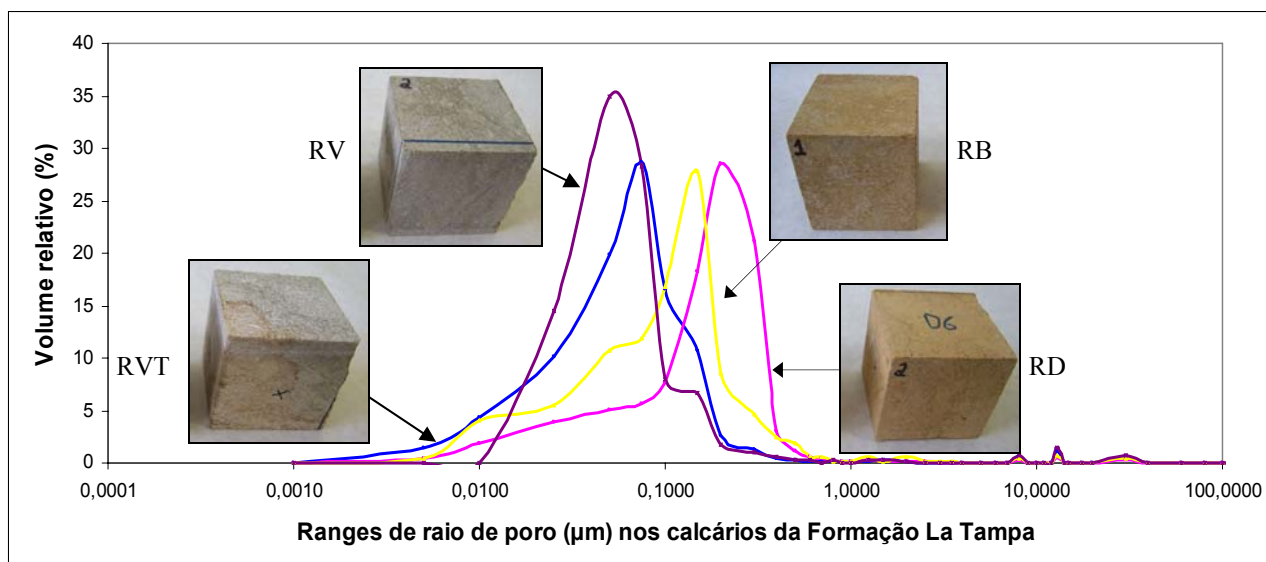


FIGURA 63. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para as quatro variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa (RV: royal verde; RVT: royal veta; RB: royal bronze; RD: royal dorado).

Além dos macroporos e mesoporos detectados pela avaliação de índices físicos e pela porosimetria de mercúrio, é possível reconhecer poros ainda menores (microporos) via MEV, sendo estes muito importantes nos processos de deterioração pelo seu caráter capilar e seu alto poder de adsorção. Os microporos conseguem fixar água no seu interior, facilitando dessa forma, os processos de deterioração. Todos os calcários avaliados estão compostos de bioclastos de diversos tipos, com grau de cimentação variável. O sistema poroso nos calcários bioclásticos está condicionado à proporção e à estrutura de cada um dos tipos de bioclastos constituintes da rocha e ao grau de cimentação.

No caso das variedades RV, RVT e RB, estas rochas são caracterizadas por possuírem um conteúdo fóssil mais homogêneo quando comparadas com o RD. Os bioclastos são especialmente de microfauna de foraminíferos bentônicos, como nummulítidos, orbitolínidos e globigerínidos, os quais apresentam estruturas porosas relativamente simples (Fig. 64A, B), com poucas cavidades e com diâmetros menores de poros (Fig. 64C). Por serem provenientes do mesmo tipo de rocha, as diferenças entre as variedades RV, RVT e RB estão condicionadas ao grau de alteração da mesma.

O grau de cimentação destas rochas é maior do que no RD o que influi na diminuição da porosidade. Porém, a identificação de microporos no calcário RV de dimensões na ordem de nanômetros (nm) (Fig. 64C), inferiores aos diâmetros mínimos para absorção de água em forma líquida, de 0,0037 micrômetros (μm) (Manganelli del Fà, 2002), mas não para a absorção da água no estado gasoso, permite considerar a higroscopia desta rocha e, portanto, a sua susceptibilidade aos processos de alteração.

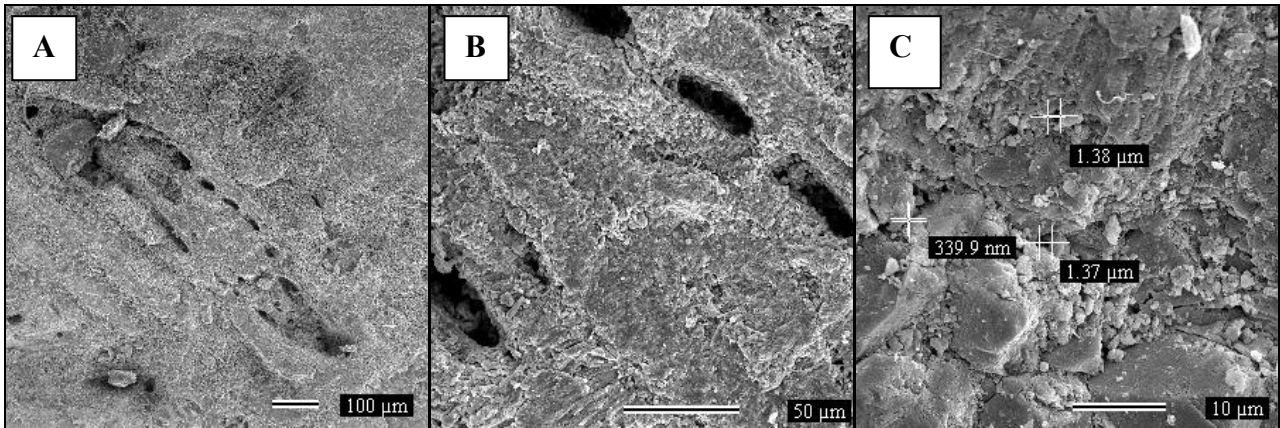


FIGURA 64. Imagens MEV do calcário Royal Verde. (A) Aspecto geral de foraminífero com porosidade simples relacionada à sua morfologia. (B) Detalhe das paredes de esparita do foraminífero, com baixa porosidade. (C) Microporos (dimensões em nm), nos cristais de calcita.

O calcário RD, da FL 2, possui maior proporção de matriz micrítica e maior variedade de bioclastos (Fig. 65), do que as variedades da FL 1 já mencionadas. Os fósseis incluem além de foraminíferos, algas, briozoos e corais, todos com uma estrutura morfológica mais complexa e com maior heterogeneidade nos tipos e tamanho dos poros. Também é comum a presença de elementos fósseis da classe molusco, especialmente de gasterópodos, nos quais a concha originariamente aragonítica foi dissolvida, criando porosidade móldica. Processos de neomorfismo posteriores permitem a precipitação e cristalização de esparita nesta porosidade móldica, com diminuição da porosidade formada no processo de dissolução da aragonita. Estas diferenças em conteúdo de matriz micrítica, grau de cimentação, composição original dos fragmentos bioclásticos e os processos de dissolução de concha aragonítica-recristalização de calcita esparítica, condicionam a porosidade do calcário RD e, portanto a classe de poros originais no material inalterado e os desenvolvidos por causa da alteração em relação às outras três variedades produzidas no processo de beneficiamento dos calcários da Fm. La Tampa.

Nas observações via MEV é possível determinar que o calcário RD, a diferença dos calcários RV, RVT e RB não apresenta quantidades importantes de microporos. A maioria dos poros do calcário RD são mesoporos, os quais se apresentam frequentemente interconectados (Fig. 65A e B). Também são identificados poros do tipo *Ink bottle*, caracterizados pela sua morfologia, com entrada larga e colo estreito, que favorece os processos de deterioração ocasionados pela ascensão capilar de fluidos (Fig. 65C).

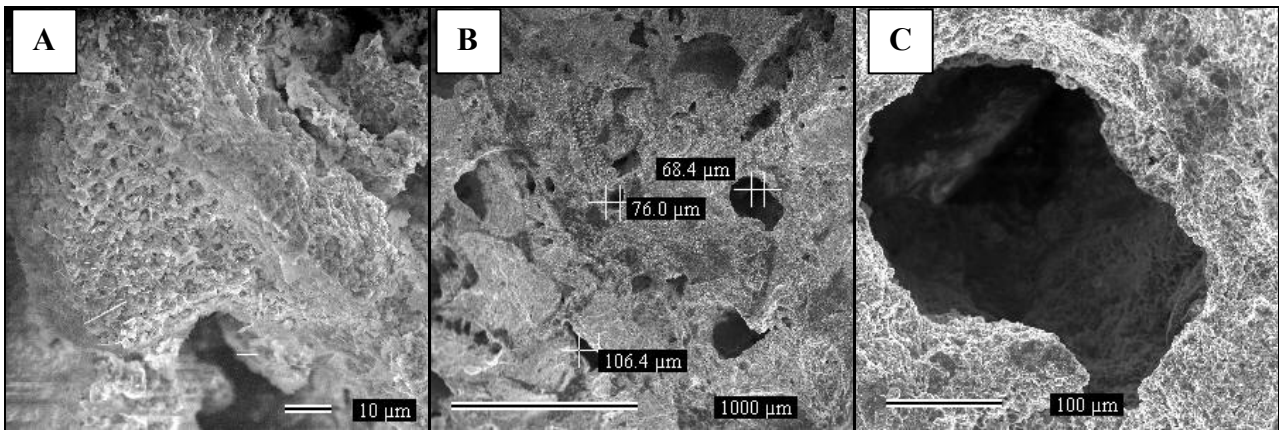


FIGURA 65. Imagens MEV do calcário Royal Dorado. (A) Fragmento bioclástico de briozóário mostrando um complexo sistema de poros. (B) As dimensões e formas dos poros são mais variadas do que as dos calcários RV, RVT e RB. (C) Poro com geometria *ink bottle* de entrada larga e colo estreito.

7.2 Propriedades relacionadas com a circulação de fluidos

7.2.1 Absorção capilar (Norma EN 1926)

A circulação de fluidos por capilaridade nas rochas é um dos principais fenômenos envolvidos nos processos de deterioração das rochas quando são utilizadas como materiais de construção, seja como revestimentos de fachadas externas, como pisos ou como ornamentos.

A absorção por capilaridade é um processo importante que pode ocorrer em todos os tipos de rocha que possuem porosidade, especialmente dos tipos meso-porosidade e micro-porosidade. Aires-Barros (2001) considera os seguintes aspectos como importantes nos processos capilares:

- Os poros podem encher-se de água muito antes do ponto de orvalho se eles forem suficientemente pequenos. Para além dos efeitos osmóticos, são possíveis condensações para valores de umidade relativa a partir de 30%;
- A condensação só acontece depois da formação de um filme monomolecular de água extremamente estável. A sua formação e evaporação são reversíveis;
- A geometria dos poros intervém fundamentalmente na determinação do momento e na própria possibilidade da condensação e da evaporação;
- Muitos poros permanecem sem água depois do enchimento de outros poros ou de capilares de menores dimensões que se encontram concatenados pela geometria de acesso;
- As variações térmicas levam à variação da pressão de vapor nos microporos e põem em movimento a água condensada nos colos dos poros, deslocando os sais presentes em solução.

7.2.1.1 Mecanismo de penetração de água nos capilares

Na interface entre o material e a água no estado líquido contida em uma cavidade ou sobre a sua superfície, há uma película de espessura molecular, composta de moléculas de água vinculadas tão fortemente ao material que assumem uma estrutura típica do estado sólido e que requer uma

energia latente de libertação (dito calor latente de imersão ou molhagem) semelhante a duas ou três vezes a de evaporação da água líquida. A presença deste filme de água “sólida” sobre a superfície de um material é condição necessária para que esta seja “molhável”, isto é, que a gota de água possa se expandir sucessivamente no interior da rocha (Aires-Barros, 2001).

Se a rocha está seca (caso do verão), ou quando não chove há bastante tempo e o sol sobre-aquece a pedra (a superfície da rocha pode atingir temperaturas 10 a 15° superiores à da atmosfera), os poros perdem, por evaporação, todo o teor de água líquida eventualmente presente e a seguir, o filme de água “sólida” que envolve toda a superfície livre, externa e interna. Uma gota de água que cai sobre a superfície da rocha não banha a rocha, tendendo a rolar rapidamente (em superfícies inclinadas). O avanço da água no caso dos monumentos secos toma a forma de um menisco convexo. A superfície lateral da rocha e o menisco constituem uma enorme superfície livre, cuja tensão superficial atua como uma membrana impermeável.

Se a rocha está em um clima que lhe assegura o teor hídrico necessário, pelo menos para a penetração na superfície interna do filme de água sólida, o menisco de água nos capilares apresenta-se côncavo, mas a superfície lateral da intrusão de água, neste caso, é constituída pela película no “estado sólido”. O menisco côncavo poderá se expandir para frente sem requerer energia do exterior. A depressão do vapor saturado de equilíbrio que estará em frente do menisco côncavo poderá fazer avançar espontaneamente a frente de água até determinado limite.

Isto explica o comportamento diferente de um monumento “seco” no verão quente quando um rápido aguaceiro pode apenas remover o depósito de pó e partículas do exterior molhando só a superfície. Pelo contrário, em um ambiente úmido, toda a água que cai sobre o monumento tende a penetrar em profundidade.

A presença do vento ajuda à penetração de água na rocha ao exercer pressão sobre a superfície da mesma, gerando diferenças de gradientes de pressão no interior da rocha que empurram alternadamente para o interior e para o exterior a água que escorre na superfície do monumento. As pressões para o interior fazem penetrar a água em profundidade, mas este avanço é contrariado pela contrapressão sucessiva porque a água, de vez em quando, está retida nos poros ao longo do percurso, pelo que a resultante do sistema é oscilante. Em condições idênticas de tempo, a chuva associada a vento intenso é mais eficaz do que a chuva em condições de vento calmo, quanto a banhar um monumento em profundidade.

A molhagem em profundidade de uma rocha em uma construção é a premissa para outras formas de degradação. A água dissolve parte do material e, quando isto sucede na porosidade interna, diminui a parte da rocha que assegura a ligação mecânica entre os grânulos, conduzindo a um enfraquecimento da estrutura. Ocorrendo processos de migração por efeitos capilares, parte do

material que está em solução afasta-se definitivamente da zona de origem onde os poros internos aumentam de volume com modificação da densidade da rocha (Aires-Barros, 2001).

Se a evaporação se dá lentamente, no interior dos poros formam-se cristais de precipitação que reconstituem um ligante entre os grânulos, mas com menor força do que o original e em posição diferente. Se a evaporação se dá sem transporte da solução na superfície, o vento tornará bastante rápido o processo evaporítico com formação de sais. Estes re-precipitam na superfície formando eflorescências ou sub-eflorescências. As sub-eflorescências podem formar-se também pelo retorno no estrato sub-superficial dos sais, havendo uma grande concentração destes na superfície e, no interior ainda molhado, onde podem vir a cristalizar. No caso da formação de eflorescências e sub-eflorescências, o enfraquecimento dá-se em profundidade e o filme superficial pode ser posteriormente removido por solução.

Na preservação dos monumentos é importante calcular o aumento de pressão no interior de uma cavidade contendo água quando a temperatura aumenta. O problema não existe para todas as cavidades abertas conectadas com o ambiente exterior. Mas ocorre em outros casos como quando os sais em solução re-precipitam na cavidade interrompendo a comunicação com o exterior (fenômeno importante nas zonas superficiais e sub-superficiais onde há eflorescências e sub-eflorescências) ou quando são preenchidos capilares que comprimem o ar contido na cavidade sem saída. O fenômeno pode se dividir em duas partes. Primeiro, o aumento de pressão devido à simples compressão do gás (ar e vapor inicialmente presente) em ambiente fechado em consequência de um aumento de temperatura. Segundo, pela contribuição devido à posterior evaporação de moléculas de água que vão aumentar a quantidade de vapor na cavidade.

7.2.1.2 Comportamento face à absorção capilar dos calcários pesquisados

Para as rochas porosas, o acréscimo de massa por unidade de área quando a água penetra dentro dos corpos de prova por capilaridade, segue aproximadamente a relação:

$$W = C \times t^{1/2}$$

onde C é o coeficiente relativo à cinética do processo antes de chegar ao tramo de estabilização (coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade) e t é o tempo (Ruiz de Argandoña *et. al.*, 2008).

A cinética do processo de absorção por capilaridade é diferente para cada uma das variedades pesquisadas (Tab. 7, Anexo B1), sendo que os coeficientes de absorção dos calcários RV e RVT são semelhantes enquanto que os calcários RB e RD apresentam coeficientes de absorção por capilaridade (C) muito mais elevados. Na execução do ensaio foram evidentes as diferenças de velocidade de ascensão capilar entre as quatro variedades e ainda entre os diferentes corpos de

prova da mesma litologia (Fig. 66), com comportamento assimétrico na ascensão capilar. Por exemplo, o calcário RV, com um padrão linear da saturação por capilaridade, apresenta diferenças no grau de saturação dos diferentes corpos de prova para o mesmo tempo de ensaio (Fig. 66A); o mesmo acontece com os calcários RVT e RB (Fig. 66B e C). Porém, o calcário RD apresenta um padrão absolutamente irregular no processo de ascensão capilar, o qual é evidenciado por uma diferença de grau de saturação, observada nas diferentes faces de um mesmo corpo de prova em um momento determinado do ensaio.

Devido a essas diferenças entre as quatro variedades de calcário e entre os corpos de prova de um mesmo tipo, apresentam-se diferentes coeficientes de absorção por capilaridade. Estas variações na absorção capilar para os corpos de prova do mesmo tipo de litologia estão relacionadas com a heterogeneidade textural destes calcários e, portanto com a dificuldade de obter corpos de prova homogêneos. No caso do calcário RVT, as diferenças de intensidade de alteração entre os corpos de prova utilizados incidem diretamente no valor do Q_i , sendo que os valores mais elevados ocorrem nos corpos de prova com maior alteração.

TABELA 7. Coeficientes de absorção por capilaridade (C) para quatro corpos de prova dos calcários ornamentais da Formação La Tampa.

Corpos de prova*	RV	RVT	RB	RD
1	3,26 g/m ² .s ^{0,5}	4,01g/m ² .s ^{0,5}	8,85 g/m ² .s ^{0,5}	14,56 g/m ² .s ^{0,5}
2	3,45 g/m ² .s ^{0,5}	3,46g/m ² .s ^{0,5}	9,92 g/m ² .s ^{0,5}	12,42 g/m ² .s ^{0,5}
3	$C = (m_i - m_o) / A^2 \times t_i^{1/2}$ 3,56 g/m ² .s ^{0,5}	3,68g/m ² .s ^{0,5}	10,41 g/m ² .s ^{0,5}	15,19 g/m ² .s ^{0,5}
4	3,28 g/m ² .s ^{0,5}	3,83g/m ² .s ^{0,5}	10,42 g/m ² .s ^{0,5}	17,29 g/m ² .s ^{0,5}
Média	3,39 g/m².s^{0,5}	3,75 g/m².s^{0,5}	9,9 g/m².s^{0,5}	14,87 g/m².s^{0,5}
Variância (σ^2)	0,015	0,041	0,41	3,01
Desvio Padrão ($\sigma^{1/2}$)	0,12	0,20	0,64	1,74

* RV: calcário Royal Verde; RVT: calcário Royal Veta; RB: calcário Royal Bronze; RD: calcário Royal Dorado.

As curvas da ascensão capilar das quatro variedades pesquisadas permitem determinar uma clara anisotropia entre os quatro tipos de calcários (Fig. 67) e seu comportamento gráfico é o correspondente àquelas rochas que não apresentam um padrão definido de porosidade (Fig. 3, Cap. 2) ou que apresentam heterogeneidades petrofísicas que afetam o fluxo de fluidos no interior da rocha (Benavente, 2004; Angeli, 2007). A inclinação das curvas de ascensão capilar é baixa para todos os calcários pesquisados mostrando como o processo acontece lentamente devido à alta porosidade das rochas, sendo necessário bastante tempo até que seja alcançada a saturação dos corpos de prova.

A velocidade de ascensão capilar no calcário RD é muito maior do que a velocidade para os calcários RV, RVT e RB devido ao maior tamanho dos seus poros. Esse mesmo calcário, pelo fato de ser também aquele que apresenta a maior porosidade aberta das quatro variedades pesquisadas,

alcança um maior incremento de massa por unidade de área. O coeficiente de absorção capilar do calcário RD é até cinco vezes maior do que o calcário RV da FL 1, e até 50% maior do que o calcário RB, correspondente à variedade alterada e que apresenta por sua vez a maior absorção capilar das três variedades (RV, RVT e RB), correspondentes à mesma rocha com diferentes graus de alteração (Tab. 10). A maior absorção capilar do RD obedece a dois fatores: a maior porosidade e o seu maior tamanho de acesso de poro. Uma vez alcançado o equilíbrio de saturação, todos os calcários pesquisados apresentam uma tendência similar.

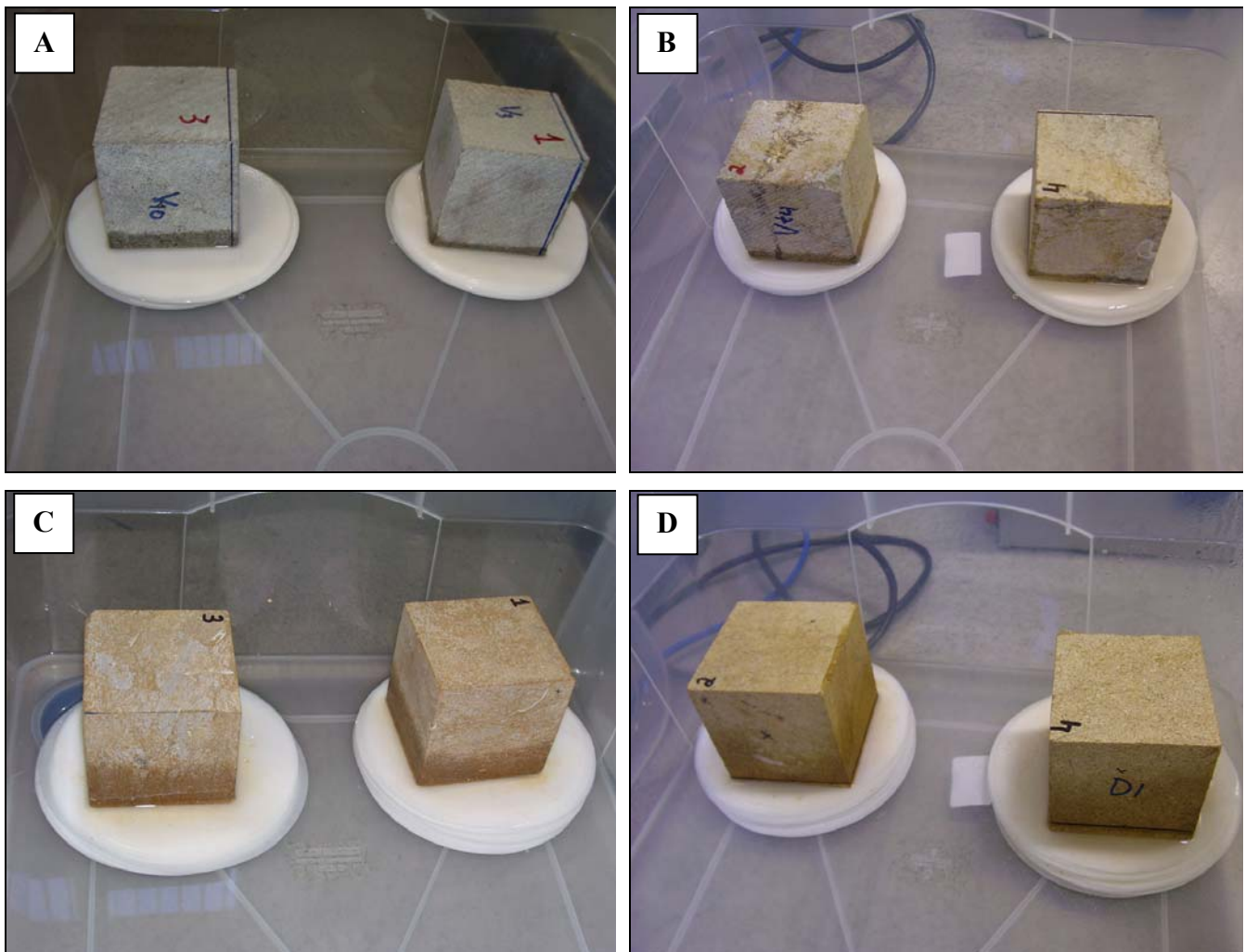


FIGURA 66. Diferenças observadas na cinética de ascensão capilar para as quatro variedades de calcários pesquisadas depois de duas horas de ensaio. (A) calcário RV, com maior ascensão capilar para o corpo de prova 3 em relação ao corpo de prova 1. (B) calcário RVT. (C) calcário RB. (D) calcário RD com ascensão capilar assimétrica nas faces de cada corpo de prova.

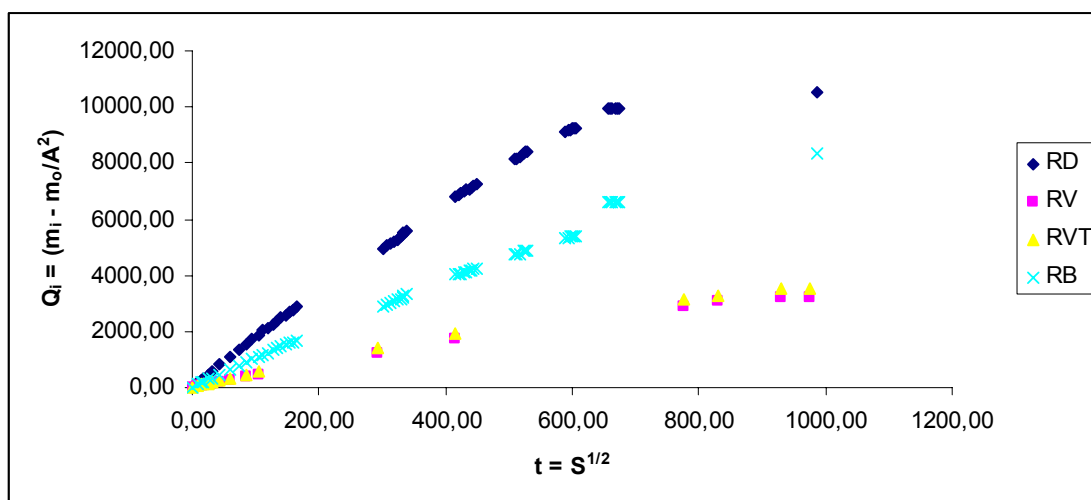


FIGURA 67. Ensaio de absorção por capilaridade nos calcários ornamentais da Fm. La Tampa. Os calcários RD da FL 2 e o RB da FL 1 apresentam a maior absorção capilar.

7.2.2 Cinética do processo de evaporação

Para todos os calcários pesquisados, observa-se que o grau de secagem produzido pelo processo de evaporação é elevado, considerando que ao longo do ensaio a perda de água é contínua e, no final, o conteúdo residual de água é muito baixo. Porém, existem consideráveis diferenças entre as quatro variedades especialmente relacionadas ao conteúdo de água em função do tempo ou conteúdo residual ($W_t = Q_i$) e ao grau de saturação em função do tempo (S_t), representados pelas equações:

$$W_t = ((M_t - M_0) / M_0) * 100$$

$$S_t = (W_t / W_s) * 100$$

Os resultados da avaliação da cinética do processo de evaporação (Anexo C) indicam que os calcários RV e RVT secam mais rapidamente em função do tempo quando comparados com os calcários RB e RD. Também são os calcários que apresentam menor grau de saturação em função do tempo de secagem (Tab. 8 e Fig. 68).

TABELA 8. Características do processo de evaporação: conteúdo de água residual (W_t), grau de saturação (S_t) e tempo até secagem aparente (T_s) dos calcários ornamentais da Formação La Tampa

Variedade*	Conteúdo de água residual ($W_t = Q_i$)		Grau de saturação S_t		Tempo até secagem aparente T_s (horas)
	1 hora	7 dias	1 hora	7 dias	
RV	2,69	0,44	1,06	0,18	288
RVT	2,30	0,44	0,91	0,18	264
RB	3,25	1,12	1,21	0,43	408
RD	6,05	1,92	2,54	0,84	456

*RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

O calcário RD apresenta a maior absorção por processos de ascensão capilar e também é o que apresenta a maior retenção de água na sua estrutura em função do tempo e maior saturação, avaliados em momentos diferentes, após uma hora e após de sete dias evaporação (Fig. 68).

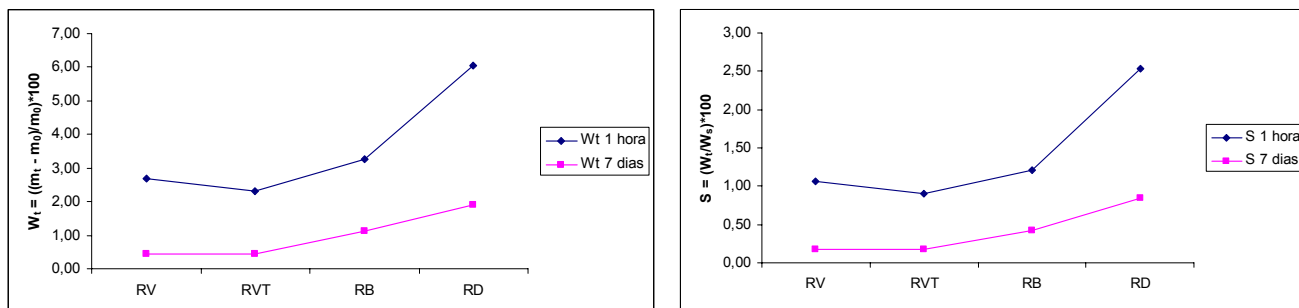


FIGURA 68. Conteúdo de água residual (**Wt**) (esquerda) e grau de saturação em função do tempo (**S**) (direita) avaliados após uma hora e sete dias de evaporação. RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

Considerando a inclinação da curva, que indica a perda de massa em função do tempo, inicialmente a evaporação acontece mais rapidamente no calcário RD do que nos calcários RV, RVT e RB. Em seguida, o processo se faz mais lento e assim, o tempo necessário para alcançar a secagem aparente (estabilização da curva) (Fig. 69 e Fig. 70) é muito maior que nas outras três variedades. Portanto, pode se estimar que esta rocha apresenta a maior facilidade de absorver vapor de água da atmosfera e retê-la na sua estrutura porosa, sendo assim, muito susceptível aos processos de deterioração.

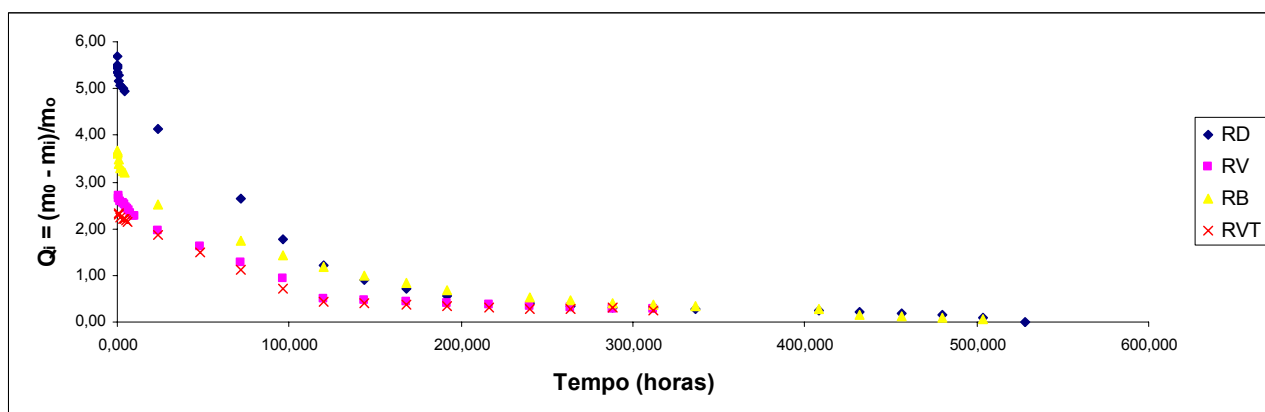


FIGURA 69. Curvas do processo de evaporação para os calcários pesquisados. Norma Normal 29/88. RV (Royal Verde); RVT(Royal Veta); RB (Royal Bronze); RD (Royal Dorado).

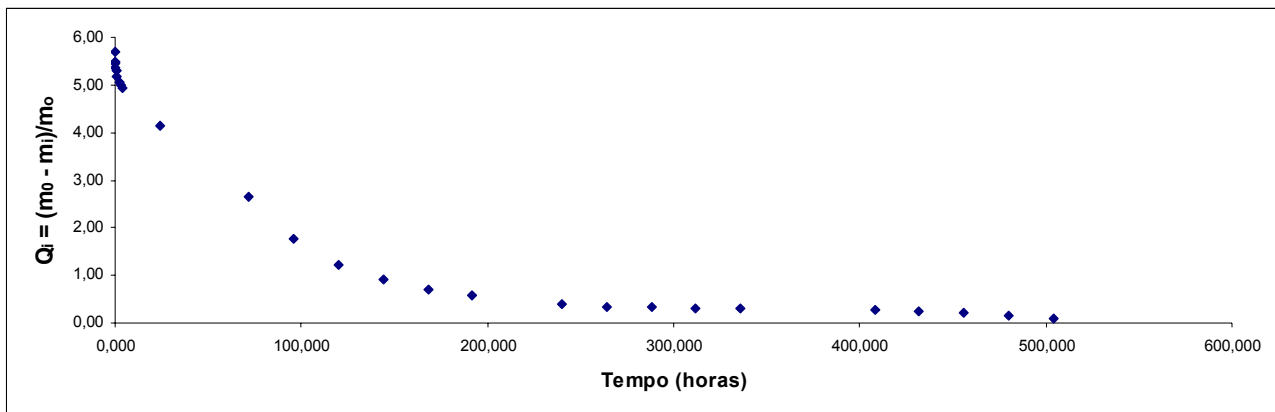


FIGURA 70. Curva do processo de evaporação no calcário RD (Royal Dorado) mostrando a variação do conteúdo de água em função do tempo de secagem.

No conjunto de calcários da FL1, o calcário RB é o que apresenta a maior capacidade de retenção de água, quando comparado com os calcários RV e RVT, os quais secam melhor e mais rapidamente (Fig. 71). Entre estes dois últimos, não se observam diferenças significativas na cinética do processo de evaporação, contrariando o esperado, pois, pela maior porosidade, relacionada com a alteração parcial do calcário RVT e considerando que este apresenta maior absorção capilar que o calcário RV, o processo de evaporação deveria apresentar diferenças mais marcadas enquanto à cinética do processo. Observando as curvas de evaporação dos calcários RV e RVT (Fig. 72), nota-se que o RV retém mais água nos poros durante o processo de evaporação; porém, seca melhor e mais rapidamente. A maior retenção de água no sistema de poros do calcário RV estaria diretamente relacionada com o menor tamanho dos poros e dos seus acessos, característicos deste calcário segundo os espectros de porosidade obtidos por MIP.

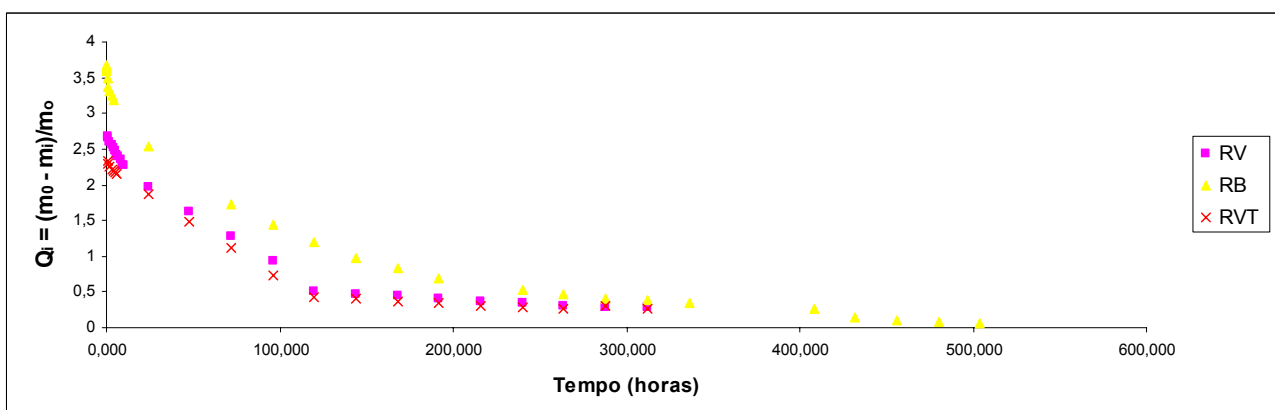


FIGURA 71. Curvas do processo de evaporação dos calcários RV (Royal Verde), RVT (Royal Veta) e RB (Royal Bronze) da FL 1, mostrando a maior retenção de água no processo de evaporação para o calcário RB.

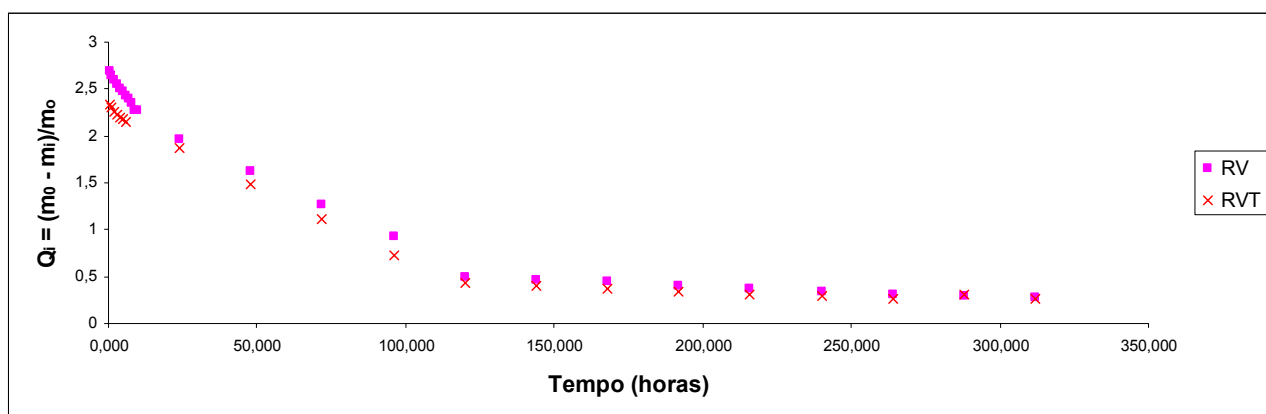


FIGURA 72. Curvas do processo de evaporação dos calcários RV (Royal Verde) e RVT (Royal Veta) da FL 1, mostrando a maior retenção de água do calcário RV (calcário inalterado) em relação ao RB (calcário parcialmente alterado).

Os coeficientes de secagem ou de evaporação C_{ev} (Tab. 9), obtidos segundo a norma Normal 29/88 e segundo o método indicado por Benavente *et.al.*, (2001), confirmam as características dos calcários RB e RD como os de menor capacidade de evaporação entre as quatro variedades de calcários produzidas no processo de lavra. O calcário RB apresenta a maior retenção de água e menor velocidade no processo de secagem quando comparado aos três calcários geneticamente relacionados (RV, RVT e RB). As diferenças nos valores dos coeficientes estão relacionadas com os intervalos de tempo utilizados em cada um dos métodos. A norma Normal 29/88 considera que o coeficiente deve ser calculado tomando em conta o processo completo de evaporação, desde o começo (massa saturada) até o final do ensaio. Já o método indicado por Benavente *et al.*, (2001), considera importante o intervalo do tempo em que o processo está dominado só pelas características intrínsecas da rocha, isto é, a Etapa II, como explicado no Capítulo 2, permitindo visualizar ainda melhor as diferenças na cinética da evaporação entre as quatro variedades de calcários.

TABELA 9. Coeficientes de evaporação (C_{ev}) dos calcários da Fm. La Tampa

Variedade	Coeficiente de evaporação ou de secagem	
	Normal 29/88	Benavente <i>et.al.</i> , 2001
RV	41,97	65,39 $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RVT	32,06	38,28 $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RB	39,85	11,17 $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RD	36,94	16,10 $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$

* RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

Um resumo das características relacionadas com a avaliação da porosidade e sua relação com as propriedades hídricas, considerando as diferentes técnicas aplicadas, é apresentado na Tab. 10, cuja análise permite as seguintes considerações:

a) O calcário RD da FL 2 apresenta características que indicariam uma maior susceptibilidade aos processos de deterioração em relação às outras três variedades produzidas no processo de extração e beneficiamento dos calcários da Fm. La Tampa. Estas características são: a maior porosidade aberta, o sistema de poros mais complexo, caracterizado pelo maior tamanho dos raios de acesso, a maior absorção capilar e ao mesmo tempo a maior retenção de água no processo de evaporação permitindo maior exposição da rocha aos fluidos circulantes que eventualmente podem carregar as substâncias capazes de gerar reação com a rocha.

b) O calcário RB da FL 1 apresenta a maior porosidade, a maior absorção capilar e a cinética de evaporação mais lenta, quando comparado com os calcários RV e RVT, sendo portanto, o mais susceptível à degradação dos calcários produzidos nesta frente de lavra.

c) Mesmo com as diferenças de porosidade existentes entre os calcários RV e RVT, não se visualizam diferenças significativas no comportamento capilar e face aos processos de evaporação como seria esperado, considerando o grau de alteração do calcário RVT, sempre maior do que o do RV. Isto significa que os dois tipos de calcários apresentariam uma susceptibilidade semelhante, face os processos de deterioração ocasionados pela migração de fluidos e substâncias poluentes nos poros das rochas. O fato de ser o calcário RV o que apresenta a menor porosidade entre as quatro variedades, indica que seria o menos susceptível aos processos capilares. Porém, ao mesmo tempo, este calcário possui as menores dimensões de poros, como determinado pelo MIP, o qual facilitaria o processo de absorção capilar, tornando assim este calcário susceptível aos processos de degradação pela ação de substâncias poluentes.

TABELA 10. Resumo das propriedades relacionadas com a porosidade dos calcários da Fm. La Tampa.

Variedade de calcário *	Características microscópicas	Φ_a (%) Hg	Raio de acesso de maior frequência (μm)	Volume da porosidade ocupada pelo raio mais frequente	Características da porosidade (MEV)	Absorção capilar	Comportamento face à evaporação
RV	Rocha inalterada, constituída por fragmentos fósseis relativamente pouco diversos, predominando os foraminíferos com estrutura morfológica simples sobre os demais bioclastos. Cimentação de esparita predominando sobre a matriz de micrita.	6,41%	0,005	34,98%	Presença de múltiplos microporos de dimensões nanométricas, de tipo intragranular.	A menor absorção capilar do conjunto. A ascensão capilar é homogênea mas com diferentes velocidades entre os corpos de prova. $C = 3,39 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	O processo de secagem é rápido e completo. $C_{ev} = 65,39 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RVT	Rocha com alteração parcial, com a mesma constituição do RV. Cimentação de esparita predominando sobre a matriz de micrita.	6,94%	0,075	29%	Presença de múltiplos microporos de dimensões nanométricas, de tipo intragranular.	Processo de absorção capilar homogêneo com diferenças de velocidade entre os diferentes corpos de prova. $C = 3,75 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	Processo de secagem rápido e completo. $C_{ev} = 38,28 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RB	Variedade de rocha alterada, com a mesma constituição do RV. Cimentação de esparita predominando sobre a matriz de micrita.	10,89%	0,150	24,48%	Presença de múltiplos microporos de dimensões nanométricas, de tipo intragranular.	Apresenta a maior absorção capilar dos calcários da FL 1. $C = 9,9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	Processo de secagem mais lento do que o RV e o RVT. $C_{ev} = 11,17 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
RD	Constituído por fragmentos fósseis muito variados, com predomínio de bioclastos de corais, briozoários e moluscos. Em menor proporção foraminíferos. Matriz de micrita com menor cimentação em relação às outras três variedades.	15,36%	0,200	28,48%	Presença esparsa de microporos de dimensões nanométricas, com predomínio da mesoporosidade como característica da rocha. Identificados poros do tipo <i>Ink bottle</i> .	Rocha com maior absorção capilar do conjunto pesquisado. Ascensão capilar caótica. $C = 14,87 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	Processo de secagem lento com muita retenção de água nos poros. $C_{ev} = 16,10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$

* RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

7.3 Caracterização geomecânica

7.3.1 Resistência aos esforços compressivos

As quatro variedades de calcários ornamentais da Fm. La Tampa (RV, RVT, RB e RD) apresentam diferentes resistências aos esforços compressivos (Fig. 73, Tab. 11), sendo esta resistência diretamente relacionada ao grau de alteração de cada uma das variedades e às descontinuidades existentes, que constituem pontos de debilidade por onde acontece a ruptura das rochas. Estas descontinuidades são as microfissuras, os estilólitos e os esporádicos macrofósseis que geram diferenças pontuais na resistência dos corpos de prova.

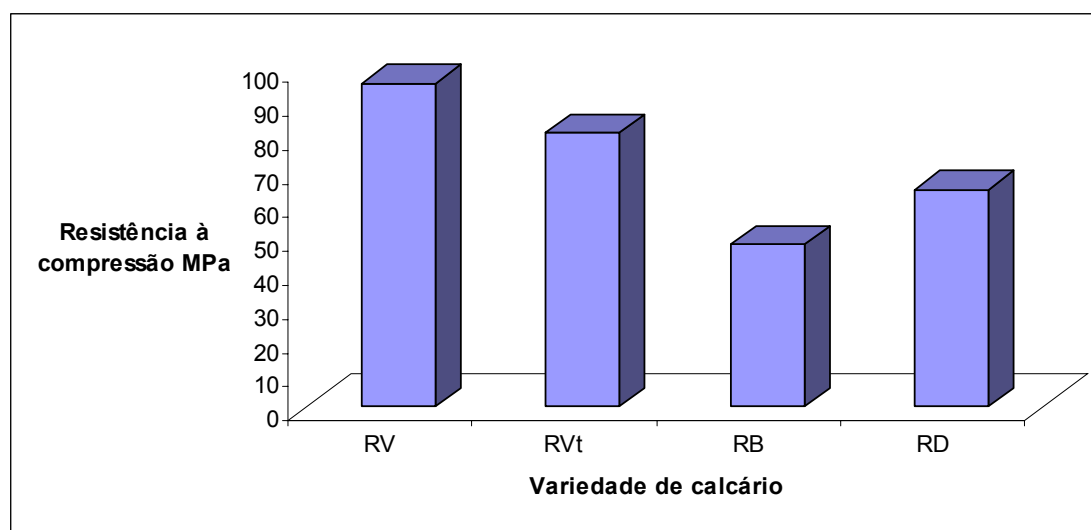


FIGURA 73. Gráfico comparativo da resistência aos esforços compressivos dos calcários da Formação La Tampa. RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

TABELA 11. Resultados do ensaio de Resistência à compressão para os calcários ornamentais da Formação La Tampa.

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)				
	Royal Verde	Royal Veta	Royal Bronze paralelo	Royal Bronze perpendicular	Royal Dorado
1	90,22	92,74	46,95	44,58	67,55
2	89,16	70,32	44,00	47,16	59,30
3	86,36	89,69	44,35	50,24	64,63
4	101,49	105,13	48,75	40,20	67,60
5	96,99	65,20	61,07	46,93	59,93
6	101,15	73,31	43,98	45,68	65,69
7	103,70	69,79	45,39	44,00	64,71
Média	95,58	80,88	47,79	45,54	64,20
Variância (σ^2)	41,26	192	32,07	8,35	9,67
Desvio Padrão ($\sigma^{1/2}$)	6,42	13,86	5,66	2,89	3,11

Os resultados indicam que o calcário RV possui os maiores valores de resistência à compressão, seguido dos calcários RVT, RD e RB. As diferenças de valores da resistência entre os corpos de

prova desta litologia são devidas a presença de pequenos defeitos nos corpos de prova como quinas ou a fissuras de desenvolvimento incipiente, presentes em alguns deles (Fig. 74).

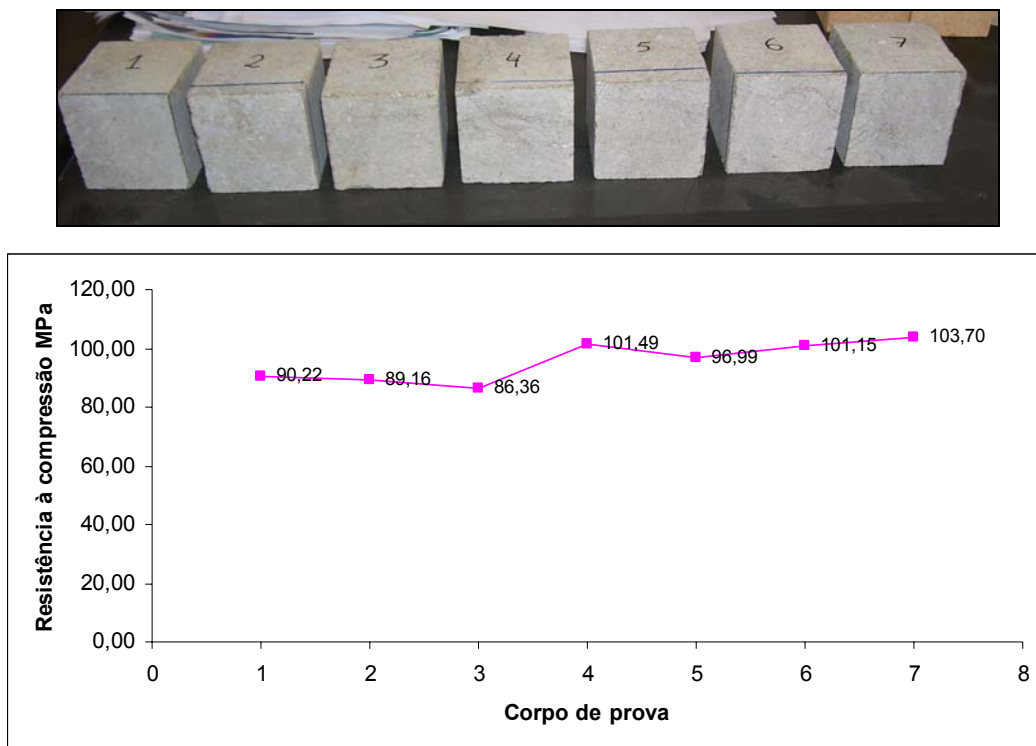


FIGURA 74. Corpos de prova e resistência aos esforços compressivos do calcário Royal Verde (RV).

A resistência à compressão do calcário RVT é muito variável, devido à heterogeneidade dos corpos de prova que refletem a mistura de áreas alteradas e áreas inalteradas características deste material rochoso. Estas áreas alteradas são produzidas pela circulação de fluidos através do sistema de poros e de fissuras. A ruptura acontece seguindo a superfície de contato entre as porções alteradas e inalteradas da rocha e as superfícies de debilidade como as fissuras (Fig. 75).

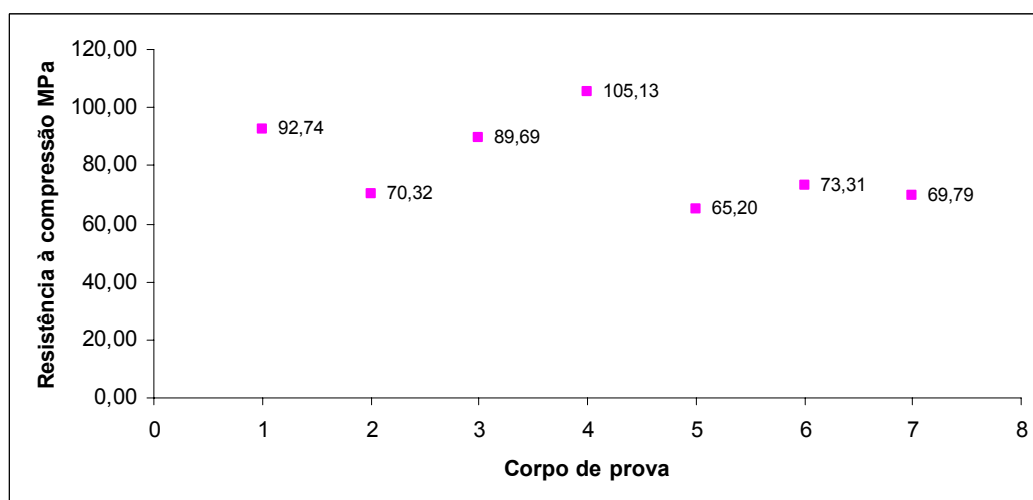


FIGURA 75. Resistência à compressão do calcário Royal Veta (RVT). Observa-se a heterogeneidade dos corpos de prova, os valores da resistência aos esforços compressivos (MPa) relacionados com a intensidade de alteração e a tendência da ruptura seguindo as superfícies de alteração.

A resistência à compressão no calcário RB é a mais baixa dos calcários ornamentais da Fm. La Tampa. Os valores para a resistência aos esforços compressivos na direção da orientação dos bioclastos não apresentam diferenças significativas com relação aos valores da resistência avaliada na direção perpendicular (Fig. 76). Neste calcário é possível observar como os fragmentos fósseis de maior tamanho, correspondentes a conchas de gasterópodos, constituem superfícies de maior resistência aos esforços compressivos, ocorrendo a ruptura ao redor destas estruturas fósseis (Fig. 77).

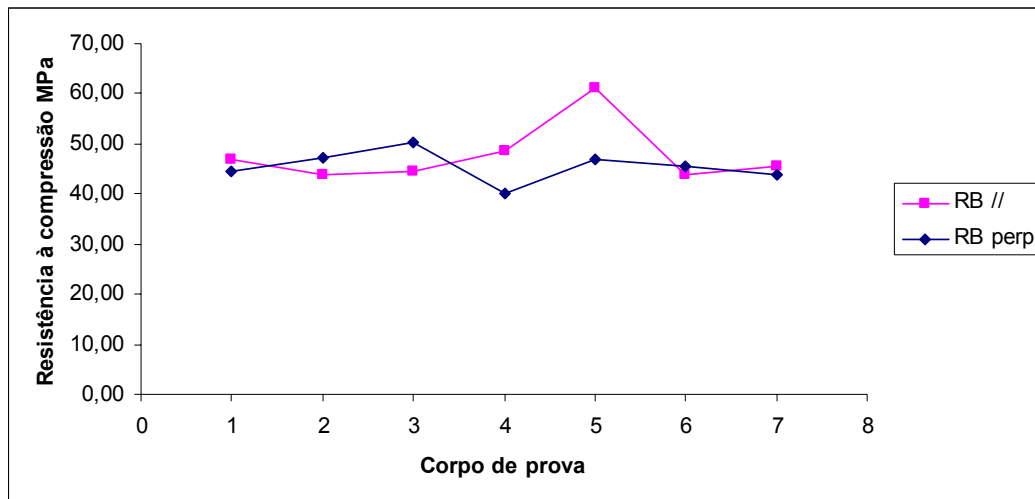


FIGURA 76. Resistência à compressão do calcário Royal Bronze (RB). (//: esforço aplicado paralelo à orientação dos bioclastos; perp: esforço aplicado perpendicular à orientação dos bioclastos).



FIGURA 77. Ruptura do corpo de prova do calcário Royal Bronze (RB) contornando o fragmento fóssil (concha de gasterópodo).

O calcário RD apresenta menores valores de resistência à compressão se comparados com os dos calcários RV e RVT, porém maiores quando comparados com os da resistência à compressão do calcário RB.

Ao avaliar os resultados da resistência aos esforços compressivos dos calcários da FL 1 (RV, RVT e RB), observa-se que há uma relação linearmente crescente quanto à resistência e aos valores

de porosidade e de coeficiente de absorção de água. Porém, ao analisar estes parâmetros nas quatro variedades extraídas e beneficiadas a partir dos calcários da Fm. La Tampa, chama a atenção que o calcário RD da FL 2 apresenta maior resistência aos esforços compressivos do que o calcário RB, apesar de ser o mais poroso e o que apresenta maior coeficiente de absorção de água (Fig. 78). Este resultado é contraditório com o esperado, partindo da premissa de que com maior porosidade aberta, que traduz a existência de poros e/ou cavidades intercomunicantes, maior será a absorção de água esperada para a rocha e menor sua resistência mecânica (Frazão, 2002).

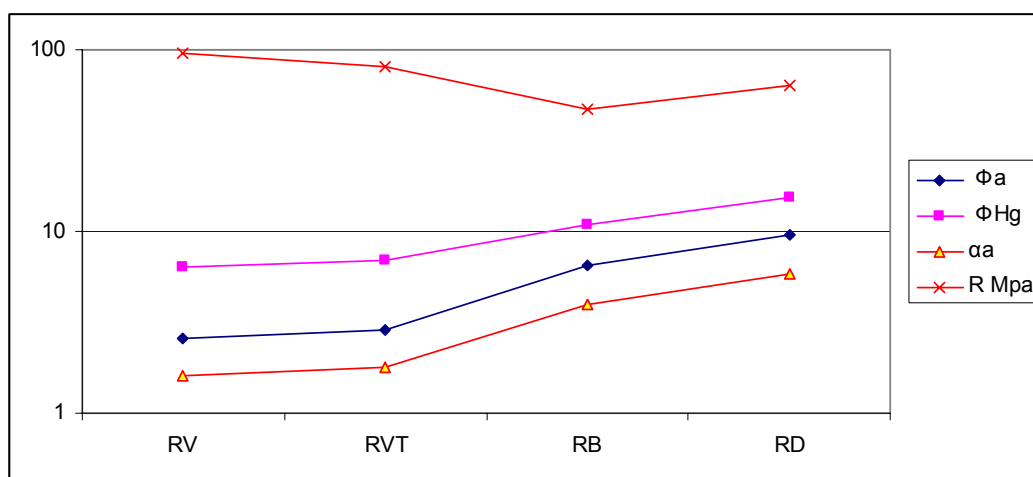


FIGURA 78. Relação entre a resistência à compressão uniaxial (RMPa), porosidade (Φ_a e Φ_{Hg}) e absorção de água aparente α_a nos calcários pesquisados. (RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado).

A razão para tal aparente contradição é que o calcário RD, mesmo sendo o calcário de maior porosidade e estando constituído de fragmentos bioclásticos mais variados do que o RB, é ao mesmo tempo o que apresenta os menores tamanhos de grãos e uma maior homogeneidade (Fig. 79), características estas que lhe permitem resistir melhor aos esforços compressivos. O maior conteúdo de sílica (SiO_2), como foi determinado por espectrometria de ICP, também pode ser um aspecto que contribui a aumentar a resistência desta rocha.



FIGURA 79. Corpos de prova do calcário Royal Dorado (RD), de caráter mais homogêneo e granulação fina.

7.3.2 Resistência ao desgaste abrasivo Amsler

As rochas usadas na construção estão sujeitas a solicitações de desgaste por abrasão, especialmente quando são utilizadas como revestimento de pisos em edificações. Uma rocha será tanto mais desgastável ou abrasível quanto menor for a sua dureza, que por sua vez está relacionada

com a composição mineral (Frazão 2002). O desgaste (D) é a propriedade que uma rocha possui de resistir a remoção progressiva de constituintes de sua superfície. O ensaio consiste na redução de espessura (mm) que placas de rocha apresentam após um percurso abrasivo de 1000m na máquina Amsler. O abrasivo utilizado é areia essencialmente quartzosa. Este ensaio procura simular, em laboratório, a solicitação por atrito devida ao tráfego de pessoas ou veículos (Frasca, 2003).

Os resultados do ensaio indicam uma relação direta entre o desgaste e o grau de alteração da rocha. Os calcários mais susceptíveis a se desgastarem ou a experimentarem remoção progressiva de constituintes da sua superfície são os calcários RB da FL 1 e do RD da FL 2 (Tab. 12).

TABELA 12. Resistência à abrasão dos calcários ornamentais da Formação La Tampa

Tipo rochoso*	Desgaste percurso 500m	Desgaste percurso 1000m
RV	1,59mm	3,32mm
RVT	1,86mm	3,66mm
RB	3,65mm	6,60mm
RD	3,87mm	7,61mm

*RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

Ressalta-se que todas as variedades dos calcários ornamentais da Fm. La Tampa têm sido utilizadas indistintamente em ambientes submetidos ao intenso tráfego de pedestres, especialmente por seu uso nos pisos dos corredores de centros comerciais e edifícios públicos. Há uma relação direta entre a resistência ao desgaste e a porosidade das rochas (Fig. 80). De acordo com os resultados do ensaio, a variedade menos alterada e menos porosa (RV) seria a que menos apresenta problemas de desgaste (D) ao ser exposta a situações de contínuo atrito, aumentando esta susceptibilidade, à medida que aumenta a porosidade, e portanto, o grau de alteração da rocha.

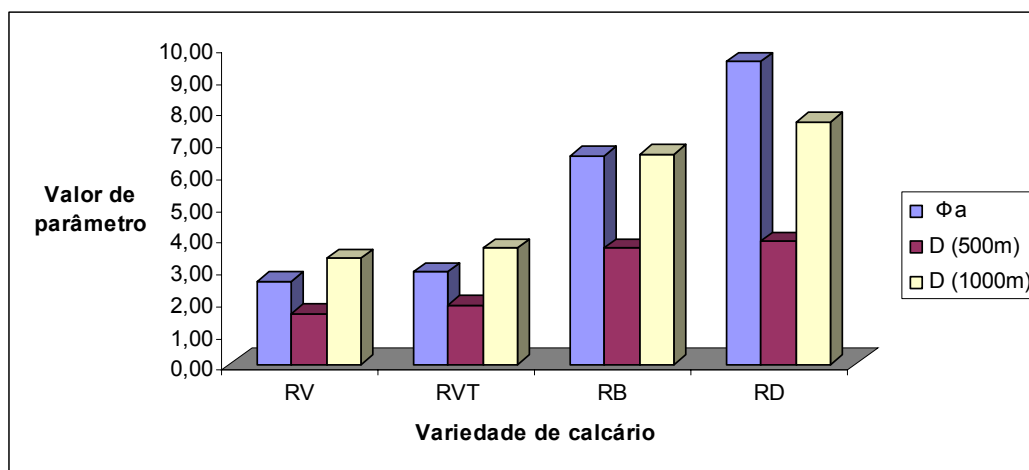


FIGURA 80. Relação direta entre a porosidade (Φ_a) e a resistência ao desgaste Amsler (D) para percursos de 500 e 1000m. (RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado).

Ao comparar os resultados obtidos nos ensaios de determinação de índices físicos e os de caracterização tecnológica com os valores considerados por Frazão (2002) nas “Especificações para rochas destinadas a revestimentos e métodos de ensaio” (Tab. 13), pode-se observar que os resultados de massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$), absorção de água (α_a (%)) e resistência à compressão R (MPa), obtidos na determinação dos índices físicos, permitem considerar os calcários ornamentais da Fm. La Tampa como calcários de baixa densidade, apesar da massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$) ser menor ao limite inferior do intervalo estabelecido (1,760/2,160 kg/m³). A absorção de água e a resistência à compressão indicariam que estas rochas estariam dentro dos limites adequados para o uso como revestimento.

Mas se utilizarmos os resultados de massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$) determinados pela técnica da porosimetria de mercúrio, nota-se que os calcários RV, RVT e RD estariam no grupo dos calcários de média densidade ($\rho_{a_{sec}}$ entre 2,16 e 2,56 kg/m³), enquanto que o calcário RB pertenceria ao grupo dos calcários de alta densidade. Nesse caso, o calcário RB seria excluído do grupo dos calcários aptos para serem usados em revestimentos, devido aos seus valores de resistência à compressão, inferiores ao limite estabelecido (>55 MPa).

TABELA 13. Correlação de valores de algumas propriedades dos calcários ornamentais da Formação La Tampa com especificações de valores para rochas destinadas a revestimento (Frazão, 2002)

Tipo de calcário	Frazão (2002)			Calcários da Fm. La Tampa							
				RV				RVT			
	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)	α_a (%)	R MPa	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) água	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) Hg	α_a (%)	R (MPa)	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) água	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) Hg	α_a (%)	R (MPa)
Baixa densidade	1,76/2,16	<12	>12								
Média densidade	2,16/2,56	<7,5	>28	1,6	2,46	1,73	95,58	1,61	2,41	1,81	80,88
Alta densidade	>2,56	<3,0	>55								

Tipo de calcário	Frazão (2002)			Calcários da Fm. La Tampa							
				RB				RD			
	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)	α_a (%)	R MPa	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) água	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) Hg	α_a (%)	R (MPa)	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) água	$\rho_{a_{sec}}$ (kg/m ³) Hg	α_a (%)	R (MPa)
Baixa densidade	1,76/2,16	<12	>12								
Média densidade	2,16/2,56	<7,5	>28	1,63	3,61	3,39	46,67	1,61	2,66	5,35	64,20
Alta densidade	>2,56	<3,0	>55								

CAPÍTULO 8 – AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO LA TAMPA AOS PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO POR MEIO DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

8.1 Introdução

Os ensaios de envelhecimento acelerado ou de avaliação da alterabilidade, realizados ao longo desta pesquisa, permitiram determinar a susceptibilidade dos calcários ornamentais da Fm. La Tampa aos principais processos que ocasionam a deterioração de rochas ornamentais nas diversas situações de uso como pisos ou revestimentos, tanto em ambientes internos, quanto em ambientes externos. Geralmente, quando se trata de avaliar a alterabilidade das rochas ornamentais, são realizados ensaios para simular condições naturais de alteração das rochas, dentre os quais podem ser citados: o da cristalização de sais (Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Angeli, 2007), da resistência ao congelamento-degelo (Nicholson & Nicholson 2000; Thomachot 2002) e da resistência ao choque térmico. Segundo os autores citados, os ensaios podem ser conduzidos com a utilização de normas específicas, tais como: a EN12370 para a cristalização de sais, a EN12371 para gelo-degelo, a EN14066 para o choque térmico e a prEN13919 para avaliar a resistência aos vapores de ácido sulfuroso.

8.2 Os sais e seus mecanismos de ação nos processos de deterioração de calcários ornamentais

A deterioração ocasionada pelos sais nas rochas ornamentais é devida à sua cristalização nos poros da rocha e à tensão que esses cristais geram nas paredes destes poros. Esta tensão é responsável pela fraturação interna da rocha e o seu conseqüente decaimento pode ser considerado como um processo físico-químico. São vários os processos de alteração que são derivados da ação da cristalização de sais: eflorescências, desintegração granular, alveolização e escamação, entre outros, cujas definições já foram expostas no Cap. 4. O tipo de dano ocasionado depende das características da rocha, assim como das características dos sais e pode ser diferente de um lugar para outro. As rochas que apresentam maior susceptibilidade ao decaimento ocasionado por sais são geralmente aquelas com alta porosidade e que apresentam rápida cinética de absorção capilar e evaporação, como é o caso dos diversos tipos de calcários. Nestas rochas, ocorrendo fornecimento de água salgada, ocorre o preenchimento dos poros e, dependendo da facilidade de migração no sistema de poros (entrada e saída), a cristalização de sais acontece com freqüência, causando danos irreversíveis.

Os processos cíclicos de umidade, que permitem a dissolução de sais e sua entrada no interior da rocha, e de secagem, que permite, neste caso, a cristalização desses sais, geram pressões

diferenciadas no sistema poroso. Estas pressões com frequência são fortes o suficiente para ocasionar a desintegração da rocha.

Os sais solúveis em água aparecem frequentemente aprisionados nos poros de rochas sedimentares formadas em ambientes marinhos. Eles também podem entrar no interior da rocha por sucção capilar de água subterrânea ou encontrar-se em aerossóis em áreas costeiras e serem depositados no interior da estrutura da rocha quando são dissolvidos pela água de chuva. A atmosfera mais ou menos contaminada e a atividade humana são também fontes comuns de sais. Por exemplo, o gesso e as argamassas utilizadas na construção contêm frequentemente uma variedade importante de sais. Nos países onde as estações são bem definidas, no inverno o sal é usado comumente para fundir a neve, e nesses casos é observada a desintegração de níveis inferiores de paredes que estão mais expostos à absorção destes sais.

A umidade, a qual é necessária para dissolver os sais, ocorre por uma diversidade de fontes, seja por precipitações, por ascensão capilar proveniente do solo ou pela umidade do ar (Gauri & Bandyopadhyay, 1999). Adicionalmente, muitos danos causados por sais, ocorrem pela sua natureza higroscópica e deliqüescente. A halita (NaCl), por exemplo, absorve umidade muito facilmente, transformando-se em solução. Muitos outros, como os sais de sódio, como também os de manganês e de potássio, tornam-se líquidos em condições de umidade relativa muito baixa, menor que a correspondente à saturação de vapor de água do ar no ambiente. A Tab. 14 mostra a umidade relativa de equilíbrio e a solubilidade em água de várias destas soluções.

TABELA 14. Umidade relativa de equilíbrio a 25°C e solubilidade de alguns sais higroscópicos encontrados nas rochas usadas na construção civil.

Sal	Mineral	Umidade relativa de equilíbrio (%)	Solubilidade (g/100cm ³)(°C)
K ₂ SO ₄	Arcanita	97,0	12 (25)
KNO ₃	Nitro	92,5	13,3 (0)
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Mirabilita	87,0	92,7 (30)
KCl	Silvita	84,3	34,7 (20)
Na ₂ SO ₄	Thenardita	81,0	4,76 (0)
NaCl	Halita	75,3	35,7 (0)
NaNO ₃	Soda-Nitro	73,9	92,1 (25)
NH ₄ NO ₃	Nitramita	61,8	118,3 (0)
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	Nitromagnesita	52,9	125
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	Nitrocalcita	50,0	660 (30)
K ₂ CO ₃ .2H ₂ O		42,8	146,9
MgCl ₂ .6H ₂ O	Biscofita	33,0	167
CaCl ₂ .6H ₂ O	Antarcticita	29,0	536 (20)

* The conservation of Stone II, R. Rossi-Manaresi (ed). Centro per La Conservazione delle Sculture All'Aperto, Int. Symp. Proceedings, Bologna 1991. In Gaury and Bandyopadhyay (1996).

Arnold (1982) apresentou um modelo de seqüência de cristalização de sais em paredes, devido ao acréscimo de umidade e baseado nas características de solubilidade dos sais (Fig. 81). Na zona A, a qual se encontra na base da parede, os carbonatos menos solúveis de cálcio e magnésio e algo de

gesso, vão precipitar (Gaudi & Bandyopadhyay, 1996). Como estes sais apresentam baixa solubilidade na água, a deterioração nesta zona é pouco severa. Na zona B, os sais $MgSO_4$, Na_2SO_4 e KNO_3 são precipitados. Estes sais são muito solúveis em água e têm uma grande capacidade de converter umidade em água líquida. Eles são freqüentemente dissolvidos e cristalizados de acordo com as condições de umidade do ambiente. Portanto, podem causar enormes danos. A zona C é caracterizada por sais sumamente higroscópicos de nitratos e cloretos de magnésio, cálcio, sódio e potássio. Aqui, os sais poderão precipitar somente se as condições de umidade relativa forem extremamente baixas. Assim, os nitratos de cálcio e magnésio quase nunca cristalizarão em ambientes externos, mas poderão cristalizar em ambientes internos, quentes e muito secos. Os danos nas paredes exteriores podem ser muito baixos nesta zona, mas aquelas podem apresentar aparência muito escura devido à umidade que será permanente justamente pela higroscopia dos sais presentes.

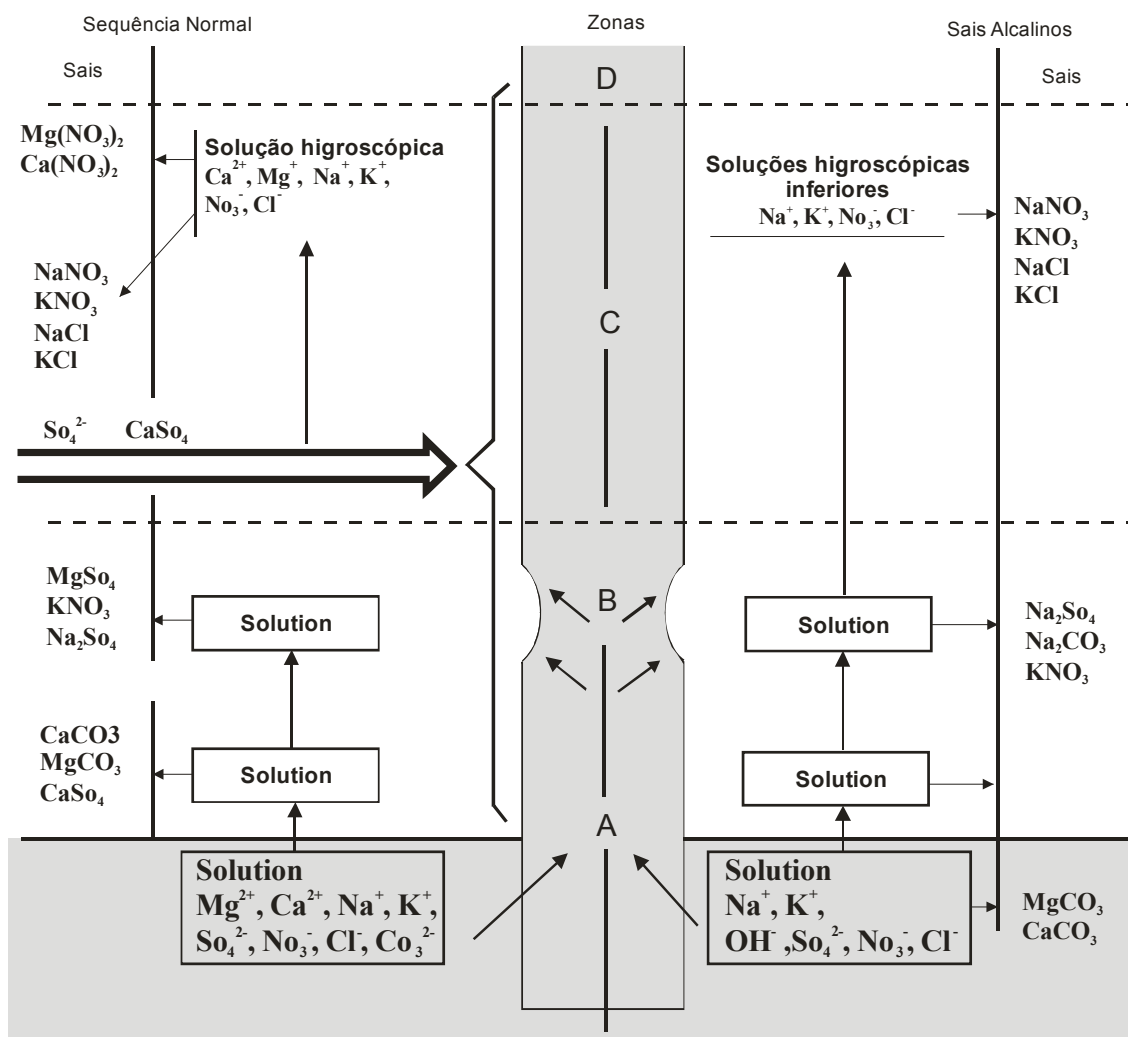


FIGURA 81. Seqüência de migração e cristalização de sais em paredes úmidas em que os sais muito solúveis podem alcançar alturas maiores, segundo modelo de Arnold. (Arnold, A., Rising damp and saline minerals, in Proceedings Fourth Intl. Congress on the Deterioration and Preservation of Stone Objects, Louis, 1982. In: Gauri & Bandyopadhyay, 1999).

É muito comum observar em paredes de prédios evidências de umidade que podem ser explicadas pelos seguintes processos (Gauri & Bandyopadhyay, 1999; Aires-Barros, 2001):

- Precipitações e ascensão de água subterrânea por capilaridade;
- Condensação da umidade dentro e fora da parede devido à flutuação da umidade relativa;
- Conversão do vapor de água para água no estado líquido, no caso de sais higroscópicos presentes.

Os sais hidrossolúveis existem na forma iônica quando estão em solução, atraindo moléculas de água e, assim, as transferem de um lugar para outro, podendo, desta maneira, contribuir para a umidade das paredes, tornando-se uma fonte agregada de desintegração da rocha.

Estas paredes permanecem a maior parte molhadas no seu interior, podendo aparecer secas na superfície e perto dela, pela evaporação, a qual é controlada pela temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. A água que se encontra dentro da parede tende a circular para o exterior, mas geralmente, esta migração é muito lenta comparada com a taxa de secagem da superfície. O mecanismo de transporte, a difusão, é muito lento comparado com a sucção devido aos processos de evaporação. Como resultado, uma zona é formada perto da superfície da parede, que apresentará estados intermitentes entre seco e molhado. Esta zona é o lugar no qual os sais podem cristalizar repetidas vezes, ocasionando danos na estrutura da parede.

Uma zona similar, que apresenta processos intermitentes de molhagem e secagem é formada também perto da superfície das paredes interiores. A secagem, neste caso, está relacionada com mudanças na umidade relativa causadas pela calefação e refrigeração dos quartos, mais que pela evaporação ocasionada pelo vento, característica das paredes exteriores. Os depósitos pulverulentos e as escamas de gesso vistas com frequência nas paredes interiores são o resultado dos ciclos frequentes de migração dos sais hidrossolúveis lixiviados originalmente das argamassas e dos ladrilhos usados na construção e revestimento das paredes. Se este fenômeno estiver limitado à porção mais baixa da parede, a fonte de sal é, então, principalmente o subsolo.

8.2.1 Processo de cristalização de sais e deterioração da estrutura da rocha

Os sais geram pressões nos poros da seguinte maneira. Primeiramente, quando há fornecimento de quantidade de água suficiente, os sais secos dissolvem-se, gerando uma solução concentrada. Quando a rocha começa a secar, a solução fica saturada e a cristalização dos sais dissolvidos começa. O desenvolvimento de cristais na superfície dos poros exerce pressão na parede dos poros, enquanto uma pressão hidrostática é exercida no processo de crescimento de cristais na solução (Steiger, 2003).

Além disso, certos minerais podem ter moléculas de água incorporadas às suas estruturas cristalinas e serem, assim, mais destrutivos devido ao aumento de volume em relação às suas

espécies anidras. O sulfato anidro de sódio Na_2SO_4 (thenardita), por exemplo, após a sua dissolução, cristaliza como $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (mirabilita). Este processo gera aumento de volume (Tab. 15) e, portanto, exercerá uma pressão de cristalização muito alta. Também, existindo sal anidro seco, este pode se transformar em sal hidratado em condições de alta umidade ou por entrar em contato com uma nova solução salina penetrando nos poros. Estes processos de cristalização e hidratação finalmente resultam na dissociação dos grãos ou na escamação da rocha. Os processos de hidratação e cristalização são mais destrutivos, porém, quando capilares finos estão presentes na rocha, porque os capilares apresentam maior probabilidade de serem preenchidos completamente, não deixando espaço para a acomodação dos cristais em desenvolvimento nem para o desenvolvimento de pressão de hidratação para serem soltos.

TABELA 15. Exemplos para equilíbrio de hidratação e volumes de expansão associados*

Mineral desidratado	Forma hidratada	Volume de expansão
Na_2SO_4 (thenardita)	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (mirabilita)	314%
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (thermonatrita)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (natron)	257%
$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (kieserita)	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (hexahidrita)	146%
$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (hexahidrita)	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (epsomita)	10%

* Steiger, 2003

O diagrama de fases do sistema $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Fig. 82) mostra que em condições de alta umidade relativa (HR), o sulfato de sódio pode existir unicamente como solução aquosa. Em uma temperatura acima da temperatura de transição ($32,4^\circ\text{C}$), a thenardita (Na_2SO_4) cristaliza. De acordo com o sistema binário $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Fig. 82A) e o diagrama de umidade relativa versus temperatura (Fig. 82B), a mirabilita e a thenardita têm diferentes condições de estabilidade. À pressão atmosférica, a mirabilita não existe acima de $32,5^\circ\text{C}$ (temperatura limite de estabilidade da mirabilita). Então, a mirabilita pode cristalizar diretamente abaixo de $32,5^\circ\text{C}$ pelo esfriamento da solução de Na_2SO_4 contendo abaixo do 30,1% de fração de peso. Esta reação conhecida como hidratação da thenardita, ocorre a $32,4^\circ\text{C}$ e corresponde ao desequilíbrio entre os cristais formados de thenardita e a solução residual. Esse desequilíbrio leva à dissolução da thenardita para produzir mirabilita (Rodríguez-Navarro *et.al.*, 2000, *apud* Angeli 2007). A reação indica que a mirabilita não é produzida somente por hidratação da thenardita, já que, primeiramente, resulta da reação de dissolução da thenardita e, posteriormente por precipitação. A thenardita pode ser formada diretamente pelo esfriamento da solução concentrada de Na_2SO_4 e a altas temperaturas, ou por desidratação da mirabilita, dando como resultado thenardita e água.

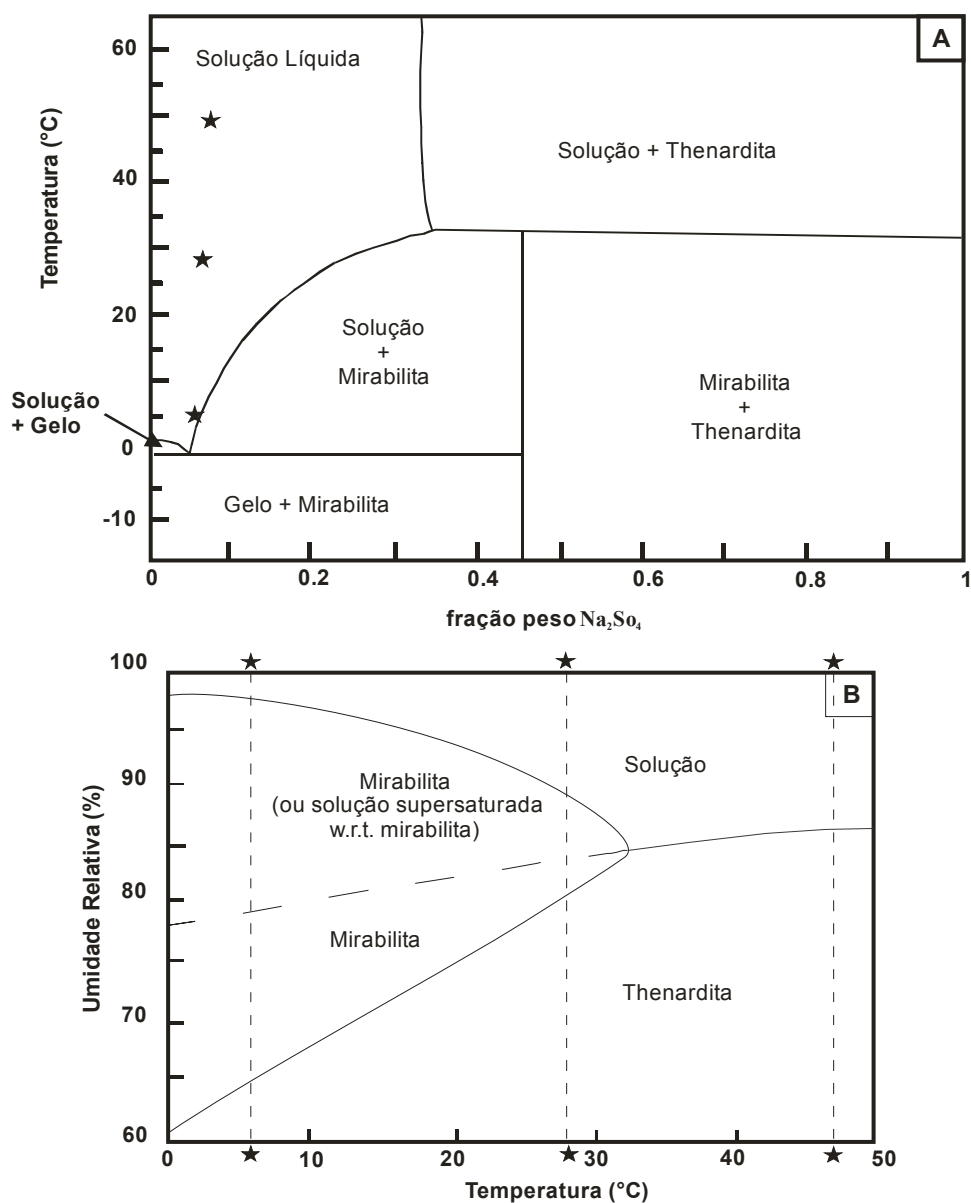


FIGURA 82. Domínios de estabilidade do sulfato de sódio: (A) diagrama da estabilidade do sistema Na₂SO₄·H₂O. (B) diagrama de estabilidade em relação à temperatura e umidade relativa. Fonte: Angeli (2007).

Estudos recentes sugerem que o impacto na deterioração de rochas é maior em presença da mirabilita do que para a thenardita e, portanto, a reação $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ é a mais importante no decaimento das rochas (Rodríguez-Navarro & Doehne 1999; Flatt, 2002; Steiger, 2003). A reação é muito sensível à umidade relativa como mostra a Fig. 82B. Neste diagrama, a mirabilita é a “fase de alta umidade relativa - baixa temperatura” e a thenardita a “fase de baixa umidade relativa - alta temperatura”. De acordo com Rodríguez-Navarro & Doehne (1999) e Genkinger & Putnis (2007), a reação $\text{mirabilita} \rightarrow \text{thenardita} + \text{H}_2\text{O}$ é mais eficiente no sentido da “hidratação” da thenardita, a qual é mais rápida que a reação envolvendo “desidratação” da mirabilita.

8.3 Ensaio de cristalização de sais (Norma EN12370)

O ensaio de cristalização de sais permitiu avaliar a susceptibilidade à deterioração dos calcários com relação a este processo, considerado como um dos mais prejudiciais nas rochas tanto de monumentos históricos quanto de prédios recentes. Para simplificar o estudo dos aspectos gerais do decaimento por cristalização de sais, foi escolhido para a realização deste ensaio somente o sulfato de sódio, o qual foi utilizado nos corpos de prova das quatro variedades analisadas, escolhendo em cada conjunto de corpos de prova, aqueles que representassem melhor as características das rochas tanto no frente de lavra, como aquelas utilizadas nos ambientes urbanos de Medellín.

É necessário ressaltar a importância da informação obtida neste ensaio, considerando o uso geral destes calcários em ambientes externos e internos, tanto em pisos quanto em paredes, sendo, portanto, expostos a este tipo de processo de deterioração.

A resposta face ao ensaio de cristalização de sais foi diferente para cada uma das quatro variedades, mostrando cada uma delas características próprias em relação ao tipo e intensidade de deterioração. A avaliação da perda de massa (Anexo D) mostrou que as menores perdas aconteceram no calcário RV, enquanto que o processo foi mais agressivo com os calcários RB e, sobretudo, com o calcário RD, que teve as maiores perdas de massa em relação à sua massa inicial. O calcário RVT mostrou feições diferentes de alteração nas porções inalterada ou alterada da rocha. Houve também mudanças nas características relacionadas com a dinâmica de circulação de fluidos (absorção capilar e perda de massa por evaporação) e, ainda, nas características geomecânicas.

8.3.1 Evolução da massa (ganhos ou perdas) ao longo do ensaio de cristalização de sais

Para cada conjunto de corpos de prova correspondentes a cada litologia, os resultados mostrados em diagramas indicam a relação entre peso normalizado e o número de ciclos. Observando os diagramas em conjunto, as rochas mostraram a mesma evolução em função do tempo, mas com diferenças entre elas de acordo com as suas características próprias.

Em todos os corpos de prova submetidos aos quinze ciclos, observa-se que o processo apresenta as três etapas consideradas no processo de cristalização de sais para materiais porosos (Benavente, 2001; Angeli, 2007), com as seguintes características:

- **Etapa I:** incremento de peso devido à entrada e à cristalização de sais nos poros da rocha. O tempo 0 é o correspondente ao início do ensaio, no qual a massa normalizada inicial (m_i/m_0) tem o valor de 1.
- **Etapa II:** (algumas vezes inexistente, começa depois dos primeiros danos identificáveis visualmente): variação de peso dependendo da competição entre a entrada e cristalização de

sais e a deterioração da rocha. Podem acontecer ganhos e perdas de massa dentro do processo.

- **Etapa III:** decréscimo ou perda de peso porque a entrada e cristalização de sais no interior da rocha é inferior, quando comparada com as perdas pela degradação da rocha.

8.3.1.1 Calcário Royal Verde (RV)

O calcário RV apresenta a menor susceptibilidade à deterioração por cristalização de sais como observado nos quinze ciclos efetuados. A perda de massa média para este calcário é de 0,54%. A menor perda de massa é registrada no corpo de prova 8 (0,24%), enquanto que o corpo de prova 10 experimenta a maior variação com uma perda ao final dos quinze ciclos de 0,78% (Tab. 16).

TABELA 16. Perda de massa para o calcário RV ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
7	933,39	927,92	5,47	0,59
8	912,31	910,08	2,23	0,24
9	867,77	864,09	3,68	0,42
10	890,12	883,18	6,94	0,78
11	906,50	903,70	2,80	0,31
12	900,12	893,98	6,14	0,68
13	888,27	884,26	4,01	0,45
Perda de massa média (%)				0,54
Desvio padrão				0,18

A dinâmica do processo de deterioração por cristalização de sais é variável devido às pequenas heterogeneidades dos corpos de prova, sejam estas, fissuras ou áreas de concentração de fragmentos fósseis, cujas estruturas se apresentam como barreiras resistentes à migração de sal e à deterioração. Por exemplo, no corpo de prova 7 (Fig. 83A e B), as carapaças de gasterópodos presentes atuam como barreira que impede a circulação homogênea do sal na rocha, pelo qual o processo de deterioração é iniciado ao redor destas, onde há mais concentração de sal, gerando ao final do ciclo, uma morfologia de entradas e saliências na rocha, com diferencial em relação a sua resistência à deterioração. Também é observado como as fissuras constituem-se em um caminho de migração, cristalização de sais e destruição da estrutura da rocha.

As mudanças estéticas são evidentes somente a partir do oitavo ciclo, sendo a arenização e a erosão diferencial os processos mais comuns que aparecem nesse ciclo, desenvolvendo-se com muita rapidez nos ciclos sub-seguintes. A demora no início do processo de perda de massa e das mudanças estéticas pode estar relacionada com a menor porosidade desta rocha em comparação

com as outras variedades, atendendo aos resultados da avaliação da porosidade, e o fato de possuir o menor tamanho de raio de poro. A menor porosidade, associada à menor interconexão entre os poros, que se estabeleceu através dos índices físicos e da porosimetria de mercúrio, determina que a circulação e cristalização de sais sejam processos mais lentos; mas devido aos pequenos raios de poro (mesoporos) predominantes nesta rocha, quando começa o processo destrutivo, este é muito rápido, em função do contraste entre pequeno tamanho de poro e o tamanho do cristal de sal que exerce pressão nas paredes dos poros, seja thenardita ou mirabilita. Aparecem cavidades com diâmetros variáveis entre 0,3 e 0,8mm, especialmente onde há processos de dissolução dos bioclastos (Fig. 83C e D).

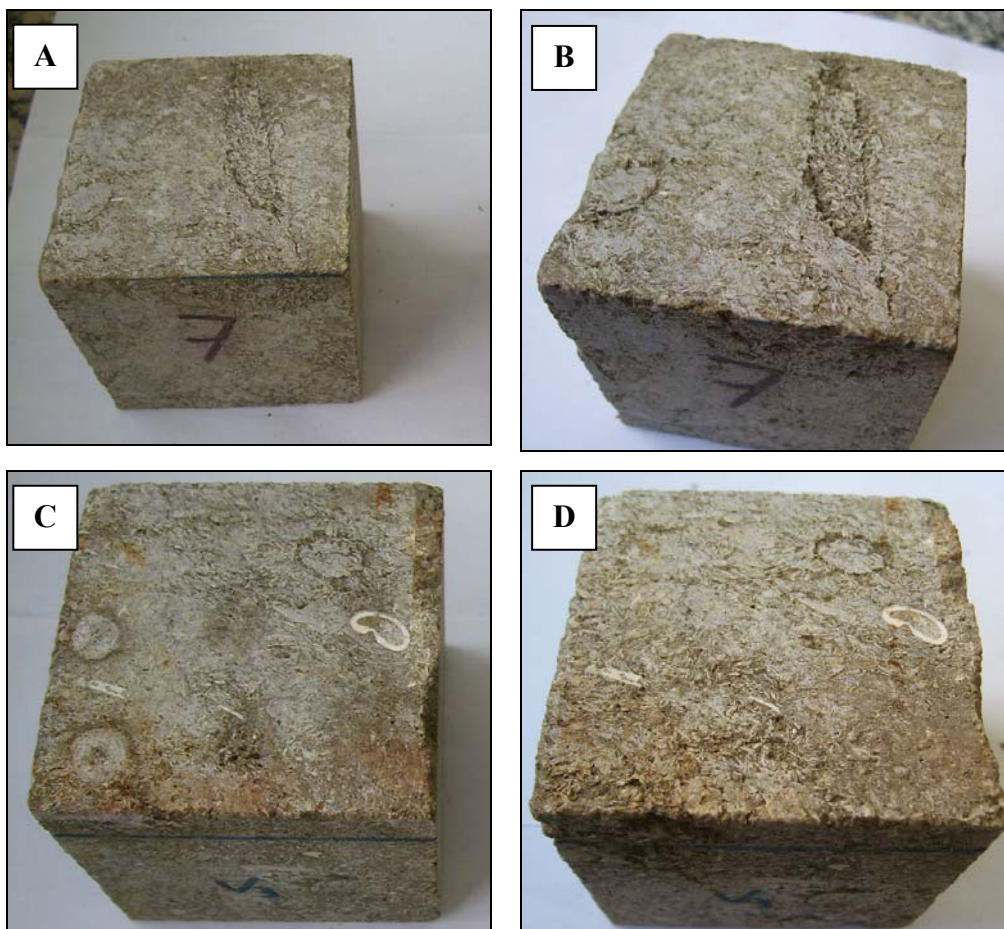


FIGURA 83. Evolução diferenciada do processo de deterioração no ensaio de cristalização de sais por discontinuidades litológicas (A e B) e pela heterogeneidade do tamanho dos fragmentos fósseis (C e D). Calcário RV (Corpo de prova 7).

A evolução da massa durante o ensaio segue as três etapas definidas por Benavente *et.al.*, (2004): incremento da massa por suplemento de sal; variação entre ganhos e perdas, dependente da competição entre o suplemento de sal e a perda de massa por deterioração da rocha e o decréscimo constante de massa produzida pela deterioração devida à cristalização de sais.

Apesar do ganho de massa ser contínuo até o oitavo ciclo, entre os ciclos quatro e sete acontece uma variação cíclica dependente da competição entre cristalização e deterioração. A partir

do nono ciclo, a perda de massa é contínua e veloz até o final do ensaio (Fig. 84), como pode ser deduzido da inclinação da curva na Etapa III, existindo variação na quantidade de massa perdida entre os diferentes corpos de prova (Fig. 85), de acordo com a presença de descontinuidades como estilólitos, microfissuras etc.

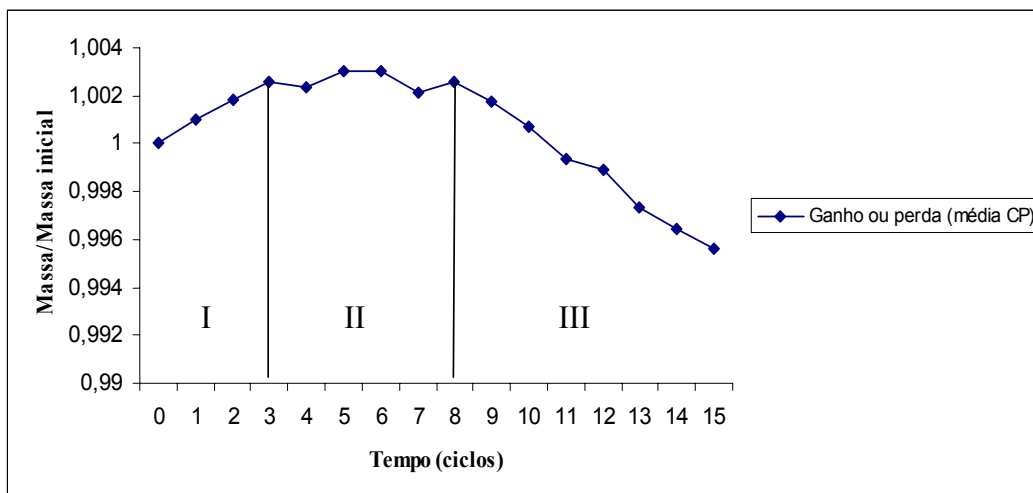


FIGURA 84. Evolução da massa média (g) dos corpos de prova (CP) do calcário RV no ensaio de cristalização salina.

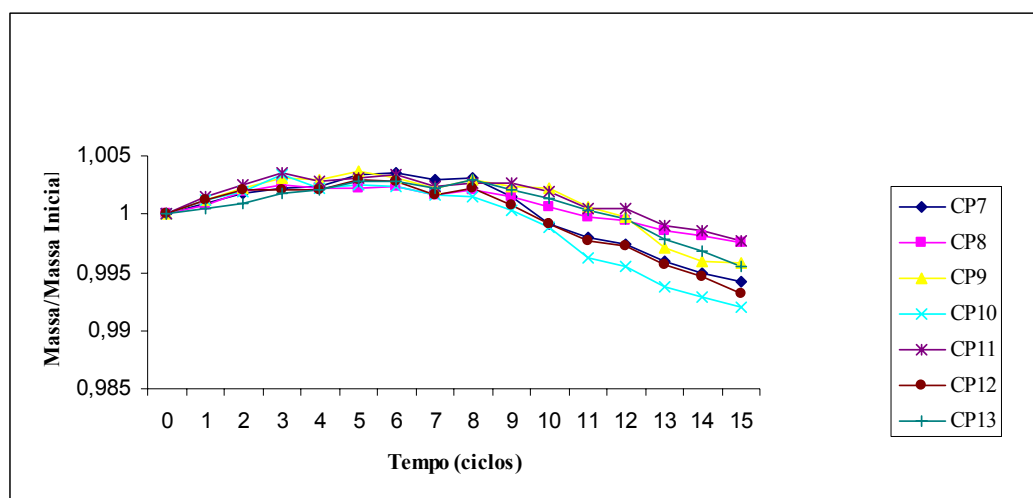


FIGURA 85. Variação da massa (g) dos diferentes corpos de prova (CP) do calcário RV no ensaio de cristalização salina. Mesmo com as diferenças no percentual de perda de massa, todos os CP seguem o mesmo comportamento durante o ensaio.

8.3.1.2 Calcário Royal Veta (RVT)

O calcário RVT é equivalente ao calcário RV em composição, sendo considerado como uma variedade parcialmente alterada pela circulação de fluidos através de poros e fissuras, com presença de goethita e limonita ($\text{FeO}(\text{OH})$) como minerais de alteração. Este calcário apresenta zonas inalteradas com as mesmas características do calcário RV e zonas alteradas de cor amarela, onde é visível o efeito da alteração ocasionada pela circulação de água, através especialmente de fissuras.

Os resultados do ensaio de cristalização de sais refletem a heterogeneidade dos corpos de prova utilizados, os quais são equivalentes em aparência e estrutura às chapas utilizadas nos prédios urbanos visitados na cidade de Medellín. Os corpos de prova apresentam diferentes intensidades de alteração, desde a mais incipiente, com características muito semelhantes ao calcário RV (corpo de prova 9) passando por um estado intermediário de alteração com superfície alterada não maior do que 30% (corpo de prova 5) até a mais intensa, onde a área alterada é maior do 70% da superfície do corpo de prova (corpo de prova 8) (Fig. 86).

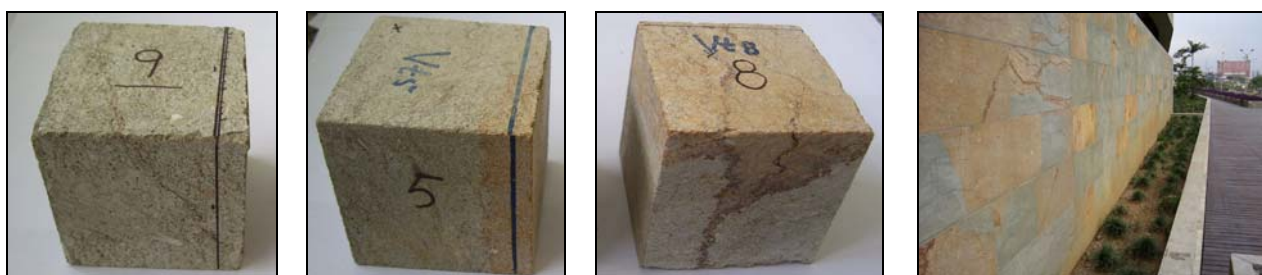


FIGURA 86. Diferentes graus de alteração nos corpos de prova do calcário RVT para a execução do ensaio de cristalização de sais e uso de chapas de calcário RVT na fachada exterior do Centro de Convenciones – Medellín.

O comportamento do calcário RVT durante o ensaio apresenta diferenças consideráveis com relação ao calcário RV, correspondente à variedade inalterada. Nos oito primeiros ciclos, apresenta um equilíbrio na competição entre o ganho de massa por cristalização de sais no sistema poroso e a perda da mesma devida à deterioração causada pela cristalização de sais. Este fato é representado graficamente pela parte da curva com inclinação suave correspondente às Etapas I e II do processo de cristalização (Fig. 87). Embora não existam perdas consideráveis de massa durante os oito primeiros ciclos, os danos estéticos aparecem a partir do quarto ciclo, no qual o acréscimo de massa pela entrada e a cristalização dos sais no arranjo poroso diminui, indicando o começo da ação da deterioração ainda nesse ciclo. A perda de massa e os danos estéticos ocasionados pela cristalização de sais se evidenciam com grande intensidade desde o ciclo nove, a partir do qual acontece a maior parte da perda média de massa (0,66%), do total da massa média perdida nos quinze ciclos (0,78%) (Tab. 17).

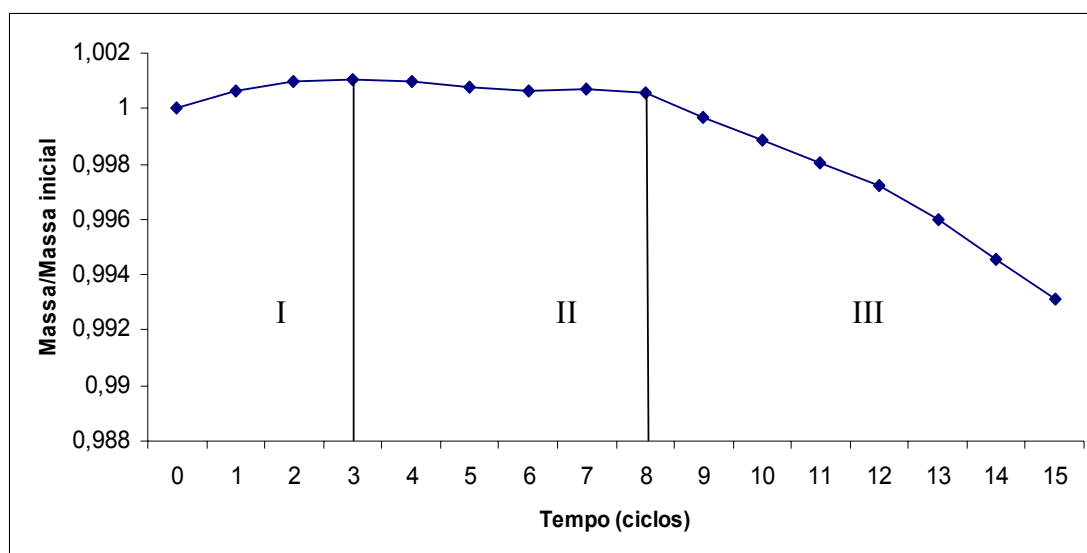


FIGURA 87. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RVT no ensaio de cristalização de sais.

TABELA 17. Perda de massa para os corpos de prova do calcário RVT ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
7	895,71	884,7	11,01	1,23
8	920,36	914,67	5,69	0,62
9	873,99	867,07	6,92	0,79
10	886,52	879,46	7,06	0,80
11	868,87	865,47	3,40	0,39
13	879,89	869,85	10,04	1,14
14	915,90	911,51	4,39	0,48
Perda de massa média (%)				0,78
Desvio padrão				0,29

Conforme observa-se nos quinze ciclos efetuados, os corpos de prova do calcário RVT apresentam individualmente diferentes graus de susceptibilidade à deterioração por cristalização de sais, a qual está relacionada com o grau de alteração dos corpos de prova utilizados. Portanto, a perda de massa é variável (Fig. 88). A menor perda de massa (0,39%) acontece no corpo de prova 11, enquanto que o corpo de prova 7 experimenta a maior perda de massa (1,23%), ocasionada tanto pelo maior grau de alteração da rocha quanto pela presença de fissuras que facilitam a circulação e cristalização do sulfato de sódio nos poros do corpo de prova.

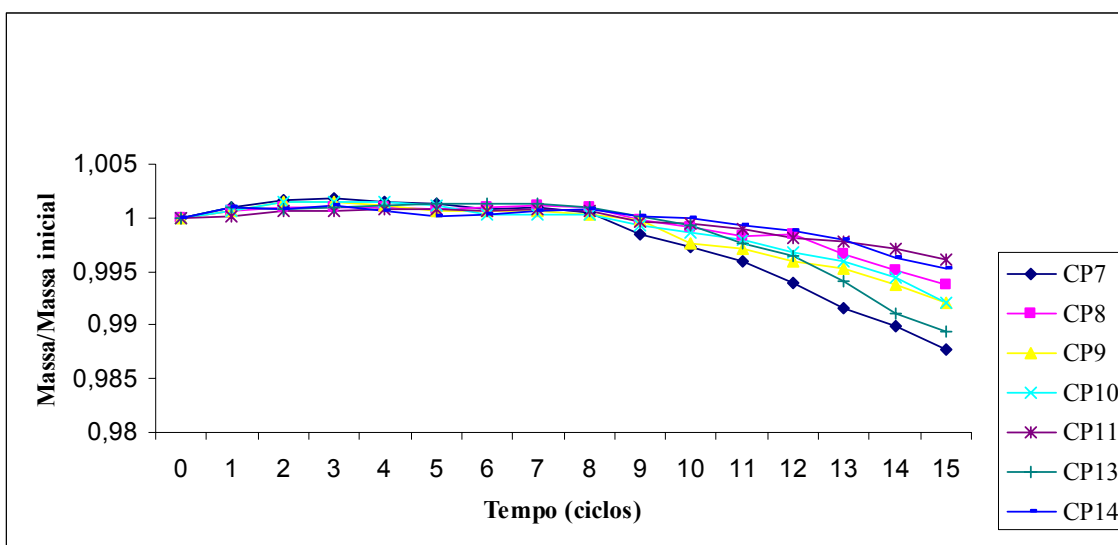


FIGURA 88. Comportamento da massa dos diferentes corpos de prova do calcário RVT no ensaio de cristalização de sais. O comportamento dos corpos de prova é similar durante o ensaio.

O processo de deterioração é diferente nas porções inalteradas e alteradas da rocha (Fig. 89). Nas áreas inalteradas, equivalentes texturalmente ao calcário RV, a deterioração apresenta-se mais rapidamente e em forma de geração de pequenas cavidades que vão se desenvolvendo ao longo do ensaio, começando o aparecimento destas cavidades no quarto ciclo. Porém, a partir do oitavo ciclo, começa a deterioração intensa das áreas alteradas dos corpos de prova, a qual acontece de forma muito agressiva e contínua até o final do ensaio, em forma de processo de arenização.

As diferenças no começo e na intensidade de alteração também estão relacionadas com as diferenças tanto no valor da porosidade, quanto nas dimensões dos raios de poro, fatores estes que definem a deterioração da rocha. Assim, as áreas inalteradas, equivalentes ao calcário RV, possuem menor porosidade, mas ao mesmo tempo, menor tamanho de raio de poro. O processo de migração por capilaridade e o preenchimento dos poros acontece rapidamente e a pressão exercida sobre as paredes pelo processo de cristalização destrói, desde o começo do ensaio, as ligações intergranulares, gerando as cavidades. As partes alteradas, equivalentes texturais do calcário RB, possuem maior porosidade e maior raio de entrada de poro, razão pela qual é preciso mais tempo para o preenchimento completo do espaço poroso e para que o crescimento dos cristais seja superior ao tamanho dos poros, conseguindo assim, a destruição das suas paredes. Porém, quando este processo inicia, estas áreas alteradas experimentam a maior e mais rápida deterioração.



FIGURA 89. Deterioração diferenciada dos corpos de prova do calcário RVT. Esquerda: aspecto antes do início do ensaio de cristalização de sais. Direita: aspecto após oito ciclos, com predomínio da deterioração nas áreas inalteradas.

8.3.1.3 Calcário Royal Bronze (RB)

O calcário RB apresenta a mesma constituição do calcário RV e corresponde à variedade obtida na lavra das porções de rocha com maior grau de alteração.

O calcário RB apresenta uma variável susceptibilidade à deterioração por cristalização de sais como observado nos quinze ciclos efetuados, em função das diferenças nos corpos de prova, relacionadas tanto à intensidade da alteração, quanto à presença de fissuras ou superfícies de descontinuidade como estilólitos na rocha.

A perda de massa é variável (Tab. 18), sendo a média para este calcário de 1,17%. A menor perda de massa (0,60%) acontece no corpo de prova 12. O corpo de prova 14 experimenta a maior perda de massa (2,06%), ocasionada tanto pelo maior grau de alteração da rocha, quanto pela presença de fissuras que facilitam a circulação e cristalização do sulfato de sódio na estrutura de poros deste corpo de prova.

TABELA 18. Perda de massa para o calcário RB ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
7	864,45	858,19	6,26	0,72
8	850,20	836,01	14,19	1,66
9	762,35	757,07	5,28	0,69
10	789,96	785,11	4,85	0,61
12	848,09	842,96	5,13	0,60
13	829,49	814,23	15,26	1,84
14	868,64	850,68	17,96	2,06
Perda de massa média (%)				1,17
Desvio padrão				0,57

A evolução da massa durante o ensaio (Fig. 90) apresenta diferenças consideráveis com relação ao calcário RV, correspondente à variedade inalterada. Os três primeiros ciclos correspondem à Etapa I, de ganho de massa por cristalização do sulfato de sódio (thenardita) na estrutura de poros, sem que exista perda de massa por deterioração. Depois, nos três ciclos seguintes, o comportamento da massa é cíclico, com aumentos e diminuições devidas à alternância entre entrada e cristalização de sais no interior do sistema poroso com a degradação da rocha por efeito da quebra das ligações intergranulares. A partir do sexto ciclo, a perda de massa predomina sobre o ganho por migração e cristalização dos sais, mas é um processo que vai se desenvolvendo lentamente. Do ciclo doze em diante, a perda de massa acontece de uma forma muito rápida e agressiva, sendo que nos últimos três ciclos, acontece a perda de massa média de 0,85%, do total de 1,024% de massa perdida no ensaio.

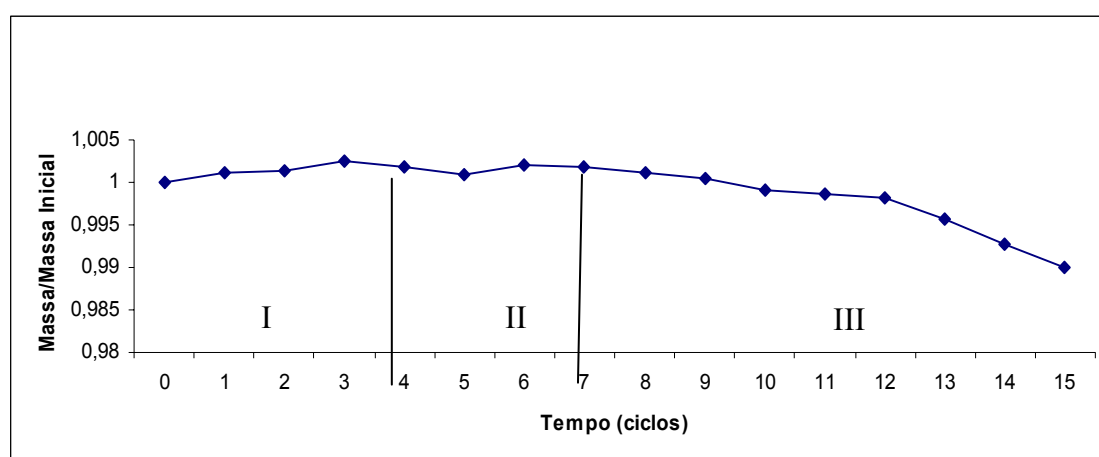


FIGURA 90. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RB no ensaio de cristalização de sais.

O processo de deterioração ao longo do ensaio é homogêneo na superfície dos corpos de prova, mas com maior desenvolvimento naquelas áreas onde há fissuras que constituem caminhos que facilitam a migração e cristalização dos sais (Fig. 91).

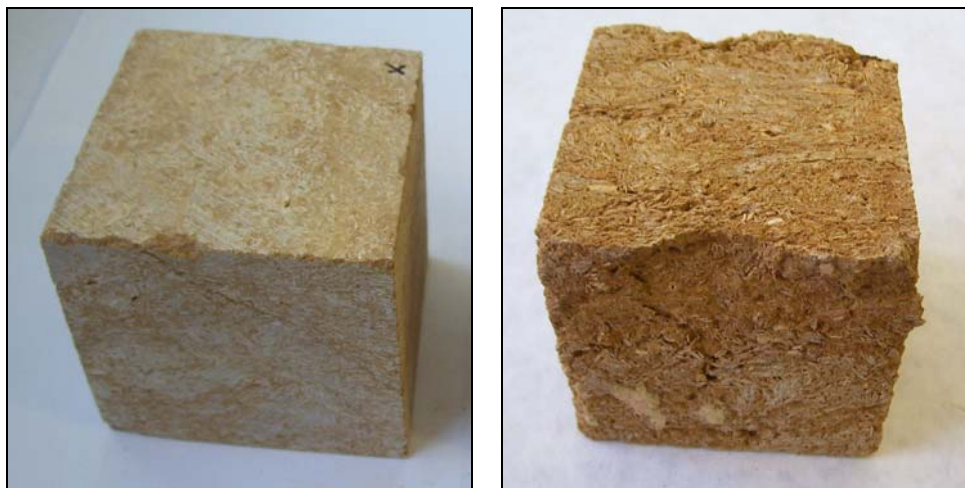


FIGURA 91. Mudanças no calcário RB (corpo de prova 14) no ensaio de cristalização de sais. Esquerda: corpo de prova inalterado; direita: após doze ciclos de saturação.

8.3.1.4 Calcário Royal Dorado (RD)

O calcário RD, caracterizado pela variedade de bioclastos e as diferenças texturais em relação aos três calcários da FL 1, apresenta, no conjunto das variedades pesquisadas, as maiores intensidades para os processos de deterioração decorrentes do ensaio de cristalização de sais.

A média da perda total de massa no conjunto de sete corpos de prova expostos aos quinze ensaios de saturação foi do 6,05%, com diferenças notórias entre eles, em razão da existência de fissuras ou micro-cavidades em alguns, facilitando o processo de deterioração. A maior perda de massa foi registrada no corpo de prova 5 (9,31%) e a menor no corpo de prova 9 (3,40%) (Tab. 19).

TABELA 19. Perda de massa para o calcário RD ao final dos quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

Corpo de prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
3	792,9	728,73	64,17	8,09
4	832,13	785,25	46,88	5,63
5	799,28	724,84	74,44	9,31
8	796,54	759,79	36,75	4,61
9	828,84	800,69	28,15	3,40
12	824,51	790,69	33,82	4,10
14	782,59	725,99	56,6	7,23
Perda de massa média (%)				6,05
Desvio padrão				2,04

Nesse calcário, a partir do primeiro ciclo de saturação, começa o processo de perda de massa, a qual é evidenciada pelos resíduos encontrados no fundo do recipiente onde os corpos de prova ficam em saturação, com geração de cavidades de 1mm de diâmetro aproximado e a destruição progressiva das quinas do corpo de prova. Porém, até o sexto ciclo, é mais intenso o processo de migração e cristalização dos sais na estrutura de poros da rocha, sendo o ganho de massa devido a esse processo de cristalização maior do que a perda devida à deterioração. A partir do sétimo ciclo de saturação, as perdas de massa devidas aos processos de deterioração predominam sobre o ganho relacionado com a cristalização dos sais, começando a partir daí, um processo progressivo de perda de grande quantidade de massa e destruição dos corpos de prova (Fig. 92). No gráfico correspondente à evolução da massa durante o ensaio, é possível determinar que, nesse calcário, não ocorre o processo de alternância de ganhos e perdas de massa, decorrentes da competição entre deterioração e cristalização na estrutura de poros da rocha, característico da Etapa II (Fig. 93).

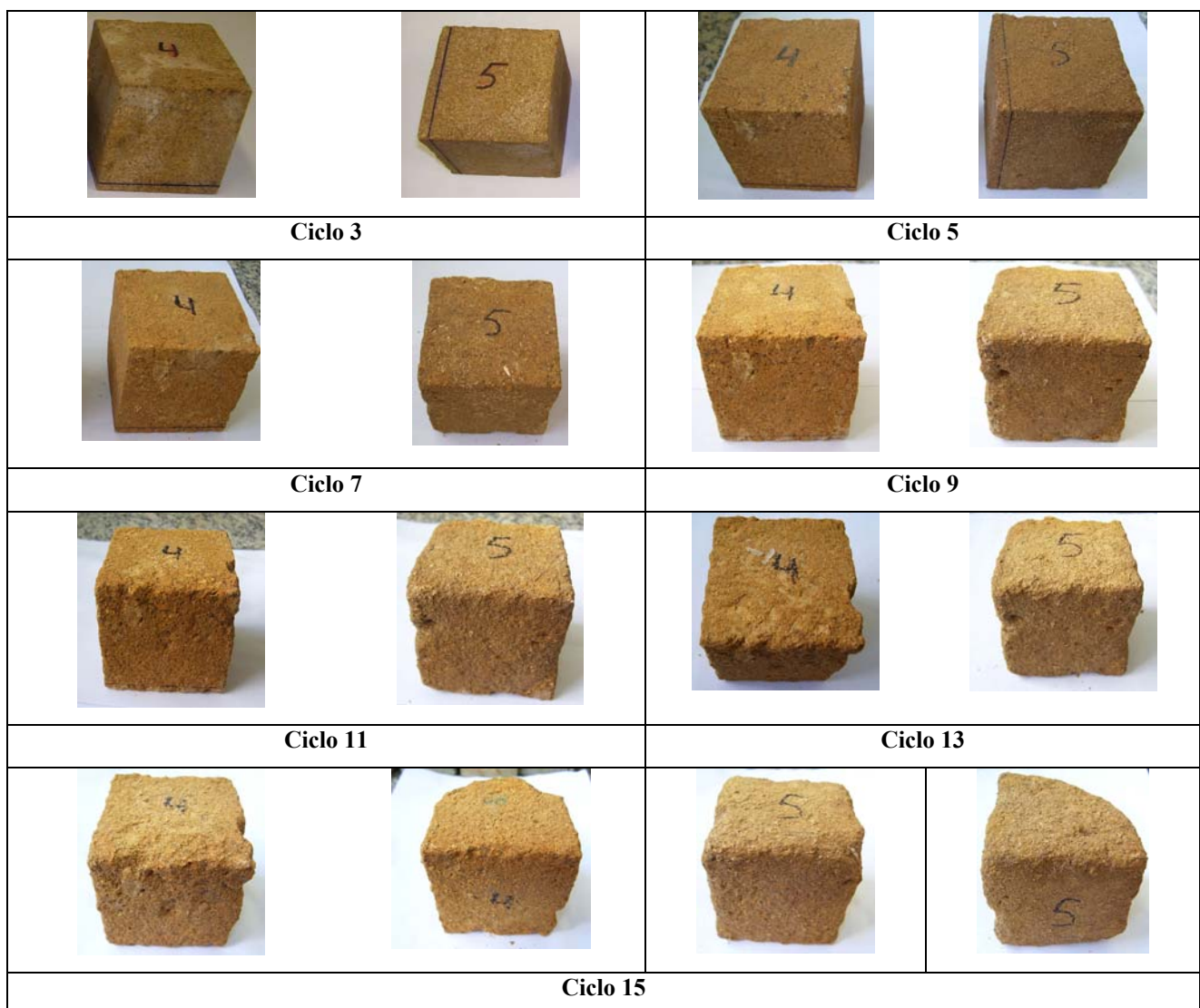


FIGURA 92. Perda de massa e mudanças estéticas no calcário RD durante o ensaio de cristalização de sais.

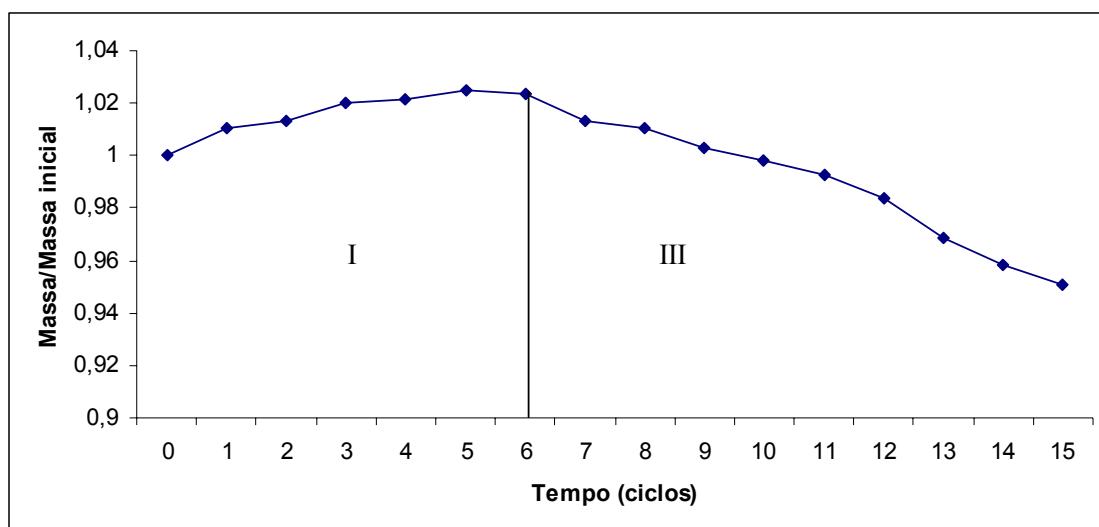


FIGURA 93. Evolução da massa média dos corpos de prova do calcário RD no ensaio de cristalização de sais.

A evolução dos corpos de prova, considerados individualmente, segue a tendência geral (Fig. 94), com diferenças relacionadas somente com a porcentagem de massa perdida de acordo com as características de cada corpo de prova, relacionadas à presença de fissuras e cavidades.

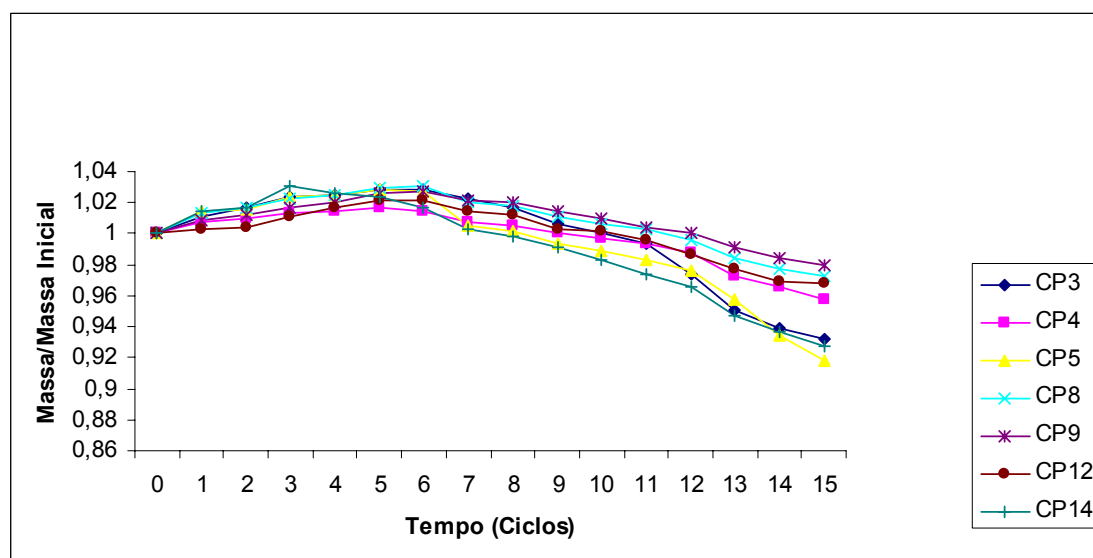


FIGURA 94. Comportamento da massa dos corpos de prova do calcário RD no ensaio de cristalização de sais.

Uma avaliação comparativa da resistência à cristalização salina, expressa na porcentagem de perda massa para as quatro litologias pesquisadas (RV, RVT, RB e RD), permite determinar a relação direta entre grau de alteração, especialmente para os calcários da FL 1 e a porosidade, com a susceptibilidade ao processo de cristalização de sais. Na FL 1, o calcário RV, caracterizado pelo menor grau de alteração intempérica e a menor porosidade, apresenta a maior resistência à ação dos sais solúveis em relação às outras três variedades, embora o pequeno tamanho dos poros seja um elemento facilitador para a degradação decorrente do processo de cristalização.

O calcário RVT, caracterizado pela mistura de áreas inalteradas com outras alteradas, apresenta uma resistência variável, mas sempre menor que a obtida para o RV, considerando o grau de alteração do corpo de prova utilizado e a maior porosidade característica desta variedade. O calcário RB, que é a variedade mais alterada da rocha, apresenta a menor resistência ao ensaio de cristalização de sais decorrente do enfraquecimento das ligações intergranulares devida à alteração e à maior porosidade característica desta variedade. O processo se vê facilitado pela presença de descontinuidades como fissuras, estilólitos e outras que podem eventualmente ajudar à deterioração da rocha quando acontece a migração da solução salina no interior da rocha. (Fig. 95).

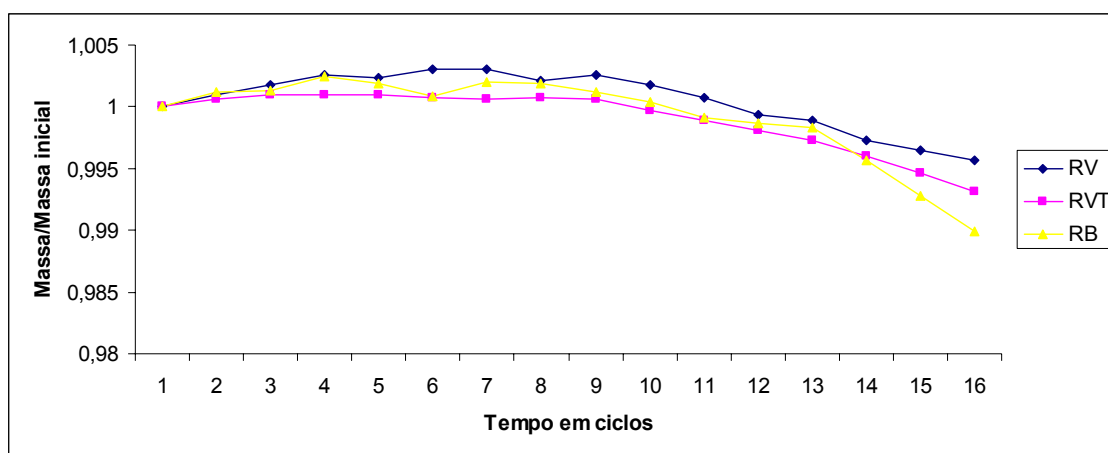


FIGURA 95. Avaliação da perda de massa durante o ensaio de cristalização de sais. Calcários FL 1.

O calcário RD apresenta a menor resistência à ação da cristalização de sais, com perdas de massa muito superiores às que acontecem nas litologias da FL 1 (Fig. 96). Estas perdas de massa estão diretamente relacionadas com a alta porosidade desta rocha e com o maior tamanho de raio de poro, que facilita a entrada dos sais, a circulação pelo interior da rocha e a sua cristalização com os efeitos destrutivos.

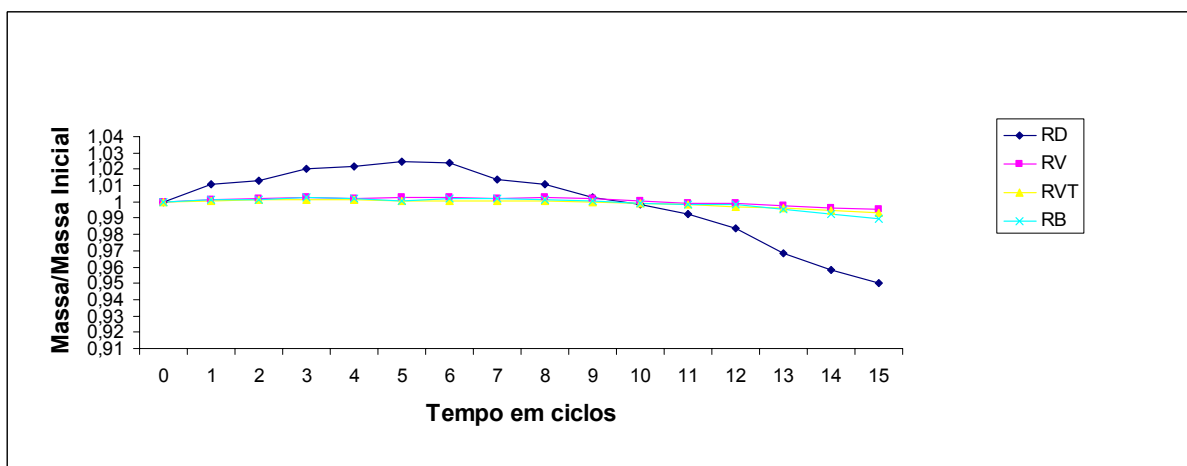


FIGURA 96. Gráfico comparativo da perda de massa dos calcários da Fm. La Tampa. O calcário RD apresenta menor resistência à cristalização de sais em relação às outras três litologias.

8.3.2 Efeitos do processo de cristalização de sais nos índices físicos

Os valores dos índices físicos, avaliados em corpos de prova que passaram pelos quinze ciclos de cristalização salina, apresentam diferenças significativas com relação aos valores obtidos para essas rochas previamente à cristalização salina (Tab. 20). São registrados aumentos dos valores correspondentes aos parâmetros massa específica seca aparente ($\rho_{a_{sec}}$), massa específica aparente saturada ($\rho_{a_{sat}}$), densidade esquelética (d_{skel}) e porosidade aparente (Φ_a). Também ocorre a diminuição do coeficiente de absorção de água aparente (α_a).

TABELA 20. Índices físicos das variedades de calcários ornamentais da Formação La Tampa.

	Variedade de calcário	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)*	$\rho_{a_{sat}}$ (Kg/m ³)	d_{skel}	Φ_a (%)	α_a (%)
FL1	RV	1,60	1,63	1,65	2,64	1,73
	RVA**	2,54	2,59	2,65	4,14	1,62
	RVT	1,61	1,64	1,66	2,92	1,81
	RVTA**	2,56	2,60	2,67	4,11	1,61
	RB	1,63	1,69	1,72	5,56	3,39
	RBA**	2,41	2,48	2,60	7,13	2,98
FL 2	RD	1,61	1,70	1,77	8,79	5,35
	RDA**	2,30	2,43	2,64	12,78	5,55

* $\rho_{a_{sec}}$: massa específica seca; $\rho_{a_{sat}}$: massa específica saturada; d_{skel} : densidade esquelética; Φ_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água aparente. **calcários submetidos ao ensaio de cristalização de sais.

O aumento dos valores da massa específica aparente tanto seca ($\rho_{a_{sec}}$) quanto saturada ($\rho_{a_{sat}}$) e da densidade esquelética (d_{skel}) está relacionado com a presença de sais no interior da estrutura de poros dos corpos de prova, não removidos no processo de lavagem, os quais bloqueiam parte dos poros pré-existentes e os gerados durante o processo de cristalização, dificultando o acesso, ocasionando o aumento dos valores mencionados. O coeficiente de absorção de água (α_a) diminui nos calcários RV, RVT e RB, embora tenha acontecido o aumento da porosidade durante o ensaio de cristalização de sais. Isto mostraria um baixo grau de conexão entre muitos dos poros após o processo de cristalização de sais, justamente pela presença destes cristais, bloqueando a comunicação entre eles e deixando isolada uma boa parte dos poros gerados no processo de alteração.

8.3.3 Mudanças na distribuição e características do sistema poroso

Os resultados da análise da modificação do arranjo poroso usando a técnica da porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) indicam mudanças na porosidade dos corpos de prova durante a cristalização salina. A avaliação foi realizada após da retirada parcial dos sais, para estudar os

efeitos dos sais na geração de novos poros e na obstrução dos poros já existentes, contribuindo ambos os aspectos no processo de deterioração das rochas.

Nos espectros de MIP dos calcários RV e RD tomados como referência, após seis e quatorze ciclos de saturação, observam-se mudanças relacionadas com a porosidade em relação com as rochas inalteradas. Nas duas rochas aumenta a porosidade após o processo de cristalização de sais, o qual está relacionado com o desenvolvimento de novos poros e fissuras decorrentes do processo (Tab. 21 e Anexo A2).

TABELA 21. Porosidade obtida por porosimetria de intrusão de mercúrio nos calcários Royal Verde (RV) e Royal Dorado (RD) no estado inalterado e após seis e quatorze ciclos de cristalização de sais

Variedade	Φ_a *(%) rocha inalterada	Raio meio de poro	Φ_a (%) após seis ciclos	Raio meio de poro	Φ_a (%) após quatorze ciclos	Raio meio de poro
RV	6,41	0,048	13,16	0,037	7,98	0,048
RD	15,36	0,19	18,94	0,26	19,55	0,24

* Porosidade aberta

Observando os valores da porosidade para o RV, aparentemente teria acontecido diminuição da porosidade após quatorze ciclos de cristalização de sais. Tal fato não seria lógico considerando as observações ao longo do processo, caracterizado pela perda de massa e acréscimo constante da porosidade. A explicação está na presença de cristais de sais que ficaram preenchendo parte dos poros da rocha após os quatorze ciclos, impedindo a entrada do Hg.

Os espectros do MIP para o calcário RV, após seis e quatorze ciclos de cristalização de sais mostram características muito diferentes (Fig. 97). Após seis ciclos de cristalização, o espectro de MIP mostra distribuição bimodal de tamanho de poros com duas famílias bem diferenciadas. A principal família de poros apresenta raios de acesso no intervalo 0,005-0,100 μ m, mantendo o mesmo pico para o valor de raio de poro da rocha inalterada (0,050 μ m), mas com um acréscimo importante no volume de poros representado por esse raio de entrada, que passa de 34,98% a 49,49% do volume de poros.

A segunda família é a representada por poros cujo tamanho está compreendido no intervalo 0,600-1,000 μ m, e constitui o 5,59% do volume de poros total da rocha. Esses novos poros resultam de fissuras e cavidades formadas durante o processo de cristalização. Nota-se também que alguns raios de poro identificados na amostra inalterada (0,150 μ m – 6,67%) não são detectados no espectro de MIP da rocha submetida aos seis ciclos. Isto pode obedecer à presença de cristais de sais preenchendo esses poros, o qual os faz indetectáveis ao MIP (Benavente, 2001; Angeli, 2007). Os resultados completos da porosimetria por MIP para o calcário RV após seis ciclos de cristalização são apresentados no anexo A2.

Após quatorze ciclos de cristalização de sais, a distribuição de poros é muito irregular e abrange um intervalo muito amplo, de 0,001 μm até 100,000 μm (Anexo A2). A primeira observação é uma redução do volume relativo dos poros mais freqüentes ou pico, de tamanho 0,050 μm , que passa de representar 49,49% do volume de poros no caso da rocha submetida aos seis ciclos de cristalização, a 36% após dos 14 ciclos de cristalização, indicando assim, tanto a maior dispersão dos valores de porosidade, quanto a possibilidade dos sais estarem preenchendo poros, afetando assim, o processo de intrusão do mercúrio.

Também é possível observar a geração de novos poros, com raios compreendidos no intervalo 0,010-0,025 μm , com pico no tamanho 0,010 μm , chegando a constituir 9,83% do volume de poros, e outros poros de raio 5,000 μm (0,980%) e 0,7 μm (0,49%).

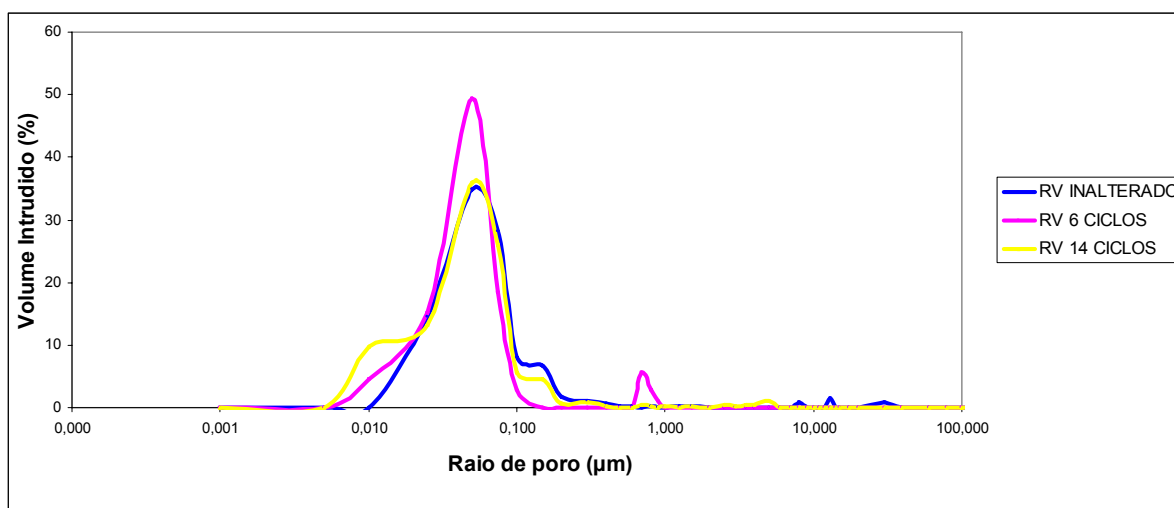


FIGURA 97. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para o calcário RV após seis e quatorze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

No caso do calcário RD, são observadas importantes mudanças na porosidade devidas ao processo de cristalização de sais (Fig. 98). Após seis ciclos, ocorre um alargamento dos raios de poro com relação aos raios da rocha inalterada. Isto se deve às pressões exercidas pelos cristais de sais nas paredes dos poros pré-existentes. O espectro de MIP é de tipo bimodal, mostrando duas famílias de poros. A principal família está constituída pelos poros cujos tamanhos estão no intervalo 0,100-0,400 μm . Uma diferença importante entre a rocha alterada e a não alterada está em relação ao pico de raio de poro, de 0,050 μm , que representa o maior volume de poros nas duas rochas, sendo 46,41% na rocha submetida aos seis ciclos e 34,98% na rocha inalterada. O aumento de volume evidencia o desenvolvimento de novos poros devido ao processo de cristalização de sais. A outra família de poros formada no processo de cristalização possui dimensões no intervalo 0,010-0,075 μm . Nesse intervalo, o valor mais freqüente de poro ou pico, está representado pelo raio de 0,050 μm , que representa 6,24% do volume de poros da rocha.

Após quatorze ciclos de cristalização de sais, são identificados poros de dimensões compreendidas entre $0,001\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$, indicando a intensa geração de cavidades e fissuras decorrentes da ação da cristalização de sais na estrutura da rocha. Porém, a maioria de poros encontra-se no intervalo $0,075-1,250\mu\text{m}$. A distribuição dos poros no espectro de MIP é de tipo bimodal, diferenciada em duas famílias. A família principal com raios de poro compreendidos no intervalo $0,200-0,700\mu\text{m}$, apresenta pico no raio de poro de $0,300\mu\text{m}$, constituindo $31,71\%$ do volume intrudido. Comparando este pico com o resultante dos seis ciclos de cristalização, pode se observar a diminuição do volume de intrusão, produto da dispersão de valores de porosidade.

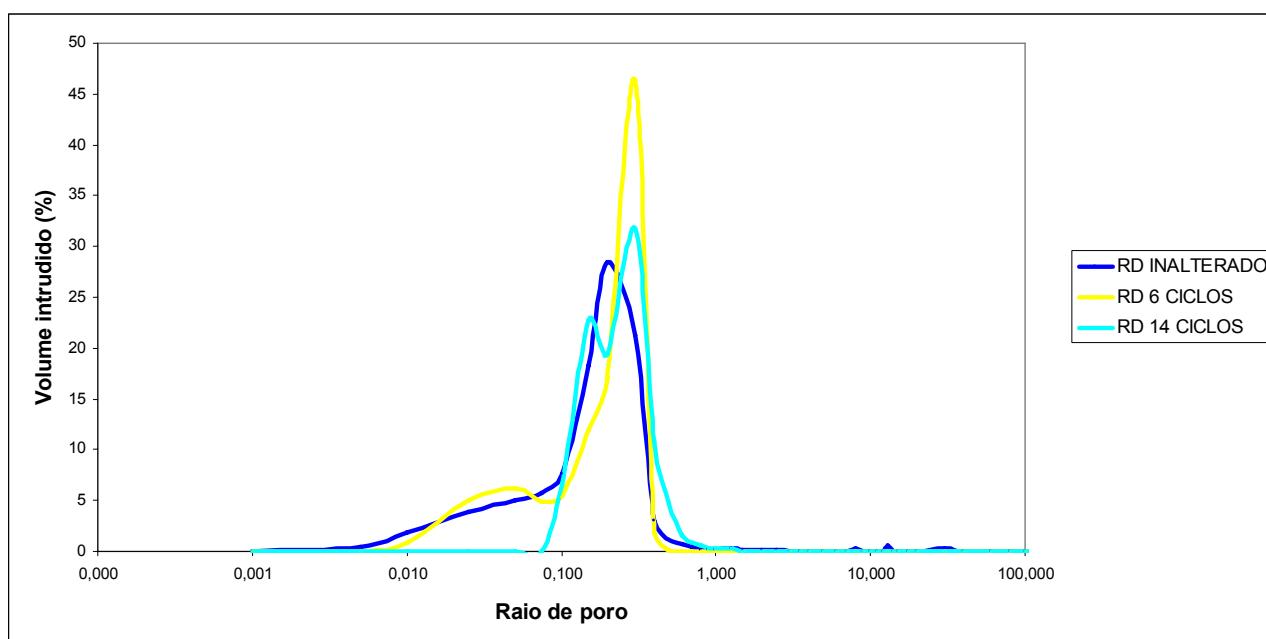


FIGURA 98. Espectros comparativos de porosimetria de injeção de mercúrio (MIP) para o calcário RD após seis e quatorze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

A segunda família é constituída por poros com dimensões entre $0,075\mu\text{m}$ e $0,200\mu\text{m}$. O pico aparece no raio $0,150\mu\text{m}$, que constitui $22,71\%$ do volume de poros da rocha e corresponde à geração de novos poros e fissuras por efeito da cristalização de sais.

Uma relação dos principais raios de poros obtidos por MIP após o ensaio de cristalização salina para os calcários RV e RD são apresentados na Tab. 22.

TABELA 22. Evolução da porosidade nos calcários RV e RD após seis e quatorze ciclos de cristalização de sais.

Calcário	Número de ciclos de saturação	Porosidade total MIP (%)	Meia de raio de poro (μm)	Raios de poro principais (μm)	Volume de poros (%)	Porosidade equivalente (%)
RV	6	13,16	0,05	0,05	49,49	6,51
				0,075	18,31	2,41
				0,025	15,25	2,01
				0,7	5,59	0,74
				0,01	4,58	0,60
				0,8	2,88	0,38
				0,1	2,88	0,38
	14	7,98	0,048	0,05	36	2,87
				0,01	9,83	0,78
				0,025	13,14	1,05
				0,075	26,04	2,08
				0,1	5,53	0,44
				0,15	4,55	0,36
				RD	6	18,94
0,2	17,07	3,23				
0,15	11,93	2,26				
0,05	6,24	1,18				
0,1	5,49	1,04				
0,025	4,99	0,95				
0,075	4,89	0,93				
14	19,55	0,24	0,4		1,8	0,35
			0,3		31,71	6,20
			0,15		22,71	4,44
			0,2		19,44	3,80
			0,4		10,83	2,12
			0,1		6,57	1,28
			0,5		4,78	0,93
0,6	1,61	0,31				

Segundo os resultados dos espectros de MIP dos calcários RV e RD, cristais de sulfato de sódio cristalizaram no interior da estrutura de poros destas rochas. Estas observações foram corroboradas com imagens obtidas via MEV do interior da rede porosa. Observa-se o desenvolvimento de cristais de thenardita em poros de todas as dimensões, como resultado do processo da cristalização durante a secagem dos corpos de prova, após a saturação com solução salina.

Nas imagens obtidas por MEV do calcário RD submetido a seis ciclos de cristalização salina, é possível observar o crescimento de cristais de thenardita nas cavidades das estruturas dos fragmentos bioclásticos (Fig. 99A e B), nas superfícies de contato entre os cristais de calcita (Fig. 99C) e, ainda, nos poros intergranulares dos cristais individuais deste mineral (Fig. 99D).

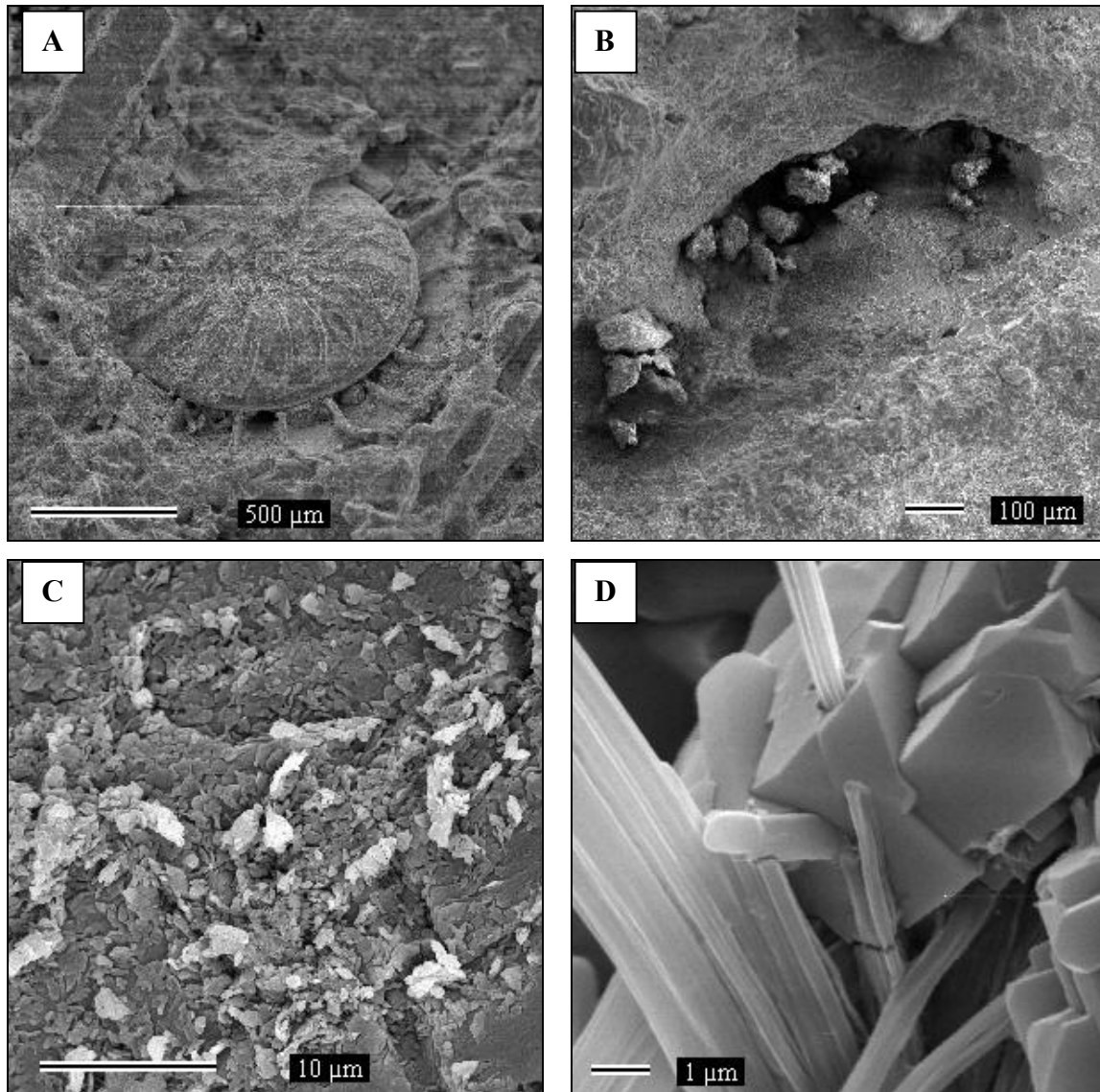


FIGURA 99. Imagens obtidas por MEV de diferentes tipos de cristalização de thenardita nas estruturas bioclásticas (A e B), nos contatos intergranulares (C) e nos poros intragranulares da calcita (D).

Deve-se considerar o fato de que o sulfato de sódio é um sal muito destrutivo, especialmente na fase hidratada (mirabilita). Nestes casos, a formação destes cristais por hidratação da thenardita ocasiona uma expansão de volume até 314%, com desenvolvimento da porosidade e deterioração da rocha (Rodriguez-Navarro & Doehne, 1999; Ruiz-Agudo *et.al.*, 2007). Logo no processo de secagem, a mirabilita desidrata e cristaliza em thenardita. Estes cristais são os que ficam como evidencia do processo de cristalização de sais, embora os danos decorrentes do processo de

cristalização de sais sejam ocasionados durante a fase da mirabilita. No desenvolvimento dos quinze ciclos de cristalização, há alternância de cristalização de thenardita e mirabilita, com conseqüente aumento de volume cristalino conduzindo a novos processos de deterioração da rocha.

8.3.4 Efeito da cristalização de sais nas propriedades hídricas

Nos processos de cristalização de sais que acontecem de forma natural nas rochas de monumentos e prédios urbanos, a remoção dos sais por ação das precipitações não é completa, ficando sempre remanescentes na estrutura de poros. Estes poros vão ser enriquecidos de sais quando ocorre o desenvolvimento de novos processos de cristalização, afetando entre outras, as propriedades relacionadas com absorção capilar e a capacidade de evaporação da rocha. A relação entre o fluxo capilar e a capacidade de evaporação da rocha por sua vez, vai influenciar diretamente na formação de eflorescências e sub-eflorescências e na deterioração da rocha (Gauri & Bandyopdhay, 1999).

A avaliação da absorção capilar após o processo de cristalização salina é um processo muito difícil por vários fatores que incidem na ampla dispersão dos resultados:

- 1- Os corpos de prova não apresentam uma superfície homogênea como acontece nos correspondentes às rochas inalteradas, pois todos têm perdido massa durante o processo de cristalização de sais. Porém, foram escolhidos aqueles que apresentavam menos danos na superfície a colocar em contato com a água.
- 2- É muito difícil manter as condições do ensaio constantes, de tal forma que seja evitada a cristalização de mirabilita por diminuição da temperatura ou por aumento da umidade relativa e a destruição ocasionada pela cristalização deste tipo de sulfato. Os corpos de prova que apresentaram perdas de massa durante o processo foram retirados para evitar erros ainda maiores nas leituras.
- 3- Os resultados apresentam alta dispersão, devido aos diferentes estados de deterioração alcançada durante o ensaio. Estas diferenças de deterioração devem-se às diferenças existentes ainda nos corpos de prova das mesmas variedades de calcário, como antes foi explicado.

Porém, os resultados obtidos permitem avaliar o efeito dos sais na cinética de absorção capilar e o efeito no processo inverso, a evaporação. Os resultados da avaliação da absorção capilar e da cinética do processo de evaporação, para quatro corpos de prova tomados como referência, de cada um dos quatro tipos de calcários pesquisados, indicam que há mudanças nessas propriedades hídricas das rochas.

Com relação à absorção por capilaridade (Tab. 23, Anexo B2), o processo de preenchimento de poros por sais nos calcários RV e RD é menor do que a geração de novos poros e fissuras durante o processo de cristalização, ocasionando aumento do valor do coeficiente de absorção

capilar. Nos calcários RVT e RB, observa-se aparente diminuição do coeficiente de absorção capilar, devido ao maior preenchimento dos poros durante o processo de cristalização. As duas situações são efeitos esperados e devidos aos ciclos de hidratação e desidratação, com alternância de cristalização de mirabilita-thenardita, acompanhada de aumento do volume de poros. O alargamento dos já existentes e o preenchimento por cristais de sais em muitos deles, afetam desta forma as propriedades hídricas das rochas. As mudanças na absorção capilar facilitam assim os processos de deterioração (Del Monte, 2006).

TABELA 23. Mudanças na absorção capilar devidos à presença de sais nos calcários da Formação La Tampa

Corpos de prova*		RV	RVA	RVT	RVTA	RB	RBA	RD	RDA
		$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$
1	$C = (m_i - m_0) / A^2 \times t_i^{1/2}$	3,26	4,10	4,01	2,87	8,85	4,51	14,56	12,92
2		3,45	4,19	3,46	3,77	9,92	7,74	12,42	17,38
3		3,56	4,19	3,68	2,32	10,41	5,18	15,19	17,89
4		3,28	4,14	3,83	3,63	10,42	-----	17,29	15,46
Média		3,39	4,16	3,75	3,15	9,9	5,81	14,87	15,91
Variância (σ^2)		0,015	0,0016	0,041	0,4624	0,41	2,89	3,01	5,07
Desvio Padrão (σ^2) ^{1/2}		0,12	0,04	0,20	0,68	0,64	1,70	1,74	2,25

RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

A Fig. 100 apresenta a evolução da absorção por capilaridade de cada uma das variedades dos calcários da Fm. La Tampa após o processo de cristalização de sais e com retirada parcial dos sais por processos de lavagem. No calcário RV (Fig. 100A) observa-se aumento da absorção capilar nos quatro corpos de prova submetidos aos quinze ciclos de cristalização de sais, confirmando que novos poros foram gerados neste processo, o que permite o aumento da capacidade de absorção por capilaridade.

O calcário RVT (Fig. 100B) apresenta diminuição aparente da absorção capilar, efeito esperado devido ao maior raio de poro que caracteriza a rocha inalterada, facilitando a entrada, circulação e cristalização dos sais no interior da rocha. A diminuição da absorção capilar está relacionada justamente com a cristalização de sais na estrutura de poros, sendo necessário um tempo maior para os corpos de prova alcançar o estado de saturação (área horizontal da curva) com relação à rocha não alterada.

No caso do calcário RB (Fig. 100C), o processo de absorção capilar nos corpos de prova alterados é menos caótico que na rocha inalterada, sendo possível observar a estabilização da curva, quando acontece a saturação do corpo de prova, o que não é comum na rocha inalterada. Porém, é observada a diminuição da capacidade de absorção capilar da rocha por efeito do preenchimento dos poros por cristais de sais.

O calcário RD (Fig. 100D) apresenta como características a maior velocidade de ascensão capilar no começo do processo e a rápida estabilização da curva para todos os corpos de prova correspondentes à rocha alterada, especialmente no corpo de prova 2. Porém, o coeficiente de absorção capilar é menor que na rocha inalterada, corroborando a cristalização de sais no interior da mesma.

Na avaliação da cinética do processo de evaporação, foram consideradas as observações sobre conteúdo de água residual (Wt) e sobre o grau de saturação (S) durante o período de secagem que não esteve acompanhado de perda de massa por formação de eflorescências. Foram verificadas também mudanças em relação à cinética do processo de evaporação após o ensaio de cristalização de sais, sendo a observação mais notória, a diminuição da velocidade da evaporação nos corpos de prova submetidos aos ciclos de cristalização de sais, em relação aos corpos de prova dos calcários inalterados.

A solução salina presente no interior do sistema poroso migra para a superfície e cristaliza, bem no interior (sub-eflorescências) ou no exterior (eflorescências) de acordo com a relação entre fluxo capilar e evaporação. O processo de cristalização vai acompanhado da destruição da superfície do corpo de prova por processos de arenização, conforme verificado no calcário RD e por processos de lascagem nos calcários RV, RVT e RB. Os menores valores do conteúdo de água residual (Wt) e a saturação (S) em relação às rochas inalteradas (Fig. 101) são aparentes e estão diretamente relacionados à menor saturação alcançada pela rocha durante o processo de ascensão capilar devida à obstrução do fluxo pela cristalização de sais, que impede o processo de saturação.

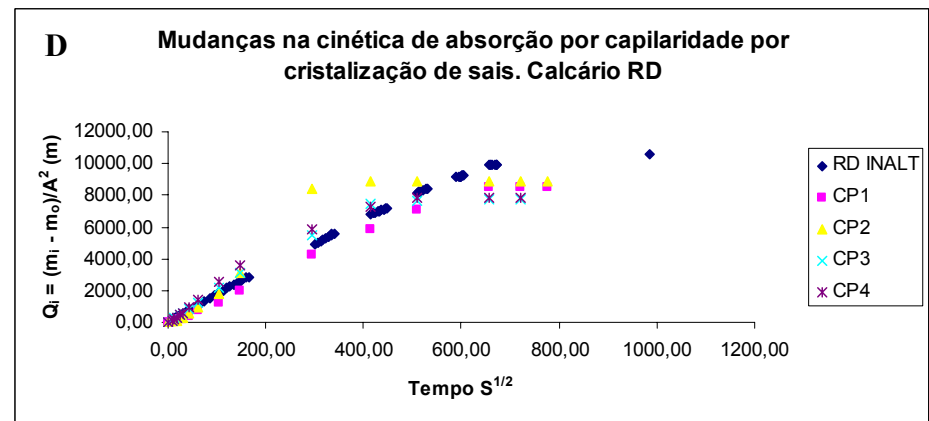
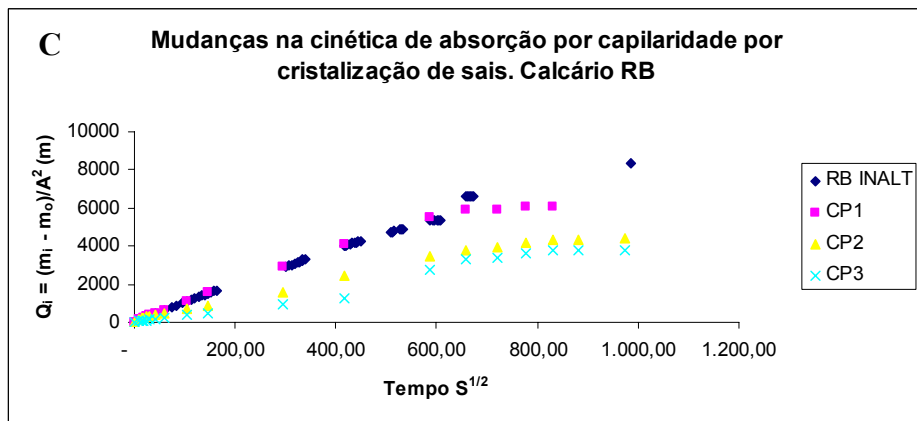
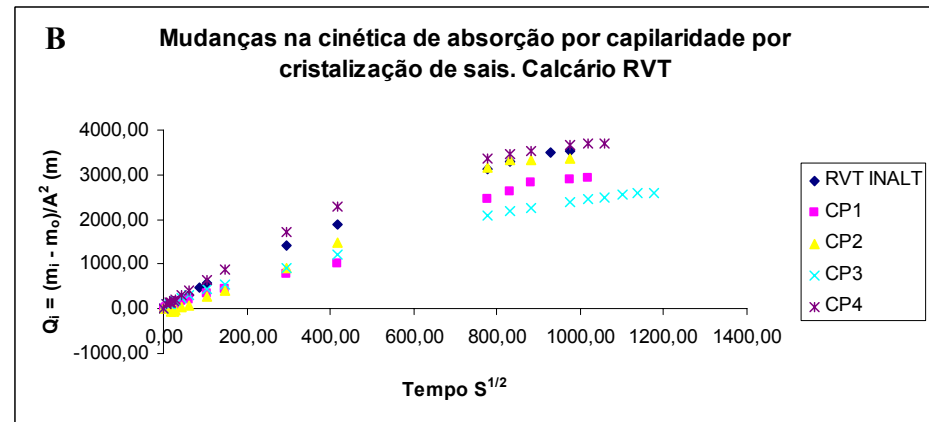
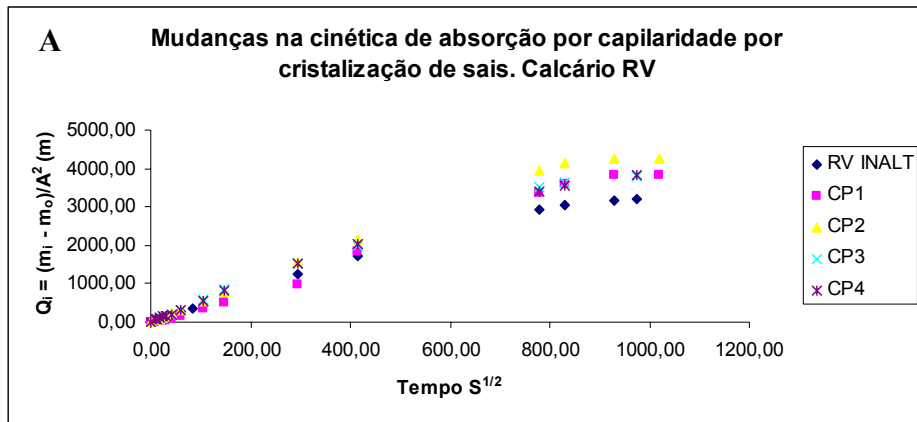


FIGURA 100. Absorção por capilaridade para os calcários ornamentais da Formação La Tampa após o ensaio de cristalização de sais.

O calcário RV é o único que não apresenta diferenças significativas no conteúdo de água residual (W_t) na rocha alterada (Fig. 101A) e apresenta maior grau de saturação após uma hora de evaporação (Fig. 101B), quando comparado com a rocha inalterada. Este comportamento está relacionado diretamente com o aumento da capacidade de absorção por capilaridade após o processo de cristalização de sais pelo predomínio da formação de novos poros e fissuras sobre o preenchimento dos poros pelos sais cristalizados.

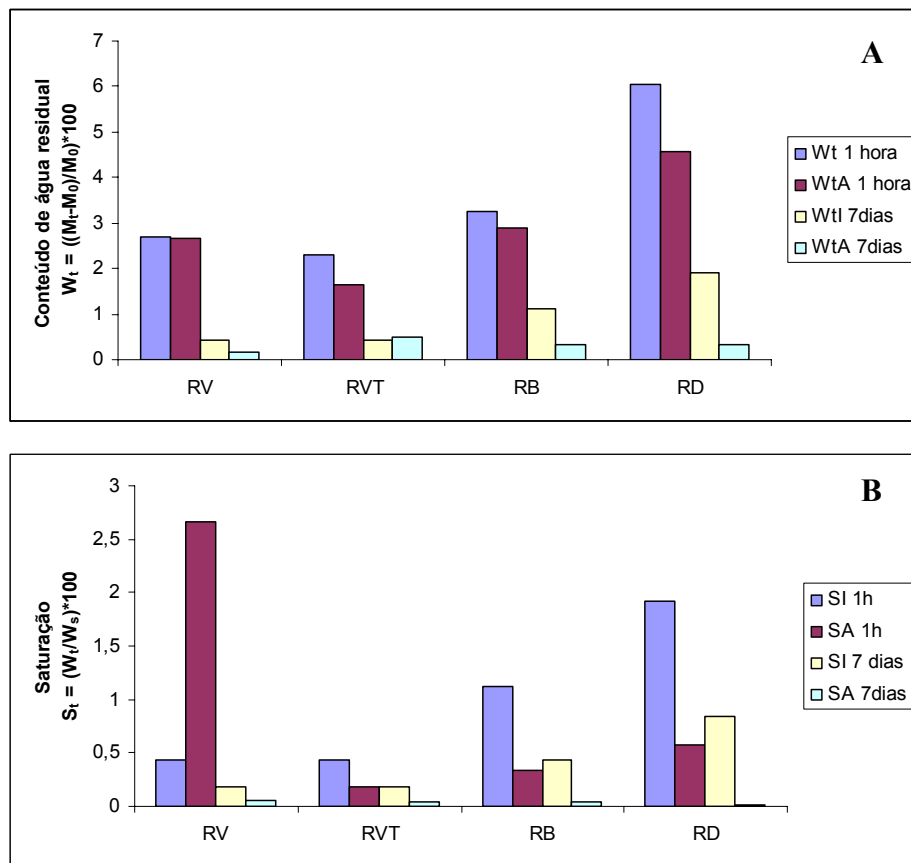


FIGURA 101. Mudanças no conteúdo de água residual (W_t) e o grau de saturação (S_t) para o calcário RV após o ensaio de cristalização de sais.

A Tab. 24 apresenta os dados de W_t e S_t após o ensaio de cristalização de sais, considerando unicamente os corpos de prova que não apresentaram perda de massa antes de sete dias de secagem.

TABELA 24. Características de evaporação após o ensaio de cristalização de sais dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. (W_t): conteúdo de água residual; (S_t): grau de saturação. Os resultados referem-se à média dos valores medidos.

Variedade*	Conteúdo de água residual ($W_t = Q_i$)		Grau de saturação S_t	
	1 hora	7 dias	1 hora	7 dias
RVA	2,66	0,15	0,64	0,05
RVTA	1,63	0,49	0,18	0,04
RBA	2,90	0,32	0,33	0,04
RDA	4,57	0,32	0,57	0,02

*RVA: Royal Verde alterado; RVTA: Royal Veta alterado; RBA: Royal Bronze alterado; RDA: Royal Dorado alterado.

Embora os processos de absorção por capilaridade e de evaporação sejam menores do que nas rochas inalteradas, o tempo necessário para a secagem dos corpos de prova das rochas submetidas ao ensaio de cristalização de sais é muito maior justamente pela natureza hidrofílica dos cristais de sulfato de sódio. Assim, por exemplo, enquanto que o processo de secagem do calcário RV inalterado gasta em média 264 horas, nos corpos de prova da rocha alterada (CP1-CP4), esse processo é muito mais lento, necessitando até 600 horas para secagem (Fig. 102A). Nos calcários RVT, RV e especialmente no calcário RD, o processo de evaporação começa muito mais rapidamente do que nos equivalentes inalterados, mas é acompanhado com grande perda de massa (representada pelos valores negativos de Q_i) a partir das 144 horas de evaporação, sendo continua esta perda até o final do processo de secagem, que acontece após 800 horas (Fig. 102B).

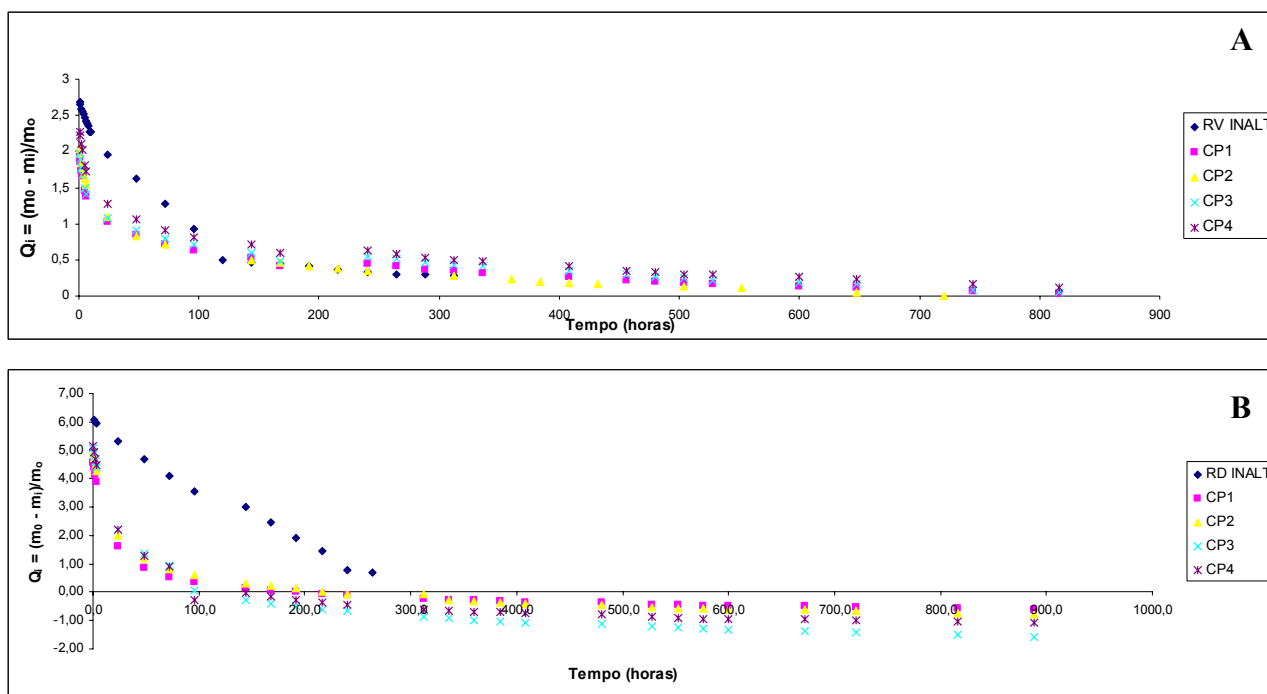


Figura 102. Curvas de evaporação para os calcários Royal verde (RV) e Royal Dorado (RD) após o ensaio de cristalização de sais.

8.3.5 Efeitos da cristalização salina na resistência aos esforços compressivos

As quatro variedades de calcários ornamentais da Fm. La Tampa (RV, RVT, RB e RD) apresentam diminuição da resistência aos esforços compressivos devido à cristalização de sais na estrutura de poros (Fig. 103) com diferenças na resistência à compressão entre as quatro variedades em função do grau de alteração. Nos calcários considerados “mais homogêneos” em função do grau de alteração (RV da FL 1) e das características de textura (RD da FL 2), é possível observar a queda progressiva da resistência face os esforços compressivos na medida em que aumenta o número de ciclos de cristalização de sais, sendo possível determinar uma tendência decrescente contínua em

função do número de ciclos (Fig 103A e 103D). Os calcários RVT e RB apresentam um comportamento diferente, caracterizado pelo aumento da resistência aos esforços compressivos durante os primeiros ciclos de cristalização de sais, seguido de queda brusca na resistência nos ciclos seguintes (Fig. 103B e 103C).

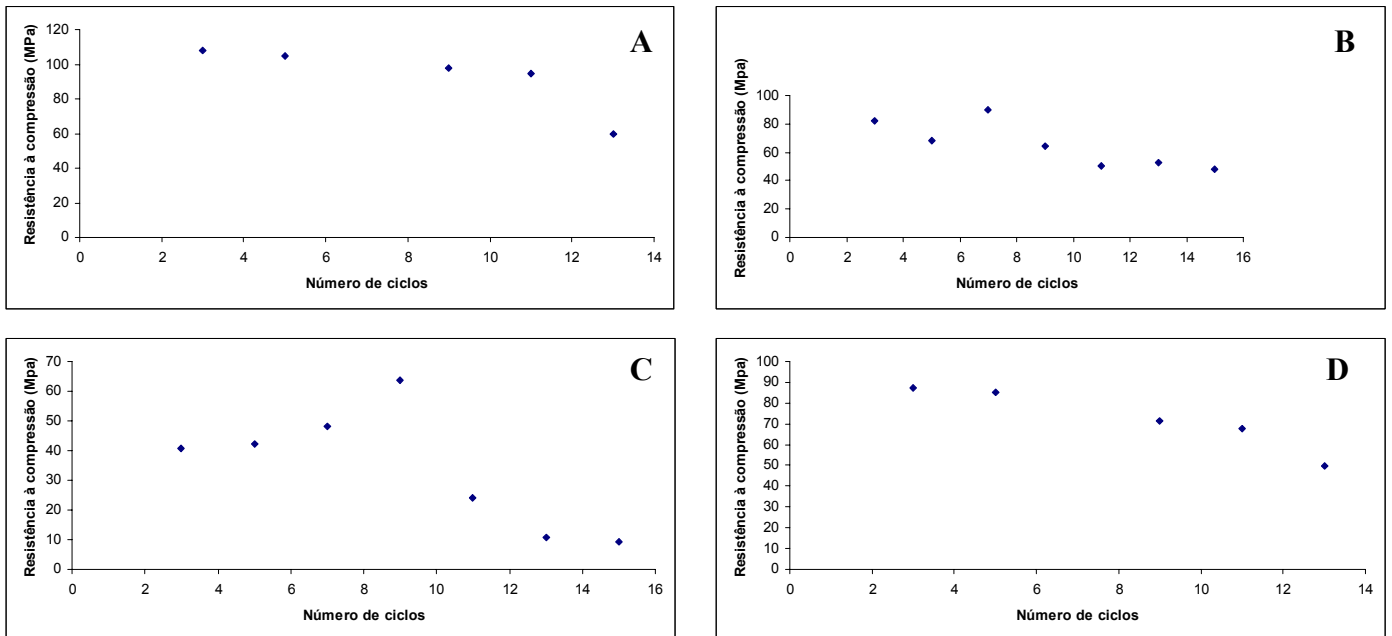


FIGURA 103. Avaliação da resistência aos esforços compressivos após diferente número de ciclos de cristalização de sais. (A) calcário RV; (B) calcário RVT; (C) calcário RB; (D) calcário RD.

O aumento aparente da resistência aos esforços compressivos durante os primeiros ciclos de cristalização nos calcários RVT e RB, está relacionado com a cristalização dos sais na estrutura de poros dos corpos de prova, ocasionando o fechamento dos espaços vazios, sem que a pressão de cristalização ainda seja suficiente para causar o enfraquecimento da rocha. A rocha adquire aparentemente maior compacidade, o que influi diretamente na resistência à compressão. Esse aumento da resistência aos esforços compressivos reflete o comportamento desses calcários (RVT e RD) durante o ensaio de cristalização de sais, com ganho contínuo de massa até determinado ciclo, a partir do qual, começa a perda de massa derivada do enfraquecimento das ligações intergranulares pela ação da cristalização de sais. No final dos quinze ciclos é evidente a perda de coesão e de resistência que caracteriza o processo de cristalização de sais nestas rochas.

Os valores da resistência aos esforços compressivos (Tab. 25 e Fig. 104) indicam que os calcários submetidos ao ensaio de cristalização de sais (RVA, RVTA, RBA e RDA) mantêm o mesmo comportamento em relação à resistência aos esforços compressivos das variedades não alteradas (RV, RVT, RB e RD). Assim, o calcário RV continua apresentando a maior resistência após o ensaio de cristalização de sais, seguido do calcário RVT, cuja resistência depende do grau de

alteração do corpo de prova. O calcário RB apresenta a menor resistência aos esforços compressivos das quatro variedades pesquisadas, apresentando uma perda brusca a partir do décimo primeiro ciclo de cristalização de sais. O calcário RD apresenta perda contínua da resistência aos esforços compressivos, mas em menor grau que o calcário RB.

TABELA 25. Evolução da resistência aos esforços compressivos avaliados após diferentes ciclos do ensaio de cristalização de sais.

Número de ciclos	Resistência à compressão (Mpa)			
	Royal Verde (RV)	Royal Veta (RVT)	Royal Bronze (RB)	Royal Dorado (RD)
3	108,04	82,06	40,82	87,27
5	104,54	67,85	42,36	85,08
7	-----	90,10	48,09	-----
9	97,49	64,12	63,54	71,36
11	94,40	50,61	24,21	67,70
13	59,77	52,59	10,69	49,71
15	-----	47,98	9,16	-----

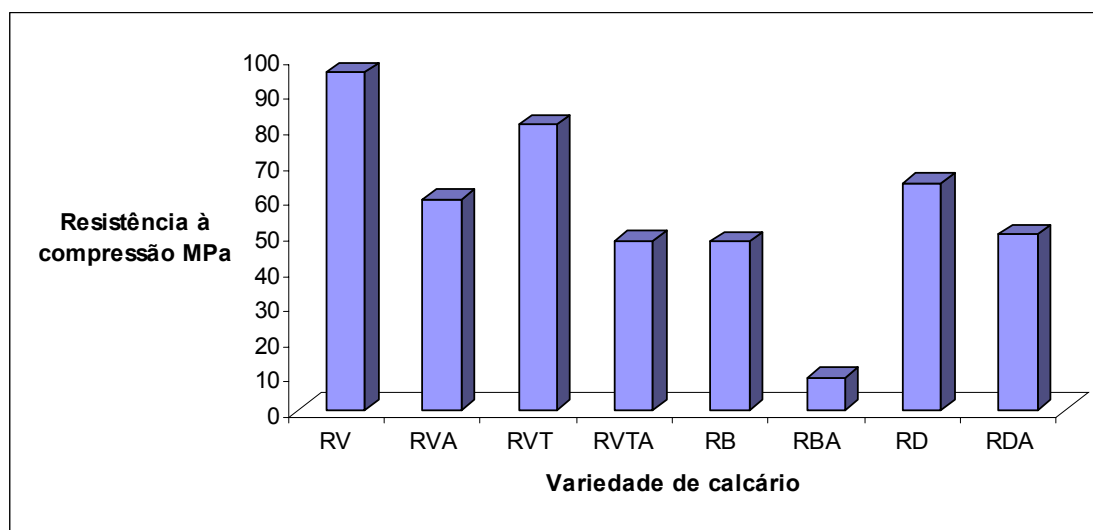


FIGURA 104. Comparação da resistência aos esforços compressivos das rochas inalteradas e após os quinze ciclos do ensaio de cristalização de sais.

8.3.6 Mudanças na resistência ao desgaste abrasivo Amsler

Os resultados do ensaio de desgaste abrasivo Amsler indicam uma relação direta entre o desgaste e o grau de alteração da rocha. Todos os calcários após o ensaio de cristalização de sais (RVA, RVTA, RBA e RDA) apresentam acréscimo do desgaste face aos seus equivalentes não alterados (Tab. 26).

TABELA 26. Resistência à abrasão dos calcários ornamentais da Formação La Tampa

Tipo rochoso*	Desgaste percurso 500m	Desgaste percurso 1000m
RV	1,59mm	3,32mm
RVA	2,25mm	3,44mm
RVT	1,86mm	3,66mm
RVTA	2,58mm	3,89mm
RB	3,65mm	6,60mm
RBA	4,67mm	8,75mm
RD	3,87mm	7,61mm
RDA	4,25mm	7,97mm

*RV: Royal Verde; RVT: Royal Veta; RB: Royal Bronze; RD: Royal Dorado.

8.4 Ensaio de exposição aos vapores de SO₂ (Norma EN13919)

Após 21 dias de exposição aos vapores de ácido sulfuroso, como indicado na Norma EN13919, os corpos de prova dos calcários RV, RVT, RB e RD foram retirados para avaliação das mudanças relacionados com ganhos ou perdas de massa, das mudanças estéticas e das mudanças químicas, relacionadas com neoformações de minerais. O primeiro aspecto a ressaltar é que as mudanças acontecem com maior intensidade nas amostras expostas à solução de ácido de maior concentração (500ml de H₂SO₃ com concentração 6% em volume em 150ml de H₂O), sendo evidentes as mudanças de massa, as mudanças estéticas e a neoformação de minerais. As amostras condicionadas no recipiente com solução mais diluída (150ml de H₂SO₃ em 500ml de H₂O) apresentam mudanças de massa menores e não registram mudanças estéticas nem neoformação de minerais.

Durante o processo de exposição aos vapores de SO₂, todos os corpos de prova das quatro litologias, apresentam ganho de massa durante os 21 dias de exposição (Tab. 27), contrariando o esperado para a avaliação da alterabilidade destes calcários (perda de massa após os ciclos do ensaio). O ganho de massa $\Delta m(\%)$ acontece com maior intensidade nos corpos de prova expostos aos vapores da solução de ácido sulfuroso de maior concentração. Dentre as quatro variedades o calcário RD apresenta o maior ganho de massa (4,87% na solução A e 2,60% na solução B), seguido do calcário RB (2,49% e 1,41%) e logo dos calcários RV (2,20% e 1,71%) e RVT (2,20% e 1,41%).

TABELA 27. Variação da massa $\Delta m(\%)$ dos corpos de prova (CP) dos calcários RV, RVT, RB e RD após o ensaio de exposição aos vapores de ácido sulfuroso H_2SO_3 .

CP	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Δm (g)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Δm (g)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Δm (g)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Δm (g)	
			$\Delta m(\%)$			$\Delta m(\%)$			$\Delta m(\%)$			$\Delta m(\%)$	
	RV			RVT			RB			RD			
Sol. A	1	165,89	169,61	3,72	178,69	182,17	3,48	186,45	190,91	4,46	148,63	155,76	7,13
				2,24			1,95			2,39			4,80
	2	170,57	174,45	3,88	178,10	182,73	4,63	159,02	163,44	4,42	153,62	161,47	7,85
				2,27			2,60			2,78			5,11
Sol. B	3	167,17	170,68	3,51	180,74	184,85	3,71	180,80	184,97	4,17	154,73	161,99	7,26
				2,10			2,05			2,31			4,69
		Média %		2,20	Média %		2,20	Média %		2,49	Média %		4,87
	4	183,54	186,75	3,21	164,06	166,86	2,80	160,22	162,82	2,60	148,34	152,64	4,30
			1,75			1,71			1,62			2,90	
Sol. B	5	182,53	185,00	2,47	168,55	170,95	2,40	184,65	186,70	2,05	145,94	150,21	4,27
				1,35			1,43			1,11			2,93
	6	185,54	189,31	3,77	175,65	177,58	1,93	178,18	180,86	2,68	158,01	161,13	3,12
				2,03			1,10			1,50			1,97
	Média %		1,71	Média %		1,41	Média %		1,41	Média %		2,60	

Nas quatro variedades de calcários expostas aos vapores do SO_2 na solução de maior concentração, ocorrem mudanças discretas de coloração, com realce das tonalidades originais (Fig. 105). São evidentes os processos de remoção do ferro dos cristais de goethita no calcário RV, gerando manchas nas áreas alteradas dos ditos cristais (Fig. 105A). No calcário RVT as mudanças de cor são mais acentuadas nas áreas alteradas da rocha. A rocha que experimenta as maiores mudanças estéticas é o calcário RD, no qual são geradas crostas superficiais de cor preta disseminadas na superfície dos corpos de prova (Fig. 105B). Análises de difração de Raios-X realizadas sobre as crostas negras retiradas por raspagem do calcário RD (Fig. 106), confirmam a presença de gesso como material neoformado e produto da reação entre os vapores do ácido sulfuroso com a calcita constituinte deste calcário.

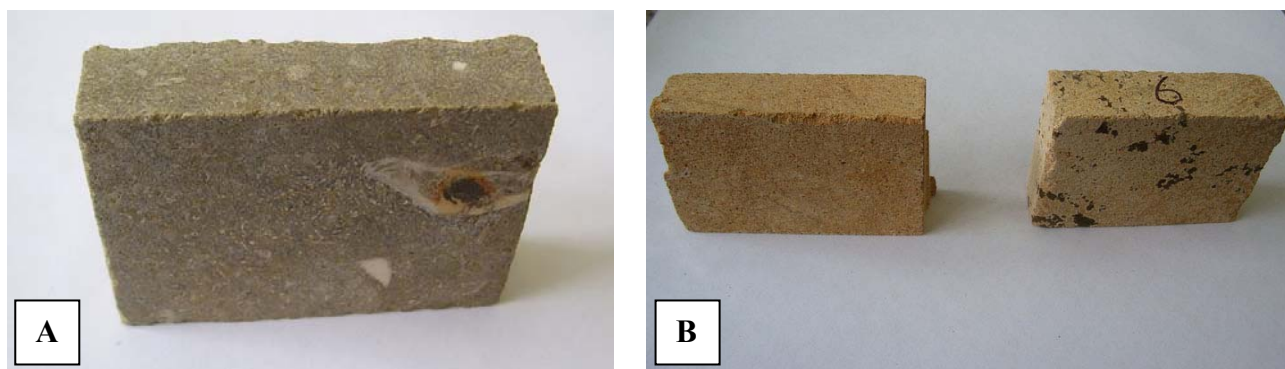


FIGURA 105. Mudanças nos corpos de prova após o ensaio de exposição aos vapores de SO_2 . (A) Manchas produzidas pela liberação de ferro dos cristais de goethita no calcário RV. (B) Formação de crostas negras de gesso no corpo de prova alterado do calcário RD (direita).

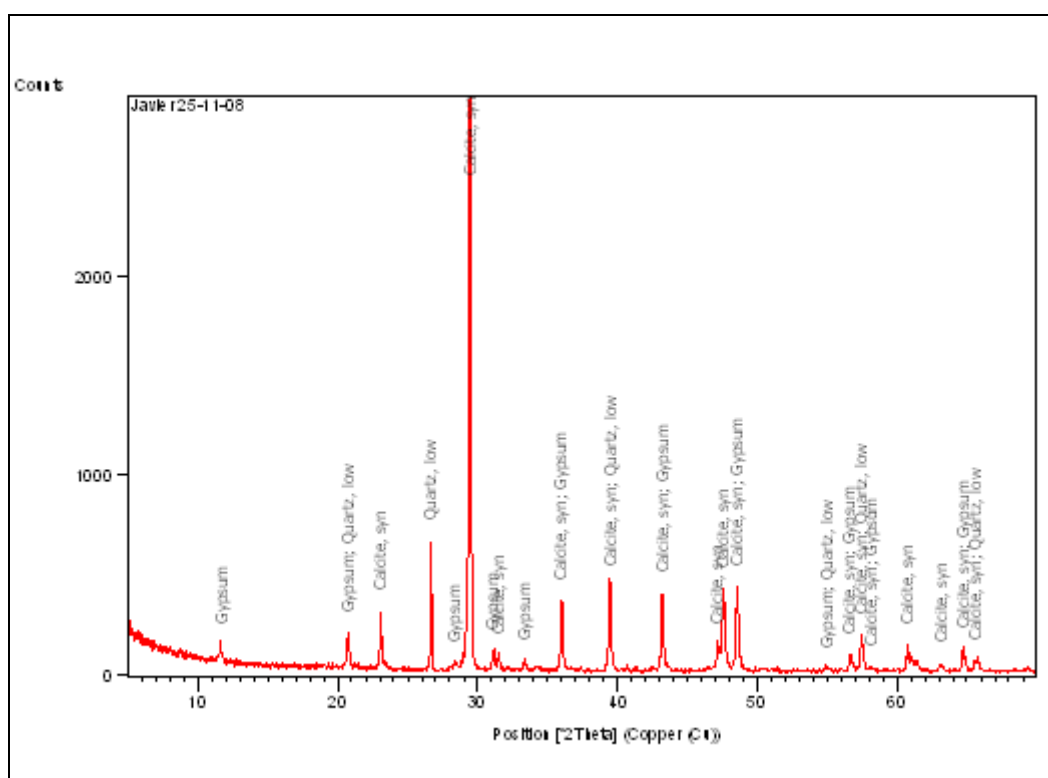


FIGURA 106. Difratoograma do material raspado nas crostas negras do calcário RD.

Existe uma relação direta entre a intensidade das mudanças acontecidas pela exposição aos vapores de SO_2 e a porosidade característica de cada uma das rochas pesquisadas. Assim, o calcário RD, o mais poroso das quatro variedades produzidas no processo de extração e beneficiamento, é também o que apresenta os maiores ganhos de massa (Δm), as mudanças estéticas mais acentuadas e a formação visível de crostas de gesso como produto da reação entre o ácido sulfuroso e a calcita. Nos calcários RV, RVT e RB, embora aconteça o ganho de massa, verificando por certo a ocorrência de reações na estrutura porosa da rocha, o tempo do ensaio não é o suficiente para visualizar a formação das crostas de gesso como acontece no calcário RD.

8.5 Ensaio de imersão parcial em soluções aciduladas

Através da execução deste ensaio, que é complementar aos ensaios de cristalização de sais e de exposição aos vapores de SO_2 , foi possível observar a formação de eflorescências salinas nos calcários expostos à ação de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 -1%).

Este ensaio permite verificar a potencialidade da deterioração resultante de processos como a cristalização de sais. A escolha do ácido sulfúrico é baseada nas observações que indicam que o SO_2 é um dos agentes poluentes mais importantes nos processos de degradação das rochas ornamentais, pela reação da substância com os minerais formadores da rocha, neste caso a calcita

dos calcários, resultando na formação de sais como o gesso, que facilitam os processos de degradação. Os mecanismos de degradação acontecem pela migração da solução por ação capilar, da zona imersa à zona seca e das bordas ao centro do corpo de prova. Os processos de cristalização acontecem por processos de supersaturação e evaporação, acompanhadas da formação de eflorescências ou sub-eflorescências (Frasca & Yamamoto, 2008).

8.5.1 Formação de eflorescências superficiais

Nos corpos de prova de todos os calcários é possível observar a cristalização de sais na superfície exposta, especialmente na borda dos corpos de prova, onde os cristais formados apresentam tonalidades e morfologias variadas (Fig. 107) sendo característicos os hábitos diferentes como acicular, reniforme e botroidal. Essa cristalização vem acompanhada de processos de deterioração, como arenização e lascagem. A cristalização de sais na superfície manifesta-se em todos os calcários pesquisados, mas com maior intensidade nos calcários mais porosos (RB e RD), que apresentam também a maior perda de massa devida à cristalização de sais na superfície da rocha.

8.5.2 Neoformação de minerais

Os resultados da análise da difração de Raios-X nas eflorescências formadas no processo (Fig. 108 – Fig 111) permitem determinar a neoformação de sais por reação do ácido sulfúrico sobre os minerais constituintes dos calcários. O processo predominante, que acontece em rochas carbonáticas (calcários e mármore) é a sulfatação (Del Monte *et.al.*, 1984), isto é, a transformação do carbonato de cálcio em gesso. Nos calcários pesquisados os sais formados são o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a anidrita (CaSO_4) e a thenardita (Na_2SO_4). O gesso e a anidrita são os sais mais frequentes como constituintes das eflorescências. A anidrita forma-se a partir da desidratação dos cristais de gesso por aumento da temperatura.

A presença de sódio na composição dos calcários pesquisados, mesmo aparecendo em baixa quantidade, permite a formação de cristais de thenardita, os quais aumentam a susceptibilidade aos processos de alteração dos calcários, devido à sua transformação em mirabilita com a expansão volumétrica característica, em condições apropriadas de umidade e temperatura (Del Monte & Rossi, 1997; Benavente *et.al.*, 2004; Angeli, 2007). Outro mineral que está relacionado à ação do ácido sulfúrico sobre a rocha calcário é a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) que aparece no difratograma do calcário RB. O quartzo, a goethita e a calcita determinados nos difratogramas de raios-X como material constituinte das eflorescências, procedem da desintegração da rocha na superfície por efeitos da cristalização.

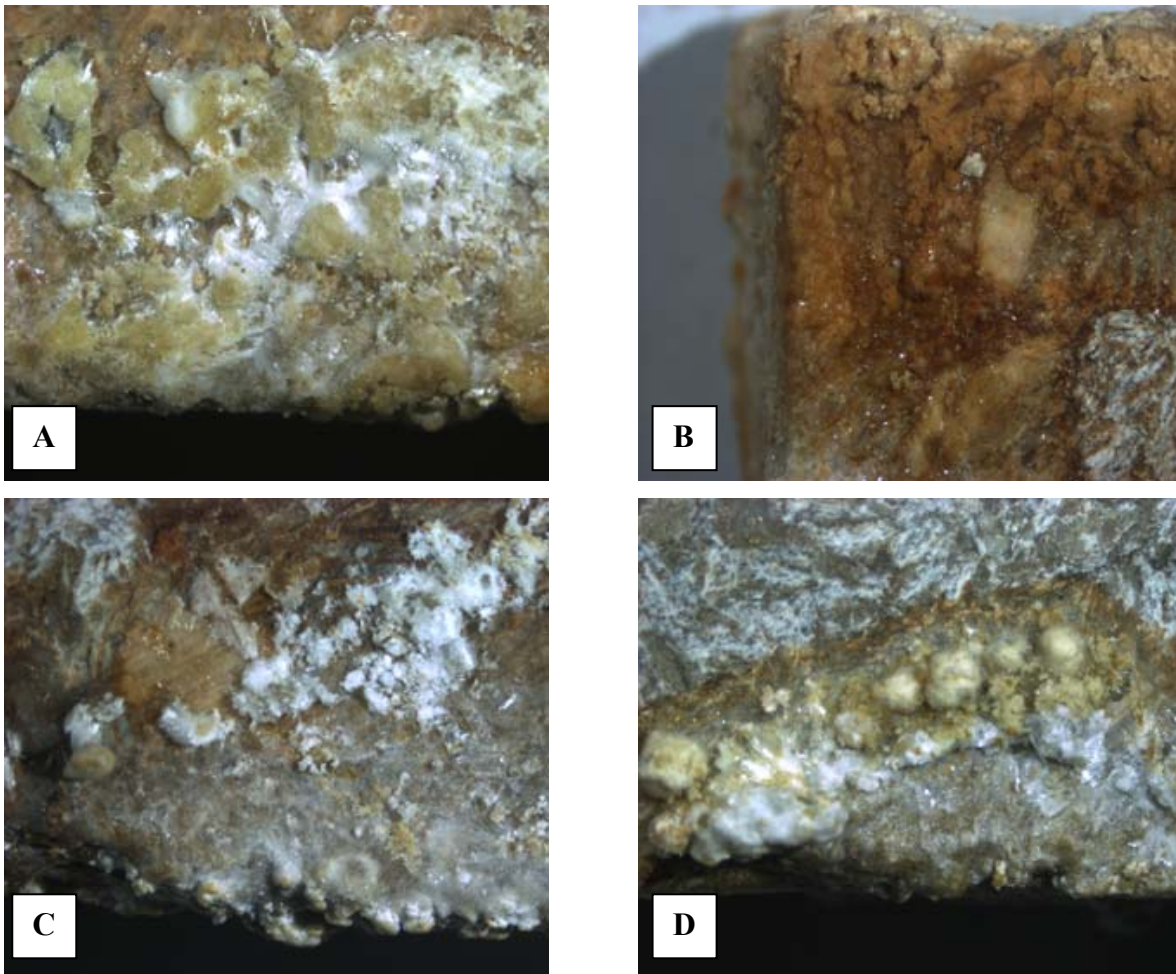


FIGURA 107. Formação de eflorescências no ensaio de imersão parcial em H_2SO_4 . O desenvolvimento é mais acentuado nas bordas com hábitos diferentes. (A) Reniforme calcário RB; (B) Botroidal, calcário RD. (C) acicular calcário RVT; (D) acicular e botroidal, calcário RVT

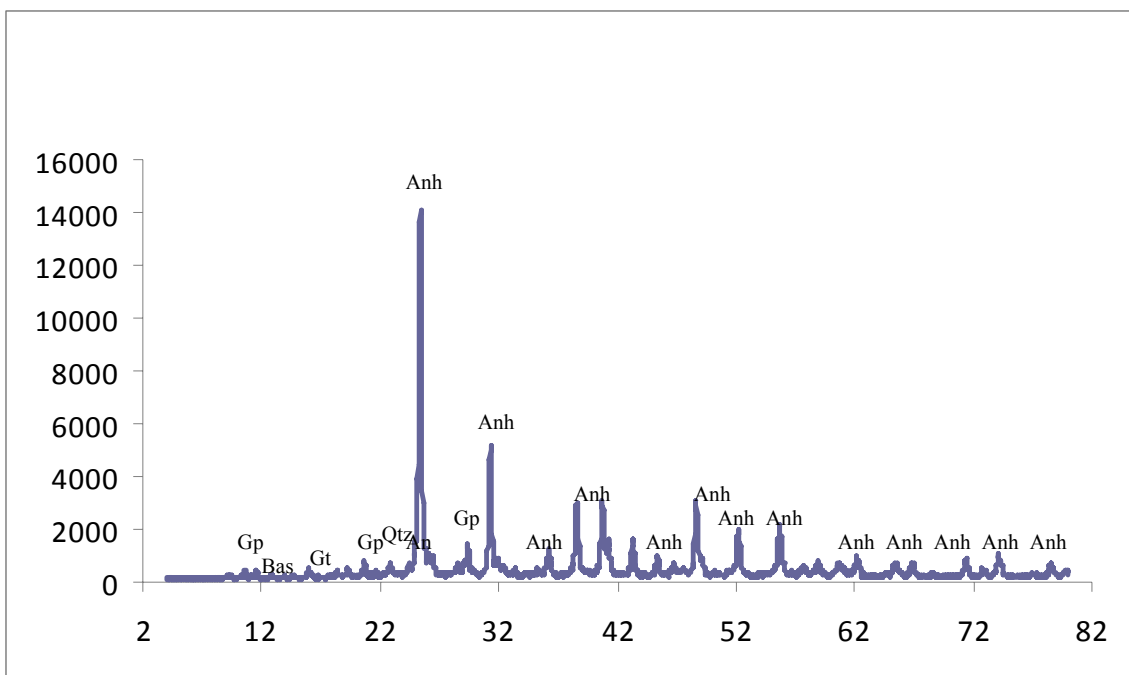


FIGURA 108. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RB por ação da solução acidulada de H_2SO_4 : anidrita (**Anh**), quartzo (**Qtz**), gesso (**Gp**), goethita (**Gt**), bassanita (**Bas**).

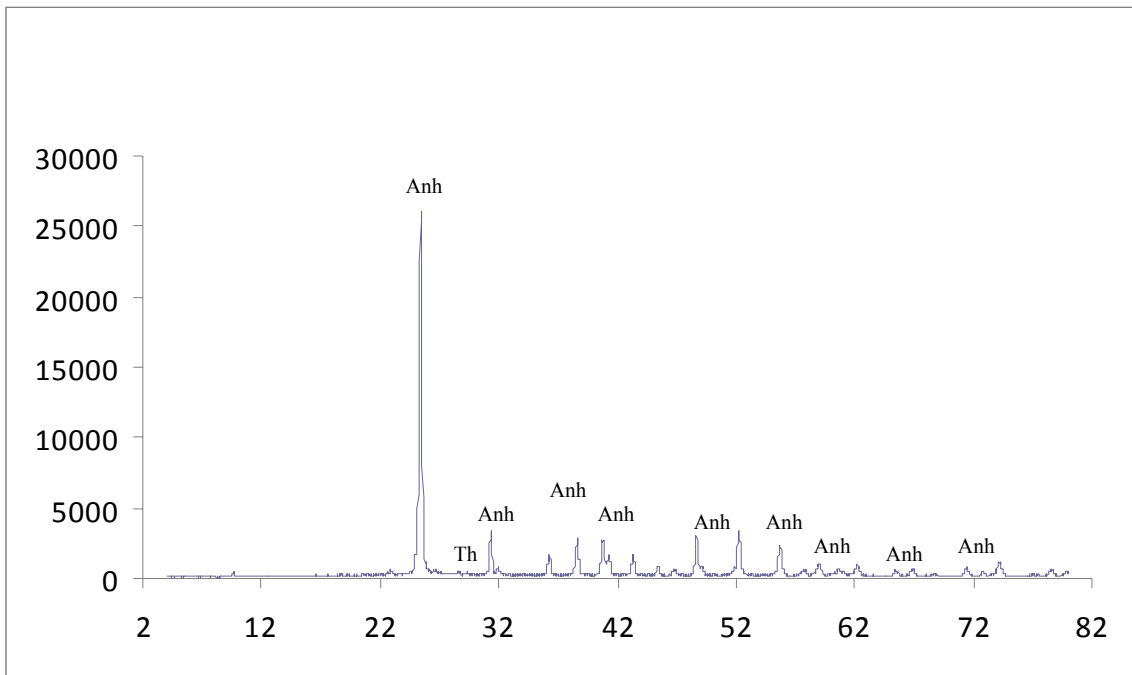


FIGURA 109. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RD por ação da solução acidulada de H_2SO_4 : anidrita (**Anh**), quartzo (**Qtz**), thenardita (**Th**).

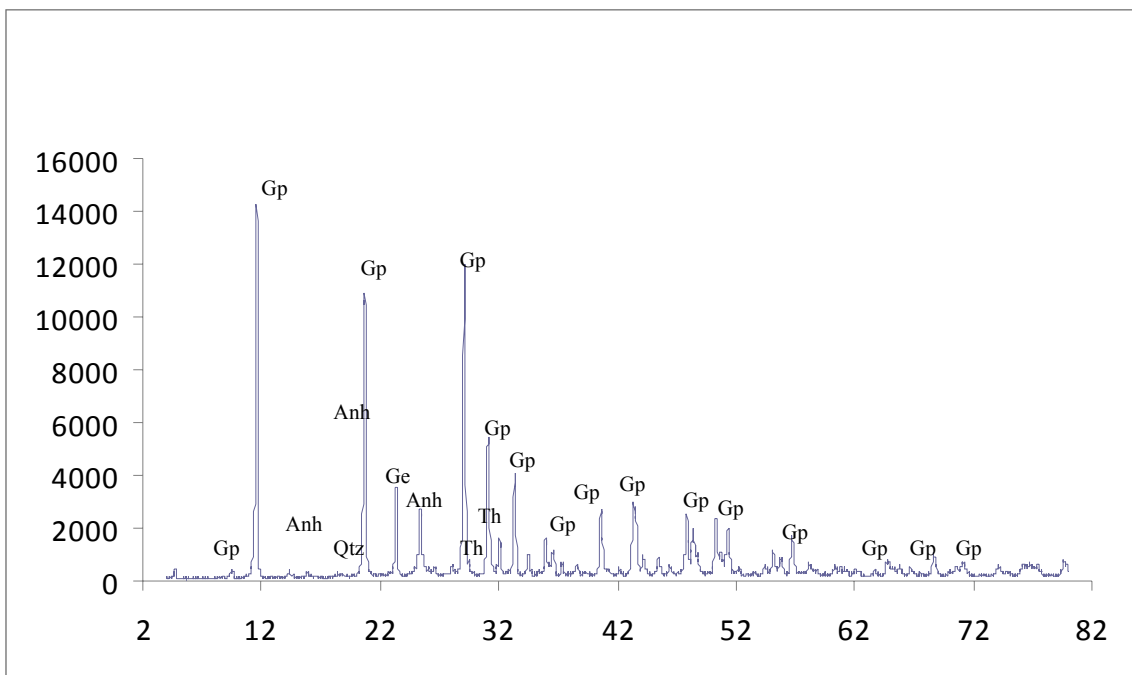


FIGURA 110. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RVT por ação da solução acidulada de H_2SO_4 : gesso (**Gp**), anidrita (**Anh**), quartzo (**Qtz**), , thenardita (**Th**).

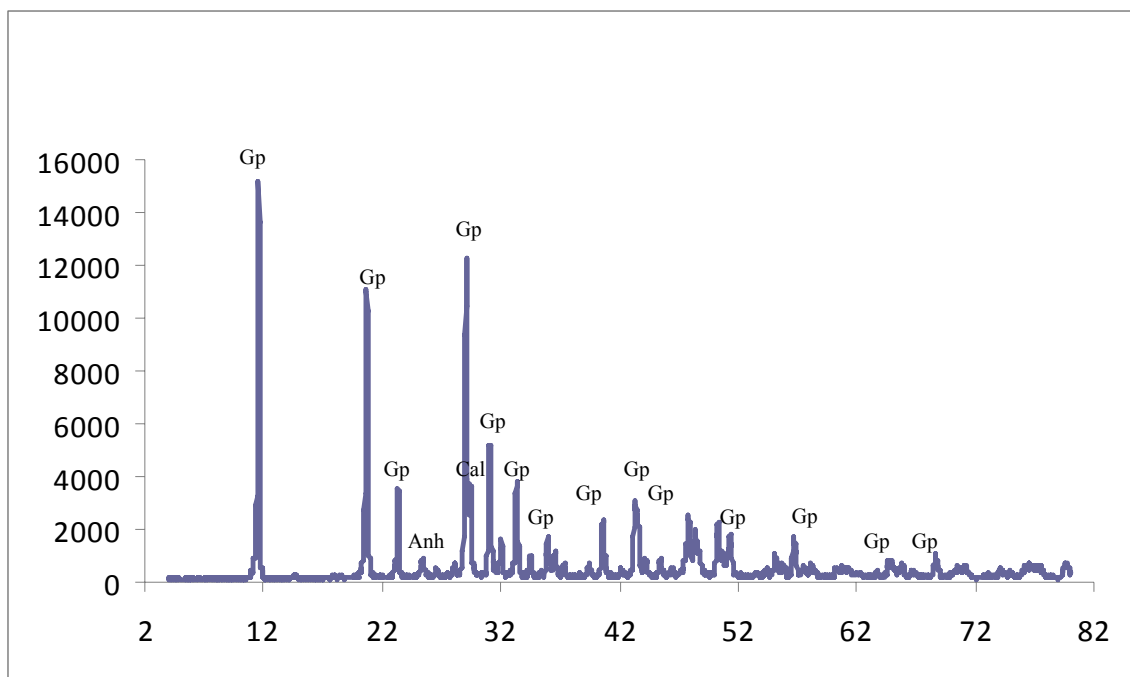


FIGURA 111. Difratoograma das eflorescências formadas no calcário RV por ação da solução acidulada de H_2SO_4 : gesso (**Gp**), anidrita (**Anh**), quartzo (**Qtz**), calcita (**Cal**).

8.5.3 Observações no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Na amostragem realizada das eflorescências salinas formadas durante o processo de exposição à solução acidulada de H_2SO_4 e das superfícies das rochas em contato com essas eflorescências, identificam-se várias formas cristalinas de minerais como gesso, thenardita e calcita (Fig. 112).

São identificados sulfatos na forma de cristais aciculares (Fig. 112A), cristais tabulares (Fig. 112B) e cristais com a típica morfologia conhecida como “rosa do deserto” (Fig. 112C). Análises complementares de EDS nos cristais, revelam a presença de cálcio e enxofre, com relação S/Ca (0,7-0,8) correspondente aos minerais anidrita ($CaSO_4$), bassanita ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) ou gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), os três já identificados via DRX. Observa-se também a corrosão da superfície dos cristais de calcita em contato com os cristais de gesso formados no processo de sulfatação ocasionada pela ação do H_2SO_4 (Fig. 112D).

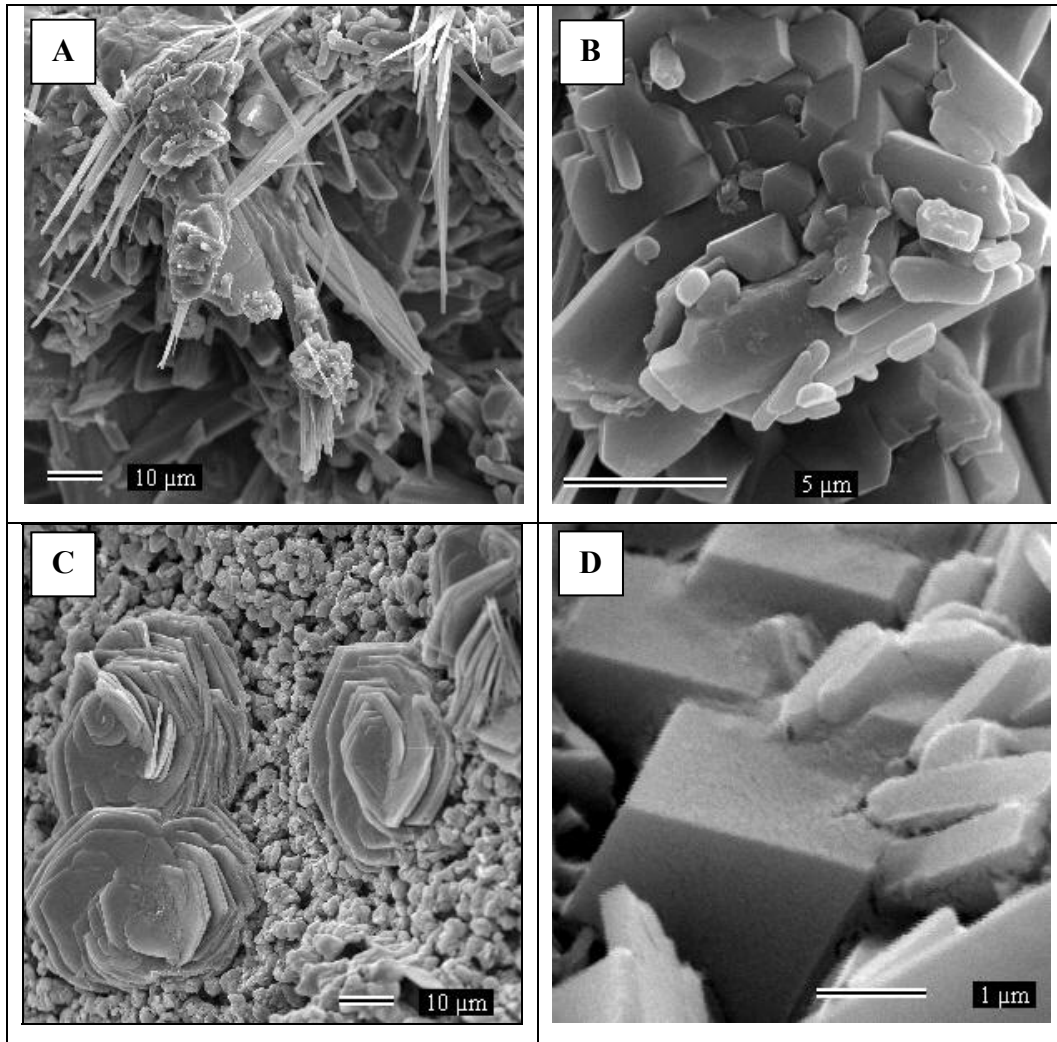


FIGURA 112. Imagens obtidas no MEV das eflorescências salinas formadas no ensaio de imersão parcial em solução acidulada de H_2SO_4 .

CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO USO DOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO LA TAMPA NA CIDADE DE MEDELLÍN

Os resultados dos ensaios de alteração acelerada realizados ao longo desta pesquisa permitem estabelecer considerações em relação à durabilidade em função da susceptibilidade aos processos de deterioração, dependentes das características dos calcários ornamentais da Formação La Tampa. Assim, são avaliados os resultados relacionados com a cinética da circulação de fluídos, da porosidade e do comportamento face o processo de cristalização de sais para estabelecer a durabilidade e conveniência de uso destes materiais nos diferentes ambientes de aplicação. Para isto são consideradas as observações e métodos de avaliação indicados por diversos autores que pesquisaram diferentes tipos de materiais pétreos e são comparados os seus resultados com os obtidos nesta pesquisa.

Pesquisas realizadas com outros materiais estabelecem como fator de durabilidade as propriedades do arranjo poroso, pois este determina a capacidade da rocha para conter sais solúveis (Angeli, 2007; Nicholson, 2001; Ordóñez *et. al.*, 1997). Assim, são importantes os fatores como porosidade, absorção, distribuição de entrada de poros, área superficial específica e a combinação de todos estes. Mod'd *et. al.*, (1996) consideram importante a relação entre porosidade e saturação como fator de deterioração; Ordóñez *et. al.*, (1997) consideram a quantificação da durabilidade de acordo com a distribuição de tamanhos de entrada de poro. Também é bem conhecido que a durabilidade depende grandemente da resistência mecânica (Theoulakis & Moropolou, 1997). Assim, estes parâmetros no conjunto têm sido utilizados para avaliar a durabilidade da rocha. Segundo Benavente *et.al.*, (2004) e Angeli (2007), o estabelecimento de todos os parâmetros mencionados devem ser levados em conta para estimativas, sejam qualitativas, sejam quantitativas, da durabilidade da rocha.

Deve-se considerar que a alterabilidade é também dependente das condições ambientais sob as quais as rochas são aplicadas, podendo dar lugar a diferentes tipos de danos (danos ocasionados por mudanças extremas de temperatura, pelas condições adversas do meio ambiente, pela cristalização de sais etc). Na avaliação de laboratório devem ser consideradas as condições experimentais (temperatura, umidade relativa, duração dos ciclos) e ainda a forma como os danos são avaliados (perda de peso ou densidade de fraturas depois de determinado tempo, observações *in-situ*). A interpretação deve considerar as mudanças acontecidas ao longo do ensaio total para ser mais exatas nas interpretações.

Nesta pesquisa foram estabelecidas as diferenças existentes entre as quatro variedades produzidas no processo de extração e beneficiamento dos calcários da Formação La Tampa, em

relação à porosidade e às propriedades hídricas, diretamente relacionadas com a porosidade, ou seja, a absorção capilar e a perda de água por evaporação. Determinou-se que a maior susceptibilidade aos processos deterioração em função dos maiores valores dos parâmetros avaliados são os das variedades Royal Bronze (RB) e Royal Dorado (RD).

Para efeitos de comparação das propriedades dos calcários da Formação La Tampa com outros materiais, são citados os resultados obtidos para outros materiais sedimentares (calcários e arenitos) identificados como: calcário de “Piedramuelle de grano grueso” (PM) (Alonso *et.al.*, 1999), arenito de La Marina (LM) (Ruiz de Argandoña *et.al.*, 2008), e os calcários Roche fine (FL), Roche Franche (RL) e Liais (LL) (Angeli, 2007). Os resultados (Tab. 28) mostram os valores de alguns ou todos os parâmetros considerados.

TABELA 28. Comparação de algumas propriedades dos calcários da Formação La Tampa com outros calcários usados como rochas ornamentais e de revestimento. Massa específica aparente ($\rho_{a,sec}$), porosidade Φ_a obtidos por MIP e índices físicos, coeficiente de absorção por capilaridade (C), coeficiente de evaporação (C_{ev}) e raio meio de acesso de poro (μm).

Nome da rocha	Φ_a (%) água	Φ_a (%) Hg	$\rho_{a,sec}$ (Kg/m ³) água	$\rho_{a,sec}$ (Kg/m ³) Hg	(C_{ev})	C	Raio meio de acesso de poro (μm)
PM	19,1	-----	2,16	-----	-----	2,1	0,13
LM	25,3	-----	-----	-----	-----	104,92	-----
FL	36,35	34,44	1,71	1,68	66,9	1106,10	12,00
RL	20,34	18,90	2,13	2,12	40,7	37,55	4,71
LL	14,16	14,87	2,30	2,27	26,7	32,25	0,44
RV	2,64	6,41	1,60	2,46	65,39	3,39	0,05
RVT	2,92	6,94	1,61	2,41	38,28	3,75	0,07
RB	5,56	10,89	1,63	3,61	11,17	9,90	0,13
RD	8,79	15,36	1,61	2,52	15,74	14,87	0,19

De acordo com os dados avaliados, é possível observar que os calcários da Formação La Tampa possuem valores menores em parâmetros importantes que definem a durabilidade dos calcários ornamentais. Assim, por exemplo, a porosidade de todas as variedades dos calcários da Formação La Tampa é menor que a porosidade de qualquer um dos outros materiais analisados. Também possuem os menores raios de acesso de poros e os menores coeficientes de absorção capilar. Todos estes aspectos implicariam tacitamente que os calcários da Formação La Tampa seriam menos susceptíveis aos processos de deterioração do que os outros materiais considerados.

Porém, devem ser consideradas as peculiaridades de cada uma das variedades dos calcários da Formação La Tampa. No caso do calcário RV, por exemplo, foi estabelecido que perante os processos de cristalização de sais, mesmo sem ser aquele que perde a maior fração de massa, apresenta danos severos decorrentes do pequeno raio de entrada de poro, o que facilita a destruição

das paredes dos poros quando acontece o processo de cristalização. Também foi estabelecido que nos calcários da Frente de Lavra 1 existe uma relação direta entre grau de alteração e susceptibilidade aos processos de deterioração dos materiais usados em acabamentos e que o calcário RD da FL 2 é o mais susceptível a todos os processos de deterioração, considerando tanto as perdas de massa nos diferentes ensaios, quanto a formação mais rápida e em destaque, das eflorescências salinas pela ação do ácido sulfúrico e das crostas de gesso na superfície pela exposição aos vapores do ácido sulfuroso. Este comportamento está diretamente relacionado com a maior porosidade deste calcário quando comparado com os outros três calcários da Formação La Tampa.

Pesquisas realizadas no Reino Unido sobre a durabilidade de calcários usados como rochas ornamentais face aos processos de cristalização de sais corroboram a relação direta entre porosidade e durabilidade, indicando o intervalo de porosidade entre 5% e 30% como o intervalo crítico de susceptibilidade aos processos de deterioração. Assim, considera-se que as rochas com porosidade menor que 5% possuem somente uma pequena quantidade de poros para a entrada e circulação da água, impedindo-a de ocasionar grandes danos na estrutura pelos processos de cristalização. Já nas rochas com porosidade maior de 30%, considera-se que a estrutura da rocha é aberta o suficiente para acomodar a expansão gerada tanto no processo de cristalização de sais, quanto nos processos de congelamento-degelo. No intervalo de porosidade entre 5 e 30% a durabilidade é afetada pelo tamanho e a distribuição de poros. As rochas com poros interconectados e de menores diâmetros apresentariam menor durabilidade que rochas com pouca quantidade de poros interconectados (Miglio *et.al.*, *apud* Hoigard, 2000).

A presença de mesoporosidade e microporosidade é considerada também pelos pesquisadores britânicos como um fator que facilita a deterioração. Assim, a presença de poros com diâmetro menor de 5 μ m (considerada como microporosidade, segundo os pesquisadores britânicos) influencia o ponto de congelamento da água e obstrui a passagem livre da água, podendo assim, interferir na durabilidade. Considera-se que quanto maior a microporosidade, menor vai ser a durabilidade (Hoigard, 2000). A macroporosidade age em sentido contrário. Segundo o mesmo autor, a durabilidade dos calcários aumenta com o aumento da macroporosidade.

Em relação à absorção por capilaridade, considera-se importante sua ação nos processos de deterioração influenciando a durabilidade. Estima-se que as rochas tendem a ser mais susceptíveis aos danos ocasionados pela ação do gelo, quando o coeficiente de saturação é superior a 0,80 (Miglio *et.al.*, 2000).

Relacionando os aspectos mencionados com os resultados obtidos na avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários da Formação La Tampa, podem ser feitas as seguintes considerações:

- a) Todos os calcários da Formação La Tampa apresentam coeficiente de absorção capilar superior ao valor de 0,80, tornando estes materiais susceptíveis aos processos de congelamento-degelo, em atendimento o postulado de Hirschwald (2000) *apud* Hoigart (2000). Esta susceptibilidade é maior nos calcários RB e RD por possuírem os maiores coeficientes de absorção capilar.
- b) Nos quatro calcários, a microporosidade é muito importante. Considerando que os resultados da porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) correspondem somente a microporos, as quatro variedades apresentam valores muito altos de microporosidade e os raios dos poros são pequenos o suficiente para ter grande incidência nos processos de deterioração, diminuindo a durabilidade das rochas.
- c) Os calcários RV e RVT seriam menos susceptíveis aos processos de deterioração e, portanto, apresentariam maior durabilidade, considerando que as suas porosidades são menores de 5% atendendo às considerações de Miglio *et.al.*, (2000). Não acontece o mesmo com os calcários RB e RD, os dois com porosidades compreendidas no intervalo crítico, entre 5-30%.

Em relação ao ensaio de cristalização de sais, a norma europeia EN12370 não determina a relação existente entre a perda de massa e a durabilidade. Segundo o método analítico do ensaio de cristalização de sais usado no Reino Unido (BRE 112, 1963) e que não tem diferença na sua execução com o ensaio realizado segundo a norma EN12370, os calcários são classificados de acordo com sua perda de massa para quinze ciclos de cristalização de sais, nas seguintes classes (Miglio *et.al.*, 2000):

- A:** calcários com perda de massa menor que 1%
- B:** calcários com perda de massa menor que 5%
- C:** calcários com perda de massa menor que 15%
- D:** calcários com perda de massa menor que 35%
- E:** calcários com perda de massa maior que 35%
- F:** calcários com desintegração total antes do final dos 15 ciclos.

Por sua vez, essa classificação determina quais são os usos das rochas mais convenientes (revestimentos internos ou externos) em diferentes ambientes urbanos (Tab. 29).

TABELA 29. Classes de calcários segundo a perda de massa no ensaio de cristalização de sais e usos relacionados em diferentes condições ambientais. Zona sem congelamento (NC); zona com congelamento (C); baixa poluição (BP); alta poluição (AP); pavimento (pav); escadas (esc); revestimento (rev). Modificada de Miglio et.al., (2000).

Classe	Perda massa (%)	Uso em interiores				Uso em exteriores ou ambientes costeiros			
		BP		AP		BP		AP	
		NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
A	<1	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev
B	<5	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	(Pav, esc, rev)*	(Pav, esc, rev)*
C	<15	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	Pav, esc, rev	(Pav, esc, rev)*	-	-	-
D	<35	rev	rev	rev	rev	-	-	-	-
E	>35	rev	rev	rev*	-	-	-	-	-
F	Desintegração	rev	rev	-	-	-	-	-	-

* Provavelmente limitada a uma vida média de cinquenta (50) anos.

No caso dos calcários ornamentais da Formação La Tampa, os calcários RV (perda média de massa de 0,54%) e RVT (perda média de massa de 0,78%) seriam passíveis de serem usados em qualquer ambiente externo ou interno nas diversas aplicações. O calcário RB (perda média de massa de 1,17%) poderia ser usado nos ambientes internos sem problemas, mas seu uso em ambientes externos é restrito, especialmente em ambientes altamente poluídos, onde a sua durabilidade poderia ser comprometida. O calcário RD (perda média de massa de 6,05%) pode ser usado sem problemas em ambientes internos, sem importar o grau de poluição urbana. Também pode ser considerado seu uso em ambientes externos com baixa poluição e sem oscilações térmicas muito elevadas. Mas não é recomendado seu uso em ambientes externos, mesmo que apresentem baixo grau de poluição se estiverem expostos a processos de congelamento degelo e, menos ainda, nos ambientes externos de alta poluição.

É importante assim mesmo avaliar a qualidade do ar no local de aplicação, o que vai definir a durabilidade das rochas expostas à ação do meio ambiente. As pesquisas realizadas mostram como a relação rocha-atmosfera nos processos de deterioração varia consideravelmente não somente entre regiões diferentes, mas também em curtas distâncias ainda nos mesmos cenários urbanos (Smith *et. al.*, 2004 *apud* Turkington 2005). Assim, a intensidade dos processos de deterioração pode ser diferente em regiões vizinhas de acordo com as condições ambientais específicas.

A cidade colombiana de Medellín, capital do departamento de Antioquia, encontra-se localizada no “Valle de Aburrá”, na Cordilheira Central dos Andes Colombianos. Sua população é superior a 3.000.000 de habitantes e é um dos maiores pólos de desenvolvimento da Colômbia, com forte atividade industrial nas áreas têxtil, mineração, automotiva e outras. A presença de substâncias contaminantes como SO₂, CO₂ e NO₂, além da forte concentração de material particulado, tem ocasionado a deterioração de prédios urbanos e se constitui em um fator incidente na alterabilidade das rochas calcárias usadas como revestimento de prédios de grande importância na arquitetura contemporânea da cidade (Fig. 113).



FIGURA 113. Uso dos calcários ornamentais da Formação La Tampa em Medellín. RVT como revestimento externo e piso (A) e como ornamento (B) no Parque de las luces; (C) uso dos calcários RV e RVT na escadaria do Centro administrativo La Alpujarra; D) uso do calcário RD como revestimento externo no Planetário Jesús Emilio Ramírez.

Para o monitoramento da qualidade do ar urbano, a “Red de calidad del aire en el Valle de Aburrá”- REDAIRE, efetua medições periódicas das partículas suspensas totais (PST), as partículas finas menores de $10\ \mu\text{m}$ (PM10) e o monitoramento da presença no ar dos contaminantes monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), óxido nítrico (NO_2) e ozônio. O monitoramento da cidade é feito em dezessete estações de controle localizadas ao longo do perímetro urbano da cidade de Medellín e em alguns municípios vizinhos.

A avaliação dos gases contaminantes do ar urbano é efetuada de forma continuada, contando-se com dados relacionados a períodos de tempo muito específicos. A Tab. 30 apresenta os dados da concentração do dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio (NO_2) avaliados em cinco estações localizadas em diferentes lugares da cidade, durante o período janeiro-maio de 2005 (REDAIRE, 2005).

Resultados do monitoramento do monóxido de carbono (CO) são apresentados na Tab. 31. Em geral, estes valores encontram-se abaixo dos valores máximos da norma colombiana para o monóxido de carbono (13.1ppm).

TABELA 30. Concentrações de Dióxido de enxofre (SO₂) e Óxidos de nitrogênio (NO₂) (µg/m³). Janeiro-maio 2005. Modificado de REDAIRE, 2005.

	AGUI*		ITAGUI		POLI**		UNAL***		UPB****	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
Média aritmética	10	33	10	44	8	56	9	47	8	44
Amostragens realizadas	21	21	20	20	20	20	21	21	21	21
Desvio médio	9	11	8	19	8	25	9	24	8	19
Valor máximo	23	60	25	82	23	112	26	90	22	81
Valor mínimo	1	17	1	5	0	9	1	5	0	15

*Edifício Miguel de Aguinaga (centro); **Politécnico colombiano Jaime Isaza Cadavid; ***Universidade Nacional de Colombia, Faculdade de Minas; ****Universidade Pontifícia Bolivariana.

TABELA 31. Concentrações de monóxido de carbono (partes por milhão). Fevereiro-abril 2005. Modificado de REDAIRE, 2005.

	Fevereiro			Março			Abril		
	AMVA*	AGUI**	GUAY***	AMVA*	AGUI**	GUAY***	AMVA*	AGUI**	GUAY***
Máximo	2,44	6,33	3,34	7,82	7,63	3,49	11,11	7,43	4,72
Média	0,75	3,96	0,85	0,73	3,03	1,18	1,14	3,38	1,18
Dados	80	69	351	743	730	744	716	221	720

*Edifício novo Centro La Alpujarra; ** Edifício Miguel de Aguinaga (centro); ***Guayabal Planta de tratamento San Fernando.

Já a Tab. 32 apresenta um resumo dos resultados das concentrações de partículas suspensas totais (PST) acumuladas durante os cinco primeiros meses do ano 2005. As concentrações de PST indicam que, nos arredores da Universidade Nacional (UNAL), o Politécnico (POLI) e o Edifício Miguel de Aguinaga (AGUI) apresentam-se as maiores concentrações de material particulado da área urbana da cidade.

TABELA 32. Resultados médios do monitoramento da qualidade do ar do material particulado em suspensão (PST) e PM10 (µg/m³ a condições de referência). Período janeiro-maio de 2005. Fonte REDAIRE, 2005.

Partículas suspensas totais PST															
	BARB	CALD	AGUI	COPA	ENVI	ESTR	GIL I	GUAI	ITAG	POLI	SABA	UDEA	UDEM	UNAL	UPB
Média	99	90	105	74	66	72	61	101	103	112	95	95	77	122	74
No dados	42	44	44	45	45	34	44	45	44	42	44	45	44	44	45
Desvio padrão	33	36	25	39	20	18	21	29	23	24	21	35	21	31	22
Máximo	208	194	170	223	117	117	133	198	176	162	146	197	129	213	144
Mínimo	38	32	60	38	36	32	43	57	52	66	48	55	46	43	42

Considerando que os calcários da Formação La Tampa são de recente utilização em Medellín e o desenvolvimento de patologias é incipiente, se faz necessária uma comparação das características da qualidade do ar desta cidade com outras cidades onde materiais semelhantes têm sido utilizados há mais tempo e os processos de deterioração estão mais desenvolvidos. Assim, a qualidade do ar em Medellín é comparada com a da cidade italiana de Veneza (Tab. 33). Os dados sobre qualidade

ambiental do ar da cidade de Veneza são tomados da Agência Nacional para a prevenção e proteção ambiental do Veneto (ARPAV).

Pode-se observar que não existem grandes diferenças na concentração média de elementos poluentes SO₂ e NO₂, entre Medellín e Veneza. A concentração média de CO e material particulado no ar são maiores em Medellín, o que traz como consequência uma alta susceptibilidade aos processos de deterioração por efeito tanto do CO, quanto da deposição seca, considerando a quantidade de elementos poluentes geralmente acarretados pelo material em suspensão.

TABELA 33. Comparação da qualidade do ar urbano da cidade de Medellín (Colômbia) com a cidade de Veneza (Itália).

Cidade	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (ppm)	Material particulado ppm	Período considerado	Fonte
Veneza	19,37	59,81	1,2	16,03	Janeiro-Maio 2005	ARPAV
Medellín	9	44,8	6,03	89,73	Janeiro-Maio 2005	REDAIRE
Média	*S= 0,89	S= 7,35	S =2,62	S = 17,35		

*S: desvio padrão

Os prédios com utilização dos calcários da Formação La Tampa, estão em zonas caracterizadas pelo alto tráfego automotriz e alta atividade industrial. As leituras das estações de monitoramento da qualidade do ar da REDAIRE indicam que nas vizinhanças destes prédios se encontram algumas das maiores concentrações de substâncias poluentes e material particulado da cidade (Tab. 34) aportando para uma maior susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários utilizados nas diversas aplicações nestes prédios.

TABELA 34. Registro de substâncias poluentes e material particulado nas vizinhanças de alguns prédios de utilização dos calcários da Formação La Tampa.

Prédio	Calcário utilizado	Tipo de uso	Estação de leitura	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	Material particulado ppm
Planetário Jesús Emilio Ramírez	RD	Revestimento externo, pisos, ornamentos.	UDEA*	-----	-----	-----	95
Centro de convenções	RV, RVT	Revestimento externo e interno, pisos, escadas	AGUI**	10	33	3,96	105
Parque de los pies descalzos	RV, RVT	Revestimento externo, pisos, ornamentos.					

*Universidade de Antioquia. **Edifício Miguel de Aguinaga.

Mesmo com as propriedades favoráveis dos calcários ornamentais da Formação La Tampa em relação à durabilidade e considerando a localização dos prédios onde estes materiais têm sido utilizados, torna-se importante realizar pesquisas para estabelecer estratégias de conservação que

permitam garantir uma longa vida a estes materiais antes que os processos de deterioração sejam intensificados.

CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nos processos de extração e beneficiamento dos calcários ornamentais da Formação La Tampa, realizado em duas frentes de lavra, são produzidas quatro variedades. Na Frente de Lavra 1, os materiais são caracterizados pela gama de tonalidades decorrentes da alteração intempérica ocasionada pela existência de poros e fissuras na rocha, resultando em três variedades conhecidas como Royal Verde (RV), Royal Veta (RVT) e Royal Bronze (RB). Na Frente de Lavra 2, é produzido o material conhecido com o nome de Royal Dorado (RD).

Foi verificado que a alterabilidade está condicionada a fatores como as composições química e mineralógica, a porosidade e a dinâmica de circulação de fluidos associada à porosidade. Os calcários RV, RVT e RB são calcários bioclásticos com a mesma composição mineralógica e química. O calcário RD apresenta diferenças texturais com relação aos calcários RV, RVT e RB, relacionadas com o tipo de bioclastos constituintes e à abundância de matriz micrítica. A goethita como mineral de alteração, identificada por análises de difração de Raios-X, marca as diferenças entre os calcários da Frente de Lavra 1. Foram identificadas por espectrometria de massa (ICP), pequenas quantidades de óxidos de sódio, potássio, alumínio e magnésio e traços de elementos como o bário. O conteúdo de ferro (Fe) apresenta uma correlação positiva com o grau de alteração dos calcários e se constitui como o elemento mais visível no desenvolvimento dos processos de alteração pela geração de manchas. Os sulfetos como pirita e arsenopirita, identificados por MEV-EDS, são a fonte primária do ferro nessas rochas. Pode-se concluir que, com base na composição química e mineralógica, todos apresentam semelhantes susceptibilidades aos processos de deterioração.

A porosidade (distribuição e o tamanho dos poros) é o parâmetro principal que determina a susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários da Formação La Tampa e apresenta uma relação direta com o grau de alteração intempérica. Assim, nos calcários da Frente de Lavra 1, o RV aparece como o menos poroso, o RVT com uma porosidade intermédia e o RB como o mais poroso. O calcário RD, da Frente de Lavra 2, apresenta a maior porosidade das quatro variedades, alcançando valores até 50% maiores do que a variedade RB, o mais alterado e mais poroso dos calcários da Frente de Lavra 1. Também apresenta os maiores raios de poro, segundo os resultados da porosimetria de intrusão de mercúrio. Os dois calcários mais porosos do conjunto, RB e RD, apresentam os maiores coeficientes de absorção de água, indicando assim a existência de alta conectividade entre os poros, o que facilita também os processos de deterioração. O calcário RD da FL 2 apresenta também a maior absorção capilar e a maior retenção de água no processo de evaporação, do conjunto todo, como indicado pelos valores do conteúdo de água

residual (W_t) e o grau de saturação (St), o que permite maior exposição da rocha aos fluidos circulantes que transportam substâncias capazes de gerar reações conducentes aos processos de deterioração. O calcário RB apresenta a maior absorção capilar e a cinética de evaporação mais lenta dos calcários da Frente de Lavra 1, sendo, portanto, o mais susceptível aos processos de degradação dentre os calcários produzidos nessa frente de lavra.

Não existem diferenças significativas no comportamento capilar e face aos processos de evaporação entre os calcários RV e RVT. No caso do calcário RV, o sistema de poros é caracterizado por apresentar o menor raio de acesso de poros. Esta característica, apesar da baixa porosidade do material, faz este material susceptível aos processos de degradação por processos capilares, especialmente se acontecerem processos de cristalização de sais no seu interior.

Os valores da resistência aos esforços compressivos e à resistência ao desgaste Amsler apresentam alta dispersão, decorrente da heterogeneidade dos calcários ornamentais da Formação La Tampa, mas é possível observar a relação inversa entre a resistência aos esforços compressivos e ao desgaste Amsler com a porosidade e o coeficiente de absorção de água.

Os ensaios de alteração acelerada confirmam a relação entre as características de grau de alteração da rocha, porosidade, e raios de acesso de poros com a susceptibilidade aos processos de deterioração. Na avaliação da resistência à cristalização de sais, em função da perda de massa durante o ensaio, pode se afirmar que o calcário RV é o mais resistente à ação dos sais solúveis em relação às outras três variedades, embora o pequeno tamanho dos poros seja um elemento facilitador para a degradação decorrente do processo de cristalização. O calcário RVT apresenta uma resistência variável, mas sempre menor que a obtida para o RV. O calcário RB apresenta a menor resistência dos calcários da Frente de Lavra 1. O calcário RD apresenta a menor resistência do conjunto dos calcários à ação da cristalização de sais, com perdas de massa muito superiores às dos calcários da FL 1.

São observados três processos característicos na cristalização de sais, em relação à distribuição de poros: i) a geração de novas famílias por efeito da pressão exercida pelos cristais de sulfato de sódio na fase da mirabilita, ii) o aumento do raio de acesso ou de entrada dos poros já existentes e iii) a obstrução da comunicação de muitos poros pelos cristais desenvolvidos no processo. Estes processos ocasionam mudanças nos índices físicos, com aumentos na massa específica seca aparente ($\rho_{a,sec}$), massa específica aparente saturada ($\rho_{a,sat}$), densidade esquelética (d_{skel}) e porosidade aparente (Φ_a), relacionados com a presença de sais presos no interior da estrutura de poros, que dificultam o acesso da água e levam, portanto ao aumento dos valores mencionados. O coeficiente de absorção de água (α_a) diminui nos calcários RV, RVT e RB, embora aumente a porosidade, indicando baixo grau de conexão entre os poros após o processo de cristalização de sais, justamente

pela presença desses sais impedindo a comunicação entre os poros e deixando isolada uma boa parte dos gerados no ensaio de cristalização.

A cristalização de sais na estrutura de poros dos calcários gerou o aumento (calcários RV e RD) ou a diminuição da absorção por capilaridade (calcários RVT e RB) e mudanças em relação à cinética do processo de evaporação, que é mais lento do que nas rochas inalteradas. Após a finalização dos ciclos do ensaio de cristalização, foi evidente no processo de evaporação, a continuação da deterioração, representada pela perda de massa devida à migração dos sais e a sua cristalização na superfície ou perto dela. Também ficou em evidência a natureza hidrofílica do sulfato de sódio que impediu a secagem dos corpos de prova, necessitando-se de muito mais tempo para atingir o estado seco, verificado quando se alcançou a massa constante. Os menores valores do conteúdo de água residual (Wt) e a saturação (S), quando comparados com os valores das rochas inalteradas, são aparentes, e indicam a menor saturação alcançada pela rocha durante o processo de ascensão capilar devida à obstrução do fluxo pela cristalização de sais que impede o processo de saturação.

As quatro variedades de calcários ornamentais da Fm. La Tampa (RV, RVT, RB e RD) apresentam diminuição da resistência aos esforços compressivos devido ao enfraquecimento das ligações intergranulares causada pela cristalização de sais na estrutura de poros.

As mudanças acontecidas nos ensaios de exposição aos vapores de SO₂, e de imersão parcial em soluções aciduladas, permitem verificar a susceptibilidade dos calcários da Formação La Tampa, especialmente do calcário RD, aos processos de deterioração pela ação de substâncias poluentes. Acontecem mudanças estéticas pela mobilização do ferro dos cristais de goethita no calcário RV, gerando manchas na superfície e crostas superficiais de tonalidade preta, disseminadas na superfície dos corpos de prova do calcário RD. Essas crostas são constituídas de gesso como produto da reação entre os vapores do ácido sulfuroso com a calcita constituinte deste calcário. Nas rochas se formam eflorescências, acompanhadas de processos de arenização e lascagem. Estes efeitos manifestam-se em todos os calcários pesquisados, mas com maior intensidade nos calcários mais porosos (RB e RD).

As eflorescências salinas formadas pela exposição dos calcários à solução acidulada de ácido sulfúrico são constituídas por sulfatos de cálcio, seja na variedade anidra (anidrita) ou nas fases hidratadas (bassanita e gesso) e de sulfato de sódio (thenardita), segundo os resultados da análise da difração de Raios-X. A composição química dessas eflorescências mostra a interação que ocorre entre os constituintes originais da rocha e as substâncias poluentes presentes no meio ambiente. Considerando a composição química dos calcários pesquisados, é possível a formação de outros sais diferentes, de magnésio, potássio, cálcio e sódio, em condições ambientais apropriadas e com o

tempo suficiente para estas reações acontecerem. Os sais formados durante os ensaios e os sais passíveis de serem formados, possuem coeficientes de expansão diferentes, capazes de causar a desintegração da rocha.

Os resultados dos ensaios de alteração acelerada permitem determinar que nas condições ambientais de Medellín, semelhantes às condições de outras grandes cidades, os calcários da Formação La Tampa, usados como revestimentos externos, revestimentos internos, pisos e degraus de escadas, são susceptíveis aos processos de deterioração. Embora as características de porosidade e dinâmica de circulação de fluidos sejam mais favoráveis do que outros calcários já pesquisados, os processos de deterioração vão acontecer e se faz necessária a adoção de medidas de proteção para os calcários já utilizados e de tratamentos industriais que permitam melhorar o desempenho destas rochas em obra e assim, aproveitar o valor estético que elas possuem.

Também é necessário reorientar o uso destes calcários, sendo que para aplicações em ambientes externos, devem ser usados aqueles que apresentam as melhores características em relação à resistência aos processos de deterioração, isto é, os calcários RV e RVT. Os calcários RB e RD devem ser usados preferivelmente em ambientes internos, garantindo assim a durabilidade e conservação destes materiais.

CAPÍTULO 11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES-BARROS, L. 2001. As rochas dos monumentos portugueses. Tipologias e patologias. Volumen 1. Lisboa. Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico. 590p.

ALONSO, F.J.; ORDAZ, L.; ROJO, A.; DIAZ-PACHE, F.; ESBERT, R.M. 1999. Caracterización petrofísica de La caliza de Piedramuelle (Oviedo, Astúrias). Revista Trabajos de geologia No 21. Oviedo. p.25-32.

ANGELI, M. 2007. Multiscale Study of Stone decay by salt crystallization in porous networks. Ph.D Tese. Université de Cergy-Pontoise. Département des Sciences de La Terre et Environment. Paris. 230p.

ARNOLD, A. 1982. Rising damp and saline minerals. Proceedings Fourth Intl. Congress on the Deterioration and Preservation of Stone objects. Louisville. Gauri, K.L and Gwinn, J. A. (Eds), p.21.

AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO – ARPAV. 2005. Rapporto dalla qualità dell'aria, gennaio-maggio. www.arpa.veneto.it.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. 1992. Materiais inorgânicos. Determinação do desgaste por abrasão. Norma NBR 12042. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. 1992. Rochas para revestimento. Determinação da resistência à compressão. Norma NBR12767. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 1992. Rochas para revestimento. Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Norma NBR 12766. 8p.

BARGOSSO, G.M.; FELLI, P.; GURRIERI, F. 2002. Pietra serena, materia della città. Edizioni Aida. Florença. 197p.

BATHURST, R.G. 1975. Carbonate sediments and their diagenesis. Developments in Sedimentology, 12. Elsevier, Amsterdam. 658p.

BECERRA BECERRA, J.E. 2004. “Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental: procedimentos analíticos para sua avaliação”. Dissertação de Mestrado em Geologia econômica e aplicada. IGC-UFMG. 117p.

BECK, K.; AL-MUKHTAR, M.; ROZEMBAUM, O.; RAUTUREAU, M. 2003. Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building materials in the Loire valley – France. Building and environment 38. p. 1151-1162.

BECK, K. 2006. Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d’altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat, Université d’Orléans. 226p.

BENAVENTE D.; GARCIA DEL CURA, MA.; FORT, R.; ORDÓÑEZ, S. 2004. Durability of porous building stones from pore structure and strength. Engineering Geology 74. p113-127.

BENAVENTE D. ; GARCIA DEL CURA, MA.; BERNABÉU A.; ORDOÑEZ, S. 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. Engineering Geology 59. p313-325.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). 1963. “The Selection of Portland Stone for Various Conditions of Severity of Exposure,”. BRE Report A112.

BRICKER, O.P. 1971. Carbonate cements. The Hons Hopkins Press. London. 376p.

DAVID, C.; DAROT, M.; JEANETTE, D. 1993. Pore Structures and transport properties of sandstone. Transport in porous media 11: 161-177.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 2000. Minerais constituintes das rochas. Uma introdução. 2ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 707p.

DEL MONTE, M. 2006. La durevolezza delle pietre messe in opera. Il Geologo dell'Emilia-Romagna, Bolletino Ufficiale d'Informazione dell'Ordine dei geologi Regione Emilia-Romagna. Anno VI, No 23. Bologna. p.7-32.

DEL MONTE, M.; ROSSI, P. 1997. Fog and gypsum crystals on building materials. Atmospheric Environment Vol. 31, No 11. London. p1637-1646.

DEL MONTE, C.; LANDUZZI, R.; LENAZ, R.; SABBIONI, C. 1984. Characterization of Individual Airborne Particles: an open problem. Mem. Soc. Geol. It. No 27. Bologna. p. 303-309.

DEL MONTE, C.; SABBIONI, C.; VITTORI, O. 1984. Urban Stone Sulphation and oil-fired carbonaceous particles. The Science of the Total Environment, 36. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. p 369-376.

DUNHAM, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1. p.108-121, Tulsa, Oklahoma.

DUQUE, H. 1990. El bloque Choco en el noroccidente Suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleogeográficas. Boletín Geológico Ingeominas, 31 (1). p. 49-71. Bogotá

DUQUE, H. 1984a. Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, Southwestern Caribbean border land. *In*: W.E. Bonini, R:B: Hargraves, and R Shagan (editors). The South American-Caribbean Plate boundary and regional tectonics. Geological Society of América Memoir 162. p. 303-316. Boulder

DUQUE, H. 1984b. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del Terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. Boletín Geológico Ingeominas 27 (2). p. 1-29. Bogotá.

DUQUE, H.; PAGE, W.; CUELLAR, J. 1983. General geology, geomorphology and neotectonics of northwestern Colombia. (Southwestern Caribbean borderland). 10th Caribbean Geological Conference. Field Trip C. Cartagena.

DUQUE, H. 1980. Geotectónica y evolución de la región noroccidental colombiana. Boletín Geológico Ingeominas, 23 (3). P. 4-37. Bogotá.

- DUQUE, H. 1979. Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. *In*: J.S. Watkins, L. Montadert y P.W. Dickerson (editors); Geological and Geophysical investigations of Continental Margins. American Association Petroleum Geologists. Memoir 29. p. 329-351. Tulsa.
- ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE - UNI. 1991. Misura della perdita per evaporazione dell'acqua assorbita dal materiale. Norma Normal 29/88. 9p.
- ESBERT, R.M.; ORDAZ, J.; SUÁREZ DEL RIO, L.M. 1980. La durabilidad de los materiales calcáreos como piedra monumental. Tomo Homenaje a José María Ríos, III. IGME, Madrid.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION - CEN. 2002. Natural Stone Test Methods. Determination of resistance to ageing by SO₂ action in the presence of humidity. Final Draft. Norma EN 13919. 7p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION - CEN. 1999. Natural Stone Test Methods. Determination of resistance to salt crystallization. Norma EN12370. 7p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION - CEN. 1999. Natural Stone Test Methods. Determination of water absorption coefficient by capillarity. Norma EN 1925. 7p.
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K.; LA BOUCHARDIERE, D. 2003. Weathering damage on Pharaonic sanstone monuments in Luxor – Egypt. *Building and Environment* 38. Aachen – Germany. p.1089-1103.
- FITZNER, B.; HEINRICHS,K.; LA BOUCHARDIERE, D. 2002. Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. *In* Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation, Strategies and Case Studies. Geological Society, London, Special Publications, 205, p. 217-239.
- FLATT, R.J. 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth* 242. p. 435-454.
- FLUGEL, E. 1982. Microfacies analysis of limestones. Springer-Verlag. Berlin. 663p.
- FOLK, R.L. 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Co. Austin, Texas.

FOLK, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestones types. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1. p.62-84, Tulsa, Oklahoma.

FOLK, R.L. 1959. Practical Petrographical classification of limestones. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, V.43, No.1. p.1-38, Tulsa-Oklahoma.

FOLK, R.L. 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. The Journal of Geology, V.62, No.4. p.344-359, Chicago – Illinois.

FRASCÁ, M. H.; YAMAMOTO, J.K. 2008. Efflorescence simulation on granite building stone. Proceedings of the 2nd International Congress of Dimension Stones. XXI Century challenges. Pacini Editore, Pisa. p. 345-348.

FRASCÁ, M. H. 2003. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 264p.

FRAZÃO, E.B. 2002. Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia, de Engenharia e Ambiental, ABGE. São Paulo. 132p.

FRIEDMAN, G.M.; ALI, S.A. 1981. Diagenesis of carbonate rocks. Cement-porosity relationships. S.E.M.P., Reprint series, 10. 295p.

GAURI, K.L & BANDYOPADHYAY, J.K. 1999. Carbonate Stone. Chemical Behavior, Durability and Conservation. University of Louisville. A Wiley-Interscience publication. 284p.

GENKINGER, S.; PUTNIS, A. 2007. Crystallization of sodium sulphate: supersaturation and metastable phases. Environmental geology, 52. p. 329-338.

GOOD RJ & MIKHAIL RS. 1981. The contact angle in Mercury intrusion porosimetry. Powder Technol 29, p53-62.

GOUDIE, A.S.; VILES, H. 1997. Salt weathering hazard. Chapter 4. Chichester : John Wiles & sons. p. 91-122.

GUERRERO HERNÁNDEZ, C.J. 2001. Rocas calizas: formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña. Revista Temas de ciencia y tecnología, Vol.5, No 14. p.3-14.

HAMMECKER C. 1993. Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en oeuvre. Ph.D. Thesis. University Louis Pasteur of Strasbourg, France.

HOIGARD, KURT. 2000. Dimension stone cladding: design, construction, evaluation and repair. ASTM Stock Number: STP1394. Chelsea. 184p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. 2001. Mapa Geológico del Departamento de Córdoba. Bogotá. 250p.

INGEOMINAS - ECOPETROL, 1994. Geología de superficie del área Sinú-San Jacinto Valle Inferior del Magdalena. Mapa geológico escala 1:250.000. Bogotá.

JEANETTE D. 1994. Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altération des roches des monuments, *Lapietre dei monumenti in ambiente fisico et culturale*, Centro universitario europeo per I beni culturali. Ravello. P.94-97.

JOUANY, C. 1981. Transfert d'eau par évaporation dans les milieux argileux. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier. Toulouse. France. 102p.

KOBAYASHI, S.; SAKAMOTO, T.; KARITANI, S. 1994. Effects of acid rain on granitic building stone. In: International Congress of the International Association of Engineering Geology, 7., 1994. Lisbon. *In.. Proceedings...* Rotterdam. V.5, p. 3651-3658.

KUMPCHELA, C.E.; HYLAND, M.C. 1992. Environmental science: living with the system of nature. 3.ed. New Jersey: Prentice-Hall.

LÓPEZ, J.C. et.al., 1996. Manual de Rocas Ornamentales. Madrid. Editora Entorno Gráfico, S.L. 695p.

MANGANELLI DEL FÀ, 2002. La porosità nei materiali lapidei naturali e artificiali. Supplemento al No 10 di *Fist Geoitália*. Modena. 35p.

MERTZ, JD. 1991. Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

MIGLIO, B.; RICHARDSON, D.; YATES, T.; WEST, D. 2000. Assessment of the durability of porous limestones: specification and interpretation of test data in U.K practice. Dimension Stone cladding. Design, construction, evaluation and repair. ASTM Stock Number: STP1394. Chelsea. 184p.

MODD BK.; HOWARTH, R.J.; BLAND, C.H. 1996. Rapid prediction of building research establishment limestones durability class from porosity and saturation. Quarterly journal of engineering geology 29. p. 285-297.

MOORE, C.H. 1989. Carbonate diagenesis and porosity. Developments in Sedimentology, 46. Elsevier Ed. 338p.

NICHOLSON, D.T. 2001. Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. Earth Surface Processes and Landforms, 26. p. 819-838.

NICHOLSON, D.T.; NICHOLSON, F.H. 2000. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. Earth surfaces processes and landforms, 25. p. 1295-1307.

ORDOÑEZ, S.; FORT, R. ; GARCIA DEL CURA, M.A. 1997. Pore size distribution and the durability of porous limestones. Quarterly journal of engineering geology 30. p. 221-230.

PEARSE, JF.; OLIVIER, TR.; NEWITT, DM. 1949. The mechanisms of drying of solids: I, the forces giving rise to movement of water in granular beds during drying. Trans Inst Chem Eng. London, 27, p1-8.

PONCE, M.B. 2003. Estudio de la acción biológica en el deterioro de la piedra. *In Anais.. IBEROEKA en Mármoles y Granitos. CETERM – Rio de Janeiro. P. 165-173.*

RAILSBACK, L.B. 1993. Contrasting styles of chemical compaction in the Upper Pennsylvanian Dennis Limestone in the Midcontinent Region, U.S.A. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63. p. 61-72.

RED DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE – REDAIRE. 2005. Calidad del aire en el valle de Aburrá, Enero-Mayo de 2005. Boletín 17. Medellín. p. 11-21.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E.; SEBASTIAN, R. 2000. How does sodium sulphate crystallize? Implications for the decay and testing of buildings materials. *Cement and concrete research* 30. p. 1527-1534.

RODRIGUEZ-NAVARRO.; DOEHNE, E. 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24. p. 191-209.

ROJAS, O. 1968. Geological transverses in the Chocó region. Informe técnico. Colombian Petroleum Company, COLPET. Gr-360. 68p. Bogotá.

ROSIGNOLI, R. 1994. Diagnosi del degrado su litotipi arenitici. *In.* Giornata di studio: Alterazione delle pietre naturali ed artificiali, diagnosi e sistemi di risanamento. Santo Antonino, Italia. 17p.

ROSSI MANARESI, R. 1996. Proceedings of the 2nd International Symposium on the Oxalate Films: Origin and Significance in the Conservation of Works of Art, eds. Realini M. and Toniolo L. Milan. p. 113-127

ROUSSET TOURNIER, B. 2001. Transferts par capillarité et évaporation dans les roches : roles des structures poreuses. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur. Strasbourg, France. 204p.

RUIZ-AGUDO, E. ; MEES, F. ; JACOBS, P. ; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. 2007. The role of saline properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental geology*, 52. p. 269-281.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G.; RODRÍGUEZ-REY, A.; CALLEJA, L.; SUÁREZ DEL RÍO, L.M.; CELORIO, C. 2008. Ensayo de capilaridad en areniscas monitorizado mediante tomografía

computerizada de rayos X. 2008. Estudio comparativo con métodos convencionales. *Materiales de Construcción*. Vol. 58. Enero-Junio. p. 289-290, 219-231.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G.; RODRÍGUEZ-REY, A.; CELORIO, C.; CALLEJA, L.; SUÁREZ DEL RIO, L.M. 2003. Characterization by X-ray computed tomography of water absorption in a limestone used as building stone in th Oviedo Cathedral (Spain). In: Mess, F. Swennen, R, Van Geet, M, Jacobs, P. (Eds). *Applications of X-ray computed tomography in the Geosciences*. Feol. Soc, London, Special Publications, 215. p. 127-134.

SABBIONI, C. 2003. Mechanisms of Air Pollution Damage to Stone. *Air Pollution Reviews V.2*, Chapter 3. Imperial College Press. London. p. 63-88.

SABBIONI, C; ZAPPÍA, G. 1992. *Water Air Soil Pollutant*. 63. p. 305-316.

SAIZ-JIMENEZ, C. 1993. *Atmos. Env.* 27B. p. 77-85.

SCHOLLE. 1978. A color illustrated guide to Carbonate Rock Constituents, Textures, Cements and Porosities. The American Association of Petroleum Geologists. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 241p.

SCHNEIDER, C.; ROCHA, V.; ABDEL-REHIM, M.; NEUMANN, R. 2003. Método expedido para medição de porosidade em partículas. CT2005-117-00 – XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa . Natal –RN, cap.1, pag 41.

SILVEY, D.F.; GREGG, J.M. 1987. Classification of dolomite rock textures. *Journal of sedimentology and petrology* 57. p. 967-975.

SMITH, B.J.; TURKINGTON, A.V. 2004. Stone decay, its causes and controls. Donhead Publishing. London. 306p.

STEIGER, M. 2003. Salts and Crusts. *Air Pollution Reviews V.2*, Chapter 5. Imperial College Press. London. p. 133-181.

THEOULAKIS, P.; MOROPOLOU, A. 1997. Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and building materials* 11. p. 65-71.

TERRAZA, R. 1999. Metodología para la descripción y análisis de rocas sedimentarias siliciclásticas y calcáreas en sección delgada. INGEOMINAS, Documento técnico. Bogotá. 53p.

THOMACHOT, C. 2002. Modification des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts d'encroûtement noir vernissés. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur. Strasbourg, France. 263p.

TOTTO, E.; KELLOGG, J. 1992. Structure of the Sinú-San Jorge fold belt-an active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South America Earth Sciences*, 5 (2). p. 211-222.

TURKINGTON, A. 2005. Stone decay in the architectural environment. The Geological Society of America. Special Paper 390. Boulder, Colorado. 61p.

TURPIN, B.J.; HUNTZICKER, J.J. 1995. *Atmos. Env.* 29 A. p. 3527-3544.

VAN DER MEER, F.; VAN DIJK, P.; VAN DER WERFF, H.; YANG, H. 2002. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova*, 14(1): 1-17.

ZAPPIA, G.; SABBIONI, C.; GOBBI, G. 1993. *Atmos. Env.* 27A. p. 1117-1121.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. 2001. Acidic attack of cement based materials: a review; part 1: principle of acidic attack. *Construction and Building Materials*, v.5, p. 331-340.

ANEXOS

**ANEXO A1- RESULTADOS DA POROSIMETRIA DE MERCÚRIO DOS CALCÁRIOS
INALTERADOS ROYAL VERDE (RV), ROYAL VETA (RVT), ROYAL BRONCE (RB) E
ROYAL DORADO (RD)**

Sample name : RV
Date : 26/06/2007

R E S U L T S

Total cumulative volume (mm3/g) : 26,03009987
 Total specific surface area (m2/g) : 1,266000032
 Average pore radius (Micron) : 0,048463002
 Total porosity (%) : 6,408800125
 Bulk density (g/cm3) : 2,462069988
 Apparent density (g/cm3) : 2,630660057
 Cut-Off radius range (Micron) : : ----- ,03-0
 Total pore volume (mm3/g) : 5,126100063
 Pore specific surface area (m2/g) : 0,541999996
 Cumulative volume [Cut-Off] (mm3/g) : 20,90399933
 Surface area [Cut-Off] (m2/g) : 0,72299999
 Sample volume correction : 0,901861191

P O R E S I Z E D I S T R I B U T I O N (custom ranges)

Pore radius ranges (µm)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m2/g)	Relative Surface (m2/g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,200	0,200	0,760	0,000	0,000
20-17,5	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,590	0,400	1,520	0,000	0,000
12-11	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,790	0,200	0,760	0,000	0,000
7-6	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
4-3,5	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
3-2,5	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5-2	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
2-1,5	0,820	0,030	0,100	0,000	0,000
1,5-1,25	0,870	0,060	0,220	0,000	0,000
1,25-1	0,930	0,060	0,220	0,000	0,000
1-,9	0,930	0,000	0,000	0,000	0,000
,9-,8	0,930	0,000	0,000	0,000	0,000
,8-,7	0,990	0,060	0,220	0,001	0,000
,7-,6	0,990	0,000	0,000	0,001	0,000
,6-,5	1,040	0,060	0,220	0,001	0,000
,5-,4	1,100	0,060	0,220	0,001	0,000
,4-,3	1,270	0,170	0,650	0,002	0,001
,3-,2	1,550	0,280	1,080	0,004	0,002
,2-,15	1,990	0,450	1,720	0,009	0,005
,15-,1	3,730	1,740	6,670	0,040	0,030
,1-,075	5,800	2,070	7,960	0,089	0,049
,075-,05	13,140	7,340	28,190	0,334	0,245
,05-,025	22,250	9,110	34,980	0,821	0,487
,025-,01	26,030	3,780	14,530	1,266	0,445
,01-,005	26,030	0,000	0,000	1,266	0,000
,005-,001	26,030	0,000	0,000	1,266	0,000
,001-,0006	26,030	0,000	0,000	1,266	0,000

Sample name : RVT
Date : 27/06/2007

R E S U L T S

Total cumulative volume (mm3/g) : 28,80080032
 Total specific surface area (m2/g) : 1,664999962
 Average pore radius (Micron) : 0,071451999
 Total porosity (%) : 6,938600063
 Bulk density (g/cm3) : 2,409169912
 Apparent density (g/cm3) : 2,588799953
 Cut-Off radius range (Micron) : : ----- ,03-0
 Total pore volume (mm3/g) : 5,513400078
 Pore specific surface area (m2/g) : 0,976999998
 Cumulative volume [Cut-Off] (mm3/g) : 23,28739929
 Surface area [Cut-Off] (m2/g) : 0,68900001
 Sample volume correction : 0,874795675

P O R E S I Z E D I S T R I B U T I O N (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m2/g)	Relative Surface (m2/g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,160	0,160	0,550	0,000	0,000
20-17,5	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,470	0,320	1,100	0,000	0,000
12-11	0,470	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,470	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,470	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,470	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,630	0,160	0,550	0,000	0,000
7-6	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
4-3,5	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
3-2,5	0,630	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5-2	0,650	0,020	0,070	0,000	0,000
2-1,5	0,700	0,040	0,160	0,000	0,000
1,5-1,25	0,790	0,090	0,310	0,000	0,000
1,25-1	0,830	0,040	0,160	0,000	0,000
1-,9	0,880	0,040	0,160	0,001	0,000
,9-,8	0,920	0,040	0,160	0,001	0,000
,8-,7	0,960	0,040	0,160	0,001	0,000
,7-,6	1,010	0,040	0,160	0,001	0,000
,6-,5	1,050	0,040	0,160	0,001	0,000
,5-,4	1,140	0,090	0,310	0,001	0,000
,4-,3	1,280	0,130	0,470	0,002	0,001
,3-,2	1,630	0,360	1,240	0,005	0,003
,2-,15	2,390	0,760	2,640	0,014	0,009
,15-,1	5,470	3,080	10,700	0,067	0,053
,1-,075	10,250	4,780	16,590	0,180	0,113
,075-,05	18,510	8,260	28,680	0,447	0,268
,05-,025	24,250	5,740	19,920	0,758	0,311
,025-,01	27,150	2,900	10,080	1,114	0,356
,01-,005	28,400	1,250	4,340	1,478	0,363
,005-,001	28,800	0,400	1,400	1,666	0,188
,001-,0006	28,800	0,000	0,000	1,666	0,000

Sample name : RB
Date : 15/06/2007

R E S U L T S

Total cumulative volume (mm3/g) : 30,19109917
Total specific surface area (m2/g) : 0,922999978
Average pore radius (Micron) : 0,127000004
Total porosity (%) : 10,89389992
Bulk density (g/cm3) : 3,608330011
Apparent density (g/cm3) : 4,049479961
Cut-Off radius range (Micron) : : ----- ,03-0
Total pore volume (mm3/g) : 2,471100092
Pore specific surface area (m2/g) : 0,379000008
Cumulative volume [Cut-Off] (mm3/g) : 27,71999931
Surface area [Cut-Off] (m2/g) : 0,54400003
Sample volume correction : 0,915326297

P O R E S I Z E D I S T R I B U T I O N (custom ranges)

Pore radius ranges (µm)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m2/g)	Relative Surface (m2/g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,160	0,160	0,540	0,000	0,000
20-17,5	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,490	0,330	1,080	0,000	0,000
12-11	0,490	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,490	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,490	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,490	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,650	0,160	0,540	0,000	0,000
7-6	0,650	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,720	0,070	0,220	0,000	0,000
5-4	0,810	0,090	0,310	0,000	0,000
4-3,5	0,860	0,050	0,150	0,000	0,000
3,5-3	0,910	0,050	0,150	0,000	0,000
3-2,5	1,000	0,090	0,310	0,000	0,000
2,5-2	1,090	0,090	0,310	0,000	0,000
2-1,5	1,230	0,140	0,460	0,001	0,000
1,5-1,25	1,370	0,140	0,460	0,001	0,000
1,25-1	1,510	0,140	0,460	0,001	0,000
1-,9	1,600	0,090	0,310	0,001	0,000
,9-,8	1,690	0,090	0,310	0,001	0,000
,8-,7	1,830	0,140	0,460	0,002	0,000
,7-,6	2,010	0,180	0,610	0,002	0,001
,6-,5	2,340	0,320	1,070	0,004	0,001
,5-,4	2,800	0,460	1,530	0,006	0,002
,4-,3	3,580	0,790	2,600	0,010	0,005
,3-,2	6,170	2,590	8,570	0,032	0,022
,2-,15	10,050	3,880	12,850	0,077	0,045
,15-,1	17,440	7,390	24,480	0,198	0,121
,1-,075	21,230	3,790	12,550	0,285	0,087
,075-,05	25,110	3,880	12,850	0,411	0,126
,05-,025	28,300	3,190	10,560	0,586	0,175
,025-,01	29,800	1,500	4,970	0,765	0,179
,01-,005	30,010	0,210	0,690	0,818	0,053
,005-,001	30,190	0,180	0,610	0,923	0,105
,001-,0006	30,190	0,000	0,000	0,923	0,000

Sample name : RD
Date : 15/06/2007

RESULTS

Total cumulative volume (mm3/g) : 68,28540039
 Total specific surface area (m²/g) : 1,847000003
 Average pore radius (Micron) : 0,188161999
 Total porosity (%) : 15,36419964
 Bulk density (g/cm3) : 2,25
 Apparent density (g/cm3) : 2,658449888
 Cut-Off radius range (Micron) : :-----,03-0
 Total pore volume (mm3/g) : 4,944399834
 Pore specific surface area (m²/g) : 0,890999973
 Cumulative volume [Cut-Off] (mm3/g) : 63,3409996
 Surface area [Cut-Off] (m²/g) : 0,95599997
 Sample volume correction : 0,892009914

PORE SIZE DISTRIBUTION (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m ² /g)	Relative Surface (m ² /g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,200	0,200	0,290	0,000	0,000
20-17,5	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,590	0,390	0,580	0,000	0,000
12-11	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,590	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,790	0,200	0,290	0,000	0,000
7-6	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
4-3,5	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,790	0,000	0,000	0,000	0,000
3-2,5	0,810	0,030	0,040	0,000	0,000
2,5-2	0,870	0,060	0,080	0,000	0,000
2-1,5	0,980	0,110	0,160	0,000	0,000
1,5-1,25	1,030	0,060	0,080	0,000	0,000
1,25-1	1,260	0,220	0,330	0,001	0,000
1-,9	1,310	0,060	0,080	0,001	0,000
,9-,8	1,420	0,110	0,160	0,001	0,000
,8-,7	1,530	0,110	0,160	0,002	0,000
,7-,6	1,810	0,280	0,410	0,002	0,001
,6-,5	2,260	0,440	0,650	0,004	0,002
,5-,4	3,030	0,780	1,140	0,007	0,004
,4-,3	5,090	2,060	3,010	0,020	0,012
,3-,2	19,590	14,500	21,230	0,147	0,127
,2-,15	39,030	19,440	28,480	0,369	0,222
,15-,1	51,480	12,440	18,220	0,569	0,199
,1-,075	56,700	5,220	7,650	0,689	0,120
,075-,05	60,590	3,890	5,700	0,815	0,126
,05-,025	64,040	3,450	5,050	1,007	0,192
,025-,01	66,670	2,640	3,860	1,339	0,331
,01-,005	67,980	1,310	1,910	1,715	0,376
,005-,001	68,290	0,310	0,450	1,847	0,132
,001-,0006	68,290	0,000	0,000	1,847	0,000

ANEXO A2- RESULTADOS DA POROSIMETRIA DE MERCÚRIO DOS CALCÁRIOS ROYAL VERDE (RV) E ROYAL DORADO (RD) APÓS O ENSAIO DE CRISTALIZAÇÃO DE SAIS

Instrument type : Pascal 240
Sample name : RV6C
Date : 14.07.2008

R E S U L T S

Total cumulative volume (mm3/g) : 18,84980011
Total specific surface area (m2/g) : 1,156999946
Average pore radius (Micron) : 0,037333
Total porosity (%) : 13,15999985
Bulk density (g/cm3) : 6,981490135
Apparent density (g/cm3) : 8,039480209
Sample volume correction : 0,965140224

P O R E S I Z E D I S T R I B U T I O N (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m2/g)	Relative Surface (m2/g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20-17,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12-11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4-3,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3-2,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5-2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2-1,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5-1,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,25-1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1-,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
,9-,8	0,190	0,190	1,020	0,001	0,001
,8-,7	0,730	0,540	2,880	0,002	0,002
,7-,6	1,790	1,050	5,590	0,005	0,003
,6-,5	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,5-,4	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,4-,3	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,3-,2	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,2-,15	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,15-,1	1,790	0,000	0,000	0,005	0,000
,1-,075	2,330	0,540	2,880	0,018	0,013
,075-,05	5,780	3,450	18,310	0,136	0,118
,05-,025	15,110	9,330	49,490	0,659	0,522
,025-,01	17,990	2,880	15,250	0,984	0,326
,01-,005	18,850	0,860	4,580	1,157	0,172
,005-,001	18,850	0,000	0,000	1,157	0,000
,001-,0006	18,850	0,000	0,000	1,157	0,000

Instrument type : Pascal 240
Sample name : RV14C
Date : 14.07.2008

RESULTS

Total cumulative volume (mm3/g) : 30,48690033
Total specific surface area (m2/g) : 2,042999983
Average pore radius (Micron) : 0,048420001
Total porosity (%) : 7,983099937
Bulk density (g/cm3) : 2,618540049
Apparent density (g/cm3) : 2,845710039
Sample volume correction : 0,934213698

PORE SIZE DISTRIBUTION (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm3/g)	Relative Volume (mm3/g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m2/g)	Relative Surface (m2/g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20-17,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12-11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,300	0,300	0,980	0,000	0,000
4-3,5	0,410	0,110	0,370	0,000	0,000
3,5-3	0,520	0,110	0,370	0,000	0,000
3-2,5	0,600	0,070	0,250	0,000	0,000
2,5-2	0,710	0,110	0,370	0,000	0,000
2-1,5	0,710	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5-1,25	0,750	0,040	0,120	0,001	0,000
1,25-1	0,750	0,000	0,000	0,001	0,000
1-,9	0,820	0,070	0,250	0,001	0,000
,9-,8	0,820	0,000	0,000	0,001	0,000
,8-,7	0,860	0,040	0,120	0,001	0,000
,7-,6	1,010	0,150	0,490	0,001	0,001
,6-,5	1,010	0,000	0,000	0,001	0,000
,5-,4	1,010	0,000	0,000	0,001	0,000
,4-,3	1,050	0,040	0,120	0,001	0,000
,3-,2	1,310	0,260	0,860	0,004	0,002
,2-,15	1,500	0,190	0,610	0,006	0,002
,15-,1	2,880	1,390	4,550	0,029	0,023
,1-,075	4,570	1,690	5,530	0,069	0,040
,075-,05	12,510	7,940	26,040	0,336	0,266
,05-,025	23,480	10,970	36,000	0,921	0,585
,025-,01	27,490	4,010	13,140	1,410	0,490
,01-,005	30,490	3,000	9,830	2,043	0,633
,005-,001	30,490	0,000	0,000	2,043	0,000
,001-,0006	30,490	0,000	0,000	2,043	0,000

Instrument type : Pascal 240
Sample name : RD6C
Date : 14.07.2008

RESULTS

Total cumulative volume (mm3/g) 80,80639648
Total specific surface area (m²/g) 1,870000005
Average pore radius (Micron) : 0,257461995
Total porosity (%) : 18,94529915
Bulk density (g/cm³) : 2,344530106
Apparent density (g/cm³) : 2,892529964
Sample volume correction : 0,931734324

P O R E S I Z E D I S T R I B U T I O N (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm ³ /g)	Relative Volume (mm ³ /g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m ² /g)	Relative Surface (m ² /g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20-17,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12-11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,040	0,040	0,050	0,000	0,000
5-4	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
4-3,5	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,080	0,040	0,050	0,000	0,000
3-2,5	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5-2	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
2-1,5	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5-1,25	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
1,25-1	0,120	0,040	0,050	0,000	0,000
1-,9	0,120	0,000	0,000	0,000	0,000
,9-,8	0,120	0,000	0,000	0,000	0,000
,8-,7	0,120	0,000	0,000	0,000	0,000
,7-,6	0,160	0,040	0,050	0,000	0,000
,6-,5	0,200	0,040	0,050	0,000	0,000
,5-,4	0,280	0,080	0,100	0,001	0,000
,4-,3	1,730	1,450	1,800	0,010	0,009
,3-,2	39,230	37,500	46,410	0,316	0,306
,2-,15	53,020	13,790	17,070	0,473	0,157
,15-,1	62,660	9,640	11,930	0,629	0,155
,1-,075	67,100	4,440	5,490	0,731	0,102
,075-,05	71,050	3,950	4,890	0,862	0,131
,05-,025	76,090	5,040	6,240	1,149	0,287
,025-,01	80,120	4,030	4,990	1,635	0,486
,01-,005	80,810	0,690	0,850	1,870	0,235
,005-,001	80,810	0,000	0,000	1,870	0,000
,001-,0006	80,810	0,000	0,000	1,870	0,000

Instrument type : Pascal 240
Sample name : RD14C
Date : 14.07.2008

RESULTS

Total cumulative volume (mm3/g) : 93,45529938
Total specific surface area (m²/g) : 1,023000002
Average pore radius (Micron) : 0,242210001
Total porosity (%) : 19,54439926
Bulk density (g/cm³) : 2,091310024
Apparent density (g/cm³) : 2,599329948
Sample volume correction : 0,924107373

PORE SIZE DISTRIBUTION (custom ranges)

Pore radius ranges (µM)	Specific Volume (mm ³ /g)	Relative Volume (mm ³ /g)	Relative Volume (%)	Specific Surface (m ² /g)	Relative Surface (m ² /g)
1280-640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
640-320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
320-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
140-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
120-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60-40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40-30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20-17,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17,5-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15-14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14-13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13-12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12-11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10-9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9-8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8-7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5-4	0,040	0,040	0,040	0,000	0,000
4-3,5	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5-3	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
3-2,5	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5-2	0,080	0,040	0,040	0,000	0,000
2-1,5	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5-1,25	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
1,25-1	0,280	0,200	0,220	0,000	0,000
1-,9	0,490	0,200	0,220	0,001	0,000
,9-,8	0,810	0,330	0,350	0,002	0,001
,8-,7	1,380	0,570	0,610	0,003	0,002
,7-,6	2,200	0,810	0,870	0,006	0,002
,6-,5	3,700	1,500	1,610	0,011	0,005
,5-,4	8,170	4,470	4,780	0,031	0,020
,4-,3	18,290	10,120	10,830	0,091	0,060
,3-,2	47,930	29,630	31,710	0,337	0,245
,2-,15	66,100	18,170	19,440	0,546	0,209
,15-,1	87,320	21,220	22,710	0,890	0,344
,1-,075	93,460	6,140	6,570	1,023	0,133
,075-,05	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000
,05-,025	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000
,025-,01	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000
,01-,005	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000
,005-,001	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000
,001-,0006	93,460	0,000	0,000	1,023	0,000

**ANEXO B1 – CINÉTICA DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DE
CALCÁRIOS INALTERADOS ROYAL VERDE (RV), ROYAL VETA (RVT), ROYAL
BRONCE (RB) E ROYAL DORADO (RD)**

Evolução da massa do corpo de prova RV1. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,13	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,36	0,23	46,94
	3	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,47	0,34	69,39
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,53	0,40	81,63
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,73	0,60	122,45
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	906,83	0,70	142,86
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	907,11	0,98	200,00
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	907,45	1,32	269,39
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	907,94	1,81	369,39
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	908,37	2,24	457,14
24	1440	86400	293,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	912,35	6,22	1269,39
48	2880	172800	415,69	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	914,64	8,51	1736,73
168	10080	604800	777,69	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	920,37	14,24	2906,12
192	11520	691200	831,38	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	921,35	15,22	3106,12
240	14400	864000	929,52	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	921,68	15,55	3173,47
264	15840	950400	974,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	906,13	921,75	15,62	3187,76

Evolução da massa do corpo de prova RV2. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	905,61	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	905,86	0,25	51,76
	3	180	13,42	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	905,97	0,36	74,53
	5	300	17,32	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	906,04	0,43	89,03
	10	600	24,49	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	906,22	0,61	126,29
	15	900	30,00	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	906,27	0,66	136,65
	30	1800	42,43	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	906,55	0,94	194,62
1	60	3600	60,00	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	906,87	1,26	260,87
2	120	7200	84,85	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	907,39	1,78	368,53
3	180	10800	103,92	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	907,81	2,20	455,49
24	1440	86400	293,94	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	911,64	6,03	1248,45
48	2880	172800	415,69	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	913,99	8,38	1734,99
168	10080	604800	777,69	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	919,73	14,12	2923,40
192	11520	691200	831,38	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	920,50	14,89	3082,82
240	14400	864000	929,52	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	921,10	15,49	3207,04
264	15840	950400	974,88	7,00	6,90	48,30	0,0048	905,61	921,20	15,59	3227,74

Evolução da massa do corpo de prova RV3. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,13	0,00	0,00
	1	60	7,75	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,37	0,24	48,99
	3	180	13,42	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,49	0,36	73,48
	5	300	17,32	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,56	0,43	87,77
	10	600	24,49	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,70	0,57	116,35
	15	900	30,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,80	0,67	136,76
	30	1800	42,43	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	892,97	0,84	171,46
1	60	3600	60,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	893,37	1,24	253,11
2	120	7200	84,85	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	893,90	1,77	361,30
3	180	10800	103,92	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	894,33	2,20	449,07
24	1440	86400	293,94	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	898,56	6,43	1312,51
48	2880	172800	415,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	901,02	8,89	1814,66
168	10080	604800	777,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	907,08	14,95	3051,64
192	11520	691200	831,38	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	907,58	15,45	3153,70
240	14400	864000	929,52	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	908,32	16,19	3304,76
264	15840	950400	974,88	6,90	7,10	48,99	0,0049	892,13	908,34	16,21	3308,84

Evolução da massa do corpo de prova RV4. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	893,47	0	0
	1	60	7,75	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	893,72	0,25	51,03
	3	180	13,42	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	893,84	0,37	75,53
	5	300	17,32	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	893,89	0,42	85,73
	10	600	24,49	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	894,15	0,68	138,80
	15	900	30,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	894,27	0,8	163,30
	30	1800	42,43	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	894,39	0,92	187,79
1	60	3600	60,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	894,72	1,25	255,15
2	120	7200	84,85	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	895,19	1,72	351,09
3	180	10800	103,92	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	895,53	2,06	420,49
24	1440	86400	293,94	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	899,07	5,6	1143,09
48	2880	172800	415,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	901,23	7,76	1584,00
168	10080	604800	777,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	907,08	13,61	2778,12
192	11520	691200	831,38	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	907,72	14,25	2908,76
240	14400	864000	929,52	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	908,4	14,93	3047,56
264	15840	950400	974,88	6,90	7,10	48,99	0,0049	893,47	908,44	14,97	3055,73

Evolução da massa do corpo de prova RVT1. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,00	0,00	0,00
	1	60	7,75	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,35	0,35	71,44
	3	180	13,42	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,44	0,44	89,81
	5	300	17,32	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,52	0,52	106,14
	10	600	24,49	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,69	0,69	140,85
	15	900	30,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	874,82	0,82	167,38
	30	1800	42,43	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	875,04	1,04	212,29
1	60	3600	60,00	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	875,48	1,48	302,10
2	120	7200	84,85	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	876,26	2,26	461,32
3	180	10800	103,92	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	876,75	2,75	561,34
24	1440	86400	293,94	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	881,03	7,03	1434,99
48	2880	172800	415,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	883,36	9,36	1910,59
168	10080	604800	777,69	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	890,15	16,15	3296,59
192	11520	691200	831,38	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	891,10	17,10	3490,51
240	14400	864000	929,52	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	893,10	19,10	3898,75
264	15840	950400	974,88	6,90	7,10	48,99	0,0049	874,00	893,18	19,18	3915,08

Evolução da massa do corpo de prova RVT2. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	880,77	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	881,28	0,51	104,08
	3	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	881,42	0,65	132,65
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	881,52	0,75	153,06
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	881,68	0,91	185,71
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	881,85	1,08	220,41
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	882,12	1,35	275,51
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	882,64	1,87	381,63
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	883,46	2,69	548,98
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	883,94	3,17	646,94
24	1440	86400	293,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	888,03	7,26	1481,63
48	2880	172800	415,69	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	890,31	9,54	1946,94
168	10080	604800	777,69	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	895,46	14,69	2997,96
192	11520	691200	831,38	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	896,04	15,27	3116,33
240	14400	864000	929,52	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	896,54	15,77	3218,37
264	15840	950400	974,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	880,77	896,56	15,79	3222,45

Evolução da massa do corpo de prova RVT3. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	886,84	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,09	0,25	50,30
	3	180	13,42	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,22	0,38	76,46
	5	300	17,32	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,30	0,46	92,56
	10	600	24,49	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,45	0,61	122,74
	15	900	30,00	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,57	0,73	146,88
	30	1800	42,43	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	887,80	0,96	193,16
1	60	3600	60,00	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	888,19	1,35	271,63
2	120	7200	84,85	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	888,90	2,06	414,49
3	180	10800	103,92	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	889,32	2,48	498,99
24	1440	86400	293,94	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	893,57	6,73	1354,12
48	2880	172800	415,69	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	896,03	9,19	1849,09
168	10080	604800	777,69	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	902,23	15,39	3096,58
192	11520	691200	831,38	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	903,00	16,16	3251,51
240	14400	864000	929,52	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	903,85	17,01	3422,54
264	15840	950400	974,88	7,00	7,10	49,70	0,0050	886,84	903,94	17,10	3440,64

Evolução da massa do corpo de prova RVT4. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Qi (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	870,98	0	0
	1	60	7,75	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	871,22	0,24	49,69
	3	180	13,42	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	871,34	0,36	74,53
	5	300	17,32	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	871,44	0,46	95,24
	10	600	24,49	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	871,67	0,69	142,86
	15	900	30,00	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	871,78	0,80	165,63
	30	1800	42,43	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	872,00	1,02	211,18
1	60	3600	60,00	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	872,5	1,52	314,70
2	120	7200	84,85	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	873,22	2,24	463,77
3	180	10800	103,92	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	873,66	2,68	554,87
24	1440	86400	293,94	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	878,04	7,06	1461,70
48	2880	172800	415,69	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	880,41	9,43	1952,38
72	4320	259200	509,12	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	882,25	11,27	2333,33
96	5760	345600	587,88	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	884,33	13,35	2763,98
120	7200	432000	657,27	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	884,91	13,93	2884,06
144	8640	518400	720,00	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	885,32	14,34	2968,94
168	10080	604800	777,69	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	886,37	15,39	3186,34
192	11520	691200	831,38	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	887,03	16,05	3322,98
240	14400	864000	929,52	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	889,39	18,41	3811,59
264	15840	950400	974,88	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	889,59	18,61	3853,00
288	17280	1036800	1018,23	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	889,89	18,91	3915,11
312	18720	1123200	1059,81	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	890,51	19,53	4043,48
336	20160	1209600	1099,82	7,00	6,90	48,30	0,0048	870,98	890,51	19,53	4043,48

Evolução da massa do corpo de prova RB1. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	766,34	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	766,89	0,55	109,11
	3	180	13,42	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	766,97	0,63	124,98
	5	300	17,32	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	767,17	0,83	164,65
	10	600	24,49	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	767,47	1,13	224,16
	15	900	30,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	767,77	1,43	283,67
	30	1800	42,43	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	768,35	2,01	398,73
1	60	3600	60,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	769,10	2,76	547,51
1,5	90	5400	73,48	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	769,84	3,50	694,31
2	120	7200	84,85	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	770,36	4,02	797,46
2,5	150	9000	94,87	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	770,87	4,53	898,63
3	180	10800	103,92	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	771,22	4,88	968,06
3,5	210	12600	112,25	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	771,57	5,23	1037,49
4	240	14400	120,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	771,90	5,56	1102,96
4,5	270	16200	127,28	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	772,24	5,90	1170,40
5	300	18000	134,16	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	772,57	6,23	1235,87
5,5	330	19800	140,71	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	772,90	6,56	1301,33
6	360	21600	146,97	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	773,18	6,84	1356,87
6,5	390	23400	152,97	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	773,45	7,11	1410,43
7	420	25200	158,75	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	773,75	7,41	1469,95
7,5	450	27000	164,32	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	774,04	7,70	1527,47
24	1500	90000	300,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	779,83	13,49	2676,06
25	1560	93600	305,94	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	780,04	13,70	2717,71
26	1620	97200	311,77	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	780,29	13,95	2767,31
27	1680	100800	317,49	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	780,51	14,17	2810,95
28	1740	104400	323,11	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	780,76	14,42	2860,54
29	1800	108000	328,63	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	781,01	14,67	2910,14
30	1860	111600	334,07	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	781,24	14,90	2955,76
31	1860	111600	334,07	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	781,47	15,13	3001,39
32	1920	115200	339,41	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	781,71	15,37	3049,00
48	2880	172800	415,69	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	784,92	18,58	3685,78
49	2940	176400	420,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,01	18,67	3703,63
50	3000	180000	424,26	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,17	18,83	3735,37
51	3060	183600	428,49	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,32	18,98	3765,13
52	3120	187200	432,67	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,43	19,09	3786,95
53	3180	190800	436,81	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,58	19,24	3816,70
54	3240	194400	440,91	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,69	19,35	3838,52
55	3300	198000	444,97	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,82	19,48	3864,31
56	3360	201600	449,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	785,93	19,59	3886,13
72	4320	259200	509,12	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	787,96	21,62	4288,83
73	4380	262800	512,64	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	788,11	21,77	4318,59
74	4440	266400	516,14	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	788,16	21,82	4328,51
77	4620	277200	526,50	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	788,54	22,20	4403,89
78	4680	280800	529,91	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	788,60	22,26	4415,79
79	4740	284400	533,29	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	788,66	22,32	4427,69
96	5760	345600	587,88	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,61	24,27	4814,52
98	5880	352800	593,97	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,69	24,35	4830,39
99	5940	356400	596,99	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,73	24,39	4838,33
100	6000	360000	600,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,90	24,56	4872,05
101	6060	363600	602,99	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,91	24,57	4874,03
102	6120	367200	605,97	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	790,92	24,58	4876,02
120	7200	432000	657,27	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,17	29,83	5917,48
121	7260	435600	660,00	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,21	29,87	5925,41
122	7320	439200	662,72	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,23	29,89	5929,38
124	7440	446400	668,13	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,23	29,89	5929,38
125	7500	450000	670,82	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,24	29,90	5931,36
126	7560	453600	673,50	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	796,24	29,90	5931,36
270	16200	972000	985,90	7,10	7,10	50,41	0,005041	766,34	804,67	38,33	7603,65

Evolução da massa do corpo de prova RB2. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m ₁ (g)	(m ₁ -m ₀) (gr)	Qi (m ₁ -m ₀ /A ²)
	0	0	0	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	800,91	0	0
	1	60	7,75	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	801,32	0,41	87,49
	3	180	13,42	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	801,66	0,75	160,05
	5	300	17,32	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	801,82	0,91	194,20
	10	600	24,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	802,28	1,37	292,36
	15	900	30,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	802,53	1,62	345,71
	30	1800	42,43	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	803,10	2,19	467,35
1	60	3600	60,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	803,90	2,99	638,07
1,5	90	5400	73,48	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	804,70	3,79	808,79
2	120	7200	84,85	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	805,23	4,32	921,90
2,5	150	9000	94,87	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	805,75	4,84	1032,86
3	180	10800	103,92	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	806,11	5,20	1109,69
3,5	210	12600	112,25	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	806,47	5,56	1186,51
4	240	14400	120,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	806,84	5,93	1265,47
4,5	270	16200	127,28	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	807,20	6,29	1342,30
5	300	18000	134,16	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	807,49	6,58	1404,18
5,5	330	19800	140,71	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	807,78	6,87	1466,07
6	360	21600	146,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	808,09	7,18	1532,22
6,5	390	23400	152,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	808,39	7,48	1596,24
7	420	25200	158,75	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	808,65	7,74	1651,73
7,5	450	27000	164,32	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	808,91	8,00	1707,21
24	1500	90000	300,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	814,54	13,63	2908,66
25	1560	93600	305,94	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	814,76	13,85	2955,61
26	1620	97200	311,77	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	814,98	14,07	3002,56
27	1680	100800	317,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	815,23	14,32	3055,91
28	1740	104400	323,11	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	815,46	14,55	3104,99
29	1800	108000	328,63	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	815,69	14,78	3154,08
30	1860	111600	334,07	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	815,96	15,05	3211,69
31	1920	115200	339,41	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	816,16	15,25	3254,37
32	1920	115200	339,41	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	816,39	15,48	3303,46
48	2880	172800	415,69	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	819,63	18,72	3994,88
49	2940	176400	420,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	819,74	18,83	4018,35
50	3000	180000	424,26	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	819,82	18,91	4035,42
51	3060	183600	428,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,03	19,12	4080,24
52	3120	187200	432,67	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,17	19,26	4110,12
53	3180	190800	436,81	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,30	19,39	4137,86
54	3240	194400	440,91	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,41	19,50	4161,33
55	3300	198000	444,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,58	19,67	4197,61
56	3360	201600	449,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	820,65	19,74	4212,55
72	4320	259200	509,12	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,04	22,13	4722,58
73	4380	262800	512,64	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,04	22,13	4722,58
74	4440	266400	516,14	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,09	22,18	4733,25
76	4560	273600	523,07	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,46	22,55	4812,21
77	4620	277200	526,50	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,51	22,60	4822,88
78	4680	280800	529,91	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	823,55	22,64	4831,41
96	5760	345600	587,88	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,61	24,70	5271,02
98	5880	352800	593,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,75	24,84	5300,90
99	5940	356400	596,99	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,79	24,88	5309,43
100	6000	360000	600,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,86	24,95	5324,37
101	6060	363600	602,99	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,90	24,99	5332,91
102	6120	367200	605,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	825,91	25,00	5335,04
120	7200	432000	657,27	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,48	30,57	6523,69
121	7260	435600	660,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,55	30,64	6538,63
122	7320	439200	662,72	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,55	30,64	6538,63
124	7440	446400	668,13	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,56	30,65	6540,76
125	7500	450000	670,82	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,57	30,66	6542,89
126	7560	453600	673,50	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	831,58	30,67	6545,03
270	16200	972000	985,90	6,60	7,10	46,86	0,00469	800,91	839,35	38,44	8203,16

Evolução da massa do corpo de prova RB3. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Qi (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	768,04	0,00	0,00
	1	60	7,75	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	768,70	0,66	140,85
	3	180	13,42	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	768,88	0,84	179,26
	5	300	17,32	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	769,02	0,98	209,13
	10	600	24,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	769,43	1,39	296,63
	15	900	30,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	769,70	1,66	354,25
	30	1800	42,43	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	770,37	2,33	497,23
1	60	3600	60,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	771,10	3,06	653,01
1,5	90	5400	73,48	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	771,83	3,79	808,79
2	120	7200	84,85	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	772,34	4,30	917,63
2,5	150	9000	94,87	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	772,85	4,81	1026,46
3	180	10800	103,92	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	773,27	5,23	1116,09
3,5	210	12600	112,25	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	773,69	5,65	1205,72
4	240	14400	120,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	774,02	5,98	1276,14
4,5	270	16200	127,28	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	774,36	6,32	1348,70
5	300	18000	134,16	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	774,71	6,67	1423,39
5,5	330	19800	140,71	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	775,06	7,02	1498,08
6	360	21600	146,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	775,35	7,31	1559,97
6,5	390	23400	152,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	775,64	7,60	1621,85
7	420	25200	158,75	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	775,93	7,89	1683,74
7,5	450	27000	164,32	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	776,21	8,17	1743,49
24	1500	90000	300,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	782,06	14,02	2991,89
25	1560	93600	305,94	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	782,38	14,34	3060,18
26	1620	97200	311,77	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	782,51	14,47	3087,92
27	1680	100800	317,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	782,78	14,74	3145,54
28	1740	104400	323,11	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	783,04	15,00	3201,02
29	1800	108000	328,63	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	783,29	15,25	3254,37
30	1860	111600	334,07	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	783,55	15,51	3309,86
31	1920	115200	339,41	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	783,79	15,75	3361,08
32	1980	118800	344,67	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	784,01	15,97	3408,02
48	2880	172800	415,69	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	787,46	19,42	4144,26
49	2940	176400	420,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	787,60	19,56	4174,14
50	3000	180000	424,26	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	787,78	19,74	4212,55
51	3060	183600	428,49	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	787,95	19,91	4248,83
52	3120	187200	432,67	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	788,10	20,06	4280,84
53	3180	190800	436,81	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	788,24	20,20	4310,71
54	3240	194400	440,91	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	788,34	20,30	4332,05
55	3300	198000	444,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	788,54	20,50	4374,73
56	3360	201600	449,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	788,59	20,55	4385,40
72	4320	259200	509,12	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,19	23,15	4940,25
73	4380	262800	512,64	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,23	23,19	4948,78
74	4440	266400	516,14	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,29	23,25	4961,59
76	4560	273600	523,07	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,74	23,70	5057,62
77	4620	277200	526,50	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,84	23,80	5078,96
78	4680	280800	529,91	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	791,87	23,83	5085,36
96	5760	345600	587,88	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,24	26,20	5591,12
98	5880	352800	593,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,26	26,22	5595,39
99	5940	356400	596,99	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,36	26,32	5616,73
100	6000	360000	600,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,40	26,36	5625,27
101	6060	363600	602,99	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,42	26,38	5629,53
102	6120	367200	605,97	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	794,44	26,40	5633,80
120	7200	432000	657,27	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,55	32,51	6937,69
121	7260	435600	660,00	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,67	32,63	6963,29
122	7320	439200	662,72	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,70	32,66	6969,70
124	7440	446400	668,13	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,72	32,68	6973,97
125	7500	450000	670,82	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,73	32,69	6976,10
126	7560	453600	673,50	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	800,73	32,69	6976,10
270	16200	972000	985,90	6,60	7,10	46,86	0,00469	768,04	809,05	41,01	8751,60

Evolução da massa do corpo de prova RB4. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m ₁ (g)	(m ₁ -m ₀) (gr)	Qi (m ₁ -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	780,32	0	0
	1 min	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	781,02	0,70	142,86
	3 min	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	781,28	0,96	195,92
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	781,43	1,11	226,53
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	782,00	1,68	342,86
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	782,16	1,84	375,51
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	782,77	2,45	500,00
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	783,57	3,25	663,27
1,5	90	5400	73,48	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	784,37	4,05	826,53
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	784,95	4,63	944,90
2,5	150	9000	94,87	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	785,52	5,20	1061,22
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	786,01	5,69	1161,22
3,5	210	12600	112,25	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	786,50	6,18	1261,22
4	240	14400	120,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	786,85	6,53	1332,65
4,5	270	16200	127,28	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	787,21	6,89	1406,12
5	300	18000	134,16	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	787,58	7,26	1481,63
5,5	330	19800	140,71	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	787,94	7,62	1555,10
6	360	21600	146,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	788,23	7,91	1614,29
6,5	390	23400	152,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	788,52	8,20	1673,47
7	420	25200	158,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	788,80	8,48	1730,61
7,5	450	27000	164,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	789,08	8,76	1787,76
24	1500	90000	300,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	795,42	15,10	3081,63
25	1560	93600	305,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	795,70	15,38	3138,78
26	1620	97200	311,77	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	796,03	15,71	3206,12
27	1680	100800	317,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	796,26	15,94	3253,06
28	1740	104400	323,11	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	796,51	16,19	3304,08
29	1800	108000	328,63	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	796,76	16,44	3355,10
30	1860	111600	334,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	797,05	16,73	3414,29
31	1920	115200	339,41	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	797,29	16,97	3463,27
32	1980	118800	344,67	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	797,53	17,21	3512,24
48	2880	172800	415,69	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,06	20,74	4232,65
49	2940	176400	420,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,24	20,92	4269,39
50	3000	180000	424,26	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,43	21,11	4308,16
51	3060	183600	428,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,62	21,30	4346,94
52	3120	187200	432,67	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,74	21,42	4371,43
53	3180	190800	436,81	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	801,92	21,60	4408,16
54	3240	194400	440,91	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	802,00	21,68	4424,49
55	3300	198000	444,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	802,17	21,85	4459,18
56	3360	201600	449,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	802,30	21,98	4485,71
72	4320	259200	509,12	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	804,94	24,62	5024,49
73	4380	262800	512,64	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	804,95	24,63	5026,53
74	4440	266400	516,14	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	805,06	24,74	5048,98
76	4560	273600	523,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	805,51	25,19	5140,82
77	4620	277200	526,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	805,63	25,31	5165,31
78	4680	280800	529,91	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	805,70	25,38	5179,59
96	5760	345600	587,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	807,97	27,65	5642,86
98	5880	352800	593,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	808,13	27,81	5675,51
99	5940	356400	596,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	808,23	27,91	5695,92
100	6000	360000	600,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	808,31	27,99	5712,24
101	6060	363600	602,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	808,31	27,99	5712,24
102	6120	367200	605,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	808,33	28,01	5716,33
120	7200	432000	657,27	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,45	34,13	6965,31
121	7260	435600	660,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,53	34,21	6981,63
122	7320	439200	662,72	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,57	34,25	6989,80
124	7440	446400	668,13	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,59	34,27	6993,88
125	7500	450000	670,82	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,61	34,29	6997,96
126	7560	453600	673,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	814,64	34,32	7004,08
270	16200	972000	985,90	7,00	7,00	49,00	0,0049	780,32	823,48	43,16	8808,16

Evolução da massa do corpo de prova RD1. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	760,41	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	761,27	0,86	170,60
	3	180	13,42	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	761,64	1,23	244,00
	5	300	17,32	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	761,90	1,49	295,58
	10	600	24,49	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	762,53	2,12	420,55
	15	900	30,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	763,07	2,66	527,67
	30	1800	42,43	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	764,26	3,85	763,74
1	60	3600	60,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	765,69	5,28	1047,41
1,5	90	5400	73,48	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	767,13	6,72	1333,07
2	120	7200	84,85	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	768,11	7,70	1527,47
2,5	150	9000	94,87	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	769,09	8,68	1721,88
3	180	10800	103,92	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	769,92	9,51	1886,53
3,5	210	12600	112,25	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	770,75	10,34	2051,18
4	240	14400	120,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	771,42	11,01	2184,09
4,5	270	16200	127,28	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	772,09	11,68	2317,00
5	300	18000	134,16	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	772,70	12,29	2438,01
5,5	330	19800	140,71	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	773,31	12,90	2559,02
6	360	21600	146,97	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	773,88	13,47	2672,09
6,5	390	23400	152,97	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	774,45	14,04	2785,16
7	420	25200	158,75	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	774,95	14,54	2884,35
7,5	450	27000	164,32	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	775,44	15,03	2981,55
24	1500	90000	300,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	786,98	26,57	5270,78
25	1560	93600	305,94	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	787,41	27,00	5356,08
26	1620	97200	311,77	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	787,85	27,44	5443,36
27	1680	100800	317,49	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	788,32	27,91	5536,60
28	1740	104400	323,11	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	788,75	28,34	5621,90
29	1800	108000	328,63	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	789,17	28,76	5705,22
30	1860	111600	334,07	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	789,62	29,21	5794,49
31	1860	111600	334,07	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	790,07	29,66	5883,75
32	1920	115200	339,41	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	790,44	30,03	5957,15
48	2880	172800	415,69	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	796,91	36,50	7240,63
49	2940	176400	420,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	797,17	36,76	7292,20
50	3000	180000	424,26	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	797,49	37,08	7355,68
51	3060	183600	428,49	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	797,80	37,39	7417,18
52	3120	187200	432,67	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	798,10	37,69	7476,69
53	3180	190800	436,81	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	798,36	37,95	7528,27
54	3240	194400	440,91	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	798,61	38,20	7577,86
55	3300	198000	444,97	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	798,88	38,47	7631,42
56	3360	201600	449,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	799,09	38,68	7673,08
72	4320	259200	509,12	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	804,04	43,63	8655,03
73	4380	262800	512,64	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	804,15	43,74	8676,85
74	4440	266400	516,14	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	804,30	43,89	8706,61
76	4560	273600	523,07	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	805,08	44,67	8861,34
77	4620	277200	526,50	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	805,19	44,78	8883,16
78	4680	280800	529,91	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	805,34	44,93	8912,91
96	5760	345600	587,88	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,20	47,79	9480,26
98	5880	352800	593,97	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,24	47,83	9488,20
99	5940	356400	596,99	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,24	47,83	9488,20
100	6000	360000	600,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,25	47,84	9490,18
101	6060	363600	602,99	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,26	47,85	9492,16
102	6120	367200	605,97	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	808,58	48,17	9555,64
120	7200	432000	657,27	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,59	49,18	9756,00
121	7260	435600	660,00	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,59	49,18	9756,00
122	7320	439200	662,72	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,60	49,19	9757,98
124	7440	446400	668,13	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,60	49,19	9757,98
125	7500	450000	670,82	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,61	49,20	9759,97
126	7560	453600	673,50	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	809,61	49,20	9759,97
270	16200	972000	985,90	7,10	7,10	50,41	0,0050	760,41	810,36	49,95	9908,75

Evolução da massa do corpo de prova RD2. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m ₁ (g)	(m ₁ -m ₀) (gr)	Qi (m ₁ -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	826,44	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	827,24	0,80	163,27
	3	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	827,57	1,13	230,61
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	827,82	1,38	281,63
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	828,44	2,00	408,16
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	828,83	2,39	487,76
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	829,83	3,39	691,84
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	831,01	4,57	932,65
1,5	90	5400	73,48	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	832,20	5,76	1175,51
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	832,94	6,50	1326,53
2,5	150	9000	94,87	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	833,68	7,24	1477,55
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	834,33	7,89	1610,20
3,5	210	12600	112,25	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	834,98	8,54	1742,86
4	240	14400	120,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	835,50	9,06	1848,98
4,5	270	16200	127,28	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	836,01	9,57	1953,06
5	300	18000	134,16	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	836,52	10,08	2057,14
5,5	330	19800	140,71	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	837,03	10,59	2161,22
6	360	21600	146,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	837,45	11,01	2246,94
6,5	390	23400	152,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	837,87	11,43	2332,65
7	420	25200	158,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	838,26	11,82	2412,24
7,5	450	27000	164,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	838,64	12,20	2489,80
24	1500	90000	300,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	847,52	21,08	4302,04
25	1560	93600	305,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	847,91	21,47	4381,63
26	1620	97200	311,77	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	848,27	21,83	4455,10
27	1680	100800	317,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	848,59	22,15	4520,41
28	1740	104400	323,11	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	848,92	22,48	4587,76
29	1800	108000	328,63	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	849,25	22,81	4655,10
30	1860	111600	334,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	849,65	23,21	4736,73
31	1920	115200	339,41	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	849,98	23,54	4804,08
32	1980	118800	344,67	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	850,28	23,84	4865,31
48	2040	122400	349,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	855,23	28,79	5875,51
49	2100	126000	354,96	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	855,44	29,00	5918,37
50	2160	129600	360,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	855,69	29,25	5969,39
51	2220	133200	364,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	855,93	29,49	6018,37
52	2280	136800	369,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	856,14	29,70	6061,22
53	2340	140400	374,70	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	856,36	29,92	6106,12
54	2400	144000	379,47	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	856,56	30,12	6146,94
55	2460	147600	384,19	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	856,77	30,33	6189,80
56	2520	151200	388,84	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	856,93	30,49	6222,45
72	4320	259200	509,12	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	860,73	34,29	6997,96
73	4380	262800	512,64	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	860,78	34,34	7008,16
74	4440	266400	516,14	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	860,90	34,46	7032,65
76	4560	273600	523,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	861,52	35,08	7159,18
77	4620	277200	526,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	861,65	35,21	7185,71
78	4680	280800	529,91	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	861,78	35,34	7212,24
96	5760	345600	587,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,01	38,57	7871,43
98	5880	352800	593,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,20	38,76	7910,20
99	5940	356400	596,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,32	38,88	7934,69
100	6000	360000	600,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,46	39,02	7963,27
101	6060	363600	602,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,54	39,10	7979,59
102	6120	367200	605,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	865,57	39,13	7985,71
120	7200	432000	657,27	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,20	40,76	8318,37
121	7260	435600	660,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,23	40,79	8324,49
122	7320	439200	662,72	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,27	40,83	8332,65
124	7440	446400	668,13	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,28	40,84	8334,69
125	7500	450000	670,82	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,30	40,86	8338,78
126	7560	453600	673,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	867,30	40,86	8338,78
270	16200	972000	985,90	7,00	7,00	49,00	0,0049	826,44	876,65	50,21	10246,94

Evolução da massa do corpo de prova RD3. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Qi (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	810,15	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	811,10	0,95	193,88
	3	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	811,63	1,48	302,04
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	811,82	1,67	340,82
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	812,38	2,23	455,10
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	812,91	2,76	563,27
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	814,11	3,96	808,16
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	815,50	5,35	1091,84
1,5	90	5400	73,48	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	816,84	6,69	1365,31
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	817,30	7,15	1459,18
2,5	150	9000	94,87	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	818,70	8,55	1744,90
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	819,90	9,75	1989,80
3,5	210	12600	112,25	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	820,16	10,01	2042,86
4	240	14400	120,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	820,77	10,62	2167,35
4,5	270	16200	127,28	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	821,45	11,30	2306,12
5	300	18000	134,16	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	821,80	11,65	2377,55
5,5	330	19800	140,71	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	822,58	12,43	2536,73
6	360	21600	146,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	822,80	12,65	2581,63
6,5	390	23400	152,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	823,56	13,41	2736,73
7	420	25200	158,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	824,00	13,85	2826,53
7,5	450	27000	164,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	824,50	14,35	2928,57
24	1500	90000	300,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	835,23	25,08	5118,37
25	1560	93600	305,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	835,73	25,58	5220,41
26	1620	97200	311,77	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	836,16	26,01	5308,16
27	1680	100800	317,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	836,58	26,43	5393,88
28	1740	104400	323,11	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	836,90	26,75	5459,18
29	1800	108000	328,63	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	837,37	27,22	5555,10
30	1860	111600	334,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	837,86	27,71	5655,10
31	1920	115200	339,41	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	838,26	28,11	5736,73
32	1980	118800	344,67	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	838,67	28,52	5820,41
48	2040	122400	349,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	844,87	34,72	7085,71
49	2100	126000	354,96	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	845,17	35,02	7146,94
50	2160	129600	360,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	845,40	35,25	7193,88
51	2220	133200	364,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	845,77	35,62	7269,39
52	2280	136800	369,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	846,06	35,91	7328,57
53	2340	140400	374,70	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	846,36	36,21	7389,80
54	2400	144000	379,47	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	846,59	36,44	7436,73
55	2460	147600	384,19	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	846,87	36,72	7493,88
56	2520	151200	388,84	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	847,07	36,92	7534,69
72	4320	259200	509,12	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	851,88	41,73	8516,33
73	4380	262800	512,64	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	851,97	41,82	8534,69
74	4440	266400	516,14	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	852,14	41,99	8569,39
76	4560	273600	523,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	852,90	42,75	8724,49
77	4620	277200	526,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	853,03	42,88	8751,02
78	4680	280800	529,91	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	853,16	43,01	8777,55
96	5760	345600	587,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	856,79	46,64	9518,37
98	5880	352800	593,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	856,96	46,81	9553,06
99	5940	356400	596,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	857,03	46,88	9567,35
100	6000	360000	600,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	857,04	46,89	9569,39
101	6060	363600	602,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	857,14	46,99	9589,80
102	6120	367200	605,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	857,16	47,01	9593,88
120	7200	432000	657,27	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,50	49,35	10071,43
121	7260	435600	660,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,51	49,36	10073,47
122	7320	439200	662,72	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,53	49,38	10077,55
124	7440	446400	668,13	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,53	49,38	10077,55
125	7500	450000	670,82	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,53	49,38	10077,55
126	7560	453600	673,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	859,60	49,45	10091,84
270	16200	972000	985,90	7,00	7,00	49,00	0,0049	810,15	860,33	50,18	10240,82

Evolução da massa do corpo de prova RD4. Ensaio de absorção por capilaridade.

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m ₁ (g)	(m ₁ -m ₀) (gr)	Qi (m ₁ -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	795,73	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	797,20	1,47	300,00
	3	180	13,42	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	797,45	1,72	351,02
	5	300	17,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	797,85	2,12	432,65
	10	600	24,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	798,57	2,84	579,59
	15	900	30,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	799,21	3,48	710,20
	30	1800	42,43	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	800,52	4,79	977,55
1	60	3600	60,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	801,90	6,17	1259,18
1,5	90	5400	73,48	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	803,51	7,78	1587,76
2	120	7200	84,85	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	804,90	9,17	1871,43
2,5	150	9000	94,87	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	805,40	9,67	1973,47
3	180	10800	103,92	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	805,90	10,17	2075,51
3,5	210	12600	112,25	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	806,87	11,14	2273,47
4	240	14400	120,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	807,30	11,57	2361,22
4,5	270	16200	127,28	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	808,13	12,40	2530,61
5	300	18000	134,16	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	808,60	12,87	2626,53
5,5	330	19800	140,71	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	809,19	13,46	2746,94
6	360	21600	146,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	809,55	13,82	2820,41
6,5	390	23400	152,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	810,16	14,43	2944,90
7	420	25200	158,75	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	810,60	14,87	3034,69
7,5	450	27000	164,32	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	811,03	15,30	3122,45
24	1500	90000	300,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	820,93	25,20	5142,86
25	1560	93600	305,94	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	821,38	25,65	5234,69
26	1620	97200	311,77	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	821,75	26,02	5310,20
27	1680	100800	317,49	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	822,14	26,41	5389,80
28	1740	104400	323,11	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	822,57	26,84	5477,55
29	1800	108000	328,63	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	822,91	27,18	5546,94
30	1860	111600	334,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	823,38	27,65	5642,86
31	1920	115200	339,41	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	823,75	28,02	5718,37
32	1980	118800	344,67	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	824,09	28,36	5787,76
48	2040	122400	349,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	829,99	34,26	6991,84
49	2100	126000	354,96	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	830,34	34,61	7063,27
50	2160	129600	360,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	830,59	34,86	7114,29
51	2220	133200	364,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	830,96	35,23	7189,80
52	2280	136800	369,86	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	831,28	35,55	7255,10
53	2340	140400	374,70	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	831,54	35,81	7308,16
54	2400	144000	379,47	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	831,79	36,06	7359,18
55	2460	147600	384,19	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	832,10	36,37	7422,45
56	2520	151200	388,84	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	832,28	36,55	7459,18
72	4320	259200	509,12	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	837,22	41,49	8467,35
73	4380	262800	512,64	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	837,31	41,58	8485,71
74	4440	266400	516,14	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	837,54	41,81	8532,65
76	4560	273600	523,07	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	838,37	42,64	8702,04
77	4620	277200	526,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	838,52	42,79	8732,65
78	4680	280800	529,91	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	838,70	42,97	8769,39
96	5760	345600	587,88	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,12	47,39	9671,43
98	5880	352800	593,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,43	47,70	9734,69
99	5940	356400	596,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,65	47,92	9779,59
100	6000	360000	600,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,84	48,11	9818,37
101	6060	363600	602,99	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,96	48,23	9842,86
102	6120	367200	605,97	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	843,98	48,25	9846,94
120	7200	432000	657,27	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,38	56,65	11561,22
121	7260	435600	660,00	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,40	56,67	11565,31
122	7320	439200	662,72	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,42	56,69	11569,39
124	7440	446400	668,13	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,43	56,70	11571,43
125	7500	450000	670,82	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,43	56,70	11571,43
126	7560	453600	673,50	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	852,44	56,71	11573,47
270	16200	972000	985,90	7,00	7,00	49,00	0,0049	795,73	853,63	57,90	11816,33

**ANEXO B2 – CINÉTICA DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DE
CALCÁRIOS ROYAL VERDE (RV), ROYAL VETA (RVT), ROYAL BRONCE (RB) E
ROYAL DORADO (RD) APÓS O ENSAIO DE CRISTALIZAÇÃO DE SAIS**

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RV1

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,26	0	0
	1	60	7,75	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,33	0,07	14,26
	3	180	13,42	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,44	0,18	36,66
	5	300	17,32	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,50	0,24	48,88
	10	600	24,49	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,54	0,28	57,03
	15	900	30,00	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,54	0,28	57,03
	30	1800	42,43	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	910,72	0,46	93,69
1	60	3600	60,00	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	911,02	0,76	154,80
3	180	10800	103,92	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	911,90	1,64	334,04
6	360	21600	146,97	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	912,77	2,51	511,24
24	1440	86400	293,94	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	915,12	4,86	989,89
48	2880	172800	415,69	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	919,27	9,01	1835,16
72	4320	259200	509,12	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	920,21	9,95	2026,62
120	7200	432000	657,27	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	923,61	13,35	2719,13
144	8640	518400	720,00	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	925,41	15,15	3085,76
168	10080	604800	777,69	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	926,78	16,52	3364,80
192	11520	691200	831,38	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	927,90	17,64	3592,92
216	12960	777600	881,82	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	928,82	18,56	3780,31
240	14400	864000	929,52	6,92	7,10	49,10	0,0049	910,26	928,99	18,73	3814,94
288	17280	1036800	1018,23	6,92	7,1	49,10	0,0049	910,26	929,10	18,84	3837,34

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RV2

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	883,36	0,00	0,00
	1	60	7,75	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	883,74	0,38	77,40
	3	180	13,42	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	883,76	0,40	81,47
	5	300	17,32	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	883,83	0,47	95,73
	10	600	24,49	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	883,98	0,62	126,28
	15	900	30,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	884,12	0,76	154,80
	30	1800	42,43	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	884,43	1,07	217,94
1	60	3600	60,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	884,90	1,54	313,67
3	180	10800	103,92	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	886,09	2,73	556,05
6	360	21600	146,97	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	887,28	3,92	798,43
24	1440	86400	293,94	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	891,08	7,72	1572,41
48	2880	172800	415,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	893,87	10,51	2140,68
72	4320	259200	509,12	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	896,37	13,01	2649,88
120	7200	432000	657,27	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	900,24	16,88	3438,13
144	8640	518400	720,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	901,57	18,21	3709,02
168	10080	604800	777,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	902,81	19,45	3961,59
192	11520	691200	831,38	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	903,60	20,24	4122,49
216	12960	777600	881,82	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	904,04	20,68	4212,11
240	14400	864000	929,52	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	904,29	20,93	4263,03
288	17280	1036800	1018,23	6,92	7,10	49,10	0,00491	883,36	904,33	20,97	4271,18

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RV3

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	903,70	0	0,00
	1	60	7,75	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,08	0,38	77,40
	3	180	13,42	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,13	0,43	87,58
	5	300	17,32	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,22	0,52	105,91
	10	600	24,49	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,36	0,66	134,43
	15	900	30,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,38	0,68	138,50
	30	1800	42,43	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	904,70	1	203,68
1	60	3600	60,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	905,31	1,61	327,93
3	180	10800	103,92	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	906,51	2,81	572,34
6	360	21600	146,97	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	907,86	4,16	847,31
24	1440	86400	293,94	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	911,22	7,52	1531,68
48	2880	172800	415,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	913,56	9,86	2008,29
72	4320	259200	509,12	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	915,41	11,71	2385,10
120	7200	432000	657,27	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	918,13	14,43	2939,11
144	8640	518400	720,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	919,24	15,54	3165,20
168	10080	604800	777,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	920,99	17,29	3521,64
192	11520	691200	831,38	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	921,51	17,81	3627,55
216	12960	777600	881,82	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	921,85	18,15	3696,80
264	15840	950400	974,88	6,92	7,10	49,10	0,00491	903,70	922,25	18,55	3778,27

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RV4

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	884,26	0,00	0,00
	1	60	7,75	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	884,65	0,39	79,44
	3	180	13,42	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	884,73	0,47	95,73
	5	300	17,32	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	884,91	0,65	132,39
	10	600	24,49	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	884,97	0,71	144,61
	15	900	30,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	885,04	0,78	158,87
	30	1800	42,43	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	885,24	0,98	199,61
1	60	3600	60,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	885,73	1,47	299,41
3	180	10800	103,92	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	886,98	2,72	554,01
6	360	21600	146,97	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	888,31	4,05	824,91
24	1440	86400	293,94	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	891,73	7,47	1521,49
48	2880	172800	415,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	894,14	9,88	2012,36
72	4320	259200	509,12	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	895,90	11,64	2370,84
120	7200	432000	657,27	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	898,47	14,21	2894,30
144	8640	518400	720,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	899,32	15,06	3067,43
168	10080	604800	777,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	900,98	16,72	3405,54
192	11520	691200	831,38	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	901,77	17,51	3566,45
216	12960	777600	881,82	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	902,20	17,94	3654,03
264	15840	950400	974,88	6,92	7,10	49,10	0,00491	884,26	903,01	18,75	3819,01

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RVT1

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	915,53	0	0
	1	60	7,75	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	915,72	0,19	37,43
	3	180	13,42	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	915,79	0,26	51,22
	5	300	17,32	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	915,80	0,27	53,19
	10	600	24,49	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	915,97	0,44	86,67
	15	900	30,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	916,02	0,49	96,52
	30	1800	42,43	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	916,41	0,88	173,35
1	60	3600	60,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	916,61	1,08	212,74
3	180	10800	103,92	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	917,26	1,73	340,78
6	360	21600	146,97	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	917,83	2,30	453,06
24	1440	86400	293,94	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	919,45	3,92	772,18
48	2880	172800	415,69	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	920,70	5,17	1018,41
96	5760	345600	587,88	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	924,34	8,81	1735,43
120	7200	432000	657,27	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	925,68	10,15	1999,39
144	8640	518400	720,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	926,98	11,45	2255,47
168	10080	604800	777,69	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	928,00	12,47	2456,39
192	11520	691200	831,38	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	928,93	13,40	2639,59
216	12960	777600	881,82	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	929,93	14,40	2836,57
264	15840	950400	974,88	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	930,25	14,72	2899,61
288	17280	1036800	1018,23	7,14	7,12	50,77	0,005077	915,53	930,37	14,84	2923,24

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RVT2

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,61	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,68	0,07	13,78
	3	180	13,42	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,77	0,16	31,50
	5	300	17,32	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,81	0,20	39,37
	10	600	24,49	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,87	0,26	51,18
	15	900	30,00	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,91	0,30	59,05
	30	1800	42,43	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	911,97	0,36	70,86
1	60	3600	60,00	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	912,04	0,43	84,64
3	180	10800	103,92	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	913,01	1,40	275,58
6	360	21600	146,97	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	913,75	2,14	421,25
24	1440	86400	293,94	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	916,31	4,70	925,18
48	2880	172800	415,69	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	919,19	7,58	1492,09
96	5760	345600	587,88	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	923,08	11,47	2257,83
120	7200	432000	657,27	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	925,16	13,55	2667,27
144	8640	518400	720,00	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	926,70	15,09	2970,41
168	10080	604800	777,69	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	927,70	16,09	3167,25
192	11520	691200	831,38	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	928,36	16,75	3297,17
216	12960	777600	881,82	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	928,49	16,88	3322,76
264	15840	950400	974,88	7,12	7,14	50,80	0,01	911,61	928,67	17,06	3358,19

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RVT3

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	920,72	0	0
	1 min	60	7,75	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,22	0,50	96,93
	3 min	180	13,42	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,31	0,59	114,38
	5	300	17,32	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,35	0,63	122,13
	10	600	24,49	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,56	0,84	162,84
	15	900	30,00	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,61	0,89	172,53
	30	1800	42,43	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	921,92	1,20	232,63
1	60	3600	60,00	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	922,25	1,53	296,60
3	180	10800	103,92	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	922,93	2,21	428,42
6	360	21600	146,97	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	923,57	2,85	552,49
24	1440	86400	293,94	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	925,45	4,73	916,94
48	2880	172800	415,69	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	927,01	6,29	1219,36
96	5760	345600	587,88	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	929,50	8,78	1702,06
120	7200	432000	657,27	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	930,20	9,48	1837,76
144	8640	518400	720,00	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	930,92	10,20	1977,34
168	10080	604800	777,69	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	931,49	10,77	2087,84
192	11520	691200	831,38	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	932,05	11,33	2196,40
216	12960	777600	881,82	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	932,36	11,64	2256,50
264	15840	950400	974,88	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	933,06	12,34	2392,20
288	17280	1036800	1018,23	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	933,33	12,61	2444,54
312	18720	1123200	1059,81	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	933,57	12,85	2491,06
336	20160	1209600	1099,82	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	933,88	13,16	2551,16
360	21600	1296000	1138,42	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	934,01	13,29	2576,36
384	23040	1382400	1175,76	7,12	7,25	51,58	0,005158	920,72	934,03	13,31	2580,24

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RVT4

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	869,51	0	0
	1	60	7,75	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	870,00	0,49	96,52
	3	180	13,42	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	870,16	0,65	128,04
	5	300	17,32	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	870,27	0,76	149,71
	10	600	24,49	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	870,42	0,91	179,26
	15	900	30,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	870,57	1,06	208,80
	30	1800	42,43	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	871,03	1,52	299,42
1	60	3600	60,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	871,51	2,00	393,97
3	180	10800	103,92	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	872,70	3,19	628,38
6	360	21600	146,97	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	874,04	4,53	892,34
24	1440	86400	293,94	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	878,21	8,70	1713,76
48	2880	172800	415,69	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	881,07	11,56	2277,14
96	5760	345600	587,88	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	884,25	14,74	2903,55
120	7200	432000	657,27	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	885,45	15,94	3139,93
144	8640	518400	720,00	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	886,10	16,59	3267,97
168	10080	604800	777,69	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	886,57	17,06	3360,55
192	11520	691200	831,38	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	887,07	17,56	3459,04
216	12960	777600	881,82	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	887,48	17,97	3539,80
264	15840	950400	974,88	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	888,11	18,60	3663,90
288	17280	1036800	1018,23	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	888,25	18,74	3691,48
312	18720	1123200	1059,81	7,14	7,12	50,77	0,005077	869,51	888,27	18,76	3695,42

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RB1

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	838,38	0	0
	1	60	7,75	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	838,71	0,33	68,16
	3	180	13,42	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	838,72	0,34	70,23
	5	300	17,32	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	838,75	0,37	76,42
	10	600	24,49	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	838,94	0,56	115,67
	15	900	30,00	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	839,01	0,63	130,13
	30	1800	42,43	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	839,12	0,74	152,85
1	60	3600	60,00	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	839,6	1,22	251,99
3	180	10800	103,92	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	840,18	1,80	371,79
6	360	21600	146,97	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	840,79	2,41	497,79
24	1440	86400	293,94	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	842,8	4,42	912,95
48	2880	172800	415,69	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	844,49	6,11	1262,02
96	5760	345600	587,88	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	851,65	13,27	2740,92
120	7200	432000	657,27	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	854,56	16,18	3341,98
144	8640	518400	720,00	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	854,91	16,53	3414,28
168	10080	604800	777,69	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	855,95	17,57	3629,09
192	11520	691200	831,38	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	856,54	18,16	3750,95
216	12960	777600	881,82	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	856,54	18,16	3750,95
264	15840	950400	974,88	7,13	6,80	48,41	0,004841	838,38	855,32	16,94	3498,96

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RB2

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	850,34	0	0
	1 min	60	7,75	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	851,10	0,76	151,62
	3 min	180	13,42	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	851,24	0,90	179,56
	5	300	17,32	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	851,57	1,23	245,39
	10	600	24,49	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	852,10	1,76	351,13
	15	900	30,00	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	852,46	2,12	422,95
	30	1800	42,43	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	852,83	2,49	496,77
1	60	3600	60,00	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	853,63	3,29	656,37
3	180	10800	103,92	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	856,04	5,70	1137,18
6	360	21600	146,97	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	858,23	7,89	1574,10
24	1440	86400	293,94	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	864,95	14,61	2914,78
48	2880	172800	415,69	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	870,80	20,46	4081,89
96	5760	345600	587,88	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	878,02	27,68	5522,32
120	7200	432000	657,27	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	879,84	29,50	5885,42
144	8640	518400	720,00	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	880,21	29,87	5959,23
168	10080	604800	777,69	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	880,55	30,21	6027,06
192	11520	691200	831,38	7,13	7,03	50,12	0,0050	850,34	880,56	30,22	6029,06

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RB3

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-mo/m ²)
	0	0	0	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	842,79	0	0
	1 min	60	7,75	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	843,66	0,87	173,69
	3 min	180	13,42	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	843,79	1,00	199,64
	5	300	17,32	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	844,14	1,35	269,52
	10	600	24,49	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	844,30	1,51	301,46
	15	900	30,00	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	844,46	1,67	333,41
	30	1800	42,43	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	844,88	2,09	417,26
1	60	3600	60,00	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	845,20	2,41	481,14
3	180	10800	103,92	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	846,22	3,43	684,78
6	360	21600	146,97	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	847,32	4,53	904,39
24	1440	86400	293,94	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	850,81	8,02	1601,14
48	2880	172800	415,69	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	855,09	12,30	2455,62
96	5760	345600	587,88	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	859,97	17,18	3429,88
120	7200	432000	657,27	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	861,71	18,92	3777,26
144	8640	518400	720,00	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	862,62	19,83	3958,94
168	10080	604800	777,69	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	863,88	21,09	4210,49
192	11520	691200	831,38	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	864,37	21,58	4308,31
216	12960	777600	881,82	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	864,51	21,72	4336,26
264	15840	950400	974,88	7,12	7,04	50,09	0,005009	842,79	864,78	21,99	4390,17

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RD1

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (mi-m0/m2)
	0	0	0	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	800,78	0,00	0,00
	1	60	7,75	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	800,88	0,10	19,53
	3	180	13,42	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	801,08	0,30	58,60
	5	300	17,32	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	801,15	0,37	72,27
	10	600	24,49	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	801,66	0,88	171,90
	15	900	30,00	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	801,92	1,14	222,68
	30	1800	42,43	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	802,91	2,13	416,07
1	60	3600	60,00	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	804,46	3,68	718,84
3	180	10800	103,92	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	807,26	6,48	1265,78
6	360	21600	146,97	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	810,87	10,09	1970,94
24	1440	86400	293,94	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	822,55	21,77	4252,47
48	2880	172800	415,69	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	831,00	30,22	5903,06
72	4320	259200	509,12	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	837,27	36,49	7127,82
120	7200	432000	657,27	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	844,18	43,40	8477,59
144	8640	518400	720,00	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	844,19	43,41	8479,54
168	10080	604800	777,69	7,17	7,14	51,19	0,0051	800,78	844,19	43,41	8479,54

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RD2

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ^{0,5})	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	m ₀ (g)	m _i (g)	(m _i -m ₀) (gr)	Q _i (m _i -m ₀ /A ²)
	0	0	0	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	790,81	0	0
	1	60	7,75	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	791,06	0,25	51,57
	3	180	13,42	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	791,19	0,38	78,39
	5	300	17,32	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	791,36	0,55	113,46
	10	600	24,49	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	791,96	1,15	237,24
	15	900	30,00	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	792,38	1,57	323,89
	30	1800	42,43	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	793,54	2,73	563,19
1	60	3600	60,00	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	795,21	4,40	907,71
3	180	10800	103,92	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	799,36	8,55	1763,84
6	360	21600	146,97	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	805,97	15,16	3127,47
24	1440	86400	293,94	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	831,74	40,93	8443,76
48	2880	172800	415,69	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	833,73	42,92	8854,30
72	4320	259200	509,12	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	833,74	42,93	8856,36
120	7200	432000	657,27	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	833,75	42,94	8858,42
144	8640	518400	720,00	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	833,76	42,95	8860,48
168	10080	604800	777,69	7,015	6,91	48,47	0,004847	790,81	833,74	42,93	8856,36

Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RD3

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	785,25	0	0
	1	60	7,75	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	785,9	0,65	134,57
	3	180	13,42	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	786,42	1,17	242,22
	5	300	17,32	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	786,82	1,57	325,03
	10	600	24,49	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	787,42	2,17	449,25
	15	900	30,00	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	788,02	2,77	573,47
	30	1800	42,43	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	789,53	4,28	886,08
1	60	3600	60,00	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	791,39	6,14	1271,16
3	180	10800	103,92	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	795,81	10,56	2186,22
6	360	21600	146,97	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	800,15	14,9	3084,73
24	1440	86400	293,94	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	811,5	26,25	5434,50
48	2880	172800	415,69	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	821,21	35,96	7444,75
72	4320	259200	509,12	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	822,42	37,17	7695,25
120	7200	432000	657,27	6,95	6,95	48,30	0,00483	785,25	822,45	37,2	7701,46
144	8640	518400	720,00	6,95	6,95	48,3025	0,00483	785,25	822,46	37,21	7703,54

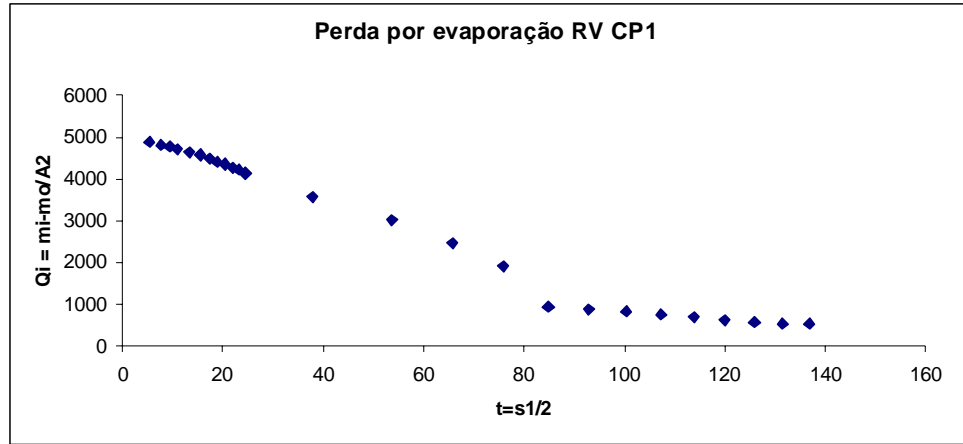
Absorção capilar após o ensaio de cristalização de sais. Corpo de prova RD4

TEMPO (horas)	TEMPO (min)	TEMPO (seg)	TEMPO (s ⁰⁵)	L1 (cm)	L2 (cm)	A (cm ²)	A (m ²)	mo (g)	mi (g)	(mi-mo) (gr)	Qi (mi-m0/m2)
	0	0	0	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	759,79	0	0
	1	60	7,75	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	760,22	0,43	87,58
	3	180	13,42	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	760,66	0,87	177,20
	5	300	17,32	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	761,1	1,31	266,82
	10	600	24,49	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	761,98	2,19	446,06
	15	900	30,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	762,72	2,93	596,78
	30	1800	42,43	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	764,32	4,53	922,67
1	60	3600	60,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	766,85	7,06	1437,98
3	180	10800	103,92	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	772,33	12,54	2554,15
6	360	21600	146,97	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	777,26	17,47	3558,30
24	1440	86400	293,94	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	788,46	28,67	5839,52
48	2880	172800	415,69	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	795,69	35,90	7312,13
72	4320	259200	509,12	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	798,45	38,66	7874,29
120	7200	432000	657,27	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	798,46	38,67	7876,33
144	8640	518400	720,00	6,92	7,10	49,10	0,00491	759,79	798,46	38,67	7876,33

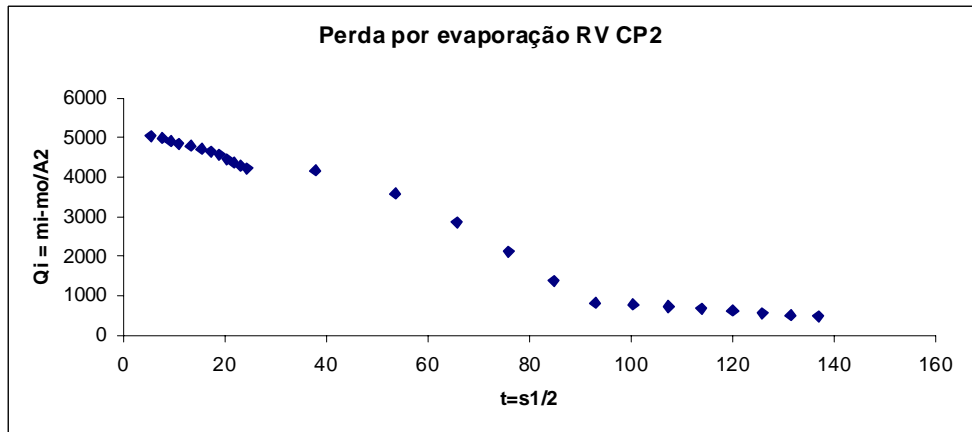
ANEXO C – EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO APÓS A SATURAÇÃO POR CAPILARIDADE DOS CALCÁRIOS INALTERADOS ROYAL VERDE (RV), ROYAL VETA (RVT), ROYAL BRONCE (RB) E ROYAL DORADO (RD)

CALCÁRIO ROYAL VERDE

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
5,48	4878,57
7,75	4807,14
9,49	4778,57
10,95	4714,29
13,42	4642,86
15,49	4578,57
17,32	4500,00
18,97	4407,14
20,49	4357,14
21,91	4278,57
23,24	4214,29
24,49	4135,71
37,95	3578,57
53,67	3021,43
65,73	2464,29
75,89	1907,14
84,85	935,71
92,95	882,14
100,40	828,57
107,33	762,50
113,84	696,43
120,00	630,36
125,86	564,29
131,45	535,71
136,82	528,57

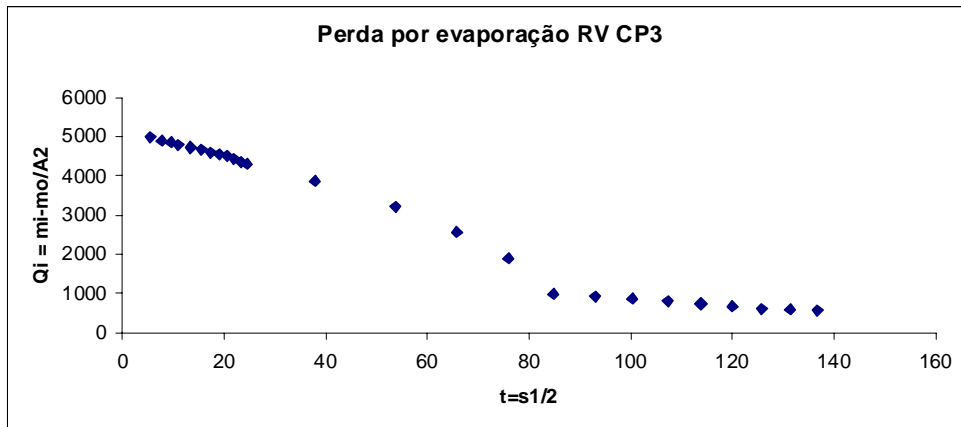


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
5,48	5042,86
7,75	4978,57
9,49	4907,14
10,95	4842,86
13,42	4792,86
15,49	4707,14
17,32	4642,86
18,97	4564,29
20,49	4450,00
21,91	4364,29
23,24	4278,57
24,49	4214,29
37,95	4157,14
53,67	3585,71
65,73	2850,00
75,89	2114,29
84,85	1371,43
92,95	814,29
100,40	767,86
107,33	721,43
113,84	665,71
120,00	610,00
125,86	554,29
131,45	500,00
136,82	478,57

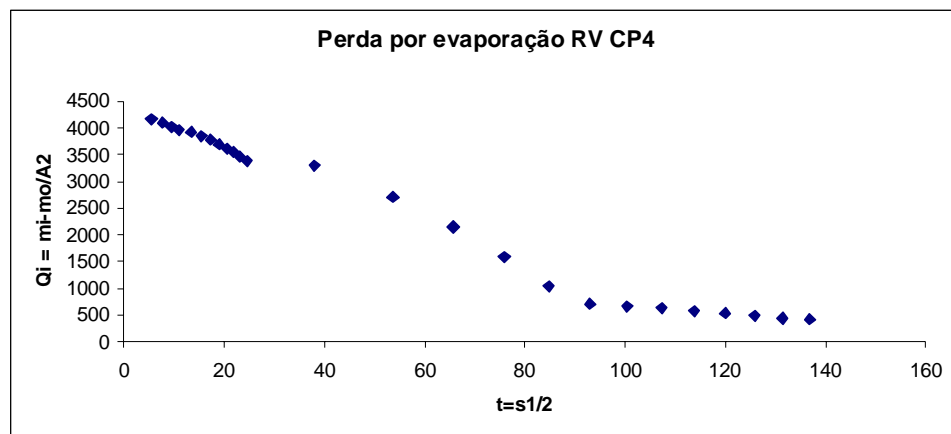


CALCÁRIO ROYAL VERDE

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-m0/A2)
5,48	5000,00
7,75	4900,00
9,49	4857,14
10,95	4800,00
13,42	4728,57
15,49	4671,43
17,32	4600,00
18,97	4557,14
20,49	4514,29
21,91	4435,71
23,24	4357,14
24,49	4314,29
37,95	3878,57
53,67	3221,43
65,73	2564,29
75,89	1900,00
84,85	985,71
92,95	928,57
100,40	871,43
107,33	807,14
113,84	742,86
120,00	678,57
125,86	614,29
131,45	600,00
136,82	571,43

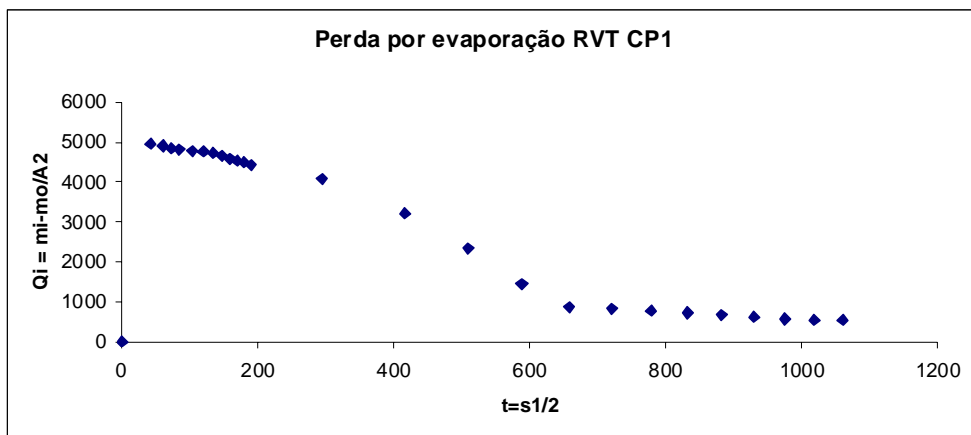


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-m0/A2)
5,48	4171,43
7,75	4100,00
9,49	4028,57
10,95	3971,43
13,42	3921,43
15,49	3850,00
17,32	3785,71
18,97	3692,86
20,49	3621,43
21,91	3550,00
23,24	3457,14
24,49	3385,71
37,95	3300,00
53,67	2707,14
65,73	2150,00
75,89	1592,86
84,85	1042,86
92,95	707,14
100,40	671,43
107,33	635,71
113,84	587,14
120,00	538,57
125,86	490,00
131,45	442,86
136,82	421,43

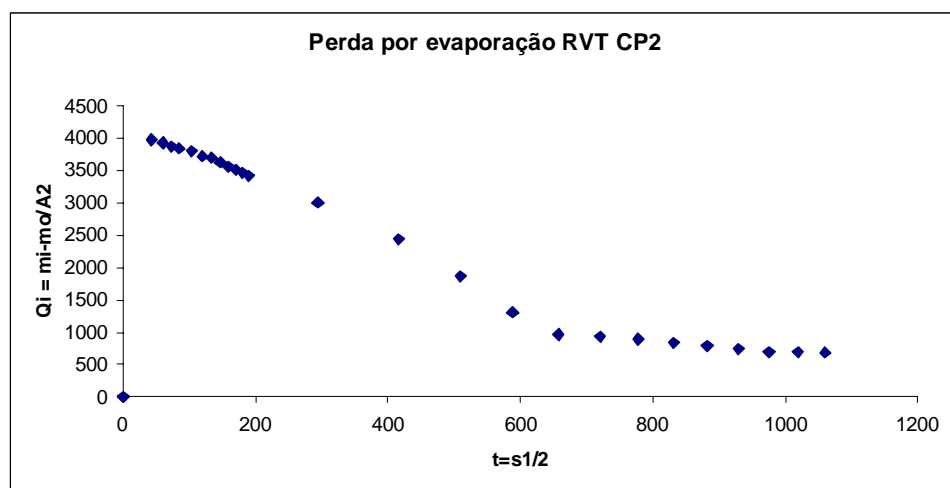


CALCÁRIO ROYAL VETA

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0	0
42,43	4950,00
60,00	4907,14
73,48	4850,00
84,85	4821,43
103,92	4785,71
120,00	4757,14
134,16	4721,43
146,97	4664,29
158,75	4592,86
169,71	4535,71
180,00	4492,86
189,74	4435,71
293,94	4092,86
415,69	3214,29
509,12	2335,71
587,88	1457,14
657,27	871,43
720,00	825,00
777,69	778,57
831,38	726,43
881,82	674,29
929,52	622,14
974,88	571,43
1018,23	542,86
1059,81	542,86

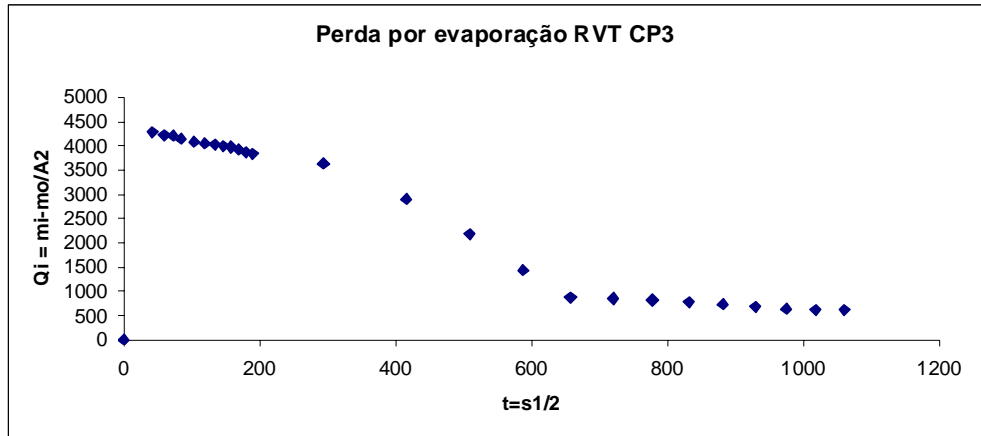


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0,00	0,00
42,43	3978,57
60,00	3928,57
73,48	3878,57
84,85	3842,86
103,92	3800,00
120,00	3721,43
134,16	3692,86
146,97	3628,57
158,75	3564,29
169,71	3514,29
180,00	3471,43
189,74	3414,29
293,94	3000,00
415,69	2435,71
509,12	1871,43
587,88	1307,14
657,27	964,29
720,00	928,57
777,69	892,86
831,38	842,86
881,82	792,86
929,52	742,86
974,88	692,86
1018,23	692,86
1059,81	685,71

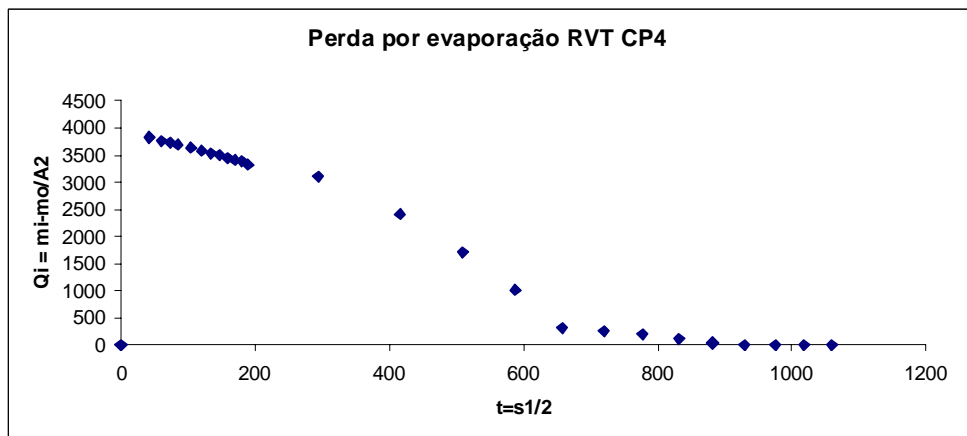


CALCÁRIO ROYAL VETA

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-m0/A2)
0,00	0,00
42,43	4292,86
60,00	4221,43
73,48	4214,29
84,85	4150,00
103,92	4085,71
120,00	4057,14
134,16	4035,71
146,97	3992,86
158,75	3978,57
169,71	3921,43
180,00	3871,43
189,74	3842,86
293,94	3635,71
415,69	2907,14
509,12	2178,57
587,88	1442,86
657,27	885,71
720,00	853,57
777,69	821,43
831,38	776,43
881,82	731,43
929,52	686,43
974,88	642,86
1018,23	628,57
1059,81	628,57

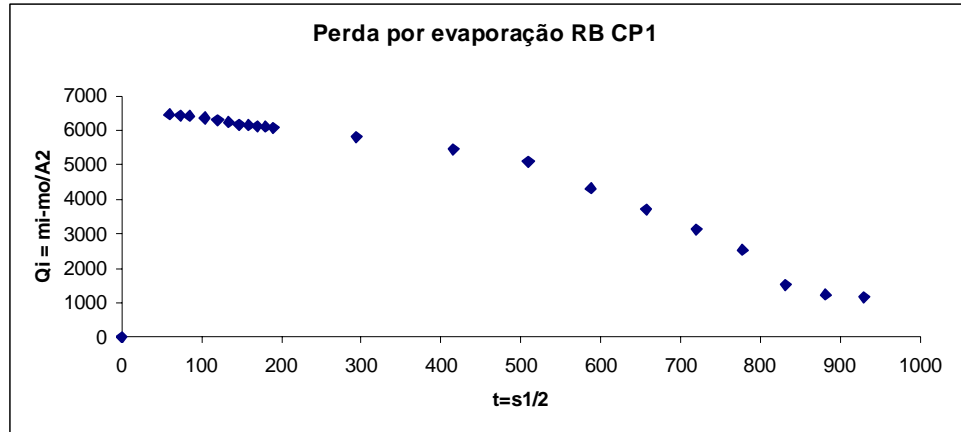


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-m0/A2)
0,00	0,00
42,43	3828,57
60,00	3764,29
73,48	3735,71
84,85	3700,00
103,92	3642,86
120,00	3585,71
134,16	3542,86
146,97	3514,29
158,75	3450,00
169,71	3407,14
180,00	3392,86
189,74	3328,57
293,94	3114,29
415,69	2414,29
509,12	1714,29
587,88	1014,29
657,27	321,43
720,00	260,71
777,69	200,00
831,38	119,64
881,82	39,29
929,52	7,14
974,88	0,00

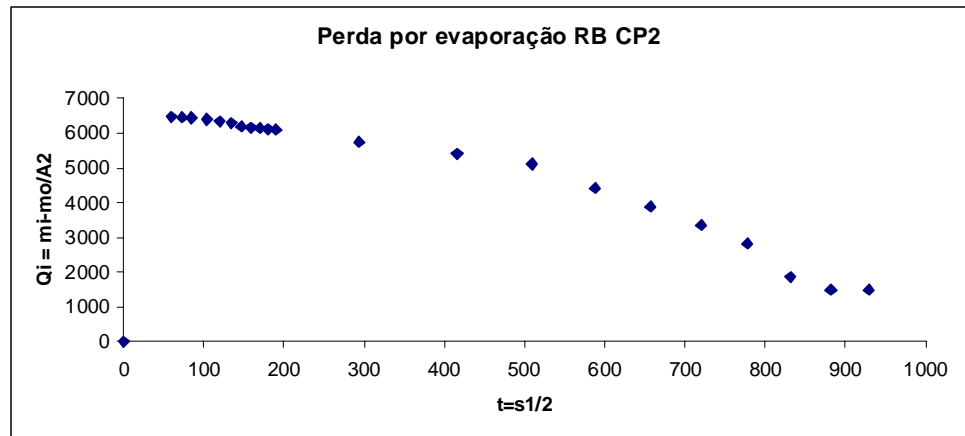


CALCÁRIO ROYAL BRONCE

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
0,00	0,00
60,00	6457,14
73,48	6435,71
84,85	6414,29
103,92	6357,14
120,00	6300,00
134,16	6235,71
146,97	6157,14
158,75	6137,14
169,71	6117,14
180,00	6097,14
189,74	6077,14
293,94	5807,14
415,69	5442,86
509,12	5085,71
587,88	4307,14
657,27	3714,29
720,00	3121,43
777,69	2535,71
831,38	1521,43
881,82	1235,71
929,52	1171,43

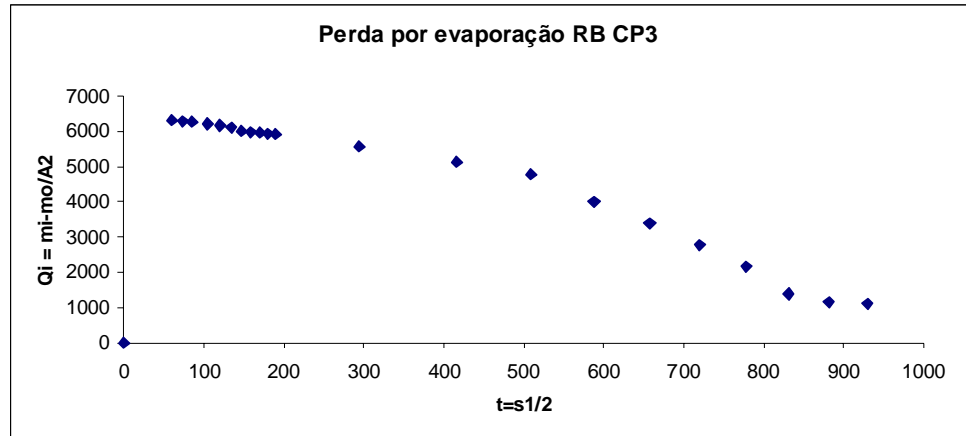


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
0,00	0,00
60,00	6485,71
73,48	6464,29
84,85	6442,86
103,92	6400,00
120,00	6342,86
134,16	6292,86
146,97	6200,00
158,75	6175,00
169,71	6150,00
180,00	6125,00
189,74	6100,00
293,94	5750,00
415,69	5407,14
509,12	5114,29
587,88	4421,43
657,27	3885,71
720,00	3350,00
777,69	2821,43
831,38	1857,14
881,82	1492,86
929,52	1492,86

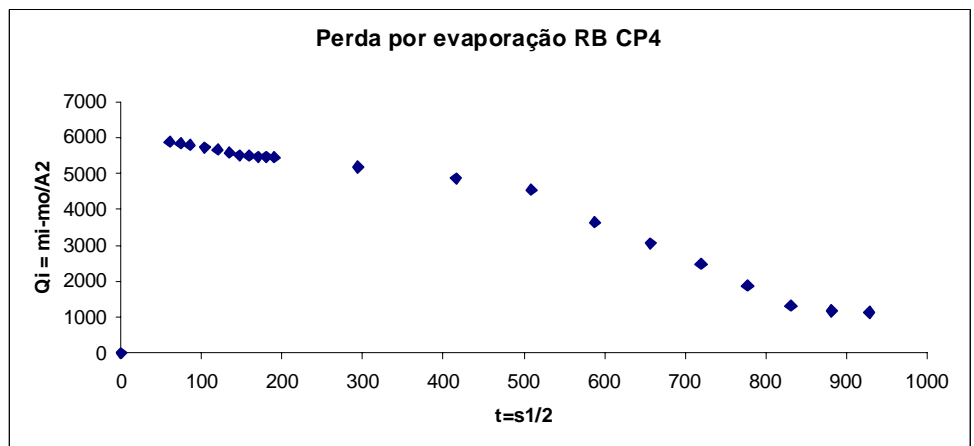


CALCÁRIO ROYAL BRONCE

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0,00	0,00
60,00	6307,14
73,48	6285,71
84,85	6264,29
103,92	6214,29
120,00	6171,43
134,16	6114,29
146,97	6014,29
158,75	5989,29
169,71	5964,29
180,00	5939,29
189,74	5914,29
293,94	5564,29
415,69	5135,71
509,12	4778,57
587,88	4014,29
657,27	3392,86
720,00	2771,43
777,69	2157,14
831,38	1385,71
881,82	1164,29
929,52	1107,14

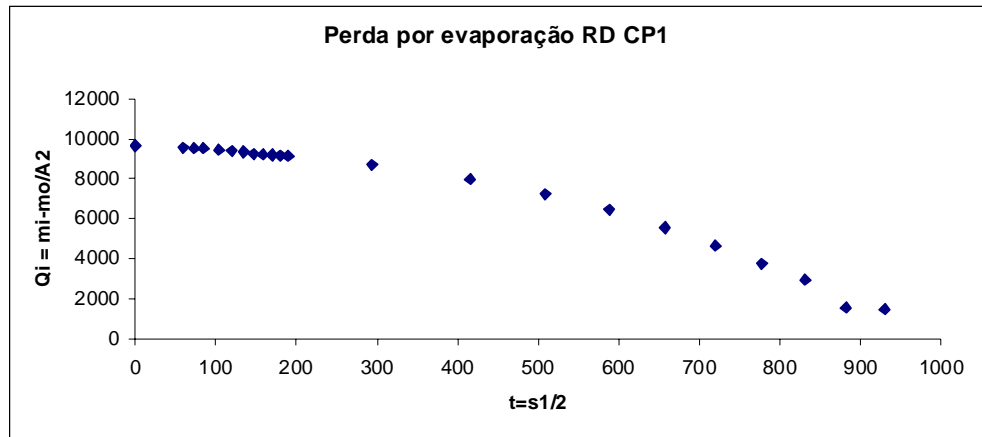


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0,00	0,00
60,00	5878,57
73,48	5839,29
84,85	5800,00
103,92	5728,57
120,00	5664,29
134,16	5585,71
146,97	5514,29
158,75	5495,71
169,71	5477,14
180,00	5458,57
189,74	5440,00
293,94	5178,57
415,69	4871,43
509,12	4542,86
587,88	3650,00
657,27	3064,29
720,00	2478,57
777,69	1885,71
831,38	1321,43
881,82	1178,57
929,52	1135,71

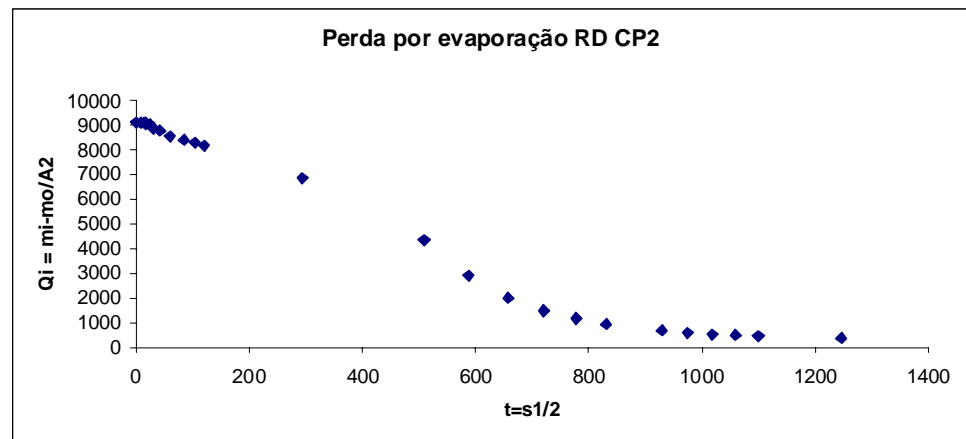


CALCÁRIO ROYAL DORADO

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0,00	9650,00
60,00	9550,00
73,48	9528,57
84,85	9507,14
103,92	9450,00
120,00	9392,86
134,16	9342,86
146,97	9257,14
158,75	9225,71
169,71	9194,29
180,00	9162,86
189,74	9131,43
293,94	8685,71
415,69	7985,71
509,12	7235,71
587,88	6457,14
657,27	5550,00
720,00	4642,86
777,69	3728,57
831,38	2928,57
881,82	1542,86
929,52	1450,00

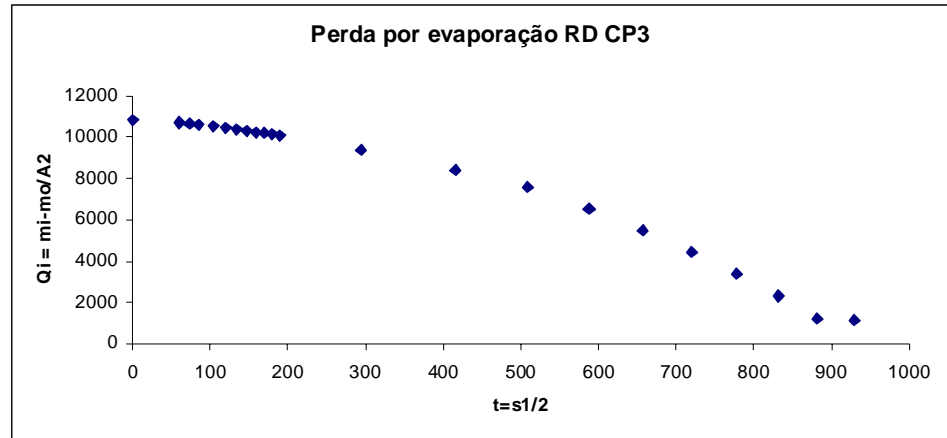


TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mo/A2)
0,00	9102,04
7,75	9097,96
13,42	9083,67
17,32	9065,31
24,49	9012,24
30,00	8879,59
42,43	8769,39
60,00	8551,02
84,85	8393,88
103,92	8302,04
120,00	8169,39
293,94	6848,98
509,12	4355,10
587,88	2912,24
657,27	2008,16
720,00	1483,67
777,69	1165,31
831,38	928,57
929,52	669,39
974,88	585,71
1018,23	530,61
1059,81	483,67
1099,82	444,90
1247,08	373,47
1314,53	0

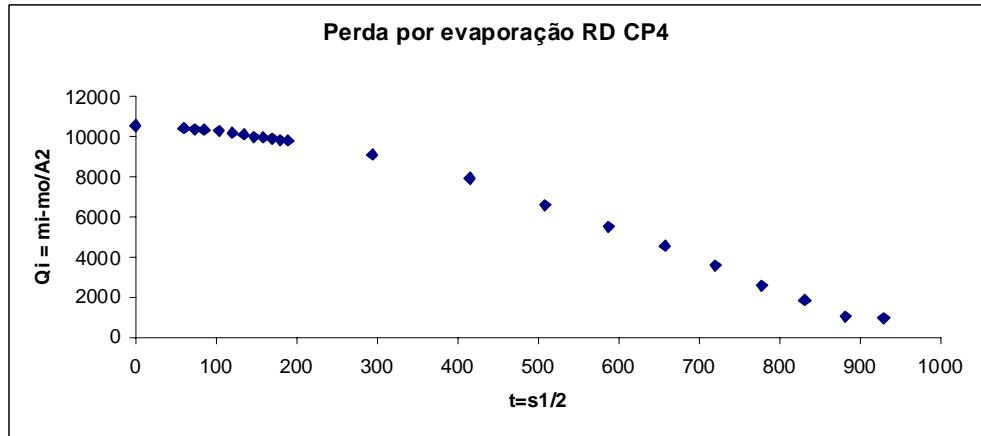


CALCÁRIO ROYAL DORADO

TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
0,00	10835,71
60,00	10707,14
73,48	10660,71
84,85	10614,29
103,92	10542,86
120,00	10464,29
134,16	10378,57
146,97	10300,00
158,75	10248,57
169,71	10197,14
180,00	10145,71
189,74	10094,29
293,94	9378,57
415,69	8392,86
509,12	7564,29
587,88	6535,71
657,27	5478,57
720,00	4421,43
777,69	3371,43
831,38	2314,29
881,82	1207,14
929,52	1128,57



TEMPO (s ^{0,5})	Qi (mi-mol/A2)
0,00	10564,29
60,00	10435,71
73,48	10400,00
84,85	10364,29
103,92	10300,00
120,00	10200,00
134,16	10114,29
146,97	10014,29
158,75	9963,57
169,71	9912,86
180,00	9862,14
189,74	9811,43
293,94	9107,14
415,69	7942,86
509,12	6628,57
587,88	5542,86
657,27	4571,43
720,00	3600,00
777,69	2628,57
831,38	1892,86
881,82	1071,43
929,52	1000,00



ANEXO D – PERDA DE MASSA NORMALIZADA DOS CALCÁRIOS ROYAL VERDE (RV), ROYAL VETA (RVT), ROYAL BRONCE (RB) E ROYAL DORADO (RD) DURANTE OS QUINZE CICLOS DO ENSAIO DE CRISTALIZAÇÃO DE SAIS

CALCÁRIO	Royal Dorado				Royal Verde				Royal Bronze			Royal Veta			
	CORPO DE PROVA	RD1	RD2	RD3	RD4	RV1	RV2	RV3	RV4	RB1	RB2	RB3	RVT1	RVT2	RVT3
MASSA SECA	800,78	790,81	785,25	759,79	910,26	883,36	903,7	884,26	838,38	850,34	842,79	915,53	911,61	920,72	869,51
MASSA SATUR CAPILARIDADE	843,49	832,91	822,35	798,35	929,10	904,33	922,25	903,09	855,32	880,55	864,78	930,36	928,67	933,88	888,25
MASSA INICIAL	843,49	832,91	822,35	798,35	929,10	904,33	922,25	903,09	855,32	880,55	864,78	930,36	928,67	933,88	888,25
MASSA (1 MIN)	843,13	832,79	822,3	798,25	929,08	904,27	922,07	903	854,33	880,36	864,67	930,28	928,18	933,84	888,2
MASSA (3 MIN)	842,88	832,65	822,18	798,15	929,02	904,17	921,91	902,91	854,2	880,31	864,54	930,14	928,09	933,73	888,11
MASSA (5 MIN)	842,68	832,49	822,04	798,03	928,85	904,06	921,83	902,84	854,04	880,24	864,34	930,11	927,94	933,61	887,97
MASSA (10 MIN)	842,37	832,25	821,73	797,77	928,69	903,92	921,64	902,63	853,96	880,12	864,21	929,9	927,78	933,44	887,88
MASSA (15 MIN)	842,11	831,99	821,76	797,54	928,56	903,79	921,48	902,59	853,8	879,93	864,05	929,79	927,56	933,28	887,77
MASSA (30 MIN)	841,44	831,34	820,89	796,99	928,14	903,44	921,11	902,23	853,54	879,63	863,72	929,4	927,3	932,95	887,32
MASSA (1 H)	840,06	829,89	819,75	795,85	927,52	902,92	920,51	901,67	852,96	879,05	863,15	928,64	926,72	932,52	886,79
MASSA (2H)	837,73	827,73	817,64	793,88	926,43	902,03	919,41	900,46	851,93		862,07	927,31	925,67	932,02	885,68
MASSA (3H)	835,94	826,22	815,64	792,07	925,57	901,22	918,69	899,97	849,91	876,52	860,03	926,54	923,62	931,46	885,21
MASSA (4H)								899,26		875,58		925,60		931,01	884,62
MASSA (5H)					923,80	899,39	916,87	898,60	848,25	874,74	858,46	924,62	922,22	930,65	884,01
MASSA (6H)					923,10	898,60	916,15	897,90	847,02	873,99	857,39	923,78	921,36	930,34	883,34
MASSA (24H)	818,41	808,11	798,01	775,09	920,09	894,63	912,92	893,89	842,22	868,25	852,34	920,05	917,82	927,97	879,50
MASSA 48H	811,75	800,86	791,85	768,95	918,55	892,70	911,27	891,66	842,19		850,00	918,09	916,24		877,01
MASSA (3 DIAS) 72H	808,24	797,81	789,36	766,10	917,47	891,39	910,08	890,63	842,16	859,82	846,11	917,30	911,95		875,91
MASSA (4 DIAS) 96H	801,32	792,91	788,00	764,39	916,79	890,62	909,34		839,96	858,03	845,25		911,31	925,23	
MASSA (5 DIAS) 120H														924,80	
MASSA (6 DIAS) 144H	798,48	790,54	786,37	762,31	915,70	889,60	908,42	888,70	838,51	856,81	844,22	915,63	910,54	924,42	872,41
MASSA (7 DIAS) 168H	797,66	789,60	785,84	761,55	914,61	888,58	907,50	888,31	837,67	855,40	843,19	915,31	909,77	924,15	871,87
MASSA (8 DIAS) 192H	796,81	788,75	785,27	760,77				887,90		854,78		915,01		923,92	871,49
MASSA (9 DIAS) 216H	796,02	787,99	784,77	760,09				887,60				914,77			871,16
MASSA (10 DIAS) 216H	795,40	787,36	784,34	759,38	915,22	888,89	907,78	887,34	835,61		843,25	914,36	909,86		870,85
MASSA (11 DIAS) 264 HORAS					914,88	888,45	907,42		835,19	853,01	842,84		909,53	923,47	
MASSA (12 DIAS) 288 HORAS					914,49	888,10	907,07		834,78	852,64	842,47		909,22		
MASSA (13 DIAS) 312 HORAS	793,95	786,08	783,48	759,38	914,22	887,82	906,81	886,75	834,49	852,26	842,17	914,05	908,99	923,05	870,30
MASSA (14 DIAS) 336 HORAS	793,51	785,71	783,21	757,70	913,98	887,55	906,58		834,23	851,92	841,92		908,78	922,88	
MASSA (15 DIAS) 360 HORAS	793,03	785,40	782,96	757,31				886,27		851,67		913,64		922,73	869,79
MASSA (16 DIAS) 384 HORAS	792,63	785,15	782,76	757,03				886,06				913,48		922,69	869,56
MASSA (17 DIAS) 408 HORAS	792,32	784,86	782,58	756,79	913,42	887,02	906,09	885,93	833,83		841,53	913,35	908,41		869,36
MASSA (18 DIAS) 432 HORAS								885,73		851,16		913,35			869,25
MASSA (19 DIAS) 456 HORAS					912,91	886,48	905,66		833,31		841,01		907,95	922,61	
MASSA (20 DIAS) 480 HORAS	791,71	784,45	782,26	756,33	912,71	886,29	905,48		833,10	850,61	840,81		907,78		
MASSA (21 DIAS) 504 HORAS					912,50	886,06	905,30	885,44	832,92	850,40	840,63	913,30	907,57	922,44	869,03
MASSA (22 DIAS) 528 HORAS	791,06	783,93	781,85	755,79	912,25	885,95	905,22		832,92	850,19	840,62		907,55		
MASSA (23 DIAS) 552 HORAS	790,78	783,68	781,69	755,56				885,23		850,16		913,21			868,80
MASSA (24 DIAS) 576 HORAS	790,48	783,45	781,54	755,34											
MASSA (25 DIAS) 600 HORAS	790,32	783,43	781,44	755,27	911,96	885,69	904,99		832,88		840,54		907,38	922,00	
MASSA (26 DIAS) 624 HORAS										850,04					
MASSA (27 DIAS) 648 HORAS					911,70	885,41	904,79	884,68	832,74		840,31	912,83	907,18		868,22

MASSA NORMALIZADA

CALCÁRIO RV

CP	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	ciclo 6	ciclo 7	ciclo 8	ciclo 9	ciclo 10	ciclo 11	ciclo 12	ciclo 13	ciclo 14	ciclo 15
7	1,010	1,017	1,024	1,025	1,028	1,028	1,023	1,017	1,006	1,000	0,994	0,974	0,951	0,939	0,932
8	1,007	1,010	1,013	1,014	1,016	1,015	1,007	1,006	1,001	0,997	0,993	0,988	0,973	0,966	0,957
9	1,015	1,015	1,024	1,025	1,029	1,027	1,005	1,002	0,993	0,989	0,983	0,976	0,957	0,934	0,918
10	1,013	1,017	1,022	1,025	1,030	1,030	1,021	1,018	1,011	1,006	1,002	0,996	0,985	0,977	0,972
11	1,009	1,012	1,017	1,021	1,026	1,028	1,022	1,020	1,014	1,009	1,004	1,000	0,991	0,985	0,979
12	1,003	1,004	1,012	1,017	1,022	1,021	1,014	1,012	1,003	1,002	0,996	0,987	0,977	0,969	0,968
13	1,015	1,017	1,030	1,026	1,023	1,017	1,003	0,998	0,991	0,983	0,974	0,966	0,947	0,937	0,927
Média	1,010	1,013	1,020	1,022	1,025	1,024	1,013	1,010	1,003	0,998	0,992	0,984	0,969	0,958	0,950

CALCÁRIO RVT

CP	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	ciclo 6	ciclo 7	ciclo 8	ciclo 9	ciclo 10	ciclo 11	ciclo 12	ciclo 13	ciclo 14	ciclo 15
7	1,001	1,002	1,002	1,002	1,001	1,001	1,001	1,000	0,998	0,997	0,996	0,994	0,992	0,990	0,988
8	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,998	0,997	0,995	0,994
9	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000	0,998	0,997	0,996	0,995	0,994	0,992
10	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996	0,994	0,992
11	1,000	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,996
13	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,996	0,994	0,991	0,989
14	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000	1,001	1,001	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,996	0,995
Média	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,997	0,996	0,994	0,992

CALCÁRIO RB

CP	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	ciclo 6	ciclo 7	ciclo 8	ciclo 9	ciclo 10	ciclo 11	ciclo 12	ciclo 13	ciclo 14	ciclo 15
7	1,001	1,001	1,002	1,001	1,001	1,002	1,002	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,997	0,996	0,993
8	1,001	1,002	1,003	1,002	1,000	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,997	0,995	0,992	0,988	0,983
9	1,003	1,002	1,004	1,003	1,002	1,003	1,003	1,002	1,002	1,000	1,000	1,001	0,998	0,996	0,993
10	1,002	1,002	1,004	1,003	1,003	1,004	1,003	1,003	1,002	1,001	1,000	1,000	0,999	0,996	0,994
11	1,001	1,000	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,998
12	1,001	1,000	1,002	1,001	1,000	1,001	1,001	1,000	0,999	0,999	0,998	0,999	0,997	0,995	0,994
13	1,000	1,001	1,001	1,000	0,999	1,001	1,001	1,000	0,999	0,998	0,997	0,998	0,993	0,986	0,982
14	1,001	1,002	1,003	1,003	1,002	1,003	1,003	1,002	1,001	0,998	0,997	0,995	0,992	0,987	0,983
Média	1,001	1,001	1,003	1,002	1,001	1,002	1,002	1,001	1,000	0,999	0,999	0,998	0,996	0,993	0,990

CALCÁRIO RD

CP	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	ciclo 6	ciclo 7	ciclo 8	ciclo 9	ciclo 10	ciclo 11	ciclo 12	ciclo 13	ciclo 14	ciclo 15
3	1,010	1,017	1,024	1,025	1,028	1,028	1,023	1,017	1,006	1,000	0,994	0,974	0,951	0,939	0,932
4	1,007	1,010	1,013	1,014	1,016	1,015	1,007	1,006	1,001	0,997	0,993	0,988	0,973	0,966	0,957
5	1,015	1,015	1,024	1,025	1,029	1,027	1,005	1,002	0,993	0,989	0,983	0,976	0,957	0,934	0,918
8	1,013	1,017	1,022	1,025	1,030	1,030	1,021	1,018	1,011	1,006	1,002	0,996	0,985	0,977	0,972
9	1,009	1,012	1,017	1,021	1,026	1,028	1,022	1,020	1,014	1,009	1,004	1,000	0,991	0,985	0,979
12	1,003	1,004	1,012	1,017	1,022	1,021	1,014	1,012	1,003	1,002	0,996	0,987	0,977	0,969	0,968
14	1,015	1,017	1,030	1,026	1,023	1,017	1,003	0,998	0,991	0,983	0,974	0,966	0,947	0,937	0,927
Média	1,010	1,013	1,020	1,022	1,025	1,024	1,013	1,010	1,003	0,998	0,992	0,984	0,969	0,958	0,950

CURRICULUM VITAE

Javier Eduardo Becerra Becerra, filho de Feliciano Becerra Martínez e María Cornelia Becerra, nasceu em Duitama, Boyacá, na República da Colômbia, no dia 08 de agosto de 1968. Graduou-se como Geólogo pela Universidade Nacional da Colômbia em Bogotá, em maio de 1996. Trabalhou como geólogo contratista na Unidade Operativa do “Instituto Colombiano de Investigaciones en Geología y Minería” (INGEOMINAS), na área de avaliação de riscos geológicos, entre fevereiro e dezembro de 1996. Em janeiro de 1997 ingressou à subdireção de Recursos do Subsolo do mesmo Instituto para trabalhar no Projeto de Exploração de Carvão do Catatumbo, em labores de mapeamento geológico, levantamento de colunas estratigráficas, interpretação de registros geofísicos, cálculo de recursos e reservas e elaboração de relatórios de pesquisa. Em junho do mesmo ano foi nomeado por concurso público de méritos como técnico científico da mesma subdireção para trabalhar nos projetos de pesquisa mineral. Em 1998 e 1999 trabalhou nos projetos de pesquisa Catatumbo e El Hoyo-Limoncito, fazendo a avaliação geológica, econômica e tecnológica das jazidas de carvão para as construções das Centrais Hidroelétricas de Termotasajero y Termopacífico. Desde setembro de 1999 trabalhou no projeto de Anomalias Geoquímicas para Ouro do Sistema de Falhas de Cauca-Romeral, que finalizou em junho de 2000. Entre junho de 2000 e julho de 2001 trabalhou no primeiro projeto de pesquisa em rochas ornamentais realizado na Colômbia, Pesquisa geológica para materiais lapidários na Sierra Nevada de Santa Marta. Recebeu uma felicitação com cópia ao currículo vitae pela sua coordenação logística e técnica do Projeto Hoyo-Limoncito. Recebeu o título de Mestre do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com a dissertação intitulada Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental: Procedimentos analíticos para sua avaliação, com calificação aprovado sem correções. Em março de 2005 deu início a seu curso de Doutorado, finalizado em março de 2009. Entre os anos 2006 e 2007 realizou um estágio de pesquisa no DICMA da Universidade de Bologna (Itália). Em 2008 participou no II Congresso Internacional de Rochas Ornamentais realizado na cidade de Carrara, apresentando resultados preliminares da sua pesquisa de doutorado. Tem participado como palestrante em vários eventos nacionais e internacionais e tem feito várias publicações em anais de eventos e em revistas científicas como Geonomos (UFMG- Brasil), Boletín de Ciencias de la Tierra (Universidad Nacional de Colômbia) e Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo (Universidad Pedagógica e Tecnológica de Colômbia, UPTC). É membro do comitê científico da Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo (uptc). É autor de dois capítulos do livro F.A.R.O Formazione Avanzata nel Settore delle Rocce Ornamentali e delle Geolaborazioni.