

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA  
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS DOS GRANITOS E LIMESTONES DO  
CEARÁ UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**LUIZ RONALDO LISBOA DE MELO**

**Campina Grande - PB**

Outubro/2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS**

**Propriedades e Microestruturas dos Granitos e Limestones do Ceará  
Utilizados como Revestimentos na Construção Civil**

**Luiz Ronaldo Lisboa de Melo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento  
as exigências para obtenção do título de Doutor em  
Ciência e Engenharia de Materiais.

**Orientador:** Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

**Co-Orientador:** Prof.Dr. Romualdo Rodrigues Menezes

**Agência Financiadora:** CAPES

**Campina Grande - PB**

Outubro/2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M528p Melo, Luiz Ronaldo Lisboa de.  
Propriedades e microestruturas dos granitos e limestones do Ceará utilizados como revestimentos na construção civil / Luiz Ronaldo Lisboa de Melo. - Campina Grande, 2011.  
115f.: il. col.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina, Centro de Ciências e Tecnologia.  
Orientadores: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes.  
Referências.

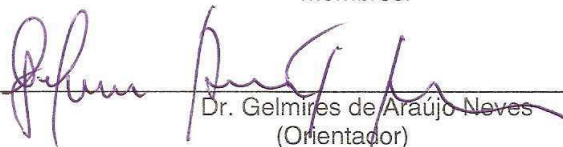
1. Revestimentos. 2. Rochas Ornamentais. 3. Caracterização. 4. Propriedades Mecânicas. 5. Microestrutura. I. Título.

CDU 679.85:67.014/.017 (043)

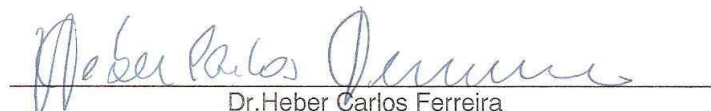
PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS DOS GRANITOS E LIMESTONES  
DO CEARÁ UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .


Luiz Ronaldo Lisboa de Melo

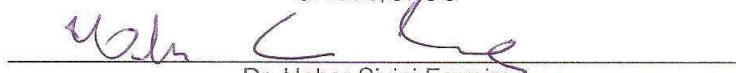
Tese Aprovada em 18/10/2011 pela banca examinadora constituída dos seguintes  
membros:


  
Dr. Gelmires de Araújo Neves  
(Orientador)  
UAEMa/UFCG

  
Dr. Romualdo Rodrigues Menezes  
(Co-Orientador)  
UFPB

  
Dr. Heber Carlos Ferreira  
(Examinador Interno)  
UAEMa/UFCG

  
Dr. Lisiane Navarro de Lima Santana  
(Examinadora Interna)  
UAEMa/UFCG

  
Dr. Heber Sivini Ferreira  
(Examinador Externo)  
DEMa - UFPB

  
Dr. Antonio Augusto Pereira de Sousa  
(Examinador Externo)  
DQ - UEPB

## Dedicatória

À esposa **Vitoria Montenegro**, aos filhos: **Danielle, Ronaldo Jr., Vanessa, Marília e João Luiz**, pelo transbordamento de amor e por compartilharem os desafios valiosos de nossas vidas. À minha mãe **Madalena**, meu pai **Luiz Melo** (in memorium), meus irmãos **João Nelson e Elizabeth**, e suas queridas famílias pelo apoio de todos, pelas palavras de carinho e entusiasmo.

## **CURRICULUM VITAE DO CANDIDATO**

Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFCG (2008), Especialista em Engenharia de Produção pela UFC (1994), Engenheiro Civil pela UFC(1973). Responsável técnico por vários projetos e construções de obras públicas e privadas. Pesquisador RHAE/CNPq/NUTEC/ Divisão de Tecnologia Mineral (1996 à 1999). Atualmente é Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

## **Agradecimentos**

Aos amigos que torceram pelos resultados obtidos, por serem todos valiosos e em grande número, cito um representante, desde a infância o Dr. João Marques de Carvalho e outro mais atual o Dr. Josileido Gomes.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pela excelência do ensino e a gratidão de um aluno que vibra aos 60 anos com os conhecimentos adquiridos da microestrutura dos materiais.

Aos meus grandes orientadores Dr. Gelmires de Araújo Neves e Dr. Romualdo Rodrigues Menezes, e aos professores Dr. Heber Carlos Ferreira, Dr. Marcus Vinicius, Dra. Laura Hecker, Dra. Lisiane Navarro de Lima Santana, que mais próximos, se empenharam em compartilhar a riqueza do ser e saber.

Aos colegas professores e administrativos do IFCE, pela amizade sincera em anos de relacionamento profícuo, pela parceria na elaboração das etapas de construção dos trabalhos de quatro anos de mestrado e doutorado.

As empresas Limestone Ceará Ltda, Granos S.A, Mont Granitos S.A, Granistone S.A, Imarf Granitos e Mineração S.A, Multigran Ltda e Grandon S.A pelo apoio e fornecimento dos limestones, granitos e mármore.

A CAPES pelo apoio financeiro, e ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) pela liberação das atividades durante o tempo de permanência no doutorado.

# **PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS DOS GRANITOS E LIMESTONES DO CEARÁ UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

## **RESUMO**

As ocorrências dos limestones do Ceará atualmente competem com a excelência comercial dos granitos, destacando-se pela textura, cor e flexibilidade de aplicação em revestimentos de fachadas e pisos na construção civil. As patologias dos granitos, acentuadas em fachadas e pisos de elevado tráfego, têm sido intensamente pesquisadas, cujas interpretações indicam micro trincas inter grãos dos minerais, com diversos coeficientes de dilatação térmica, ocorrência originada no resfriamento do magma, e ampliada nos processos de lavra e de beneficiamento. Assim, técnicas de caracterização da microestrutura através de ensaios não destrutivos com significativos níveis de acerto resultariam um avanço tecnológico e uma redução significativa de tempo e de investimento na prospecção do produto, identificando suas propriedades, com eficiência, prevendo-se o uso como revestimentos viáveis, técnica e comercialmente no mercado da construção civil. Este trabalho tem como objetivo caracterizar as microestruturas e propriedades dos limestones e granitos do estado do Ceará utilizados como revestimentos na construção civil. Os limestones e os granitos foram caracterizadas por análise química, difração de raios-X, análise térmica e microscopia eletrônica de varredura. Em seguida foram determinadas as propriedades físico-mecânicas através da densidade aparente, porosidade, absorção de água, resistência à compressão e flexão, impacto e abrasão. As análises de alterabilidade foram realizadas por ataque químico. Os resultados evidenciaram que a microestrutura tem grande influência nas propriedades mecânicas destes materiais, sendo mais atuante nos limestones. Em relação a alterabilidade, sua magnitude variou de acordo com amostra e o reagente utilizando, observando-se, de forma geral que os limestones foram mais afetados durante o ensaio que os granitos, e que os reagentes que provocaram maiores alterações nas rochas foram causado pelos ácido cítrico nos limestones e ácido clorídrico nos granitos.

**PALAVRAS CHAVES:** Revestimentos, rochas ornamentais, caracterização, propriedades mecânicas, microestrutura



## **PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS DOS GRANITOS E LIMESTONES DO CEARÁ UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

### **ABSTRACT**

The texture, color and ease of application render limestones from Ceará competitive with granites as tiles for wall coverings and flooring applications. Granite pathologies, enhanced in wall coverings and heavy traffic flooring have been intensely researched and interpreted as being due to mineral inter-grain micro-cracks with differing thermal dilation coefficients which originate during magma cooling and that are enhanced during carving and milling operations. Thus, microstructural characterization performed by accurate non-destructive essays would result in technological improvement and significant reduction in time and prospection, as product properties could be efficiently ascertained and their use technical and commercial use as tiles for wall coverings and flooring applications, could be estimated in advance. The aim of this work is to execute the microstructures analyzes and the properties of limestones and granites from the state of Ceará to be used as tiles in wall and flooring applications. Limestones and granites were characterized by chemical analysis, X-ray diffraction, thermal analysis and scanning electron microscopy. Once characterized, their physical-mechanical properties were determined by apparent density, porosity, water absorption, abrasion resistance, compression, flexural and impact testing. Durability was determined with respect to chemical attack. Results evince that microstructure greatly influences the mechanical properties of the materials investigated, particularly of the limestones. Material durability varied with sample nature and solvent employed but in general, limestones were more affected by chemical attack than granites and citric acid caused more alterations in limestones while hydrochloric acid attacked granites mores severely.

**Key-Words:** Paving and wall tile, ornamental rocks, characterization, microstructure, mechanical properties.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
1.0 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>4</b>
2.0 Fundamentação teórica.....	4
2.1 O revestimento na construção civil.....	4
2.2 Rochas ornamentais.....	4
2.3 As rochas ornamentais do Ceará.....	11
2.3.1 A pedra Cariri.....	13
2.4 Rochas ornamentais para uso como revestimento em construção civil	14
2.5 A alterabilidade das rochas ornamentais .....	20
2.6. Estudos sobre a caracterização de rochas ornamentais.....	24
2.6.1 Estudos abordando granitos.....	25
2.6.2. Estudos abordando pedras calcárias.....	32
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>46</b>
3.0 Materiais e métodos.....	46
3.1 Materiais.....	42
3.1.1 A preparação das amostras.....	47
3.2 Métodos.....	50
3.2.1 Caracterização microestrutural.....	50
3.2.2 Caracterização físico-mecânica.....	51
3.2.3 Análise da alterabilidade.....	51
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>57</b>
4.0 Resultados e discussão.....	58
4.1 Caracterização microestrutural.....	58

4.1.1 Análise química por fluorescência de Raios X. (EDX).....	58
4.1.2 Difração de raios X (DRX) .....	59
4.1.3 Análise térmica diferencial e termogravimétrica.....	61
4.1.4 Microscopia ótica e eletrônica.....	64
4.2 Caracterização físico-mecânica.....	78
4.2.1 Índices físicos.....	78
4.2.2 Coeficiente por dilatação térmica.....	82
4.2.3 Resistência à compressão uniaxial.....	83
4.2.4 Resistência à flexão.....	86
4.2.5 Resistência ao Impacto.....	87
4.2.6 Determinação do desgaste por abrasão – Amsler.....	89
4.3. Análise de alterabilidade.....	91
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>103</b>
5.0 Conclusões.....	103
6.0 Sugestões.....	106
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>107</b>
7.0 Referências.....	107

## TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Ensaio de caracterização das rochas brutas.....	<b>16</b>
<b>Tabela 2.2.</b> Ensaio de caracterização das rochas beneficiadas – polidas.....	<b>16</b>
<b>Tabela 2.3.</b> Ensaio e análises de acordo com o uso CHIODI FILHO, 2008).....	<b>17</b>
<b>Tabela 2.4.</b> Qualificação tecnológica versus ensaio de caracterização (HENRIQUES & TELLO, 2006)	<b>18</b>
<b>Tabela 2.5.</b> Valores limites para granitos segundo a norma brasileira (ABNT, 2010).....	<b>18</b>
<b>Tabela 2.6.</b> Valores limites segundo a ASTM (FRAZÃO & FARJALLAT, 1996).....	<b>19</b>
<b>Tabela 2.7.</b> Ensaio de alteração acelerada e seus objetivos (FRASCÁ, 2003).....	<b>22</b>
<b>Tabela 2.8.</b> Classes de resistência química e de recuperação de rochas alteradas..	<b>23</b>
<b>Tabela 3.1.</b> Denominação comercial das amostras e designação utilizada na pesquisa para identificá-las.....	<b>46</b>
<b>Tabela 3.2.</b> Substâncias utilizadas na análise de resistência ao ataque químico, tempo de exposição aos reagentes e substâncias comerciais que os contêm.....	<b>55</b>
<b>Tabela 4.1.</b> Composição química das amostras analisadas.....	<b>57</b>
<b>Tabela 4.2.</b> Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água, das amostras analisadas.....	<b>79</b>
<b>Tabela 4.3.</b> Coeficientes de dilatação térmica das amostras analisadas.....	<b>82</b>
<b>Tabela 4.4.</b> Resultados dos ensaios mecânicos das amostras analisadas.....	<b>84</b>
<b>Tabela 4.5.</b> Análise comparativa e qualitativa dos ensaios das amostras analisadas.....	<b>90</b>
<b>Tabela 4.6.</b> Brilho das amostras analisadas antes e após exposição ao cloreto de amônia, NH <sub>4</sub> Cl e ao hipoclorito de sódio, NaClO.....	<b>96</b>
<b>Tabela 4.7.</b> Brilho das amostras analisadas antes e após exposição ao ácido cítrico, C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> .....	<b>97</b>
<b>Tabela 4.8.</b> Brilho das amostras analisadas antes e após exposição ao ácido clorídrico, HCl e ao hidróxido de potássio.....	<b>98</b>

## FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Mapa das bacias interiores Nordeste do Brasil (BRITO, 1990).....	<b>12</b>
<b>Figura 2.2.</b> Micrografia de MEV de rochas graníticas após exposição ao SO <sub>2</sub>	<b>27</b>
<b>Figura 2.3.</b> Micrografia de MEV das eflorescências de NaCl em rocha granítica (RIVAS et al. 2010).....	<b>31</b>
<b>Figura 2.4.</b> Micrografia ótica da pedra calcárea azul: a) após oxidação da pirita (regiões em azul) e b) evidenciando a precipitação de hidróxido de ferro como veios em volta dos cristais de dolomita (DREESEN et al., 2007).....	<b>35</b>
<b>Figura 2.5.</b> Microscopia eletrônica com elétrons retroespalhados da pedra calcárea azul após manchamento ilustrando os veios de óxido de ferro (branco), os cristais de dolomita (escuro) e os vazios na estrutura em torno dos cristais de dolomita (DREESEN et al., 2007).....	<b>36</b>
<b>Figura 2.6.</b> Perda de massa dos materiais graníticos (a) e calcários (b) em função dos ciclos de pulverização (SILVA & SIMÃO 2009).....	<b>39</b>
<b>Figura 2.7.</b> Características macroscópicas da superfície do travertino após ensaio de envelhecimento com a névoa salina a) rugoso e b) polido (UROSEVIC et al. 2010).....	<b>42</b>
<b>Figura 3.1.</b> Fotografias dos “limestones” analisados nessa pesquisa.....	<b>48</b>
<b>Figura 3.2.</b> Fotografias dos granitos e do mármore analisados nessa pesquisa.....	<b>45</b>
<b>Figura 3.3.</b> Equipamento de desgaste Amsler utilizado na pesquisa.....	<b>50</b>
<b>Figura 3.4.</b> Arranjo utilizado para o ensaio de alterabilidade.....	<b>52</b>
<b>Figura 3.5.</b> Arranjo da amostra utilizada para o ensaio de alterabilidade.....	<b>53</b>
<b>Figura 4.1.</b> Padrões de difração de raios X dos limestones analisados.....	<b>60</b>
<b>Figura 4.2.</b> Padrões de difração de raios X dos granitos e do mármore analisados.....	<b>61</b>
<b>Figura 4.3.</b> Curvas de análise térmica diferencial dos limestones analisados	<b>62</b>
<b>Figura 4.4.</b> Curvas de análise térmica diferencial dos granitos e mármore analisados.....	<b>63</b>
<b>Figura 4.5.</b> Micrografias de campo escuro dos limestones analisados.....	<b>65</b>
<b>Figura 4.6.</b> Micrografias de campo escuro dos limestones analisados.....	<b>66</b>
<b>Figura 4.7.</b> Micrografias de MEV dos limestones analisados.....	<b>71</b>

<b>Figura 4.8.</b> Micrografias e mapeamento de fluorescência de raios X das amostras LCA e LBM.....	<b>72</b>
<b>Figura 4.9.</b> Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados.....	<b>74</b>
<b>Figura 4.9</b> Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados (continuação).....	<b>75</b>
<b>Figura 4.9</b> Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados (continuação).....	<b>76</b>
<b>Figura 4.9</b> Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados (continuação).....	<b>77</b>
<b>Figura 4.10.</b> Fotografias das amostras analisadas após exposição ao cloreto de amônia.....	<b>92</b>
<b>Figura 4.11.</b> Fotografias das amostras analisadas após exposição ao hipoclorito de sódio.....	<b>93</b>
<b>Figura 4.12.</b> Fotografias das amostras analisadas após exposição ao ácido cítrico.....	<b>94</b>
<b>Figura 4.13.</b> Fotografias das amostras analisadas após exposição ao ácido clorídrico.....	<b>95</b>
<b>Figura 4.14.</b> Fotografias das amostras analisadas após exposição ao hidróxido de potássio.....	<b>96</b>
<b>Figura 4.15.</b> Perda de massa das amostras analisadas após exposição ao reagentes químicos.....	<b>99</b>

## **Lista de Simbologia e abreviaturas**

- ABNT** – Associação brasileira de normas técnicas;
- AP** – Análise Petrográfica.
- ATD** - Análise térmica diferencial;
- ATG** - Análise térmica gravimétrica;
- CAPES** - Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior;
- CCT** - Centro de Ciências e Tecnologia;
- CQ** - Composição química;
- CTC** - Capacidade de troca de cátions;
- DNPM** – Departamento nacional de produção mineral;
- DRX** - Difração de raios X;
- EDX** - Análise química por fluorescência de raios X
- MEV** - Microscopia eletrônica de varredura;
- MO** – Microscopia ótica;
- NBR** – **Norma brasileira registrada;**
- RESIDLAB** - Laboratório de reciclagem;
- UAEMa** - Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais;
- UFCG** - Universidade Federal de Campina Grande;

## 1. INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais são materiais nobres, tipificadas por características que valorizam o seu uso, como revestimento na construção civil destaca-se por sua durabilidade, resistência mecânica, alternativas de aplicação, flexibilidade no uso, facilidade de conservação, e relevante efeito estético, que, por suas variadas cores da matéria-prima permitem a obtenção de produtos sofisticados, e criativos.

Material utilizado há milhares de anos, em esculturas e peças estruturais de obras de arquitetura admiradas no mundo, tornou-se revestimento no império romano, a partir do ano 80 aC, destacando-se o mármore branco e travertino, da região de Carrara – Itália.

No entanto, as patologias em monumentos edificados em rochas na Europa observadas em meados do século XX, surpreenderam a todos, que julgavam ter durabilidade infinita. Situação, que vem demandando estudos sobre as características e durabilidade das rochas até os dias atuais, avaliando-se as suas propriedades e alterabilidade quanto às agressões do meio e as conseqüentes implicações estruturais e estéticas nas rochas utilizadas como revestimentos.

Neste contexto, torna imprescindível o conhecimento mais abrangente das características físicas, químicas e microestruturais desses materiais, de modo a nortear o uso das rochas ornamentais com base em aspectos técnicos-científicos, evitando utilizações inadequadas e minimizando falhas em uso.

A caracterização tecnológica das rochas ornamentais, em geral realizada por meio de ensaios normatizados, cujos resultados devem ser obtidos na etapa de pesquisa do jazimento, indicam a viabilidade técnica e econômica da rocha, através da identificação dos possíveis tipos de aplicações, e sua adequação às condições do meio. Por outro lado, os ensaios de caracterização microestrutural permitem nortear e embasar os usos pretendidos, tendo-se um total panorama e entendimento do seu potencial de aplicação, podendo correlacionando seu comportamento com as características microestruturais.

Mesmo materiais de uso consagrado em revestimentos e com enorme volume de estudos de caracterização física e microestrutural já realizados, como os mármore e granitos, ainda continuam sendo muito pesquisados ao redor do mundo,



de modo de se ter um conhecimento e entendimento das características dos novos jazimentos em relação a sua variedade. O que destaca a necessidade de estudos continuados a cerca das características microestrutural do material que se pretende usar como revestimento.

A caracterização se torna ainda mais importante quando tem-se o lançamento de novos revestimentos ou novas aplicações revestimentos conhecidos, por ser necessário avaliar a adequabilidade desses materiais a uma gama aspectos técnicos a influência das suas microestruturas na definição das propriedades finais em uso.

O Estado do Ceará tornou-se um pólo graniteiro a partir do final do século passado, em virtude da diversidade de cores e padrões exclusivos dos seus granitos. A partir de 2000 as indústrias locais de beneficiamento de limestones, estimulados pelo aumento da procura mundial, passaram a produzir em quantidades sempre crescentes, superando a produção de granito. No entanto, o conhecimento das propriedades físicas, químicas e mecânicas desses materiais, particularmente o limestone e de seu comportamento como revestimento foram muito pouco avaliados, não se tendo total conhecimento de sua suscetibilidade em condições climáticas, aos esforços solicitantes da edificação e de seu uso. Isso evidencia uma grande necessidade de caracterização das variedades de rochas ornamentais cearences, para o entendimento de suas características e propriedades.

Ademais, a obtenção de parâmetros técnicos dos limestones proporcionaria o fortalecimento desta promissora variedade de rocha ornamental, aumentando seu mercado consumidor, além de ampliar a participação econômica desta rocha no desenvolvimento socioeconômico do estado.

A caracterização das rochas ornamentais, principalmente no que tange aos limestones, permitirá, também, a obtenção de resultados mais confiáveis, auxiliando todas as etapas do processo do bem mineral, e apoiando com critérios técnicos, a viabilidade de soluções arquitetônicas, estéticas e funcionais mais seguras na construção civil.

## **2. Objetivo**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo entre as características físico-químico e das microestruturas e as propriedades dos rochas ornamentais do Estado do Ceará, utilizados como revestimentos na construção civil.

### **2.2. Objetivos específicos**

Para realização da pesquisa, foram estabelecidos como objetivos específicos às seguintes etapas:

- Fazer um estudo físico-mineralógico das matérias-primas, compreendendo dois aspectos: análises petrográficas (ABNT, 2010) e as análises microestruturais: EDX; DRX; ATG, ATD, MO e MEV.

- Determinar as propriedades físicas de acordo com as normas da ABNT, através dos ensaios: massa aparente, porosidade e absorção;

- Determinar as propriedades físico-mecânicas de acordo com norma da ABNT, através dos ensaios: resistência a compressão uniaxial; resistência a flexão – módulo de ruptura; resistência ao impacto de corpo duro e resistência ao desgaste por abrasão;

- Estudar a degradação dos limestones e dos granitos e mármore através de resistência aos agentes químicos, caracterizando a alterabilidade às ações de intemperismo nas amostras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O revestimento na construção civil

O aspecto estético, a resistência mecânica e a estabilidade funcional representam importantes propriedades no revestimento, e por ser um dos itens de custo unitário significativo na construção civil, respondendo, atualmente, por grandes prejuízos e gastos, resultantes de reparos e restaurações de painéis de fachadas, pisos e outros elementos danificados no pós-uso.

As edificações modernas, por suas grandes dimensões e formas esbeltas e complexas, resultam diferentes tipos de tensões e deformações, que provocam microfissuras e fendas (FERRARI, 2001). Conseqüentemente, surgem significativas patologias que comprometem pinturas sobre argamassas, produtos cerâmicos, metálicos ou materiais pétreos, independentemente, do tipo de obra, e condições climáticas.

A especificação correta do revestimento na construção civil se constitui um importante fator de qualidade da obra. Através da definição e condições do local de aplicação, da conformidade do uso com os esforços solicitantes e dos agentes químicos prováveis e presentes, determina-se o conjunto de propriedades que os revestimentos devem ter para a adequação do revestimento apropriado, com ênfase as fachadas de edificações de grande porte (MEDEIROS & SABBATINI, 1999).

As funções principais dos revestimentos na construção civil são: proteger os elementos estruturais; constituir um acabamento final que reúna a estética; valorização econômica; a higiene (fácil limpeza, não nocivo a saúde); isolamento térmico; segurança ao fogo; estanqueidade de água e gases; e regularização da superfície dos elementos de vedação (OLIVEIRA, 2001).

Há uma série de características adequadas para cada ambiente, seja interno ou externo; sujeito a umidade ou não; baixo ou alto tráfego; com elevada ou baixa insolação; com ou sem contato com produtos químicos; maior ou menor solicitação mecânica, características do substrato, e outros que isolados ou em conjunto, fazem com que seja imprescindível sua análise criteriosamente, para que se proceda corretamente à especificação e se garanta a segurança e a durabilidade ao revestimento (MEDEIROS, 1999). As

quais devem ser avaliadas através do conhecimento de suas propriedades fundamentais de natureza química, física e mecânica (NAVARRO, 2002).

O projeto arquitetônico especifica os materiais de revestimento conforme as propriedades e o tipo de acabamento pretendido. Assim, as superfícies internas e externas, de uma edificação recebem revestimentos específicos, conforme os pré-requisitos para aplicação e uso, como: pintura sobre argamassa (cimento, cal, gesso), aplicação de materiais cerâmicos e metálicos, painéis de vidro, madeira, compósitos poliméricos e rochas ornamentais.

Um produto, dentro de modernos padrões de qualidade, exige a sua adaptabilidade ao uso, resistência, segurança e durabilidade que devem ser avaliadas através do conhecimento de suas propriedades fundamentais de natureza química, física e mecânica.

Situação que tem motivado um empenho maior dos construtores na especificação dos revestimentos, com ênfase, a durabilidade relativa ao meio e condições inerentes ao local onde aplicado.

A especificação de um revestimento deve previamente associar o custo dos materiais utilizados no substrato e acabamento final às propriedades dos materiais e, efetivamente considerar a sua vida útil, estudando os custos de operação e manutenção, previsíveis em função das características e condições de serviço a que estarão sujeitos.

Portanto, a escolha de determinada solução construtiva não pode ser feita com base no menor custo inicial ou menor custo de operação e manutenção, mas sobre a solução que melhor combine estes dois custos, associados ao tempo de vida útil projetado para a edificação. Esta avaliação, quando criteriosa, indica a especificação de materiais pétreos em fachadas e em outras áreas que exigem maiores resistências aos esforços e agressões do meio.

Por outro lado, a qualidade global de uma obra resulta do processo de planejamento, que compreende o desenvolvimento dos projetos arquitetônico e complementares, a especificação dos materiais e as técnicas construtivas, todos condicionados às condições climáticas regionais e a interatividade entre os materiais. Se, estas condições necessárias, deixam de ser observadas individualmente ou em conjunto, resultam graves danos a resistência e a

durabilidade da edificação, com a ocorrência de patologias construtivas, cujos reparos são longos, exigindo a desocupação do imóvel e demais serviços correlatos e, geralmente, inviáveis financeiramente (THOMAZ, 1989).

A ausência de planejamento das obras públicas e privadas no Brasil, principalmente no Nordeste, respondem pelas patologias mais freqüentes, atribuídas a erros de execução, que na realidade são originadas nos projetos elaborados intempestivamente para atender a um prazo que impossibilita a compatibilização e adequação às condições locais existentes – esforços solicitantes e agentes climáticos. A execução torna-se um desafio para o construtor, que gerenciará a obra através de parâmetros técnicos próprios obtidos com a sua experiência e competência profissional.

Toda a responsabilidade das patologias recai sobre o construtor, que assume e gerencia o processo de especificação, seleção, compra e aplicação dos materiais. Situação diferente é a planejada, cujos projetos compatibilizados para a obra definem o tipo e o padrão dos serviços e materiais a serem utilizados na obra.

São inúmeras as ocorrências de destacamentos de revestimentos de fachadas de edifícios construídos no Nordeste brasileiro, explicadas no primeiro momento, por causas diversas, como: a ausência de juntas de dilatação (assentamento e movimentação), argamassas de assentamento e rejuntamento inadequadas, a expansão por umidade de cerâmicas, ou a oxidação dos grampos de fixação de rochas ornamentais. Observa-se que os materiais empregados sempre apresentam mudanças físicas – dilatações térmicas, deformações estruturais e/ou químicas – alterações da sua composição, que os tornaram ineficazes às tensões resultantes dos esforços, valores que não correspondem aos especificados no projeto, levando-os, conseqüentemente, ao colapso.

Neste sentido, a indústria cerâmica de revestimentos tem conquistado bons resultados, definindo parâmetros para emprego dos produtos como revestimento, com ênfase a abrasão, a absorção de água, a resistência ao gretamento, a expansão a umidade, condições que auxiliam nas definições das possíveis e ideais condições de aplicação e uso.

No Brasil, desde 1996, ficaram estabelecidos os requisitos para a execução, fiscalização e recebimento de revestimento de paredes externas com placas cerâmicas assentadas com argamassas colantes em fachadas e métodos de ensaios, através da ABNT - NBR 13755/96 e NBR 13818/97.

No entanto, quando se trata de rochas ornamentais para uso em revestimentos alguns outros pontos, além da pura normatização devem ser levados em consideração para sua adequada utilização. A especificação correta da rocha para aplicação como revestimento exige o conhecimento de parâmetros petrográficos - composição mineralógica e estrutural das rochas, e ensaios de caracterização, muitos já preconizados por normas internacionais e exigidos nas comercializações dos produtos pétreos, que os qualifique para revestimento (MOURA, 2000).

A avaliação destes parâmetros vem contribuindo significativamente para definição das propriedades físicas, químicas e mecânicas das rochas, compatíveis aos esforços solicitantes das estruturas, bem como, suas suscetibilidades em relação aos ambientes construídos (FRASCÁ & QUITETE, 2000). Essa avaliação vem possibilitando que a seleção da rocha não seja ditada apenas pela beleza estética, mas também esteja intimamente relacionada às suas caracterizações tecnológicas e microestruturais, obtendo um perfeito binômio entre beleza estética e características técnicas, permitindo definir com muito maior precisão suas possíveis utilizações.

## **2.2 Rochas ornamentais**

As rochas ornamentais apresentam-se entre as mais promissoras áreas de negócios do setor mineral, situação que resulta da existência de materiais de reconhecida beleza estética, associados aos investimentos em qualidade, segurança, caracterização e avaliação de durabilidade em sua utilização, com ênfase em aplicações de revestimentos na construção civil, na arte funerária, em decorações e peças de mobiliários.

As rochas ornamentais abrangem tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, que cortados em formas variadas, e beneficiadas através de esquadrejamento, polimento, lustro, etc. Modernas tecnologias utilizando ferramentas diamantadas vem contribuindo para a

obtenção de peças mais esbeltas, como também vem reduzindo o impacto que o uso de outros sistemas convencionais provocam na estrutura cristalina dos minerais (CICCU,1996).

Cerca de 80% da produção mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos internos e externos da construção civil, 15% destina-se a arte funerária e 5% para outros campos de aplicação. Aproximadamente 60% dos revestimentos referem-se a pisos, 16% a fachadas externas, 14% a interiores e 10% a trabalhos especiais de acabamento. A expansão mundial das rochas deve-se a introdução de novas variedades de rochas, que se tornaram viáveis com o desenvolvimento tecnológico na extração e beneficiamento. Os mármore representam 45% da produção mundial, 40% atribuídos aos granitos, 5% aos quartzitos e similares, e 5% às ardósias. O setor brasileiro de rochas ornamentais movimenta cerca de US\$ 2,1 bilhões/ano, incluindo-se a comercialização nos mercados interno e externo e as transações com máquinas, equipamentos, insumos, materiais de consumo e serviços, gera mais de 105 mil empregos diretos em aproximadamente 10.000 empresas. O mercado interno é responsável por quase 90% das transações comerciais e as marmorarias representam 65% do universo das empresas do setor (ABIROCHAS, 2011a).

O crescimento de mercado deve se firmar para sua sustentabilidade, através do perfeito binômio entre beleza estética e características técnicas, exigindo uma forte demanda de estudos e pesquisas para a parametrização dos produtos pétreos utilizados como revestimento no mercado da construção civil. A especificação correta da rocha para aplicação como revestimento exige o conhecimento de parâmetros petrográficos - composição mineralógica e estrutural das rochas, e outros resultados de ensaios de caracterização, muitos já preconizados por normas internacionais e exigidos nas comercializações dos produtos pétreos, que os qualifique para revestimento (MOURA, 2000).

As rochas utilizadas em revestimentos na construção civil são classificadas conforme sua origem e constituição, agrupadas da seguinte forma: rochas silicáticas (granitos e similares); rochas carbonáticas (mármore, travertinos, calcários/limestones, ônix e alabastro); rochas silicosas (quartzitos maciços e foliados, cherts, arenitos e similares), rochas síltico-argilosas

(ardósias) e rochas ultramáficas (serpentinitos, pedra sabão e pedra talco) (ABIROCHAS, 2011b).

A formação dos granitos, diferentemente de rochas sedimentares ou metamórficas utilizadas como revestimento na construção civil, compõe-se de múltiplos e distintos minerais, portanto, mais complexos, e exigem destaques no conhecimento de sua origem, morfologia, composição, sua anisotropia textural/estrutural quanto aos aspectos de granulometria, arranjo, imbricação, graus de micro-fissuramento e alterações estruturais. As rochas graníticas apresentam resistências físicas e mecânicas superiores aos calcários, mármore, ardósias, entre outros (HENNIES & STELLIN JUNIOR, 2000).

Em termos geológicos, a história geotônica das rochas brasileiras ocorreu em quatro eventos tectonomagmáticos: Arqueano, Paleoproterozoico, Mesoproterozoico e Neoproterozoico, evolução marcada por grande mobilidade, com regimes alternativos de compressão e distensão (MENDES, 2003).

As rochas ígneas têm origem do resfriamento do magma. O magma, no resfriamento, dá origem às rochas silicáticas, formadas pelo oxigênio e o silício, tendo ainda presentes como elementos principais, Fe, Ca, Mg, Na, K, Al, Ti, cujos minerais apresentam uma razoável gramatura, formadas essencialmente por feldspatos, quartzos e micas (biotitas e muscovitas), constituídos por diferentes estruturas cristalinas. Suas concentrações presentes condicionam o tipo de rocha que o magma solidificado sob altas pressões e lenta queda de temperatura formará após o resfriamento (SIAL & LONG, 1987).

O  $\text{SiO}_2$  é responsável pela viscosidade do magma e pela sua acidez, quanto maior sua quantidade mais ácido e viscoso o magma. Se o magma possuir baixa viscosidade irá formar rochas melhor cristalizadas, com viscosidade elevada ocorrerá a formação de rochas com maior teor de material vítreo. Quanto maior o teor de  $\text{SiO}_2$  de uma rocha ou mineral, maior é a sua acidez e maior a sua resistência ao intemperismo (DEER, 1996).

Para o setor de rochas ornamentais e de revestimento, o termo granito designa um amplo conjunto de rochas silicáticas, abrangendo monzonitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, diabásios/basaltos e os próprios granitos. A composição mineralógica dos “granitos” é definida pela associação



de variáveis de quartzo, feldspato, micas (biotita e muscovita), anfibólios (sobretudo hornblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina. Nos granitos mais leucocráticos (claros), portanto com menor quantidade de minerais ferro-magnesianos, o quartzo e o feldspato compõem normalmente entre 85% e 95% da rocha (ABIROCHAS, 2011c).

As proporções das fases constituintes presentes na rocha e seu arranjo estrutural definindo as situações de porosidade, interações, forma, tamanho, distribuição e o grau de orientação da fase dispersa podem identificar as características intrínsecas dos materiais. Nas rochas silicáticas tem-se o feldspato como responsável pela aparência do produto e de suas características superficiais e tem por função envolver, separar e proteger o quartzo de ataques externos e de transmitir as tensões aplicadas ao mesmo. O quartzo, como fase dispersa, tem uma função estrutural e responde por sua resistência.

As rochas carbonáticas abrangem calcários e dolomitos, sendo os mármoreos os seus correspondentes metamórficos com graus variados de recristalização. Os calcários são rochas de natureza sedimentar compostas principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), enquanto dolomitos são rochas também sedimentares formadas sobretudo por dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ). Essas rochas são resultantes do transporte, acumulação e consolidação de sedimentos provenientes de erosão, precipitação química de substâncias resultante de alteração de rochas preexistentes e por matérias orgânicas – de organismos vegetais, animais, conchas marinhas, etc. Os agentes atuantes são a água, o vento, e a gravidade, esta última, responsável pela compactação dos sedimentos, que, por vezes, formam estruturas compactas de considerável resistência mecânica (FIGUEIREDO, 1997).

As rochas carbonáticas representam os materiais sedimentares, constituídos por 50% ou mais dos minerais calcita e dolomita. Alguns outros minerais carbonáticos, notadamente a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), ankerita ( $\text{Ca, MgFe}(\text{CO}_3)_4$ ) e a magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), estão associados em pequenas proporções aos calcários e dolomitos. As argilas, quartzo, micas, anfibólios, matéria orgânica/grafitosa e sulfetos, formam as impurezas comuns que podem

caracterizar uma ampla variedade de cores, texturas, desenhos, cristalinidade e conteúdo fóssil. (ABIROCHAS, 2011d).

Os quartzitos são rochas metamórficas cujo componente principal é o quartzo (mais de 75% como ordem de grandeza). Essas rochas apresentam textura sacaróide e são derivadas de sedimentos arenosos, formadas por grãos de quartzo recristalizados e envolvidos ou não por cimento silicoso. As ardósias são rochas metamórficas de grão fino e homogêneo compostas por argila ou cinzas vulcânicas que foram metamorfizadas em camadas. São formadas a partir de seqüências argilosas e siltico-argilosas e têm como principais constituintes mineralógicos mica branca fina (sericita), quartzo, clorita e grafita (ABIROCHAS, 2011e).

### **2.3 As rochas ornamentais do Ceará**

O Ceará tornou-se o 5º maior estado exportador brasileiro de rochas ornamentais em 2004, destacando-se os granitos e os calcários sedimentares – limestones (DNPM, 2006). A exportação para a China vem crescendo significativamente, sendo a expectativa do setor que a China se torne líder do mercado importador, ultrapassando países como Itália, Alemanha e Portugal (CHIODI FILHO, 2004).

As principais jazidas de granitos do Ceará estão localizadas nas regiões da: Meruoca, Santa Quitéria, Serra do Barriga, Itapipoca, Aracoiaba, Pedra Branca, Marco, Santana do Acaraú, Quixadá, Limoeiro do Norte e Santana do Cariri (ROBERTO et al, 2005).

As rochas silicáticas do subsolo cearense são polifásicas, constituídas de variadas espécies de minerais, que compõem um sistema químico em equilíbrio natural. Os arranjos estruturais específicos para as variadas formas e diferentes orientações se desenvolveram durante o esfriamento na natureza, em associações mútuas, conforme as suas compatibilidades, nomeadamente em termos térmicos, ou isoladamente (AIRES-BARROS, 1991).

As rochas calcárias do Ceará são originadas basicamente das bacias do Araripe e do Apodi. As origens das Bacias do Araripe, sul do Ceará, bem como a do Apodi, região entre o Ceará e o norte do Rio Grande do Norte, devem-se ao evento da abertura do Oceano Atlântico Sul, que envolveu toda a porção

leste da Plataforma Sul-Americana, chamado Revolução Wealdeniana, responsável pela fragmentação do paleo-continente Gondwana e pela formação dos riftes mesozóicos do Nordeste (PONTE, 1992).

A intensa atividade da Plataforma Sul-Americana criou grandes depressões tafrogênicas possibilitando a formação de centros de deposição sedimentar cenozóicos (110 milhões de anos atrás), observados na Figura 2.1, com a seqüência sedimentar destas bacias referidas como bacias interiores do Nordeste, (BRITO, 1990).

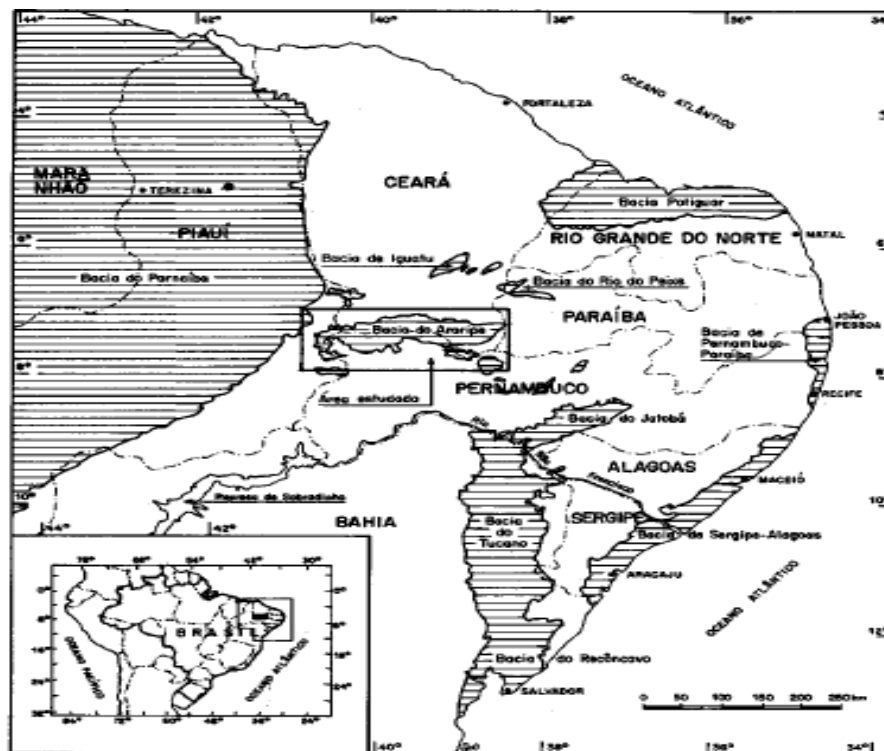


Figura 2.1. Mapa das bacias interiores Nordeste do Brasil. Fonte: (BRITO, 1990)

A chapada do Apodi apresenta uma superfície plana conservada sobre os calcários da Formação Jandaíra, situa-se nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, compreendida entre os cursos inferiores dos rios Jaguaribe e Açu.

A Formação Jandaíra caracteriza-se por calcário maciço de granulação fina, de cor bege, composto predominantemente por calcita podendo ter também dolomita, com intercalações arenosas, pelíticas e gipsíticas.

Composta por calcarenitos com bioclóstos e calciluditos, depositados em ambiente de planície de maré, laguna rasa, plataforma e mar aberto, com espessura máxima de 650 m. Repousa concordantemente sobre a Formação

Açu e Membro Quebradas, pela implantação da ampla plataforma carbonática designada de Formação Jandaíra (NOGUEIRA NETO, 2000).

As rochas calcárias do Ceará, identificadas como “limestones”, são aplicadas brutas na construção há mais de 60 anos. A partir de 2000, quando modernas tecnologias, utilizando ferramentas diamantadas, inovaram com a execução da calibração e do polimento com escova diamantada, passaram a ser aplicadas em revestimentos internos, áreas de pilotis e fachadas de edifícios, e outro. Sua cor clara (creme e cinza) e a sua textura são destaques entre projetistas e construtores, que as têm especificado como revestimento em inúmeras obras residenciais, comerciais e públicas.

O calcário do Ceará vem abastecendo o mercado industrial, desde os anos 40, servindo de matéria-prima para a fabricação de óxido, hidróxidos e carbonatos de cálcio e sendo aplicado nas indústrias de papel, celulose, construção civil, tubos e conexões em PVC, calçados, pisos vinílicos, filler asfáltico, ração animal, e etc.

### **2.3.1 A pedra Cariri**

A Formação Santana, localizada ao Sul do estado do Ceará, constitui um dos principais sítios paleontológicos brasileiros, que preservou em seus sedimentos inúmeros grupos fósseis em excelente estado de conservação, demonstrando a diversidade da natureza da fauna de vertebrados e uma aparente, empobrecida fauna de invertebrados (MARTILL, 1993)

Na região de Santana do Cariri, CE, evidencia-se uma sucessão de até quatro bancos calcários, com espessuras compostas inferiores a 40 metros. A estratificação regular, muito fina e paralela indica um ambiente calmo de sedimentação. A associação fossilífera de insetos e peixes relativamente pequenos indicam um depósito em um corpo de água doce. A região de Nova Olinda representa, provavelmente, as bordas de uma grande lagoa (BERTHOU, 1990).

Essas rochas calcárias foram formadas pelo acúmulo de sucessivas camadas de microcristais de calcita, composto por carbonato e cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e em menor quantidade, cristais de dolomita ( $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), que encontrava-se dissolvido na água. O calcário pode ter sido formado diretamente pela

precipitação da calcita a partir da água do mar ou pode ter sido formado pelo acúmulo de fragmentos de conchas de animais que retiram o carbonato de cálcio da água para construir suas carapaças. Os grãos de calcita e pequenos fragmentos de conchas foram sendo aos poucos compactados sob a pressão das novas camadas depositadas sucessivamente e seguindo as condições climáticas da Terra. Durante esta compactação, ocorreu um processo químico de cristalização de calcita entre os grãos cimentando-os de modo a formarem a rocha compacta e maciça

O calcário laminado, pedra do Cariri, compreendida entre Nova Olinda e Santana do Cariri tem coloração creme claro a amarelo intenso, por vezes um variegado com cinza claro; apresenta uma laminação estratificada plano-paralelas horizontalizadas, constituindo uma reserva de 114,5 milhões de metros cúbicos na região que afloram de modo tabular ao longo de rios e riachos, cujo capeamento varia de 0,5 a 2,5 m, constituído de fragmentos de calcário creme a amarelado, cinza claro a escuro, misturados com folhelhos cinza e marrom, alterados e matéria orgânica com areias e argilas (CETEM/CETEMAG, 2005).

As indústrias do Cariri (60 microempresas) de extração e beneficiamento do calcário laminado, conhecidas comercialmente como pedra Cariri, surgiram a partir dos anos 60, localizadas nos Municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda, CE, compõem-se em torno de 300 frentes de lavra, com uma produção de 80 mil toneladas por ano, sendo a principal atividade da economia dos dois municípios, a cargo de (FIEC, 2011). A Pedra do Cariri, comercializada bruta, tem uma apreciável clientela e um forte mercado consumidor no Norte, Nordeste e Sul, Consumo que apresenta um contínuo crescimento anual, justificado pelo baixo custo, e suas características físicas - cor clara amarelada ou azul, polimento natural, antiderrante e friabilidade

#### **2.4 Rochas ornamentais para uso como revestimento em construção civil**

Diante de um cenário de ofertas globalizadas, a utilização de metodologia normatizada que padroniza os ensaios e resultados, adequando os materiais aos usos específicos, torna-se uma importante ferramenta em todos os setores produtivos.

A ABNT detém, obviamente, um papel econômico relevante em todas as atividades no território nacional, que se ausente do setor, compromete o seu desenvolvimento. As rochas ornamentais, como revestimentos na construção civil, durante anos, utiliza-se de parâmetros de normas estrangeiras, que, recentemente, teve validadas as NBR 15844, 15845 e 15846 específicas para rochas de revestimento – requisitos para granitos, a partir de 10 de julho de 2010.

As rochas ornamentais utilizadas como revestimento na construção civil devem obedecer a uma série de parâmetros, importantes para a qualidade e durabilidade das edificações, a partir das seguintes características: aspecto estético-decorativo da rocha; avaliação da sua composição mineral e propriedades físico-mecânicas; definição do sistema de fixação a ser adotado e dos esforços solicitantes, devido às cargas atuantes no revestimento, inclusive as ações das intempéries as agressões químicas e físicas do meio.

Os ensaios tecnológicos, normalizados por entidades brasileiras e estrangeiras, com destaques para a “American Society for Testing and Materials” - ASTM e a “European Comitee for Standardization” – CEN (GONZÁLEZ-MESONES 2005); usados na caracterização física e mecânica das rochas e exigidos na qualificação das matérias-primas e dos produtos, importante, tanto aos que comercializam quanto àqueles que aplicam os produtos pétreos. Os ensaios buscam representar os esforços solicitantes e demais condições que a rocha estará submetida desde a extração até seu uso final.

A Tabela 2.1 apresenta os ensaios recomendados por órgãos normativos para a caracterização básica das rochas, importantes na etapa extrativa, informação básica na etapa de pesquisa e no planejamento da lavra, no beneficiamento e nas avaliações de possíveis alternativas de aplicação como revestimento (FRASCÁ, 2001).

Tabela 2.1. Ensaios de caracterização das rochas brutas

ENSAIOS	NORMAS				
	ABNT -NBR	ASTM	DIN <sup>1</sup>	AFNOR <sup>2</sup>	UNI <sup>3</sup>
Análise Petrográfica	12.768/92	C-295	--	B-10301	9724/1
Índices Físicos	12.766/92	C-97	5102	B-10503 B-10504	9724/2
Compressão Uniaxial	12.767/92	C-170	52105	B-10509	9724/4
Congelamento/Degelo	12.769/92		52104	B-10513	
Flexão em 3 Pontos	12.763/92	C-99/C-880	52112	B-10510	9724/5
Dilatação Térmica Linear	12.765/92	E-228			
Desgaste Amsler	12.042/92	C-241	52108	B-10518	2232
Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sônicas	D-2845				
Módulo de Deformab.	10.341/88	D-3148			
Resistência ao Impacto	12.764	C-170			
Microdureza Knoop					724/6

Fonte: (FRASCÁ, 2001). <sup>1</sup>DIN – Deutsches Institut für Normung; <sup>2</sup>AFNOR – Association Française de Normalisation; <sup>3</sup>UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

A Tabela 2.2 apresenta os ensaios, indicados pela experiência de centros de pesquisas, alguns não normatizados, e realizados conforme as condições do meio onde o material será aplicado, estabelecendo o uso das rochas beneficiadas na especificação para o emprego como produto final em revestimento da construção civil (FRASCÁ, 2001).

Tabela 2.2. Ensaios de caracterização das rochas beneficiadas - polidas

ENSAIOS	NORMAS		
	ABNT - NBR	ASTM	UNI
Resistência à Flexão 4 Pontos		C-880	
Impacto Corpo Duro	12.764/92	C-170	
Resistência ao Ataque Químico	13.818/97 Anexo H		
Exposição à nevoa salina	8094/83		
Exposição ao dióxido de enxofre	8096/83		
Exposição a intemperismo artificial	G-53/83	G-53	
Exposição ao choque térmico			G-53/83
Manchamento	13.818/97 Anexo G		
Resistência ao Escorregamento	13818 Anexo N	C-1028	
Resistência ao Desgaste	6481		

Fonte: (FRASCÁ, 2001)

Para orientar e nortear a utilização dos ensaios mais importantes para um determinado uso da rocha como revestimento na construção, a Tabela 2.3 abaixo, sumariza os ensaios considerados necessários e recomendáveis em casos específicos de uso na construção civil (CHIODI FILHO, 2008).

Tabela 2.3. Ensaios e análises de acordo com o uso

USOS/ENSAIOS	AP	IF	DE	IM	CO	MD	FL	DT	ALT
Revestimentos Externos	A	A	B	C	A	B	A	A	A
Revestimentos Internos	A	A	B	C	A	C	A	B	C
Pisos Externos	A	A	A	B	A	C	A	A	A
Pisos Internos	A	A	A	B	A	C	A	B	B
Degraus	A	A	A	B	A	C	A	A	A
Tampas	A	A	B	B	A	C	A	C	A

Convenções: AP: petrografia; IF: índices físicos; DE: desgaste Amsler; IM: impacto de corpo duro; CO: compressão uniaxial; MD: módulo de deformabilidade; FL: flexão; DT: dilatação térmica; ALT: alterabilidade

A: necessário                      B: desejável                      C: recomendável em casos especiais

Fonte: (CHIODI FILHO, 2008)

O padrão estético obtido pela cor, textura e homogeneidade da rocha, são determinados pela estrutura e composição mineral, constituindo importantes fatores para o comércio e uso das rochas como material de revestimento na construção civil (ABIROCHAS, 2008).

As características tecnológicas são de fundamental importância para qualificar as rochas ornamentais para uso na construção civil. No entanto, as o conhecimento da geomorfologia é de grande importância por ter implicações nas suas propriedades e na definição dos materiais com melhores características para o projeto. Nesse sentido, deve-se salientar que a análise petrográfica está regulamentada pela norma ABNT NBR 15845 (2010), ASTM C294 (1986) e EN 12407(2000).

Os estudos mineralógicos e petrográficos são importantes na caracterização das rochas, pois estabelece as relações texturais, microestruturais e mineralógicas que influenciam diretamente nas propriedades físico-mecânicas. A influência da investigação petrográfica é citada como ferramenta de previsão de parâmetros físicos e mecânicos como porosidades, desgaste abrasivo, resistência à compressão e módulo de ruptura (NAVARRO, 2002).



Henriques e Tello (2006) propuseram uma qualificação tecnológica das rochas ornamentais para revestimentos na construção civil, adotando os parâmetros médios dos ensaios. Essa classificação está apresentada no *Manual da Pedra Natural para Arquitectura* (HENRIQUES & TELLO, 2006) resumidamente ilustrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Qualificação tecnológica ensaios de caracterização

Qualificação da rocha	Baixa	Regular	Média	Boa	Ótima
Absorção de Água (%)	> 3,0	1,0 – 3,0	0,4 – 1,0	0,1 – 0,4	< 0,1
Porosidade Aparente (%)	> 6,0	3,0 – 6,0	1,0 – 3,0	0,5 – 1,0	< 0,5
Resistência à Compressão (MPa)	< 40	40 – 70	70 – 130	130 – 180	> 180
Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)	< 6	6 – 12	12 – 18	18 – 22	> 22
Coefficiente de Dilatação Térmica ( $\text{mm} \times 10^{-3}$ )	> 12	10 – 12	8 – 10	6 – 8	< 6
Resistência ao Impacto (m)	< 0,30	0,30 – 0,50	0,50 – 0,70	0,70 – 0,95	> 0,95
Resistência ao Desgaste Amsler (mm)	> 6,0	3,0 – 6,0	1,5 – 3,0	0,7 – 1,5	< 0,7

Fonte:(HENRIQUES & TELLO, 2006)

A NBR 15844 (2010) estabelece valores limites mínimos para granitos utilizados para fins de rochas ornamentais, como revestimentos em construção civil. A Tabela 2.5 abaixo sumariza em requisitos, os valores limites presentes nessa normalização.

Tabela 2.5. Valores limites para granitos segundo a norma brasileira NBR 15844 - 2010

Propriedades	Unidade	Requisitos – limites
Densidade aparente	$\text{Kg/m}^3$	2.550 - mínimo
Porosidade aparente	(%)	1,0 - máximo
Absorção de água	(%)	0,4 - máximo
Módulo de ruptura (flexão três pontos)	MPa	10,0 - mínimo
Resistência a flexão por quatro pontos	MPa	8,0 - mínimo
Resistência ao desgaste	$\text{mm}/1000\text{m}$	1,0 - máximo
Resistência ao impacto de corpo duro	m	0,3 - mínimo
Coefficiente de dilatação térmica linear	$[10^{-3}\text{mm}/(\text{m} \times ^\circ\text{C})]$	8,0 - máximo
Resistência a compressão uniaxial	MPa	100 - mínimo

A Tabela 2.6 apresenta os valores limites para os diferentes resultados e respectivas propriedades e seu desempenho em serviço das rochas e usadas como revestimentos (FRAZÃO & FARJALLAT, 1996).

Tabela 2.6. Valores limites segundo a ASTM

Rocha	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> ) ASTM C97	Absorção de Água (%) ASTM C97	Compressão Uniaxial (MPa) ASTM C170	Flexão 03 pontos (MPa) ASTMC99	Flexão 04 pontos (MPa) ASTM C880	Normas ASTM
Granito	≥ 2560	≤ 0,40	≥ 131	≥ 10,34	≥ 8,27	C 615-92
Mármore						
• • Travertino	≥ 2595	≤ 0,75	≥ 52	≥ 7		
• • Calcítico	≥ 2800					C 503-89
• • Serpentinico	≥ 2690					
• • Dolomítico	≥ 2305					
Calcário						
<b>densidade</b>						
• • baixa	1760-2160	≤ 12,0	≥ 12	≥ 2,9		C 568-89
• • média	2160-2560	≤ 7,5	≥ 28	≥ 3,4		
• • alta	>2560	≤ 3,0	≥ 55	≥ 6,9		
Arenito						
≥60% SiO <sub>2</sub>	≥ 2003	≤ 8,0	≥27,6	≥ 2,4		
≥ 90% SiO <sub>2</sub>	≥ 2400	≤ 3,0	≥68,9	≥ 6,9		C 616-89
Quartzito						
≥ 95% SiO <sub>2</sub>	≥ 2560	≤ 1,0	≥137,9	> 13,9		

Fonte: (FRAZÃO & FARJALLAT, 1996).

As interpretações de resultados dos ensaios de caracterização tecnológica definem as possibilidades de emprego de diferentes rochas para fins ornamentais, através dos parâmetros exigidos no ambiente de aplicação, vale destacar os parâmetros utilizados diretamente nos cálculos de materiais para os projetos de construção, a resistência à flexão, o coeficiente de dilatação térmica e a massa específica, cujos valores são incorporados diretamente nos cálculos das dimensões e espessuras das chapas fixadas com grampos em fachadas de edifícios.

De acordo com ARTUR et al. (2001), as correlações entre os dados petrográficos e os resultados dos ensaios físico-mecânicos são diretas e evidentes. Inclui-se nesta categoria o grau de micro fissuramento em relação às porcentagens de porosidade e absorção d'água das rochas graníticas, e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas que se propagam mais

rapidamente em rochas menos alteradas, com maior massa específica e melhor entrelaçamento mineralógico.

Segundo LIMA (2002), as rochas silicáticas com um incremento de 5% no conteúdo de quartzo, o coeficiente de dilatação térmica linear aumenta em 16%. A redução no tamanho dos cristais aumenta o coeficiente de dilatação térmica linear entre 2 a 6%. Um aumento de 1% na porosidade pode gerar uma redução média do coeficiente de dilatação térmica linear de 27,5%. Sabe-se que a dilatação térmica linear decresce com o aumento da porosidade, pois espaços vazios entre os minerais conduzem à redução do módulo de elasticidade. Rochas com elevado microfissuramento apresentam valores menores de módulo. Quanto maior a granulação de um granito, menor será a sua dilatação térmica.

MATTOS (2005) estabeleceu que a correlação direta entre mineralogia e resistência ao ataque químico, principalmente a relação inversa entre perda de brilho e quantidade de quartzo. E que a correlação entre absorção, porosidade, microfissuras e perda de reagente é coerente, indicando que o comportamento das rochas nos testes de alterabilidade não devem ser analisados isoladamente, mas sempre correlacionados com a mineralogia, características petrográficas e os índices físicos.

## **2.5 A Alterabilidade das rochas ornamentais**

Atualmente vários estudos são dedicados a alterabilidade de rochas ornamentais utilizadas na construção civil, aspectos relevantes, que comprometem a segurança e a estabilidade dos revestimentos, é um importante tema para ser contextualizado.

AIRES BARROS (1991) define a alteração de uma rocha, como uma desagregação e decomposição por ação de agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha em outro produto natural, em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente

A alterabilidade é um conceito dinâmico que se refere à aptidão de uma rocha para se alterar em função do tempo. As patologias resultantes das interações rocha/ambiente, que provocam alterações das características físico-químicas do material rochoso, provocam alterações de brilho, cromáticas e

outros defeitos mais severos, chegando a colapsar o material atacado (MARANHÃO & BARROS, 2006).

A alterabilidade também é avaliada a partir do estudo do aumento de vazios e alteração microestruturais e petrográficos, modificações na porosidade e permeabilidade ao longo do tempo em que o material é exposto às intempéries, além da perda de cátions por percolação de fluídos (MESQUITA, 2002).

O ensaio de resistência ao ataque químico permite simular, em laboratório, o processo de envelhecimento do material quando em contato com compostos químicos comumente utilizados na fabricação de produtos de limpeza ou encontrados em substâncias orgânicas naturais. Essa ação ocorre na superfície dos revestimentos, perda de brilho, cor, e da resistência mecânica (FRASCÁ, 2002).

A realização dos ensaios de resistência aos ataques químicos e de outros agentes, para conhecimento de sua alterabilidade, torna-se de grande importância para a especificação de um material adequado e duradouro, que preserve a sua qualidade durante sua vida em uso.

O ensaio de resistência ao ataque químico, conforme a norma NBR 13818 - Anexo H (ABNT, 1997), consiste na aplicação de substâncias químicas diretamente na superfície polida das rochas ornamentais, especificamente, placas graníticas, simulando os ambientes agressivos em velocidade acelerada.

Os efeitos do ataque de substâncias agressivas ao material são estudados com relação à diminuição do brilho, as alterações cromáticas e o desgaste do mineral (corrosão), avaliados antes e depois dos ataques químicos, para as avaliações das possíveis alterações e seus objetivos são descritos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 Ensaio de alteração acelerada e seus objetivos.

ENSAIO	OBJETIVOS
CONGELAMENTO E DEGELO - (EN 12371:2001 / ABNT - NBR 12.769:1992)	Verificação da eventual queda de resistência da rocha (por ensaios mecânicos) após 25 ciclos de congelamento e degelo.
CHOQUE TÉRMICO (EN 14066:2003)	Verificação da eventual queda de resistência da rocha (por ensaios mecânicos) após simulação de variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes.
EXPOSIÇÃO A ATMOSFERAS SALINAS (EN 4147:2004)	Simulação, em câmaras climáticas, de ambientes marinhos ricos em sais e potencialmente degradadores, e verificação visual das modificações decorrentes.
SATURAÇÃO E SECAGEM Não há norma específica	Simulação de intemperismo, realizada pela verificação da eventual queda de resistência mecânica da rocha, após ciclos de umedecimento em água e secagem em estufa.
INTEMPERISMO ARTIFICIAL Não há norma específica	Simulação da exposição ao intemperismo, por ciclos de umedecimento e secagem em câmaras de condensação e radiação de luz ultravioleta. Especialmente indicado para verificação de possível fotodegradação de resinas aplicadas em rochas, a serem usadas em exteriores.
<b>AÇÃO DE POLUENTES</b>	
EXPOSIÇÃO A ATMOSFERAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE	Simulação, em câmaras climáticas, de ambientes urbanos poluídos (umidade e H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), potencialmente degradadores de materiais rochosos, e verificação visual das modificações decorrentes
<b>AÇÃO DA CRISTALIZAÇÃO DE SAIS</b>	
AÇÃO DA CRISTALIZAÇÃO DE SAIS (EN 13919:2002)	Imersão parcial de corpos-de-prova em soluções de natureza ácida (ácido sulfúrico) para simulação da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências) na face polida dos ladrilhos.
AÇÃO DA CRISTALIZAÇÃO DE SAIS (EN 12370:1999)	Consiste em número determinado de ciclos de imersão de corpos-de-prova em solução salina e secagem em estufa. Rochas porosas (arenitos, por exemplo) podem se desintegrar antes do final do ensaio. Pouco apropriado para granitos.
<b>AÇÃO DE LIMPEZA</b>	
RESISTÊNCIA AO ATAQUE QUÍMICO (ABNT NBR 13.819/87, Anexo H, modificado)	Consiste na exposição, por tempos predeterminados, da superfície polida da rocha a alguns reagentes comumente utilizados em produtos de limpeza, para verificar-se a susceptibilidade da rocha ao seu uso.
<b>AÇÃO DE MANCHAMENTO</b>	
RESISTÊNCIA AO MANCHAMENTO (ABNT NBR 13.819/87, Anexo G, modificado)	Verificação da ação deletéria de agentes manchantes selecionados, de uso cotidiano doméstico e/ou comercial, quando em contato com a rocha.  Objetiva a orientação do uso da rocha como tampos de pias de cozinha ou de mesas residenciais ou de escritórios.

Fonte: (FRASCÁ, 2003)

A composição mineralógica das rochas e suas características estruturais definem o nível de resistência das mesmas quando submetidas a condições ambientais agressivas, ou mesmo o emprego de materiais de assentamento e/ou de rejuntas inadequados.

O revestimento é afetado pela ação do intemperismo, que provoca desgaste das rochas, materiais ligantes (cimento, argamassa, e até do substrato - concreto). As principais patologias resultam da atuação do intemperismo químico, físico o enegrecimento superficial por ação de microorganismos, fissuras de dilatação, infiltrações, desacoplamento dos ladrilhos e desgaste e dissoluções do material pétreo.

Para definir possibilidades de recuperação de rochas alteradas/degradadas no que tange ao seu polimento e brilho, MEYER et al (2003) propôs uma sistemática de classificação de degradação que relaciona as patologias e suas magnitudes ao “grau” (possibilidade) de recuperação, sugerindo a forma de tratamento da rocha bem como uma forma de classificação quanto a resistência as patologias. A parametrização está apresentada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8. Classes de resistência química e de recuperação de rochas alteradas

ALTERAÇÕES (Patologias)	Valores	Perda do brilho (%)	Resistência a corrosão	Classe de resistência	Grau de recuperação
Perda ao Brilho (PB)	0	40	Alta	A	I - Secar e Polir
Eflorescência + PB	0	≤ 30	Alta a moderada	B	
Desbotamento + PB	1	≤ 50	Moderada a baixa	C	II - Lixar
Desbotamento + Eflorescência + PB	2	≤ 50	Baixa	C*	
Eflorescência + Covas	3	> 50	Baixa sem corrosão	D	III - Substituir
Desbotamento+ Covas+ PB	4	>50	Baixa e forte	S*	

Fonte: (MEYER et al, 2003)

Destaque-se a importância da especificação dos revestimentos pétreos nas cidades litorâneas brasileiras, relativamente às condições climáticas agressivas, a salinidade atmosférica, que associada às situações como as umidades relativas próximas a 80%, as temperaturas médias de 28°C e a contínua exposição ao sol ao longo de todo o ano, torna o cenário preocupante quanto a durabilidade dos materiais especificados e quanto a sua aplicação adequada. A prevenção de problemas relacionados à absorção de líquidos e oleosidade, pode ser viabilizada através de impermeabilizantes subsuperficiais hidro e óleo repelentes. A utilização desse selante exige testes específicos, pois os produtos disponíveis no mercado guardam sigilo de sua composição química, e suas recomendações de uso são muito genéricas.

## **2.6. Estudos sobre a caracterização de rochas ornamentais**

Tem-se observado vários estudos ao redor do mundo abordando a caracterização de rochas ornamentais, particularmente na Europa, em países com maior tradição em produção e comercialização de rochas ornamentais, como Portugal, Espanha e Itália.

Em especial, os trabalhos divulgados buscam definir a resistência da rocha aos agentes químicos, manchamento, poluição ambiental, névoa salina, intempéries, resistência ao desgaste abrasivo, ao impacto, etc., correlacionando seu comportamento com os ensaios de caracterização.

Mesmo materiais de uso consagrado como rochas ornamentais e com enorme volume de estudos de caracterização física e microestrutural, como mármore e granitos, ainda continuam sendo muito analisados e pesquisados, de modo a sempre se ter conhecimento e entendimento das características dos novos jazimentos e variedades descobertos. O que destaca a necessidade e importância de estudos continuados a cerca das características do material que se pretende usar como revestimento. Ademais, frente o panorama de grande expansão do setor de rochas ornamentais nos últimos anos observa-se a grande importância tecnológica e econômica da adequada caracterização dos materiais utilizados como rochas ornamentais.

### 2.6.1 Estudos abordando granitos

WILLARD & Mc WILLIAMS (1969) estudaram as descontinuidades da microestrutura das rochas ígneas, através dos contatos entre grãos, a clivagem mineral e os planos de macla, concluíram de sua influencia nos resultados obtidos nas resistências mecânicas. Explicaram que as descontinuidades atuavam como superfície de fraqueza, que definiriam as direções em que as rupturas ocorreriam.

TUGRUL & ZARIF (1999) estudaram a relação entre a mineralogia e as propriedades físico-mecânicas de rochas graníticas da Turquia. Observou-se que a porosidade total decresceu com aumento da relação teor de quartzo/teor de feldspato (em virtude das fissuras, que se constitui a porosidade predominante, estar associadas ao feldspato). Os seus estudos evidenciaram que as características morfológicas dos minerais constituintes (textura) parecem ser mais determinantes nas características analisadas que a mineralogia, evidenciando que os tipos de contato, o tamanho e a forma do grão influenciam significativamente suas propriedades.

MENEGAZO (2001) desenvolveu um estudo comparativo entre o granito e grés porcelanato cerâmico, utilizando-se de ensaios de coeficiente de atrito dinâmico, concluiu que os resultados eram semelhantes, e um reduzido percentual apresentava o porcelanato com uma pequena margem superior.

GRASSELLI (2001) obteve erros de mensuração dos perfis de rugosidade dos granitos, através de ensaios com o perfilmetro a laser, (técnica de refração de superfície), concluindo que além da variável do teor de quartzo presente, os resultados também dependem dos diferentes arranjos minerais e das microestruturas de superfície.

MATTOS (2005) estabeleceu uma correlação entre os resultados dos ensaios físico e mecânicos e os aspectos petrográficos dos granitos ornamentais do *stock* Serra do Barriga – Ceará, que indicam para menores índices de quartzo, maiores teores de feldspatos e micas, resultando maiores desgastes abrasivos.

SOUSA et al. (2005) estudaram a influência da porosidade e extensão de microfissuração no comportamento físico-mecânico e durabilidade de granitos portugueses. O estudo evidenciou que a presença de trincas



intragranulares são as mais comuns nos granitos estudados, no entanto também foi observada a presença de trincas intergranular e transgranular. Observou-se que a resistência a compressão diminui com o aumento na densidade linear de trincas, mas havendo baixa correlação entre ambos os parâmetros. A baixa correlação foi atribuída a influência de outros fatores, como tamanho de grão, orientação da trincas e de alguns minerais. Verificou-se que o intemperismo provoca o aumento na largura das microtrincas conduzindo a uma maior quantidade de vazios com forma de poros, particularmente no feldspato. Materiais com elevada densidade linear de trincas demonstraram grande suscetibilidade ao processo de degradação por cristalização de sais, indicando que em determinadas condições de uso mais severas, como em cidade litorâneas ou expostos a poluição ambiental, precauções devem ser utilizadas caso os granitos possuam porosidades superiores a 3%.

SIMÃO et al. (2006) avaliaram a influência da matéria particulada oriunda da emissão de veículos a diesel e gasolina (da Espanha e Portugal) na sulfatação de granitos (esses particulados foram coletados de veículos antigos e continham elevado teor de Pb). Os autores observaram abundante crescimento de cristais de sulfato de cálcio, gipsita, e corrosão nas pedras cobertas com o material particulado oriundo dos motores a diesel após 72h de exposição em uma umidade de 100%. Nos materiais expostos ao resíduo oriundo dos motores a gasolina observaram-se apenas pequenos cristais de gipsita. Verificou-se também que a resistência dos granitos aos poluentes depende da resistência dos seus constituintes ao ataque ácido, em virtude da formação de ácido sulfúrico e que o Fe presente nos resíduos catalisa a formação do ácido sulfúrico. Não foi observado aceleração da cinética de formação de ácido em virtude da presença de Pb. A Figura 2.2 evidencia o desenvolvimento de cristais de gipsita no material granítico, associado ao material particulado oriundo do diesel (DPM)

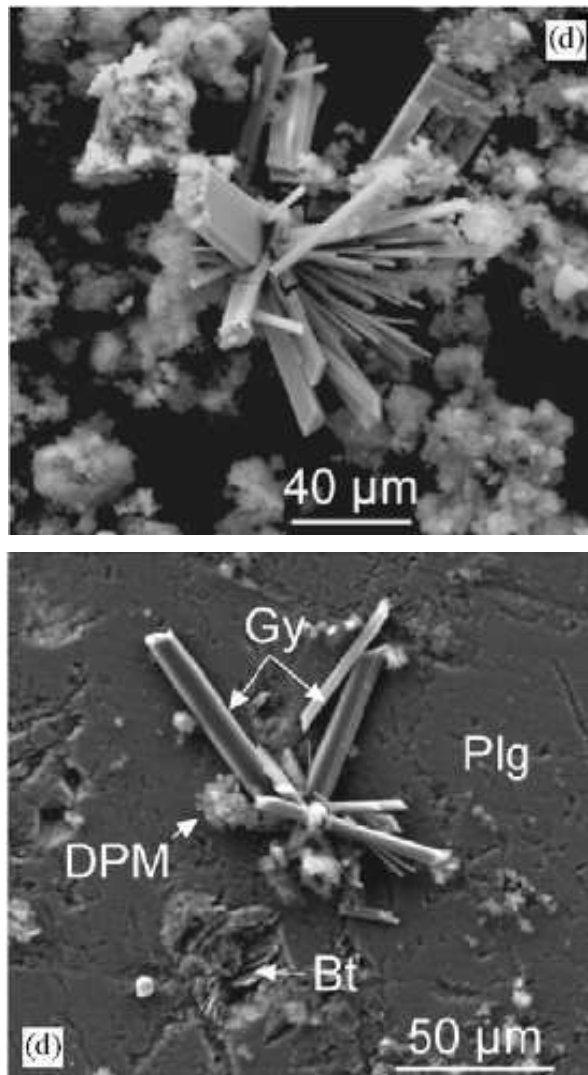


Figura 2.2. Micrografias de MEV de rochas graníticas após exposição a  $\text{SO}_2$ : Plg – plagioclásio, Bt – biotita, Gy – gipsita e DPM – material particulado oriundo do diesel (SIMÃO et al. 2006)

RÍO et al. (2006), considerando que o conhecimento detalhado das propriedades intrínsecas das rochas naturais é fundamental para a adequada caracterização de sua qualidade para uso como rocha ornamental, conduziram estudos de caracterização por ultrassom de granitos espanhóis. Também foram determinadas sua resistência à compressão, ao impacto, dureza knoop, porosidade, absorção de água. Os autores associaram a velocidade de propagação das ondas sonoras à presença de defeitos ou porosidade nos materiais, quanto menor a velocidade de propagação mais “deteriorada” foi considerada a amostra. Os autores buscaram também correlacionar a velocidade de propagação com a resistência e porosidade dos materiais, no entanto não obtiveram correlações bem definidas, observando apenas uma correlação

inversamente proporcional entre a velocidade e a porosidade, entretanto com baixo coeficiente de correlação (0,60).

SALAS et al. (2006) caracterizaram uma centena de amostras de granitos usados como rochas ornamentais, oriundos dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, visando determinar a presença de isótopos radioativos e as dosagens de radiação emitidas. Testes usando radiografia com filmes, evidenciaram que amostras apresentavam radiações com níveis de energia da ordem de 6MeV em quantidade maiores que 100ppm. As regiões que emitiam radiação apresentaram na maioria das amostras as seguintes fases, monazita, alanita e zircônio. Os autores concluíram que a dosagem de radiação emitida estava abaixo dos limites internacionais, de 1mSv/ano, não sendo superado o valor de 0,4mSv/ano nas amostras mais radioativas.

VASCONCELOS et al. (2008) também desenvolveram pesquisas de caracterização de materiais graníticos utilizando ultrassom. Os pesquisadores objetivaram avaliar a suas propriedades físico-mecânicas e o seu estado de alterabilidade ambiental, frente o intemperismo. Os autores concluíram que é possível caracterizar os materiais graníticos utilizando ensaio de ultrassom, tendo sido obtido correlações entre as velocidades de propagação das ondas dentro do material com as propriedades mecânicas determinadas. Os coeficientes de correlação dessas inter-relações variaram de 0,69 a 0,89%. Os autores também evidenciaram que o ensaio era adequado para avaliar o estado de alterabilidade do material, obtendo-se uma relação entre a porosidade dos corpos e a velocidade de propagação com coeficiente de correlação de 0,74%. No entanto, acredita-se que os coeficientes de correlação obtidos por VASCONCELOS et al. (2008) e também por RÍO et al. (2006) não foram adequados para se estimar as propriedades dos materiais, entretanto, há um enorme potencial na técnica por ser um ensaio não destrutivo que permite avaliar as características dos materiais frente ao intemperismo no seu local de utilização.

AMARAL et al. (2008) analisaram a tenacidade a fratura de amostras de granitos, oriundos da Espanha e de Portugal, e avaliaram a influência das condições de ensaio nos resultados obtidos. Observaram que os resultados tendem a apresentar menor variabilidade (dispersão de resultados) quando o

ensaio é feito utilizando um sistema de flexão em quatro pontos e que usando entalhe evita-se de superestimar os valores de tenacidade. Os autores concluíram que a metodologia de ensaio influencia no resultado obtido. Com base nos resultados dos autores acredita-se que a diferença nos resultados, mais intensa em determinadas amostra que em outras, pode esta associado, também, as características petrográficas de cada amostra.

YILMAZ et al. (2009) buscou associar a fragilidade de granitos com a tamanho de grão de seus constituintes. Os autores estudando granitos da Turquia, concluíram que além da proporção entre os minerais quartzo e feldspato (a razão quartzo/feldspato é reconhecida como um dos fatores mais influentes na resistência mecânica de rochas graníticas), o parâmetro tamanho de grão dos feldspatos parece ser o efeito dominante no grau de fragilidade das rochas analisadas. Os autores justificaram essa observação ao fato que planos bem definidos de clivagem são observados nos feldspatos, manifestando-se de forma mais acentuada em materiais com maior tamanho de grão, o que facilita a propagação de trincas e fragiliza o material. No entanto, tem-se que destacar, que os mecanismos de propagação de trincas nas rochas são afetados por vários parâmetros como composição, pré-existência de trincas e fissuras, porosidade, condições de carregamento, tamanho de amostras (AKESSON et al., 2003; WONG et al., 2006; VASCONCELOS et al., 2008) e pela interação entre eles. O que evidencia mecanismos complexos, não definidos em geral, por apenas um parâmetro.

AMARAL et al. (2009) analisaram o mecanismo de desgaste de rochas graníticas utilizando o modelo do sistema de trincas laterais. Os autores, utilizando esse modelo e sabendo-se a força normal aplicada durante o desgaste erosivo obtiveram correlações entre o volume perdido no material com o desgaste por um disco de diamante e propriedade da rocha, como dureza e módulo de elasticidade. Os coeficientes de correlação variaram de 0,76 a 0,97, sendo observada elevada correlação entre o volume removido de material e a tenacidade a fratura das rochas graníticas.

VAZQUEZ et al. (2010) caracterizaram três amostras de granitos oriundos da Espanha. Os autores determinaram a absorção de água pro capilaridade, a velocidade de propagação de onda e as características da

“rede” de trincas (densidade linear de trincas, volume de trincas (porcentagem da área da amostra coberta por trincas) e largura das trincas). Com base nos resultados os autores observaram que não há alterações significativas nos valores das propriedades conforme a orientação do ensaio, o que indica a não existência de orientações preferenciais nas trincas dos materiais analisados.

LÓPEZ-ARCE et al. (2010) estudaram a resistência de granitos espanhóis (usados por vários anos como rochas ornamentais) ao intemperismo natural devido a cristalização de sulfato de sódio em ciclos de molhamento e secagem. Após os ensaios observou-se que as fases mais susceptíveis aos ciclos de cristalização foram o feldspato, a biotita e a região intergranular entre as duas fases. A rugosidade dos granitos submetidos ao intemperismo aumentou (em maior ou menor intensidade dependendo do granito estudado). Também se observou um aumento da porosidade aparente e absorção de água após os ensaios de cristalização (em geral superior a 10%), com o tamanho médio de poro (determinado por porosimetria de mercúrio) aumentando nas amostras analisadas, chegando a incremento de até 50%.

RIVAS et al. (2010) analisaram a influência de agentes modificadores de cristalização do NaCl no tratamento de dessalinização de granitos. Uma das principais causas de deterioração de granitos é a cristalização de sais solúveis de origem marinha e o tratamento de dessalinização é um procedimento utilizado para aumentar a vida útil desses materiais quando utilizados como rochas ornamentais (ou materiais de construção). Esses pesquisadores estudaram o uso de ferrocianeto de potássio e ferrocianeto de sódio como agentes modificadores de cristalização, observando que eficiência desses reagentes depende do granito estudado. Em um dos granitos observou-se que o uso dos cianetos permitiu a migração do NaCl de sódio para superfície e sua cristalização como eflorescência, reduzindo a intensidade de desagregação do material, no outro observou uma maior formação de subeflorescência quando do tratamento. Os autores concluíram que esse comportamento deveu-se a diferença na estrutura dos poros dos materiais analisados. No primeiro a porosidade aberta era bem maior ( $\approx 6\%$ ), enquanto no segundo era de  $\approx 1\%$ , indicando que o real efeito dos reagentes foi mascarado devido à diferente

estrutura capilar dos materiais. A Figura 2.3 ilustra a cristalização de NaCl com eflorescência na superfície do granito estudado.

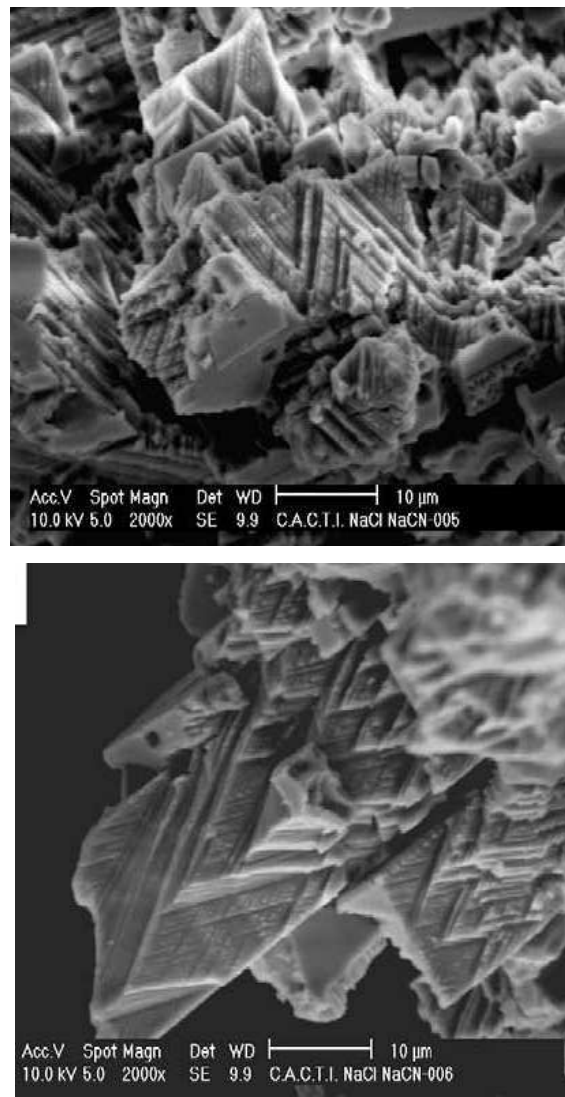


Figura 2.3. Micrografia de MEV das eflorescências de NaCl em rocha granítica (RIVAS et al. 2010)

YILMAZ et al. (2011) efetuaram uma análise buscando associar parâmetros petrográficos com o comportamento mecânico de rochas graníticas ornamentais. Foram analisadas doze amostras de granito e determinada as suas distribuições de tamanhos de grãos e composições químico-mineralógicas. Os autores observaram uma correlação entre a resistência a compressão dos granitos e o teor Fe feldspato presente nas amostras e o tamanho de grão dos feldspatos (mesmo com baixos coeficientes de correlação

- 0,76 e 0,62, respectivamente). Os autores justificaram essa correlação com o fato de maiores grão implicarem em menor quantidade de contornos e conseguinte menor número de barreiras a propagação das trincas e maior facilidade de propagação intergranular das trincas; bem como, ao fato do feldspato possuir planos de clivagem que facilitam a ruptura dos grãos, tal como também observado por TUGRUL & ZARIF (1999).

### **2.6.2. Estudos abordando pedras calcárias**

RODRIGUEZ-NAVARRO e SEBASTIAN (1996) avaliaram a sulfatação de pedras calcárias (limestones) espanholas devido aos poluentes oriundos da emissão veicular. As pedras foram expostas a  $\text{SO}_2$  e a particulados oriundos da emissão veicular sob condições controladas de temperatura e umidade ( $30^\circ\text{C}$  e 100%, respectivamente). Os autores observaram um efeito catalítico crítico do C e do metal presente no particulado na aceleração da taxa de fixação do  $\text{SO}_2$  atmosférico na forma de gipsita nas pedras calcárias. Com base nos resultados os autores propuseram o seguinte mecanismo:  $\text{SO}_2$  catalizado por partículas metálicas e carbono oxida para  $\text{SO}_3$ , que na presença de umidade se transforma em  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que por sua vez ataca a pedra calcária provocando o desenvolvimento de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Os autores destacaram também que há uma grande interdependência entre a degradação de construções históricas, que utilizam pedras calcárias como rochas ornamentais, e a poluição nos grandes centros, sendo necessário apenas a emissão veicular para uma degradação significativa desses materiais. Essa pesquisa ressalta a importância de se conhecer as características do material em suas condições de uso para se definir sua adequada aplicabilidade, especialmente quando se trata de intemperismo e/ou poluição.

RODRIGUEZ-NAVARRO et al. (2000) analisaram a influência da cristalização de surfactantes, usados como biocidas, agentes de limpeza, de proteção de superfície, de dessalinização e estabilizantes de material argiloso, na degradação de pedras calcárias, limestone (porosas, porosidade não indicada pelos autores). Foi analisado todo o comportamento de cristalização, a concentração crítica de cristalização e a influência da presença de sódio e cálcio no meio líquido. Observou-se que o uso de dodecilsulfato de sódio

(“sodium dodecyl sulfate” SDS) em elevadas concentrações pode-se induzir a cristalização de sulfato de sódio hidratado (mirabilita) , promovendo a degradação da rocha através da formação de subeflorescências. Verificou-se que o uso de cloreto de amônio cetil dimetil benzil (“cetyltrimethylbenzylammonium chloride” - CDB) aumenta a solubilização do soluto, favorecendo os mecanismos de transporte da mirabilita e sua cristalização em baixas supersaturações, possibilitando a formação de cristais euédricos, reduzindo inicialmente os danos por cristalização dos sais organofilizadores. No entanto, processos de desidratação e rehidratação da mirabilita podem provocar danos a rocha, mesmo com o uso do CDB.

TÖRÖK (2003) estudando a resistência superficial e alterações microestruturais em virtude do intemperismo de pedras calcárias (com elevada porosidade,  $\approx$  20 a 30%) utilizadas como revestimento e como elementos de construção observou que a poluição atmosférica provoca a formação de incrustações, o que provocou a degradação das rochas, particularmente devido a presença de  $\text{SO}_2$ . O autor observou a presença de elevados teores de sulfato de cálcio (gesso) nas regiões deterioradas das pedras calcárias, que variaram de 27 a 70% (nas regiões mais deterioradas) e que dois tipos de incrustações surgiam nas pedras calcárias conforme a maior ou a menor exposição da rocha a chuva, uma rica em calcita e a outra de uma mistura de gipsita e carbono orgânico.

MIRANDA e QUINTINO (2005) estudando os mecanismos de desgaste (corte) de pedras calcárias quando submetidas a corte por jato de água, evidenciaram que os mecanismos de fratura e desgaste são diferentes de acordo com o tipo de pedra calcária. Verificou-se que a dureza e a porosidade das pedras têm um efeito significativo nos mecanismos de desgaste. Nas rochas carbonáticas mais duras e homogêneas, como os mármore, a fratura e o desgaste ocorrem por nucleação e propagação intergranular e transgranular das trincas, com o arrancamento de grãos, e clivagem dos grãos de calcita. Nas limestones (como as Pedras Cariri) o processo de remoção de material envolve o fissuramento intergranular, mas também, escorregamento do material constituinte da pedra ao longo da matriz argilosa presente ou



escorregamento entre os grãos de calcita, sendo observado inclusive deformação plástica no material.

MARINONI et al. (2007) analisaram as alterações cromáticas de rochas calcárias italianas devido ao intemperismo natural. Os resultados evidenciaram que as alterações cromáticas na superfície de pedras calcárias pretas não são devido a oxidação da matéria orgânica original (presente no material), tal como acreditado. Observou-se que intemperismo químico e mecânico, com microtrinca e dissolução da calcita, associados a deposição de nova matéria orgânica no material conduzem a alterações na rugosidade superficial do material, produzindo uma superfície difusa com menor reflexão de luz, o que seria o motivo das alterações cromáticas das rochas analisadas.

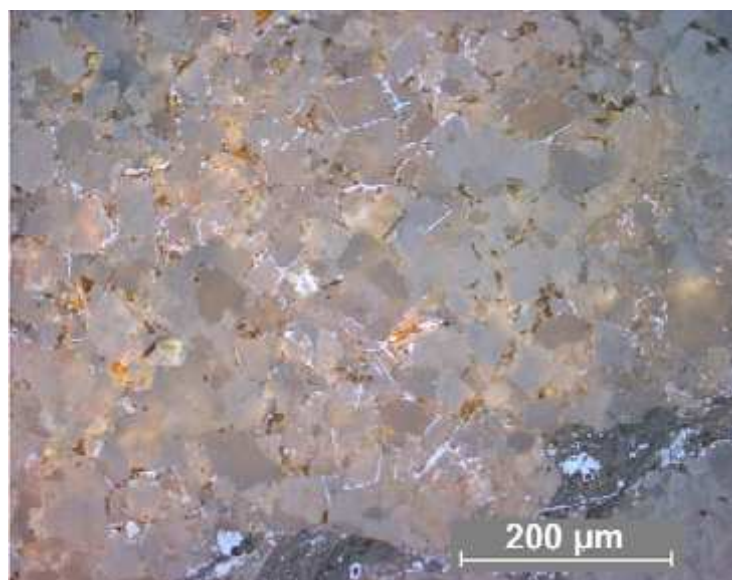
BAMS e DEWAELE (2007) analisaram o manchamento de mármore brancos utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura. O manchamento, descoloração do material, é um dos problemas mais comuns das rochas ornamentais, principalmente das pedras com coloração clara. Os materiais estudados foram caracterizados e submetidos a aquecimento e a solução alcalina visando acelerar os processos de oxidação de seus constituintes e propiciar o desenvolvimento de manchamento no material. Os autores concluíram que apesar da matéria orgânica inclusa no mármore ser, em geral, apontada como responsável pelo manchamento, a investigação evidenciou que ela tem pouca ou nenhuma influência na descoloração das rochas analisadas. Os autores atribuíram o manchamento a presença de pirita e hematita nas rochas analisadas, tendo um papel dominante no desenvolvimento de sua descoloração.

JIMENEZ-LOPEZ et al. (2007) avaliaram o uso de um meio de cultura para ativar a população bacteriana presente na pedra calcária e iniciar o processo de precipitação de carbonato de cálcio (consolidação bacteriana) na superfície do material. Microscopia eletrônica de varredura evidenciou o crescimento de novos cristais de carbonato de cálcio na superfície do material em uma faixa de 300 a 400  $\mu\text{m}$ , e que a nova fase cimentante penetrou no material cerca de 1 a 2 mm. A distribuição de tamanho de poros não foi significativamente alterada, com um pequeno decréscimo no tamanho dos poros, mas muito significativo nos poros maiores (entre 15 e 20  $\mu\text{m}$ ).

DREESEN et al. (2007) analisaram o comportamento de manchamento (descoloração) natural de rochas calcáreas ornamentais não porosas. Observaram que o intemperismo provoca uma seqüência de eventos responsáveis pelo manchamento do material: oxidação de pirita presente no material, formação de água rica em sulfatos, dissolução de dolomita e precipitação de hidróxido de ferro na forma de uma camada nos interstícios oriundos da dissolução dos constituintes da rocha. As Figura 2.4 e 2.5 ilustram o mecanismo de manchamento (descoloração) observado por esses autores.



a)



b)

Figura 2.4. Micrografia ótica da pedra calcária azul: a) após oxidação da pirita (regiões em azul) e b) evidenciando a precipitação de hidróxido de ferro como veios em volta dos cristais de dolomita (DREESEN et al., 2007)

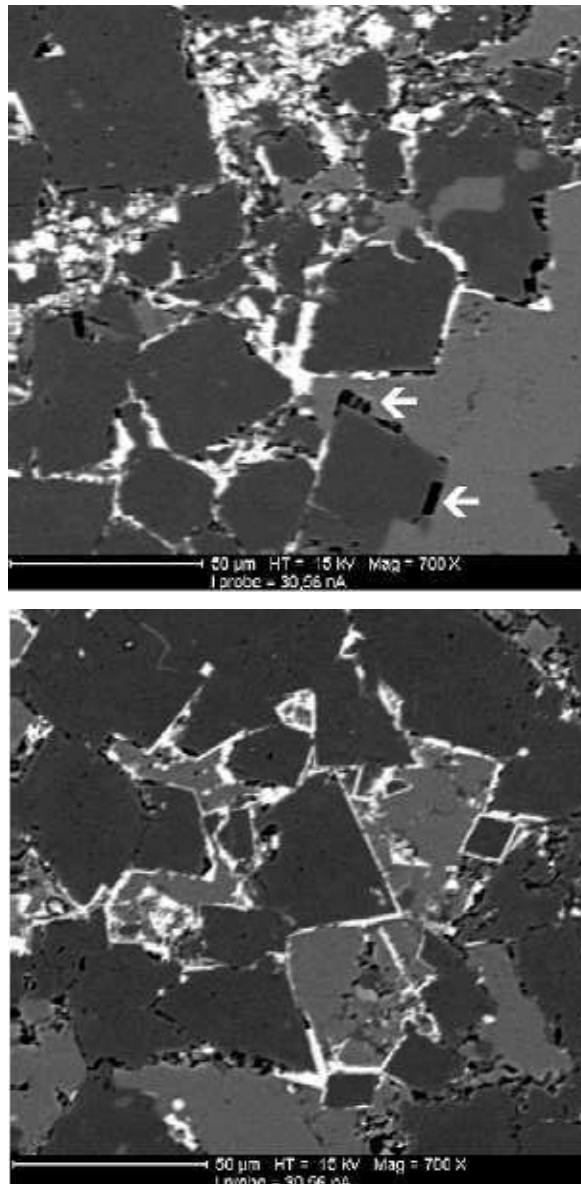


Figura 2.5 Microscopia eletrônica com elétrons retroespalhados da pedra calcária azul após manchamento ilustrando os veios de óxido de ferro (branco), os cristais de dolomita (escuro) e os vazios na estrutura em torno dos cristais de dolomita (DREESEN et al., 2007)

CARDELL et al. (2008) avaliaram o comportamento micro e macroestrutural de rocha calcária com porosidade em torno de 24% e presença de fragmentos de argila, quartzo e feldspato em sua matriz, usada como materiais de construção, quando em contato com soluções de sulfatos alcalinos

e alcalinos terrosos. Os autores observaram que as soluções mais concentradas provocam os maiores danos nas rochas, com a cristalização de sulfato de sódio e magnésio provocando o desenvolvimento de microtrincas e fissuras mais acentuadamente. Também observou-se nas eflorescência a presença de carbonato de cálcio, de magnésio (hidratado) e sulfato de magnésio. Os autores verificaram também, através de porosimetria de mercúrio, que pode ocorrer diminuição ou aumento da porosidade aberta dos corpos em virtude da precipitação e crescimento dos sais no interior dos poros (aumentos foram correlacionados a formação de trincas e fissuras).

GAYLARDE et al. (2008) estudaram a deterioração estrutural de rochas calcáreas relacionadas ao manchamento por ação de cobre. Essas rochas permaneceram por vários anos em contato com cobre oriundo de latão ou bronze em construções e monumentos, sofrendo a ação do cobre. Os autores observaram que o cobre inicialmente protege a rocha da degradação, agindo como um biocida e evitando a degradação do material por ação de microorganismos, no entanto, segundo os autores, após vários anos há a formação de carbonato de cobre e seu acúmulo no decorrer dos anos em regiões sub-superficiais, o que provoca deterioração mecânica do corpo e sua fragmentação.

MARAVELAKI-KALAITZAKI et al. (2008) estudaram o tratamento de rochas calcárias gregas (limestones) com materiais poliméricos a base de silício e partículas coloidais de sílica visando reforçar suas propriedades mecânicas. Foi observado que o tratamento com ester e com sílica coloidal reduziram os valores de permeabilidade a água a valores aceitáveis, no entanto também provocaram alterações de coloração no material. O efeito do tratamento na resistência mecânica variou com o tipo de material estudado. As pedras calcárias com poros grandes ( $\approx 50\mu\text{m}$ ) apresentaram decréscimo da resistência com o tratamento, enquanto as rochas com poros pequenos ( $\approx 2,5\mu\text{m}$ ) apresentaram elevação no seu comportamento mecânico com o tratamento, evidenciando assim, a importância do conhecimento das características microestruturais do material para seu adequado beneficiamento e aplicação comercial.

XIANG et al. (2009) examinaram a dissolução da calcita em função do pH e na presença de enxofre. O que é importante para se analisar a vida útil de rochas calcárias quando utilizadas como materiais ornamentais expostos a poluição ambiental, particularmente em cidades com elevado índice de poluição. Os autores desse trabalho observaram que a taxa de dissolução da calcita na presença de sulfito aumenta com a temperatura e que a cristalinidade da calcita tem uma grande influência na taxa de dissolução, quando maior a cristalinidade menor a taxa. Verificou-se também que pH menor que 5,5 intensifica a dissolução e que pH maiores inibem o processo.

SILVA & SIMÃO (2009) examinaram a influência da névoa salina nas alterações dimensionais de pedras calcárias (limestones e mármore) e rochas graníticas. Os materiais foram submetidos a ciclos de pulverização de solução salina e secagem e em seguida caracterizados. Os autores observaram acentuada modificação na rugosidade superficial de todos os materiais analisados, também foi verificado perda de peso e cristalização superficial de sal (eflorescência) em todas as rochas ornamentais analisadas. Nas rochas calcárias a perda de peso (em virtude provavelmente do desenvolvimento de sub-eflorescências, microfissuramento e “desmembramento” da amostra) e de brilho (aumento da rugosidade superficial) foram mais significativas que nos materiais graníticos, em virtude, provavelmente, segundo os autores, da elevada porosidade do material, fácil acesso da água ao interior do material e a fácil desagregação do material argiloso presente. Nas rochas graníticas verificou-se mais acentuadamente degradação mineral, com a biotita e mica sendo os minerais que apresentaram maiores alterações. Observou-se a expansão das lamelas da biotita e mica em virtude da cristalização do sal no seu interior, a qual foi favorecida pelas suas excelentes características de clivagem. Essa expansão juntamente com a cristalização do sal nos poros provocou a desagregação da matriz vítrea e conseqüentemente perda de massa no material granítico. A Figura 2.7 apresenta a perda de massa do material granítico e do calcário em função dos ciclos de pulverização.

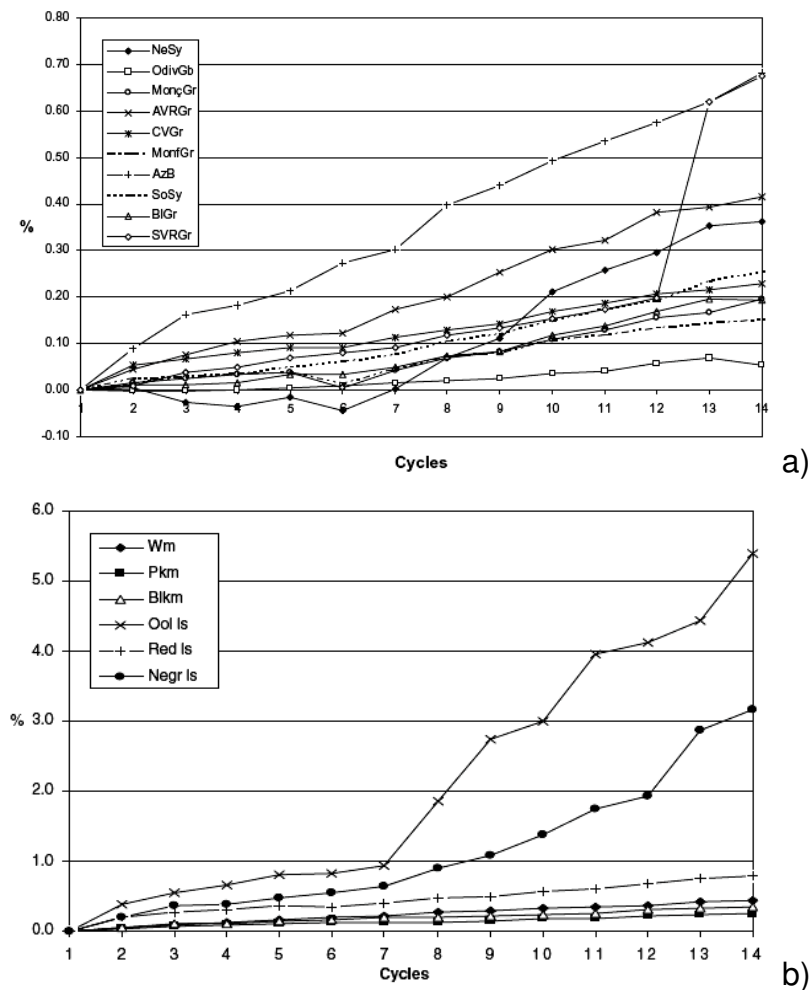


Figura 2.6. Perda de massa dos materiais graníticos (a) e calcários (b) em função dos ciclos de pulverização (SILVA & SIMÃO 2009)

CNUdde et al. (2009) caracterizaram de arenitos, com porosidades variando de 5 a 23%, e de um limestone, com porosidade em torno de 51%, visando uso como material de construção. A porosimetria de mercúrio indicou uma concentração de poros em torno de 20 e 70 $\mu$ m, enquanto as amostras de arenito apresentaram concentrações de poros inferior a 0,1 $\mu$ m ou superior a 10 $\mu$ m, dependendo da amostra. Os autores buscaram comparar os resultados obtidos com a porosimetria de mercúrio com dados obtidos com microtomografia de raios X, no entanto observaram que as faixas de tamanhos poros analisadas eram diferentes, com a microtomografia fornecendo informações sobre a faixa de poros acima de 10 $\mu$ m. Os dados de microtomografia indicaram que o teor de porosidade fechada nos materiais variam de 8 a 18%, observando-se uma porosidade total no limestone de 69%.

BUJ et al. (2010) caracterização pedras calcárias, limestones, oriundas da Espanha, e analisaram a influência do seu sistema de poros no comportamento de degradação com a ação de cristalização de sais (segundo o ensaio normatizado - EN 12370:1999). As rochas analisadas apresentaram em sua constituição elevada teores variados de dolomita, com rochas apresentando teores de até 80-90% de dolomita. A porosidade dos materiais analisados foi inferior a 4%, com esses apresentando fundamentalmente poros com dimensões inferiores a 0,2 $\mu$ m. Os materiais apresentaram elevada resistência a deterioração por cristalização de sais. Essa resistência foi atribuída pelos autores a baixa porosidade e a predominância de poros pequenos, inferiores a 0,2 $\mu$ m.

MAHROUS et al. (2010) avaliaram propriedades tecnológicas (resistência a compressão e a abrasão) de pedras calcárias e executaram sua caracterização mineralógica, visando sua utilização como materiais de pavimento na construção civil. Os autores evidenciaram uma grande lacuna de informações tecnológicas a cerca do uso das pedras calcárias do Egito como materiais de construção. Os pesquisadores observaram que as pedras calcárias estudadas apresentam elevada quantidade de feldspatos, superiores a 10% e teores de calcita variando de 20 a 60%. Os teores apresentados por esses autores diferem das composições mineralógicas observadas em outros trabalhos, indicando inclusive que algumas das rochas analisadas não se tratam de rochas calcárias propriamente ditas, destacando novamente a importância de estudos de caracterização para a adequada aplicação dos materiais na construção civil. Os autores não verificaram correlação entre a resistência a compressão e a abrasão e os teores de calcita e quartzo presente nos materiais, concluindo que alguns materiais podem ser utilizados para uso como pavimentos em regiões de alto tráfego. A pesquisa evidencia que é necessária a análise pormenorizada de cada material para se ter a real dimensão de sua aplicabilidade e assim, utilizado adequadamente.

PIRES et al. (2010) apresentam um estudo de caso de revestimento calcário, com porosidade aparente em torno de 2,5%, utilizado como pavimento de uma residência que apresentou sinais de degradação com o aparecimento de eflorescências após aproximadamente um mês de sua colocação em uso.

Verificou-se que a desagregação na peça ocorreu ao longo da interface dos estratos da rocha (rocha formada por camadas sucessivas formando estratificações, a semelhança da Pedra Cariri). Deve-se ressaltar que essa interface, nesse material, é rica em material argiloso. Na composição química da eflorescência os autores observaram uma predominância de cálcio, mas também a presença de magnésio, silício, alumínio e ferro, e como fase predominante a calcita. Nessa pesquisa os autores indicaram que o cálcio nas eflorescências era oriundo da argamassa e cimento e não apenas da pedra calcária. Os autores observaram, por fim, a necessidade de tratamento superficial (na parte basal) dos pavimentos de modo a evitar a percolação da água oriunda da argamassa e assim evitar a diminuição de resistência da rocha ornamental usada como pavimento.

UROSEVIC et al. (2010) estudaram a influência da rugosidade superficial de pedras calcárias (travertino) com relação ao envelhecimento sob névoa salina. A deterioração de rochas ornamentais induzidas pelo sal (cristalização-solubilização) provoca uma série de alterações microestruturais e mecânicas nos materiais atacados, principalmente em regiões próximas ao mar. Utilizou-se um travertino polido (selagem com gesso e resina seguida por polimento) e um rugoso (material não polido), os quais foram submetidos a ciclos de molhamento (com “spray”) e secagem em temperatura constante de 35°C. Observou-se um aumento na porosidade dos materiais estudados, tanto nos polidos como naqueles com elevada rugosidade superficial. No entanto, o aumento da porosidade aparente nesses últimos materiais foi maior, cerca de 25% (nos polidos o aumento da porosidade foi de  $\approx 15\%$ ). O aumento na porosidade dos materiais não polidos submetidos à névoa salina refletiu-se no aumento de sua área superficial (determinada pelo método de BET), observando-se um aumento de quase 100%. Por outro lado o material polido apresentou um aumento muito pequeno de sua área superficial. A microscopia evidenciou que a penetração do sal no travertino foi de apenas 200  $\mu\text{m}$ , no entanto foi suficiente para provocar alterações cromáticas em ambas as amostras. A Figura 2.8 apresenta as características macroscópicas do travertino rugoso e do polido após ataque da névoa salina.





Figura 2.7. Características macroscópicas da superfície do travertino após ensaio de envelhecimento com a névoa salina a) rugoso e b) polido (UROSEVIC et al. 2010)

KARACA et al. (2010) analisaram a influência de ciclos de congelamento-descongelamento na resistência a abrasão de rochas ornamentais: mármore, limestones, travertinos e granitos. Os autores submeteram as rochas a 28 ciclos de congelamento-descongelamento variando a temperatura de  $-20$  a  $20^{\circ}\text{C}$ . Os limestones e os granitos analisados apresentaram porosidade inferiores a 2 e 1% respectivamente. Observou-se que a perda de massa devido ao ensaio de abrasão aumenta após o congelamento-descongelamento em todas as amostras, a exceção do granito (os autores creditaram a resistência do granito à insensibilidade do tipo de ensaio de abrasão utilizado quando aplicado a materiais como o granito – maior resistência ao desgaste).

FRONTEAU et al. (2010) analisaram limestones utilizados na fachada de edifício, caracterizando-os e avaliando sua durabilidade. Os limestones estudados apresentaram porosidades variando de 12 a 45%, com tamanhos de poros da ordem de 0,1-0,2 $\mu$ m em algumas amostras e da ordem de milímetros em outras. Os resultados dos resultados de capilaridade da água foram comparados com os de estudos efetuados dez anos antes, observando-se que algumas rochas apresentaram variações significativas nesses coeficientes, indicando degradação no material. Mesmo rochas tratadas com materiais repelentes a água apresentaram variações nos coeficientes, como por exemplo, de 0.1  $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1/2}$  to 1.4  $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1/2}$ , evidenciando a perda da eficiência do tratamento de hidrofobicidade ao longo dos anos. Por outro, lado algumas rochas mantiveram coeficientes de capilaridade semelhantes aos dos estudos realizados anteriormente, evidenciando que em algumas materiais o tratamento para proteção contra água se manteve eficiente.

UROSEVIC et al. (2011) caracterizaram amostras de pedras calcárias, duas de calcarenito e duas de travertino, oriundas da Espanha. Evidenciou-se que as amostras são constituídas basicamente por calcita, os calcarenitos contendo pequenos teores de quartzo (< 10%, mesmo sendo apresentada como um calcarenito), argila e feldspato (< 5%), e os travertinos contendo pequenos teores de argila, feldspato, quartzo e dolomita. A porosidade aberta dos calcarenitos esta entre 25 e 30% e a dos travertinos esta em torno de 8%. Os calcarenitos apresentaram duas concentrações de poros bem definidas, em torno de 0,3 $\mu$ m e 40 $\mu$ m, enquanto nos travertinos os poros concentraram-se em torno de 0,1 $\mu$ m em uma das amostras e 1 $\mu$ m na outra amostra (entretanto os autores não levam em consideração a macroporosidade dos travertinos, com poros nas suas amostras da ordem de 1mm). Por fim os autores indicam essas rochas como adequadas para uso como materiais de construção.

LAM dos SANTOS et al. (2011) estudaram a influência da temperatura, envelhecimento térmico e choque térmico no módulo de ruptura de ladrilhos artificiais - sintéticos com grãos moídos de rochas ornamentais (ou pedras de engenharia) e de uma pedra calcária (limestone) e de um granito. Observou-se que rochas artificiais apresentaram maiores valores de resistência a flexão e maior resistência após submetidas a resfriamento rápido (choque térmico) – de

200 a 20°C, comparativamente as rochas naturais analisadas. Na faixa de temperatura analisada o envelhecimento térmico não provocou efeitos significativos nos parâmetros avaliados. No entanto, os autores não levaram em consideração que os materiais naturais analisados têm uma porosidade aberta superior aos artificiais, 1% versus 0% e provavelmente porosidade total também maior, bem como que o ensaio de flexão foi efetuado com uma velocidade de carregamento muito elevada, 2mm/min, o que compromete em maior escala os materiais mais frágeis, como os naturais e em menor magnitude os que apresentam uma matriz mais dúctil, como os artificiais.

MOLINA et al. (2011) estudaram a porosidade de rochas ornamentais sedimentares (limestones, travertinos, rochas dolomíticas – também conhecidas como limestones magnesianas ou dolomitos) e buscaram associar o seu comportamento de degradação, em virtude de processos de cristalização e ciclos de congelamento-descongelamento. No estudo foram utilizados porosimetria de mercúrio, adsorção de gás, microscopia eletrônica e absorção de água para a análise da porosidade dos materiais. Os estudos de cristalização (envelhecimento) foram realizados utilizando sulfato de sódio hidratado. As rochas analisadas apresentaram porosidades abertas em uma larga faixa de valores, variando de 8 a 33% e com poros indo de dimensões micrométricas até poros macroscópicos, da ordem de 3-4 mm. A cristalização e os ciclos de congelamento-descongelamento influenciou significativamente a microestrutura das amostras de limestones, com acentuada perda de massa. No entanto, os autores não analisaram a evolução da distribuição dos tamanhos de poros após os ciclos de cristalização e de congelamento-descongelamento.

KARACA et al. (2011) analisaram a influência do acabamento superficial e do preenchimento com cimento na durabilidade limestones com relação a ciclos de congelamento-descongelamento e solução alcalina de cloreto de sódio (cristalização). Foram estudadas duas amostras de limestones, com porosidades abertas em torno de 2% e porosidades totais em torno de 7%. Observa-se um aumento na porosidade dos materiais com os ciclos de congelamento-descongelamento, variando entre 1,5 e 2,5%. Os maiores aumentos foram reportados quando do congelamento-descongelamento

usando solução alcalina e não água destilada. Verifica-se também um aumento da perda de massa em ensaio de abrasão após os ciclos de congelamento-descongelamento. De forma geral, as amostras preenchidas com melhor acabamento superficial e preenchidas com cimento apresentam as menores degradações após os ciclos de variação de temperatura.

O estudo das referências desta fundamentação teórica oferece a análise comparativa de situações importantes para as propriedades dos materiais pétreos, que a partir dos ensaios de caracterização apresentaram resultados específicos para os materiais pétreos.

A situação evidencia nos granitos uma estrutura atômica composta por feldspatos/quartzo de diferentes coeficientes de dilatação térmica, cujo comportamento matriz/reforço estudada em compósitos, torna-se de difícil conceituação. Acrescente-se a fase da mica, laminar e quimicamente instável quando exposta ao meio.

Nos calcários, o comportamento é mais previsível, facilitado através do estudo de sua porosidade de sua estrutura monocristalina.

No entanto, os trabalhos de pesquisa que utilizam técnicas de microestrutura estão restritos as patologias pontuais, apresentando resultados limitados a justificativa e entendimento do fenômeno pesquisado.

Torna-se necessário um estudo abrangente da microestrutura, mais amplo com metodologia consistente, que sirva de embasamento e indicação para uma padronização confiável e reprodutiva das rochas ornamentais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, obteve-se a relação das empresas, através do Sindicato das Indústrias de Mármore e Granitos do Ceará, SIMAGRAN–CE, que indicou as empresas que representam maior experiência e capacidade operacional, com forte atuação no mercado. O Sindicato também auxiliou na obtenção das amostras dos materiais caracterizados nessa pesquisa.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 A seleção, tipos e localização das rochas

Na execução dessa pesquisa foram utilizadas 15 (quinze) amostras de pedras ornamentais oriundas de jazidas do Estado do Ceará. Foram estudadas 07 tipos de rochas calcárias - limestones sendo 05 da Chapada do Apodi e 02 da Chapada do Araripe, 07 tipos de rochas ígneas - granitos e 01 amostra de mármore. A Tabela 3.1 apresenta a denominação comercial dos tipos estudados e a designação utilizada nesse trabalho para identificá-los.

Tabela 3.1. Denominação comercial das amostras e designação utilizada na pesquisa para identificá-las

Tipo	Denominação Comercial	Designação Utilizada	Município <sup>a</sup>	Empresa <sup>b</sup>
Limestone	Pedra Cariri Creme	LCC	Nova Olinda	Limestone Ceará Ltda
Limestone	Pedra Cariri Azul	LCA	Santana do Cariri	Limestone Ceará Ltda
Limestone	Crema Buzius	LCB	Limoeiro do Norte	Granos S/A
Limestone	Mont Charmont	LMC	Limoeiro do Norte	Granos S/A
Limestone	Bege Capri	LBC	Limoeiro do Norte	Mont Granitos S/A
Limestone	Blue Marine	LBM	Limoeiro do Norte	Mont Granitos S/A
Limestone	Bege San Marino	LBSM	Limoeiro do Norte	Mont Granitos S/A
Granito	Branco Ceará	GBC	Santa Quitéria	Granistone S/A
Granito	Rain Forest	GRF	Meruoca	Granos S/A
Granito	Red Dragon	GRD	Sobral	Imarf – G. M. S/A
Granito	Green Galaxy	GGG	Marco	Imarf – G. M. S/A
Granito	Verde Ventura	GVV	Massapê	Multigran Ltda.
Granito	JuParaná Tropical	GJPT	Massapê	Multigran Ltda.
Granito	Branco São Paulo	GBSP	Santa Quitéria	Grandon S/A
Mármore	Branco Acarape	MBA	Acarape	Geolux

<sup>a</sup> município onde foi extraído o material, <sup>b</sup> empresa fornecedora do material

Os limestones da Chapada do Apodi são oriundos do município do Limoeiro do Norte e os da Chapada do Araripe são oriundos dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri. Os granitos são oriundos de vários municípios do Estado, todos, exceto o mármore, foram selecionados pela qualidade e boa aceitação comercial entre as demais rochas ornamentais do Ceará.

### 3.1.2 A preparação das amostras

As amostras analisadas foram coletadas nas frentes de lavra, com exceção do mármore, no período de novembro de 2008 à janeiro de 2009. As coletas das amostras de limestones foram realizadas utilizando-se pixotes e ponteiros de modo a permitir a abertura de matacões retirados junto as aberturas das frentes de lavra para a obtenção de amostras “frescas”, isentas de falhas e trincas, ideais para os fins específicos.

Foram obtidos 03 cubos medindo 300mm de aresta de todos os materiais, com exceção das amostras da região do Cariri, Pedra Cariri Creme e a Azul, que por suas características lamelares, foram obtidas 15 peças de 300x300x80mm de cada material, dimensões limitadas pela espessura máxima de 80mm.

As amostras foram processadas conforme as necessidades específicas de cada ensaio no NUTEC e em empresas de beneficiamento, obtendo-se para cada material o mínimo de:

- Microestrutura - AQ, DRX, TG e ATD – pós;
- MO, AP e MEV - 12 lâminas polidas - espessura  $\leq 15$ mm;
- Índices Físicos - 12 cubos de 50mm, pesando de 250 a 300g;
- Resistência à compressão uniaxial - 05 cubos de 70mm;
- Resistência à flexão - 05 peças medindo 200x100x50mm;
- Resistência ao impacto - 05 peças medindo 200x200x30mm;
- Desgaste Amsler - 05 peças medindo 70x70x40mm;
- Alterabilidade - 10 peças polidas 100x100x20mm.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam as fotografias das amostras polidas dos materiais estudados. Observe-se que os granitos e o mármore têm o brilho como fator primordial para sua aplicação, enquanto os limestones apresentam-se sem brilho, de modo a manter a conotação de pedra natural.

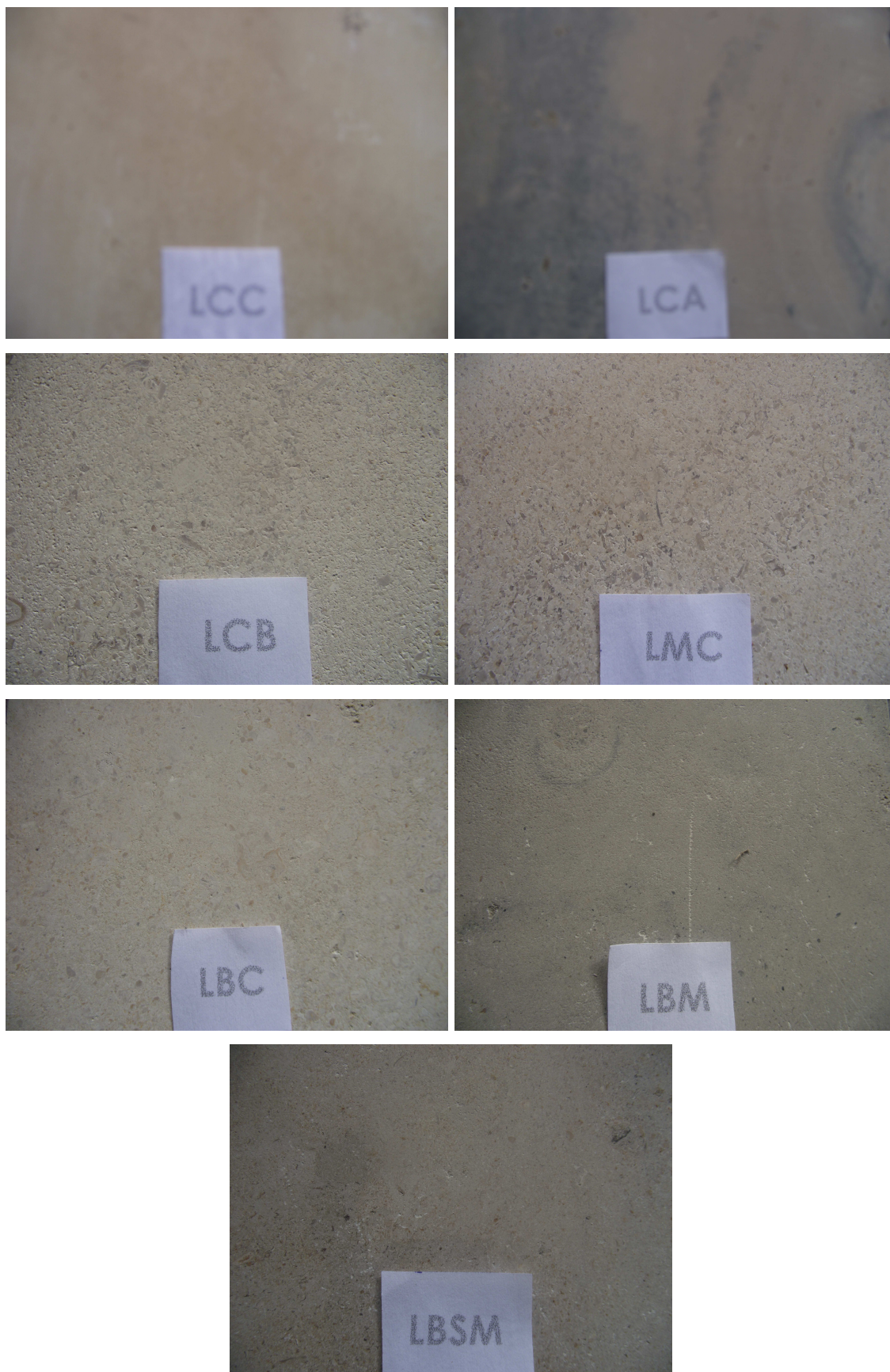


Figura 3.1. Fotografias dos “limestones” analisados nessa pesquisa

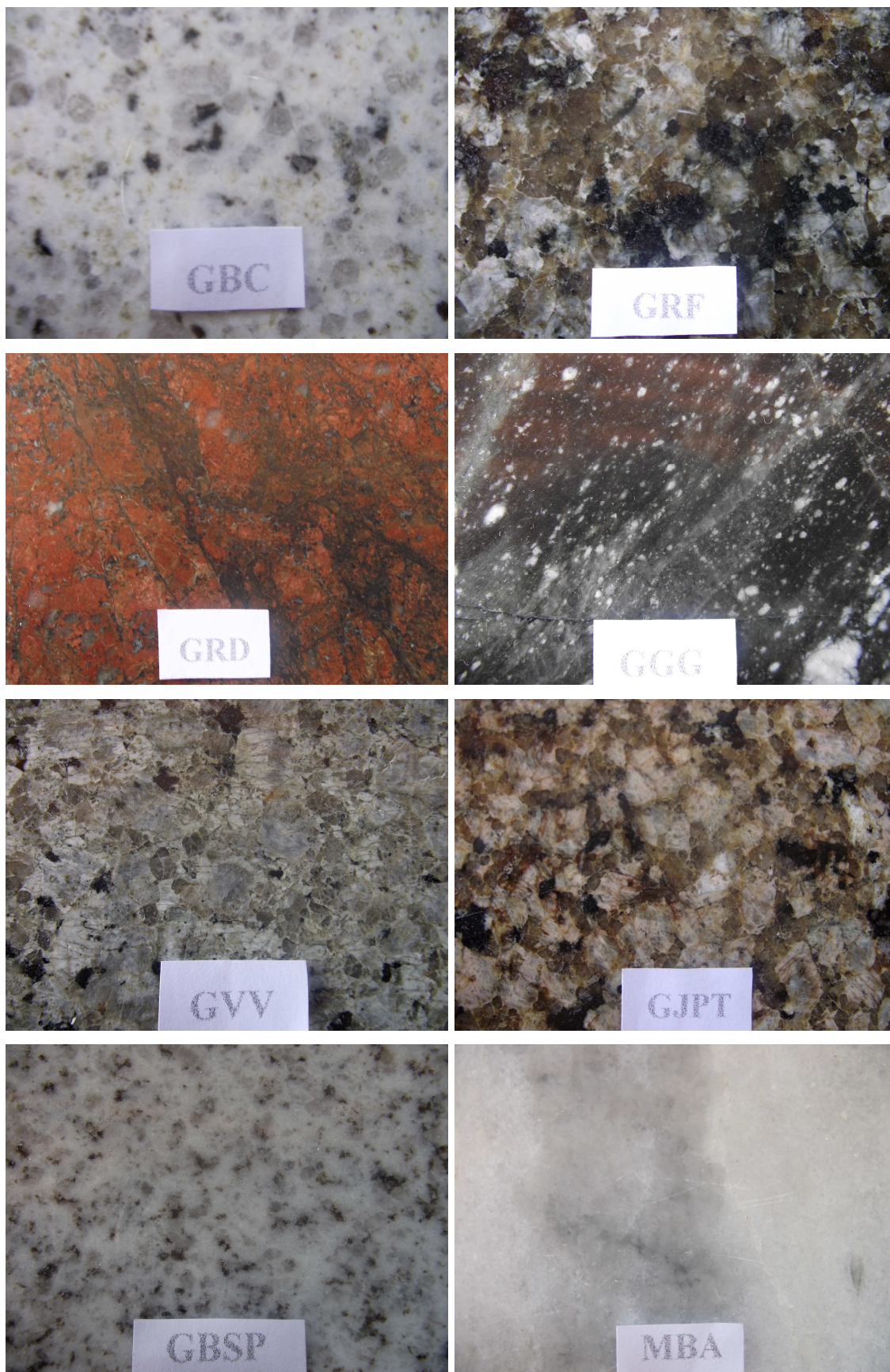


Figura 3.2. Fotografias dos granitos e do mármore analisados nessa pesquisa



## **3.2 Métodos**

Os materiais foram submetidos à caracterização microestrutural, caracterização físico-mecânica e de alterabilidade frente a agentes químicos. A metodologia dos ensaios realizados será descrita nessa secção. No entanto, para os ensaios que foram executados conforme normatização far-se-á apenas a indicação da norma utilizada e de aspectos particulares dos ensaios.

### **3.2.1 Caracterização microestrutural**

Os ensaios de caracterização microestrutural foram realizados no Laboratório de Caracterização e no Laboratório de Reciclagem da Universidade Federal de Campina Grande, no Laboratório de Solidificação Rápida da Universidade Federal da Paraíba e no NUTEC, Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará.

A caracterização das amostras analisadas nesta pesquisa foi efetuada através dos seguintes métodos: análise química (AQ); difração de raios X (DRX); análise termogravimétrica (TG); análise térmica diferencial (ATD); microscopia ótica (MO); análise petrográfica (AP) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Sendo AQ, DRX, TG e ATD realizados na UFCG, MO e MEV realizados na UFPB e AP realizados no NUTEC.

#### **3.2.1.1 Análise química**

A determinação da composição química fornece dados fundamentais de grande utilidade industrial e científica, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica. As composições foram determinadas através da técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X utilizando detector EDS. O ensaio foi realizado em equipamento Shimadzu (EDX 720) sendo determinada a composição semi-quantitativa das amostras.

#### **3.2.1.2 Difração de Raios X**

A difração de raios X foi utilizada para a determinação das fases cristalinas presentes nas amostras. Foi utilizado um difratômetro de raios X da

Shimadzu (XRD 6000) com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40kV e corrente de 30mA, operando no modo tempo fixo (“fixe time”), com passo de  $0,02^\circ$  e tempo de contagem em cada passo de 0,6s. A interpretação dos resultados foi efetuada por comparação com padrões contidos no PDF 02 (ICDD, 2003).

### 3.2.1.3 Análise Térmica

As análises termogravimétrica (TG) e termodiferencial (ATD) indicam as faixas de temperaturas onde ocorrem perdas ou ganhos de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas, respectivamente. As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas modelo RB-3000 da BP Engenharia, com razão de aquecimento  $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$ . A temperatura máxima para ambos os casos foi de  $1000^\circ\text{C}$  e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) calcinado.

### 3.2.1.4 Microscopia ótica e eletrônica

A análise de microscopia eletrônica foi efetuada em um microscópio óptico Axiotech da Zeiss acoplado com câmera digital ColorView Soft Imaging System – II com o software analySIS® analisador de imagens. As amostras foram polidas segundo o procedimento metalográfico padrão e em seguida analisadas no modo de campo escuro e no modo de interferência de luz polarizada e contraste de fase (DIC).

Análise Petrográfica foi executada utilizando microscópio ótico, Leitz modelo Laborlux 12pol (operado no modo de campo claro), e lupa binocular, Olympus, modelo SZ – BR com aumento de 4 a 25x. O ensaio foi realizado no NUTEC utilizando lâminas polidas, segundo procedimento metalográfico padrão, e reagentes químicos para evidenciar contrastes e a ocorrência de determinados óxidos.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi efetuada em microscópio eletrônico de varredura Leo Steroscan 1430 equipado com detector de energia dispersiva de raios X.

### 3.2.2 Caracterização físico-mecânica

Exceto o ensaio do coeficiente de dilatação térmica realizado na UFCG, as demais caracterizações físico-mecânicas foram executadas no NUTEC – Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará, órgão do governo do estado do Ceará, que mantém laboratórios para apoio ao setor mineral e responsável desde a década de 80 por caracterizações das rochas ornamentais da região.

#### 3.2.2.1 Índices Físicos

Os ensaios de caracterização física das rochas para determinação dos índices físicos; massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente, foram feitos de acordo com a norma NBR12766/1992 (Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente).

Os corpos-de-prova foram secos em estufa ( $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por 24 horas, e pesados, após resfriamento (peso A). Os corpos foram colocados em uma bandeja e adicionado água até 1/3 de suas alturas. Após 4 horas foi adicionado água até 2/3 e após 4 horas completado a submersão dos corpos-de-prova, deixando completar o tempo total de 24 horas. Transcorridas as 24 horas de submersão, a superfície dos corpos-de-prova foi enxugada e seus pesos determinados (peso B). Finalmente, pesam-se os corpos-de-prova na condição submersa (peso C). Os cálculos foram feitos, utilizando-se as seguintes expressões:

- 1) Massa específica aparente seca ( $\rho_{a_{sec}}$ ):  $\rho_{a_{sec}} = (A / (B - C)) \cdot \rho_{H_2O}$
  - 2) Massa específica aparente saturada ( $\rho_{a_{sat}}$ ):  $\rho_{a_{sat}} = (B / (B - C)) \cdot \rho_{H_2O}$
  - 3) Porosidade aparente ( $\eta_a$ ):  $\eta_a = ((B - A) / (B - C)) \cdot 100$
  - 4) Absorção d'água aparente ( $\alpha_a$ ):  $\alpha_a = ((B - A) / A) \cdot 100$
- sendo  $\rho_{H_2O}$  a massa específica da água.

#### 3.2.2.2 Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica

O coeficiente de dilatação térmica é de grande importância em projetos de revestimentos por indicar a capacidade de expansão dos materiais e

permitir dimensionar adequadamente as juntas de dilatação. A análise foi realizada por dilatométrica em um equipamento de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia. Aqueceu-se de 25 a 300°C com patamar de 30min a 30°C (para estabilização do equipamento) e o coeficiente foi determinado para as faixas de temperaturas de 30 a 50°C e de 40 a 100°C. As dilatométricas foram realizadas no Laboratório de Reciclagem da Universidade Federal de Campina Grande.

### **3.2.2.3 Resistência à Compressão Uniaxial**

A resistência à compressão uniaxial foi determinada utilizando a norma NBR 12767/1992 (Rochas para revestimento - Determinação da resistência à compressão uniaxial). O procedimento consiste em submeter um corpo-de-prova cúbico com dimensões aproximadas de 7 x 7 x 7 cm ao esforço de compressão. Foi utilizada uma máquina hidráulica de ensaio EMIC com célula de carga de 200 toneladas.

### **3.2.2.4 Resistência à Flexão**

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma, NBR 12763/1992 (Rochas para revestimento - Determinação da resistência à flexão), sendo determinado o módulo de ruptura do material. Corpos com dimensões aproximadas de 20 x 10 x 5 cm foram submetidos à esforço de tração por flexão utilizando um sistema de carregamento em três pontos. Foi utilizada uma máquina hidráulica de ensaio EMIC com célula de carga de 200 toneladas

### **3.2.2.5 Resistência ao Impacto**

O ensaio foi realizado conforme as diretrizes gerais da norma NBR – 12.764/92, consistindo em deixar uma esfera de aço, com massa de 1 kg, cair sobre um corpo-de-prova com dimensões aproximadas de 20 x 20 x 3 cm assentado em um colchão de areia. O resultado é obtido anotando-se a altura de queda que causou fissuras e a ruptura do corpo de prova.

### 3.2.2.6 Determinação do desgaste por abrasão – Amsler

O ensaio foi realizado segundo o método apresentado na norma NBR 12042/90 (Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão – Método de Ensaio). O ensaio foi conduzido em equipamento de desgaste Amsler construído no NUTEC. Duas amostras de aproximadamente 7,0 x 7,0 x 4,0 cm são colocadas sobre uma pista circular de aço, contendo areia essencialmente quartzosa (a areia é continuamente alimentada), e postas a girar sobre a pista. Quando completadas o número de voltas equivalentes a 500 e 1000m são medidos os desgastes de cada amostra, através da variação da espessura antes e após o processo de desgaste. A Figura 3.3 apresenta o equipamento utilizado para determinação do desgaste por abrasão Amsler.



Figura 3.3. Equipamento de desgaste Amsler utilizado na pesquisa

### 3.2.3 Análise da Alterabilidade

As análises de alterabilidade frente agentes químicos, para avaliar a degradação dos materiais selecionados, e executadas nos laboratório de

química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Cariri.

Como as normas brasileiras não contemplam o ataque químico especificamente para rochas ornamentais, para este processo foi utilizado como referência a norma da ABNT NBR 13818/97, anexo H (Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Anexo H – Determinação da resistência ao ataque químico) aplicada para análise de placas cerâmicas esmaltadas. As substâncias e concentrações utilizadas nos ensaios, conforme a NBR 13818/97 anexo H estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Substâncias utilizadas na análise de resistência ao ataque químico, tempo de exposição aos reagentes e substâncias comerciais que os contêm

Reagentes <sup>a</sup>	Fórmula	pH	Concentração	Tempo <sup>b</sup>	Produtos comerciais <sup>c</sup>
Cloreto de Amônia	NH <sub>4</sub> Cl	5	100g/l	24 h	Detergentes, sabões
Hipoclorito de Sódio	NaClO	8	20mg/l	24 h	Alvejantes, desinfetantes (água sanitária)
Acido Cítrico	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	1,2	100g/l	24 h	Sucos cítricos, vinagres, refrigerantes
Acido Clorídrico	HCl	1	3% (v/v)	96 h	Ácido muriático (líquido), agentes de limpeza
Hidróxido de Potássio	KOH	14	30g/l	96 h	Sabões moles

<sup>a</sup> Os reagentes utilizados foram P.A., <sup>b</sup> Tempo de exposição das rochas aos reagentes durante o ensaio, <sup>c</sup> Produtos comerciais que contêm os reagentes em suas formulações. Fonte: NBR 13818/97 anexo H (ABNT, 1997).

Nesse ensaio foram utilizadas seis placas polidas com formato quadrado, com lado de 10 cm, para cada rocha estudada, mantendo-se uma placa intacta para posterior comparação de sua superfície com a superfície das demais placas atacadas pelos agentes químicos agressivos. As cinco placas selecionadas foram inicialmente submetidas à determinação do brilho de suas superfícies polidas através da média de dez medidas com o aparelho Gloss Meter (Horiba, Gloss Checker 16.310). O material utilizado no ensaio foi selecionado na coleta, utilizando-se uma lupa e um “glossmeter”, de modo a

garantindo amostras com um bom nível de perfeição, sem defeitos ou falhas que comprometessem a análise dos resultados obtidos.

Foram fixados nas superfícies das placas tubos de PVC de 75mm de diâmetro, vedadas com silicone. Em seguida foram aplicados os reagentes, anotando a massa de cada um, após medir-se 50ml, e colocados em seguida no interior dos cilindros, tampando-os com filmes de PVC para evitar a evaporação, contando-se a partir de então o tempo de exposição aos reagentes. Após o tempo de exposição, de cada amostra, estipulado para cada reagente (Tabela 3.2), procedeu-se a retirada dos cilindros e à lavagem das superfícies das placas atacadas sob água corrente, as quais foram secas naturalmente e em seguida submetidas a novas medidas de brilho, através de uma média de dez leituras sobre as superfícies atacadas.

Segundo MATTOS (2005) a ação dos agentes químicos podem elevar a absorção das rochas, através de reações com a rocha que dissolvem os materiais de preenchimento dos contatos, de microfissuras, até mesmo de maclas e clivagens dos minerais, elevando a porosidade aberta e provavelmente a permeabilidade da rocha. As perdas dos reagentes no ensaio de ataque químico podem ocorrer devido à absorção das rochas e ao poder de dissolução do agente químico sobre os minerais. Assim, foram avaliadas as perdas de massa dos reagentes, não normatizadas, em cada ensaio, com a pesagem da quantidade de cada reagente recolhido após o tempo determinado dos ensaios. Obtendo-se a perda de reagente em massa, feitas antes e após do ataque. A Figura 3.4 apresenta o arranjo utilizado no ensaio das amostras



Figura 3.4. Arranjo utilizado para o ensaio de alterabilidade

A estanqueidade foi testada anteriormente, através do enchimento dos cilindros com água. A Figura 3.5 mostra o detalhe da vedação.

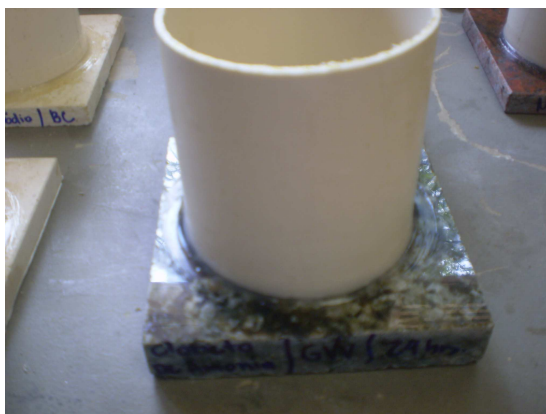


Figura 3.5 Arranjo de uma amostra, utilizado para o ensaio de alterabilidade



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa secção serão abordados os resultados dos ensaios de caracterização das rochas ornamentais analisadas, sendo apresentados na seguinte ordem: caracterização microestrutural, físico-mecânica e análise de alterabilidade.

### 4.1 Caracterização microestrutural

#### 4.1.1 Análise química por fluorescência de raios x (EDX)

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de composição química das amostras analisadas. Pode-se observar que nos limestones estudados predomina os óxidos de cálcio e de magnésio, com pequenos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SO}_3$ .

Tabela 4.1. Composição química das amostras analisadas

Rocha	Composição Química das Rochas (em % mássica)									
	CaO	MgO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$	Total
LCC	93,7	-	1,3	2,8	0,2		0,5		1,0	99,5
LCA	88,1	4,9	2,0	-	0,3		2,3		1,6	99,2
LCB	90,7	3,2	3,1	1,3	0,4		0,4		0,8	99,9
LMC	96,3	-	1,5	0,7	0,2		0,4		0,8	99,9
LBC	90,4	3,0	3,0	1,3	0,3		0,7		1,2	99,9
LBM	80,4	11,3	3,8	1,6	0,3		0,8		1,7	99,9
LBSM	95,9	-	1,7	-	0,2		0,8		1,2	99,8
GBC	1,4		66,8	17,4	3,9	7,3	1,5	-	1,2	99,5
GRF	2,1		70,0	14,6	5,2	1,3	4,2	0,3	1,3	99,0
GRD	0,8		66,7	16,0	7,2	1,0	5,9	0,6	1,1	99,3
GGG	3,8		63,0	16,9	4,8	2,3	6,2	0,6	1,2	98,8
GVV	1,4		69,3	14,4	5,5	3,0	2,7	0,2	2,3	98,8
GJPT	1,7		67,5	14,4	5,6	5,1	3,9	0,4	1,0	99,6
GBSP	1,0		70,2	18,3	4,8	2,7	0,5	-	1,3	98,8
MBA	61,4	28,2	7,3	0,73	0,2		0,8	-	1,1	99,7

Com base no teor de óxido de magnésio, verifica-se que os limestones estudados se enquadram em tipos distintos de rochas carbonáticas, observando-se calcários calcíticos ( $\text{MgO} < 1,1\%$ ), magnésianos ( $1,1 < \text{MgO} < 2,1$ ), dolomíticos ( $2,1$

< MgO < 10,8) e dolomito calcítico (10,8 < MgO < 19,5) (SOUZA et al, 2005). Os calcários são rochas sedimentares compostas principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), enquanto dolomitos (ou rochas dolomíticas) são rochas também sedimentares formadas sobretudo por dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ).

Os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SO}_3$  estão provavelmente relacionados a presença de impurezas nos limestones. As impurezas dos calcários e dolomitos variam muito em tipo e quantidade, surgindo durante o processo de deposição ou em ocorrendo em estágios posteriores à deposição. A impureza mais comum nas rochas carbonáticas são as argilas, encontrando-se argilominerais tanto disseminados quanto laminados nesses materiais. No entanto, outras impurezas podem ser encontradas como feldspatos, micas, siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), ankerita ( $\text{CaMgFe}(\text{CO}_3)_4$ ), quartzo, sulfetos (pirita,  $\text{FeS}_2$ , calcopirita,  $\text{CuFeS}_2$ , etc.), etc. (SAMPAIO & ALMEIDA, 2005). Deve-se salientar que por vezes essas impurezas têm grande influência nas aplicações dessas rochas, definindo, por exemplo, matizes e cores, bem como, influenciando propriedades mecânicas.

Os granitos analisados apresentam  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  com alguns também apresentando  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como óxidos majoritários. Verifica-se a presença de pequenos teores de  $\text{CaO}$  e  $\text{SO}_3$ , o que indica a provável presença de pequenos teores de carbonatos e sulfetos. A presença do  $\text{CaO}$  é indicativo, também, da presença de plagioclásio (feldspato sódio-cálcico) nos granitos analisados. Outros óxidos, que somam menos que 1%, são compostos por  $\text{MnO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , presentes em todas as rochas, exceto o  $\text{TiO}_2$  nos granitos GBC e GBSP.

A presença de  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  indica a presença de feldspato potássico constituindo a matriz dessas rochas silicáticas, o que é importante porque os feldspatos (microclínio, ortoclásio e plagioclásios), são os principais balizadores do padrão cromático das rochas silicáticas, conferindo as colorações avermelhada, rosada e creme-acinzentada nos granitos homogêneos (isótropos) e orientados/movimentados (anisótropos). No que tange a aparência também é muito importante os teores de óxido de ferro e magnésio. A cor negra na matriz das rochas silicáticas é, em geral, conferida pelos silicatos ferro-magnesianos, sobretudo anfibólio (hornblenda) e mica (biotita), chamados vulgarmente de “carvão”, enquanto os granitos leucocráticos (claros) estão relacionados a baixos teores de ferro e

magnésio. Nesse sentido, verifica-se que os granitos não apresentam MgO, no entanto observa-se teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  acima de 4% em todos os materiais analisados.

O mármore estudado, MBA, é uma rocha metamorfizada que tem na sua composição predominância dos óxidos CaO e MgO. Com base apenas no teor de MgO ter-se-ia que se trata de uma rocha carbonática classificada como um mármore dolomítico. A presença de  $\text{SiO}_2$  pode está relacionada a presença de quartzo, feldspatos ou outras impurezas como a tremolita ( $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ) (mármore dolomíticos costumam apresentar teores significativos de tremolita). Teores elevados de  $\text{SiO}_2$  são importantes porque acima de 7% conferem ao material as propriedades de resistência mecânica compatíveis a utilização como revestimento da construção civil.

#### 4.1.2 Difração de raios X (DRX)

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os difratogramas de raios X das amostras de limestones, granitos e mármore analisadas. Com base na Figura 4.1 verifica-se que os limestones são constituídos por calcita,  $\text{CaCO}_3$ , e por dolomita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , tal como inferido a partir da composição química presente na Tabela 4.1. Verifica-se, como esperado, que em todas as amostras que contem algum teor de MgO há dolomita em sua constituição. As amostras, LCC, LMC e LBSM não apresentam dolomita, o que está em pleno acordo com a composição química, que não indica a presença de MgO nesses materiais.

Os granitos são rochas silicáticas formadas essencialmente por quartzo e feldspato, assim, com base na Figura 4.2, verifica-se que os granitos estudados apresentam constituição mineralógica em acordo com os dados da literatura, apresentando em sua composição quartzo, feldspatos e mica. Observou-se em algumas amostras a presença de pequena quantidade de caulinita como mineral acessório.

Conforme evidenciado na Figura 4.2 as granitos analisados apresentaram não apenas um tipo de feldspato como a fase matriz de sua estrutura, sendo detectados ortoclásio (feldspato potássico), albita (feldspato sódico), sanidina (feldspato potássico-sódico) e plagioclásio (feldspato cálcico-sódico). Esses resultados estão

em concordância com os dados de composição química, que indicam elevados teores de alcalinos terrosos e a presença de  $K_2O$ ,  $Na_2O$  e  $CaO$  nos materiais.

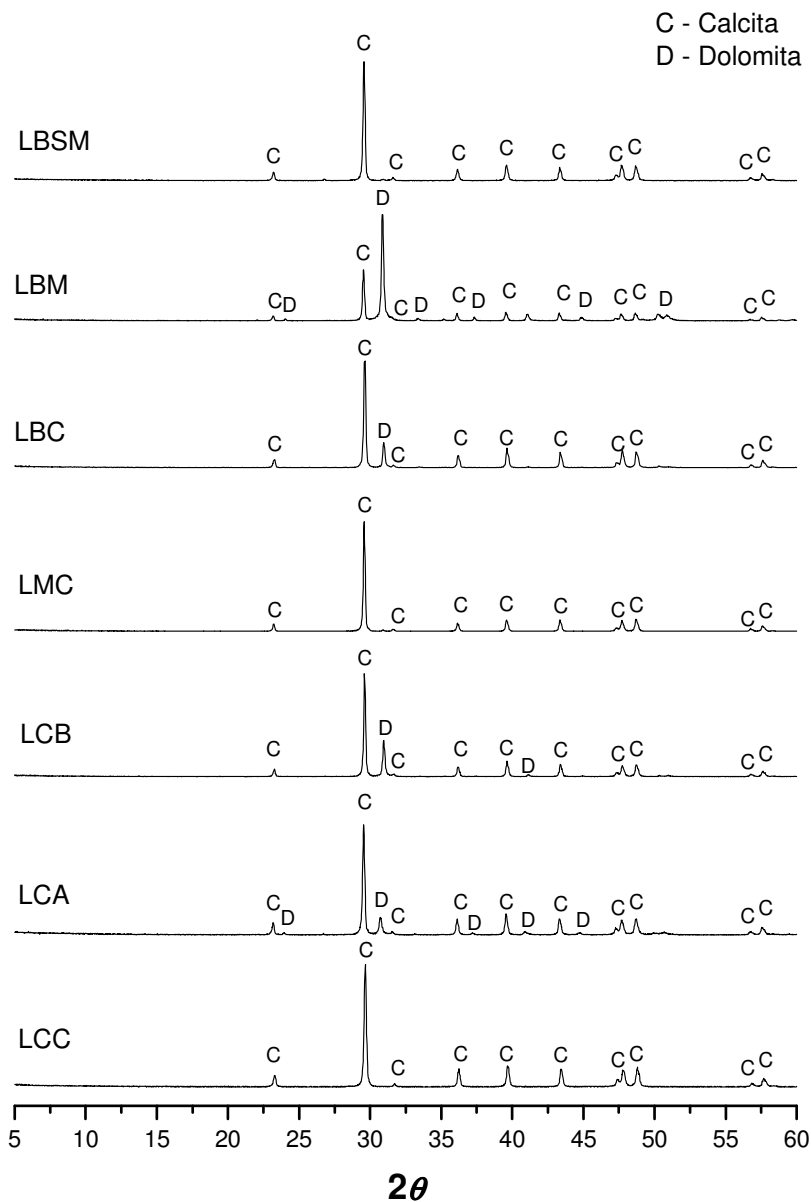


Figura 4.1. Padrões de difração de raios X dos limestones analisados

A amostra de mármore apresenta-se constituída por dolomita e calcita, aparentando predominância da dolomita em sua estrutura. Esta observação esta em acordo com os dados de análise química que evidenciaram elevado teor de  $MgO$  na amostra MBA, indicando que se tratava de um calcário dolomítico.

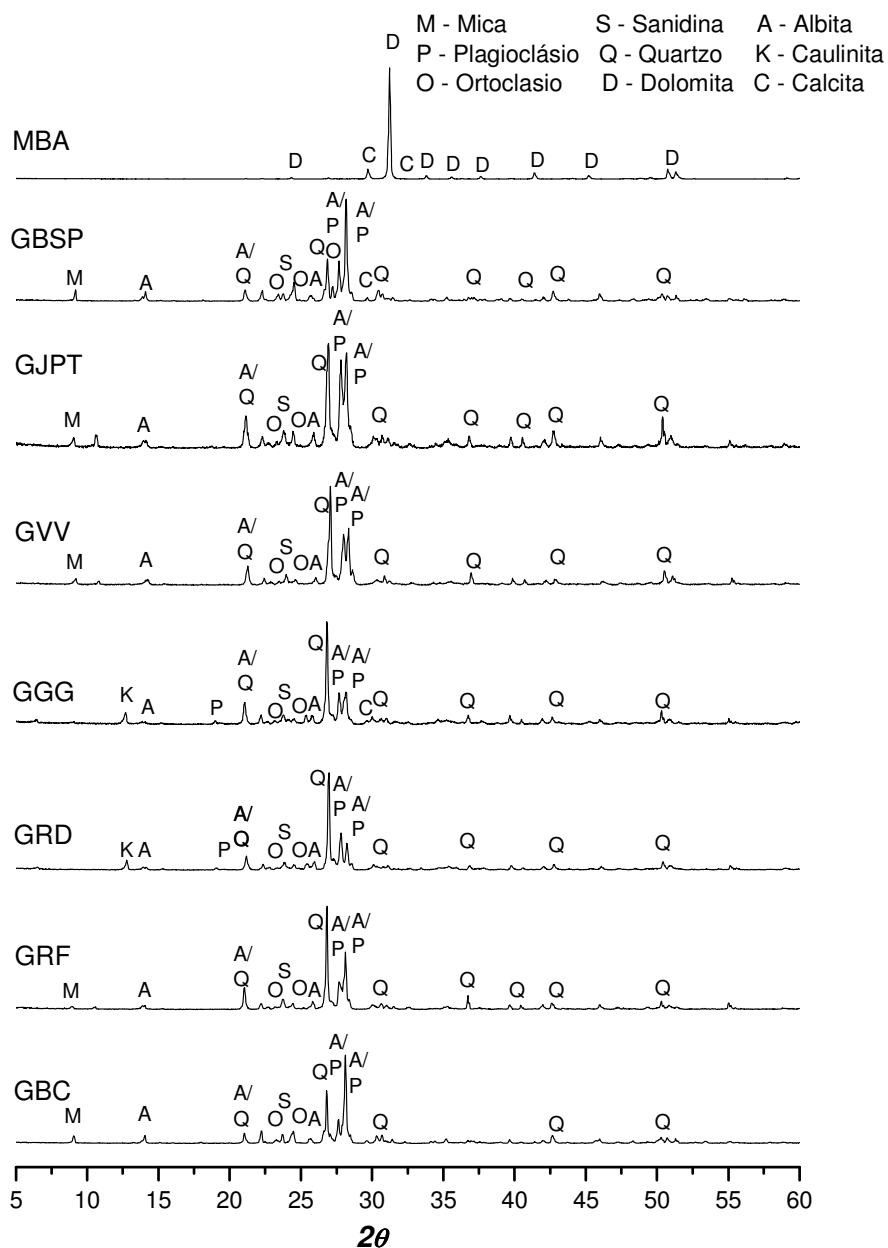


Figura 4.2. Padrões de difração de raios X dos granitos e do mármore analisados

### 4.1.3 Análise Térmica. Diferencial e Termogravimétrica

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as curvas de análise térmica diferencial, ATD, das amostras de limestones, granitos e mármore estudadas nessa pesquisa.

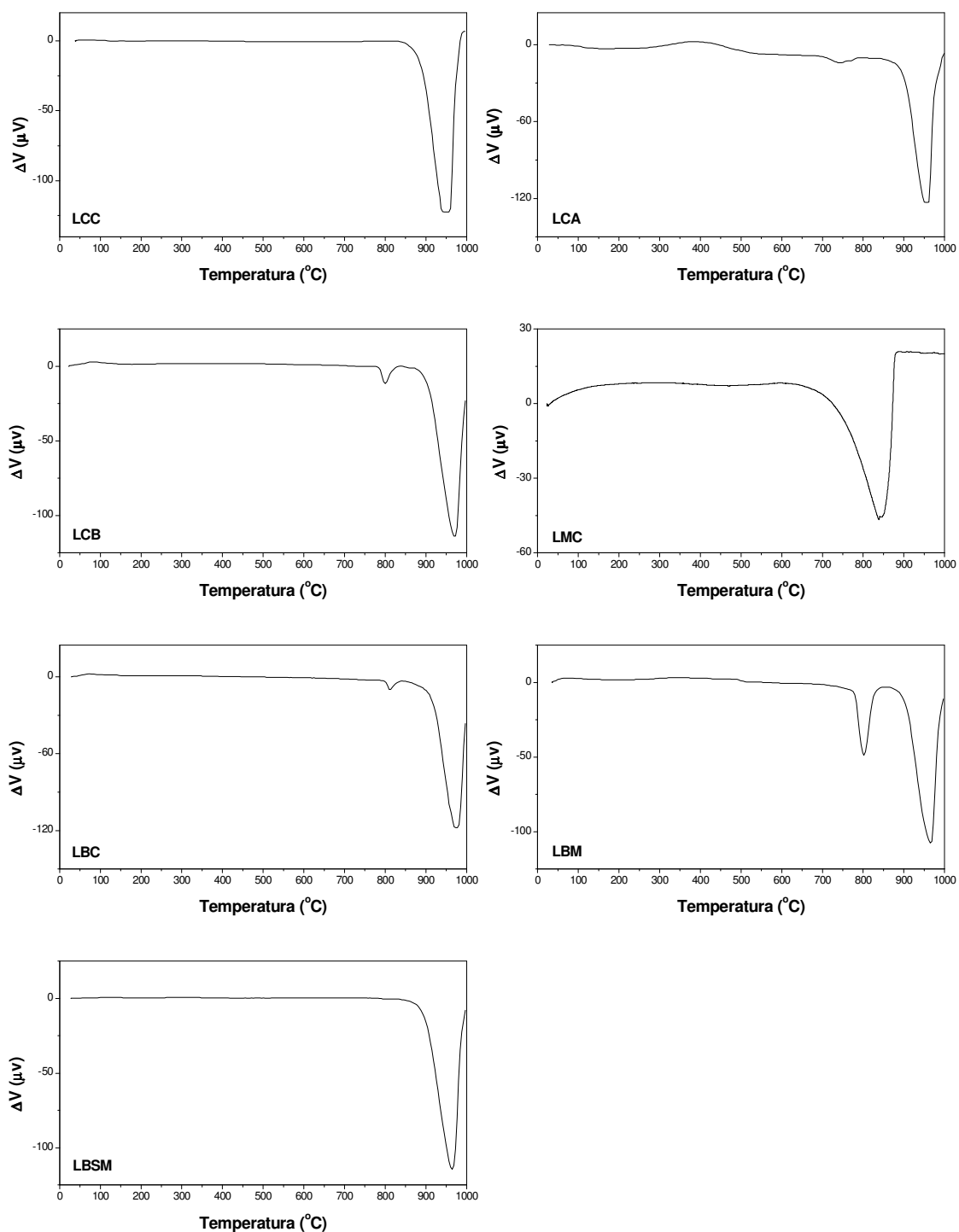


Figura 4.3. Curvas de análise térmica diferencial dos limestones analisados

Com base na Figura 4.3 verifica-se que os limestones apresentam um ou dois picos endotérmicos durante o seu aquecimento. Os materiais que apresentam apenas um pico endotérmico são os materiais que não apresentam o MgO na sua

composição, tais como o LCC, o LMC e LBSM, sendo o pico observado relacionado a decomposição da calcita, carbonato de cálcio.

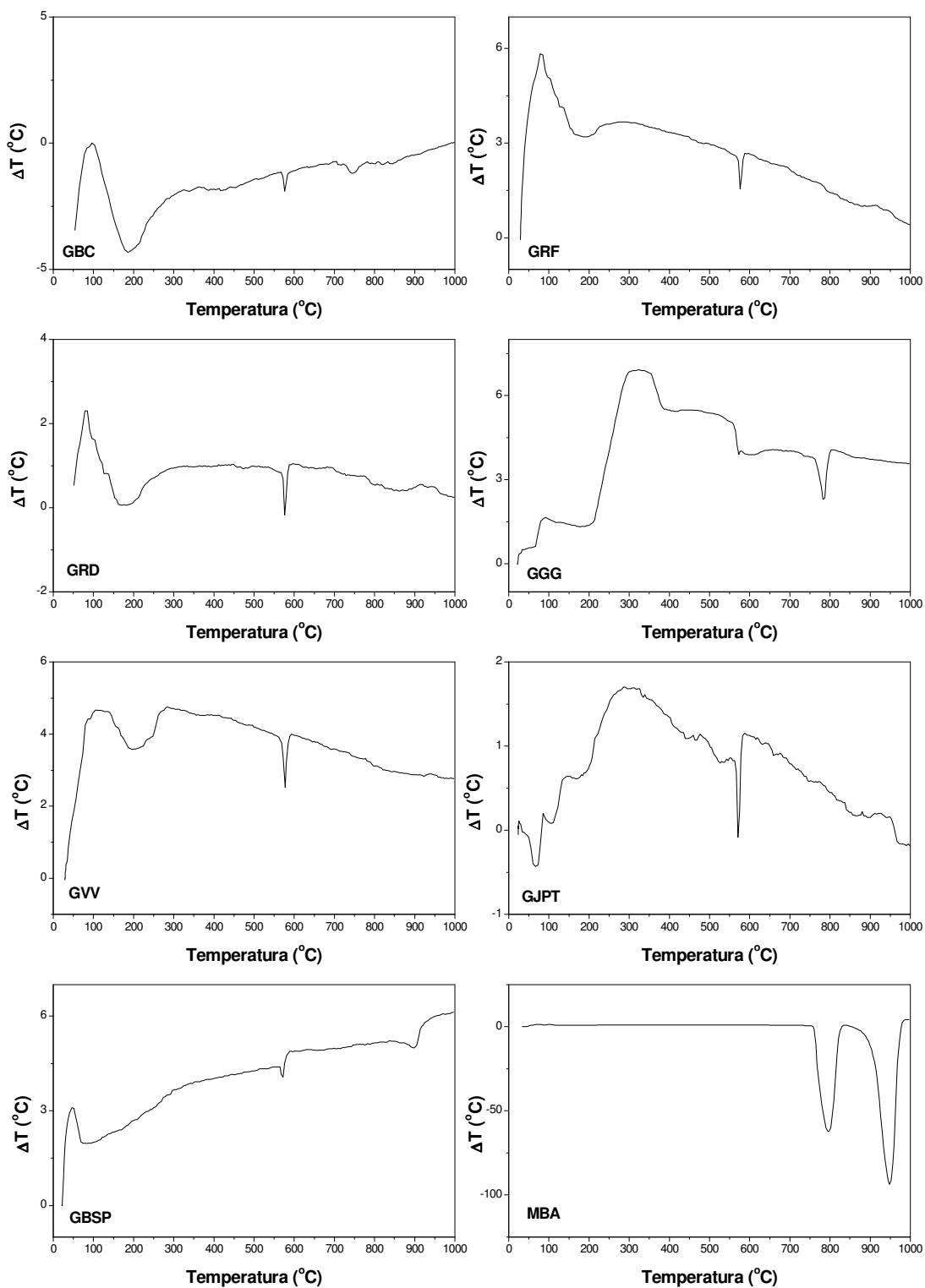


Figura 4.4. Curvas de análise térmica diferencial dos granitos e mármore analisados

Nos materiais que apresentam MgO em sua composição química observa-se em suas curvas de ATD dois picos endotérmicos. Com base nos difratogramas desses materiais (Figura 4.1) verifica-se que são constituídos por calcita e dolomita, assim, os primeiros picos estão relacionados, provavelmente, a decomposição do carbonato de magnésio, enquanto os segundos estão associados a decomposição da calcita

As curvas térmicas diferenciais dos granitos analisados, Figura 4.4, apresentam picos endotérmicos por volta de 100 e 573°C. Os picos a 100°C estão provavelmente associados a eliminação da água livre e os picos a 573°C a inversão cristalográfica  $\alpha \rightarrow \beta$  do quartzo, o que está de acordo com os dados obtidos com a difração de raios X e os dados da literatura que indicam que os granitos são materiais que apresentam elevados teores de quartzo em sua constituição. Na amostra GGG observa-se uma pequena banda endotérmica por volta de 600°C e um pico endotérmico em torno 780°C. Esses eventos endotérmicos estão, provavelmente relacionados a decomposição da caulinita e da calcita presentes nesse material.

Nas amostras analisadas observa-se também pequenos picos endotérmicos entre, aproximadamente, 700 e 900°C, que possivelmente estão associados a destruição do reticulado cristalina da mica presente nos granitos.

Na curva de ATD do mármore analisado, observa-se dois picos endotérmicos por volta de 800 e 950°C, relativos a decomposição do carbonato de magnésio e do carbonato de cálcio respectivamente.

#### **4.1.4 Microscopia ótica e eletrônica**

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam as micrografias óticas, utilizando constata de campo escuro, das amostras de limestones, granito e mármores estudadas nessa pesquisa. Com base na Figura 4.5 observa-se que os limestones apresentam estruturas distintas. Alguns são constituídos por uma matriz contendo pequenos cristais, menores que 100 $\mu\text{m}$ , outros a matriz contem cristais, superiores a 200 $\mu\text{m}$ , e por fim há aqueles em que se observa estruturas contendo grandes cristais, superiores a 500 $\mu\text{m}$  com a matriz não sendo mais a fase predominante.



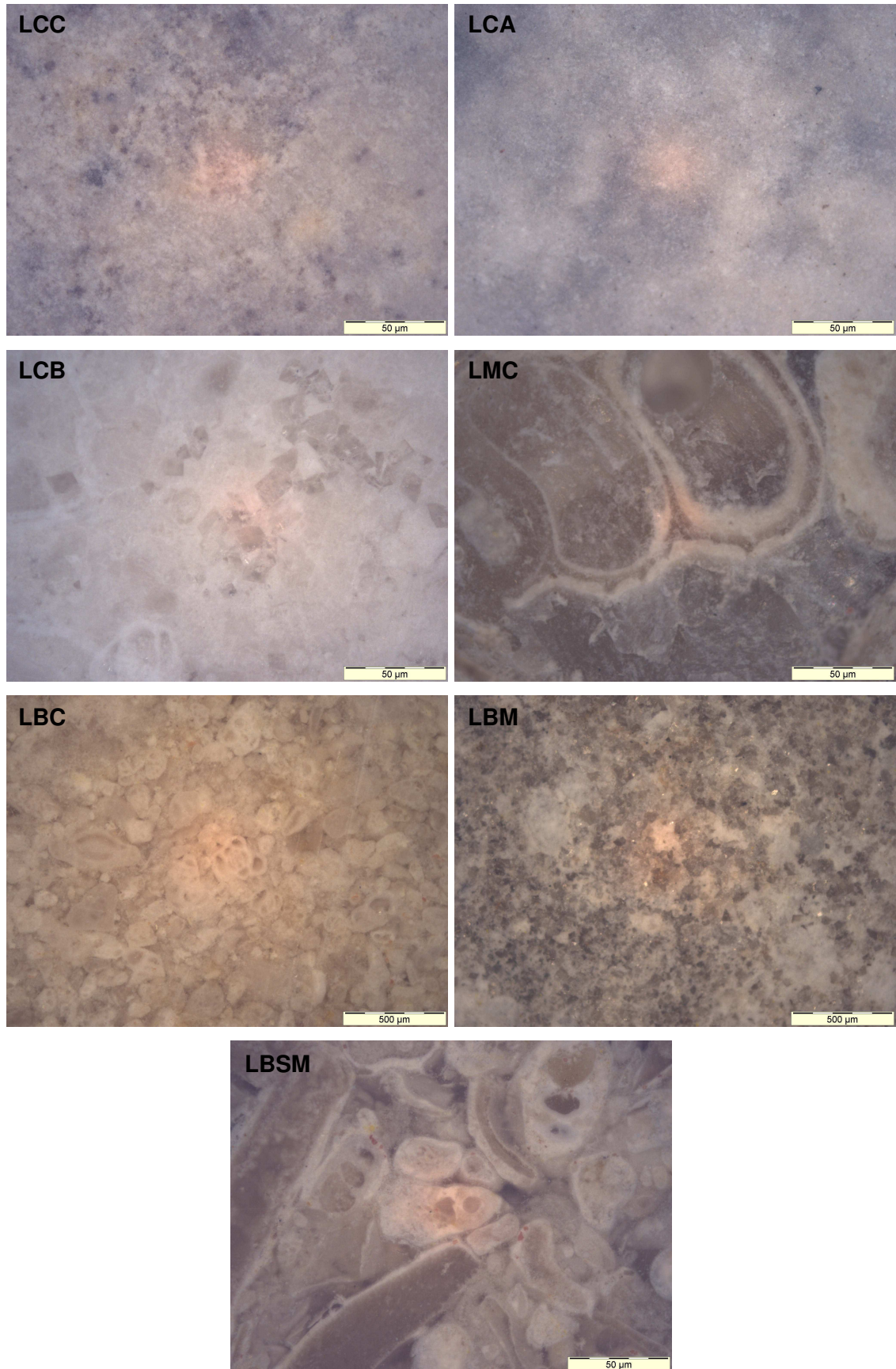


Figura 4.5. Micrografias de campo escuro dos limestones analisados

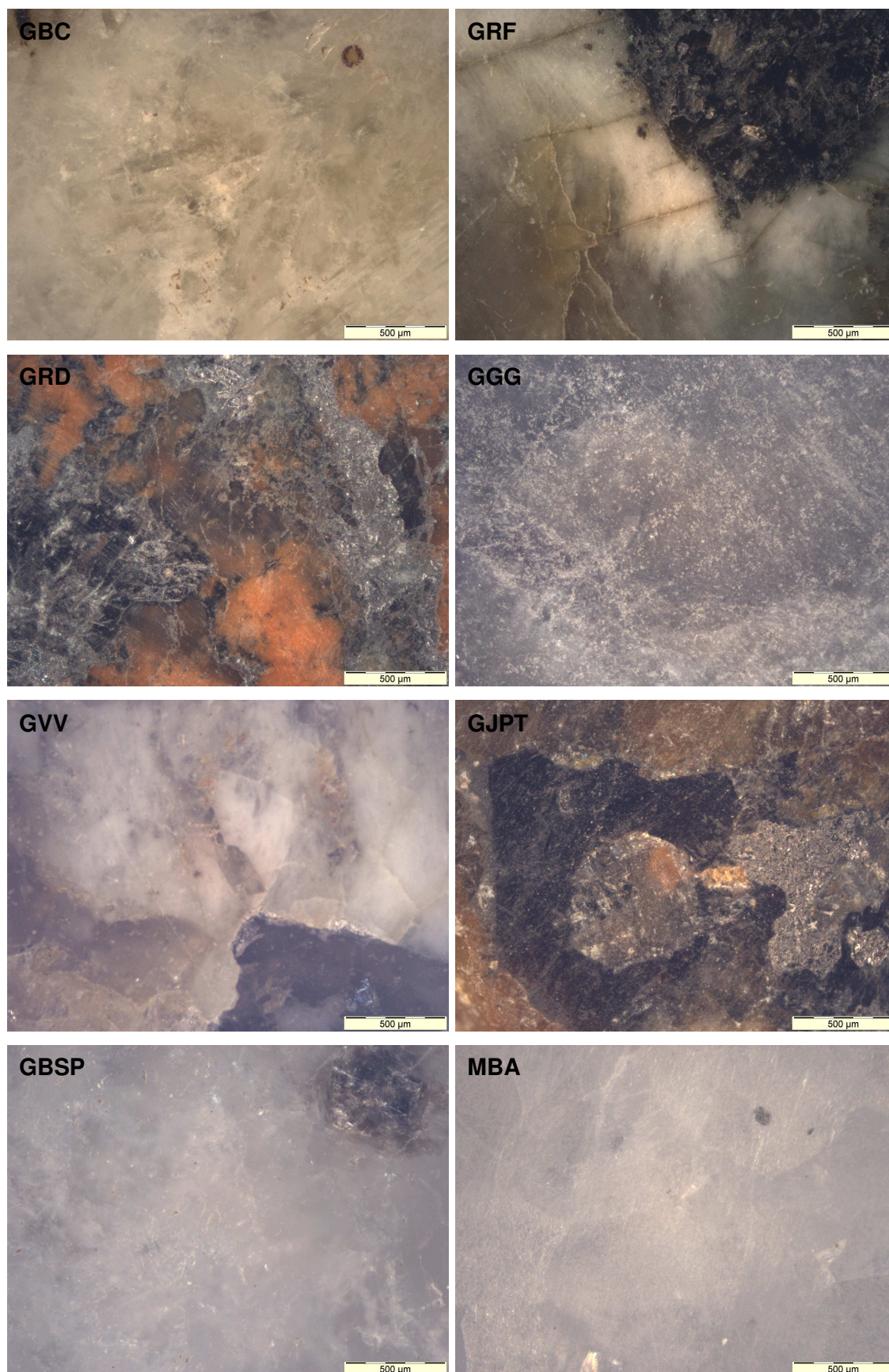


Figura 4.6. Micrografias de campo escuro dos granitos e mármore analisados

Deve-se ressaltar que a distinção entre grão e matriz foi evidenciada utilizando contraste de fase e luz polarizada, cujas micrografias não estão apresentadas nesse trabalho.

Através da Figura 4.6 verifica-se que os granitos estudados apresentam estruturas semelhantes. Essas estruturas são, em geral, mais grosseiras e apresentam menor variação que aquelas observadas nos limestones. De forma geral observam-se microestruturas constituídas por cristais grandes, por vezes superiores a 500 $\mu$ m, circundados por uma matriz. No entanto, no caso das amostras GBC, GBSP e GGG observa-se pequenos cristais, menores que 200 $\mu$ m imersos na matriz

No caso do GBC e GBSP verifica-se através do contraste de luz polarizada e de fase que os pequenos cristais presentes imersos na matriz possuem forma alongada.

A análise do mármore, MBA, evidenciou que sua estrutura é composta por cristais grandes, superiores a 500 $\mu$ m, que apresentam contrastes de fase distintos (DIC), possivelmente relacionados a presença de cristais de dolomita e de calcita, conforme indicado na análise de difração de raios X, Figura 4.2.

Conforme a análise petrográfica dos limestones, tem-se que:

- LCC: rocha calcária monocristalina apresenta uma estrutura maciça, de natureza sedimentar, com textura microcristalina bioclástica (micrítica fóssil), com cristais de muito fino à fino, apresenta estruturas fósseis dispersas, com formas alongadas de aproximadamente 0,5cm, cuja composição tem 99% de carbonatos, formados por finíssimos compostos de cálcio: tem uma cor predominante de bege claro a escuro, com tons amarelos, cujos movimentos em forma de ondas, explicado, provavelmente, quando de sua formação: apresenta estratificações importantes, com intercalações finas de folhelos e siltitos argilosos, originários de colóides floculados e sedimentados de forma lamelar, em presença da argila;
- LCA: semelhante ao LCC, cuja composição tem 99% de carbonatos, predominando os calcídicos muito finos, e com teor de 5%, os magnesianos, a rocha apresenta uma coloração cinza esbranquiçada quando seca, e quando úmida, torna-se cinza azulada, e dispersa, se mostram traços na cor bege, seguindo, as duas cores, uma orientação em forma de ondas, que provavelmente relata as condições que a originou;

- LCB: rocha de natureza sedimentar apresenta uma estrutura maciça, com monocristais de fino a médio, com textura microcristalina, cuja composição tem 95% de carbonatos na forma de agregados concêntricos de origem inorgânica, predominando os compostos muito finos de CaO, com 3% de MgO, e o quartzo está presente com um teor de 3%, na forma de clastos sub-arredondados com dimensões média de 0,7cm: as rochas mostram uma coloração bege claro, com tonalidade amarela: apresenta estruturas bioclástica (micrítica fóssil), fósseis dispersos, de cor escura, com formas alongadas de até 0,5cm, originadas de carapaças de animais e de vegetais diversos;
- LMC: rocha com características semelhantes ao LCB, indicativos de terem a mesma formação mineral, onde os carbonatos se diferenciam, sendo formados por compostos muito finos de CaO, e o quartzo se apresenta próximo a 2%: as rochas mostram uma coloração bege claro, com pigmentação escura, originadas de fósseis diversos;
- LBC: as rochas apresentam uma estrutura maciça, de natureza sedimentar, com uma granulometria de fina a média, sua composição mineralógica mostra teores de 95% de carbonatos de cálcio, e de 3% de carbonatos de magnésio, com 3% de quartzo, que ocorrem na forma de clastos sub-arredondados com dimensões média de 0,7cm: as rochas mostram uma coloração bege claro, com estruturas de fósseis dispersos, de cor escura, com formas alongadas de até 0,5cm, originadas de vegetais e carapaças de animais;
- LBM: estas rochas, de estrutura semelhante ao LBC, compõem-se de carbonatos magnesianos superiores a 10%, e calcídicos, superiores a 80%, o teor de quartzo se aproxima de 4%: apresenta uma cor bege claro, com pigmentação escura, originadas de fósseis diversos;
- LBSM: rochas de estrutura semelhante ao LBC, sua composição mineralógica mostra teores acima de 95% de carbonatos de cálcio, com aproximadamente 2%, de quartzo; apresenta uma coloração cinza esbranquiçada, com pigmentos variegados, originados de fósseis diversos.

Conforme a análise petrográfica realizada nos granitos e mármore tem-se que:

- GBC: rocha granítica, trondhjemitóide, ígnea-intrusiva, é classificada como albíta granito, com topázio, fluorita e com zinwaldita e siderofilita: apresenta granulação de média a grossa e isotrópica, com textura fanerítica granular atípica, caracterizada por cristais de quartzo prismático com terminações trapezoidais, imersos numa matriz feldspática, contendo muscovitas: esta rocha se diferencia dos outros granitos por ser hololeucocrático, e de cor branca com pórfiros de feldspatos e quartzo;
- GRF: rocha granítica, granito grosseiro, equigranular, ígnea plutônica isotrópica de composição sieno-granítica, não apresenta sinais de deformação, compõe-se essencialmente, por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio e biotita: o feldspato potássico ocorre sob a forma de cristais que chegam facilmente a 1cm, exibindo diversas tonalidades da cor verde, compondo o mineral essencial da rocha: o quartzo ocorre sob a forma de cristais sub-arredondados a hexagonais e variam de 0,2 a 0,5 cm que, quando em contato com os K-feldspatos, adquire uma pseudo coloração esverdeada: o plagioclásio ocorre subordinadamente, sendo mais facilmente reconhecido em rochas já alteradas: finalmente a biotita ocorre em aglomerados lamelares, podendo ultrapassar 0,5cm de espessura;
- GRD: rocha de natureza ígnea plutônica, classificada como Biotita – Magnetita Granito, formada por cristais grosseiros, composta essencialmente de minerais feldspato potássico com aproximadamente 53%; feldspato plagioclásio, 12%; o quartzo, 18%; a magnetita, 10% e mica, 5%: os minerais acessórios que completam a composição são clorita, epidoto, carbonatos, fluoritas, e produtos de oxidação (óxidos de ferro, sericita e minerais de argila neoformados): os cristais dos agregados micáceos apresentam brilho metálico, com comprimentos próximos de 1mm: trata-se de um granito de coloração vermelha intensa, de granulação média a grossa sendo composto predominantemente por megacristais de feldspato potássico e subordinadamente por cristais menores de quartzo, plagioclásio e lamelas de biotita; o processo de substituição/alteração está evidente com a cloritização das micas (biotitas e muscovitas), as magnetitas (martitas) apresentam-se bem formadas e outras, que alteradas, se desprendem;
- GGG: rocha de natureza ígnea plutônica, classificada como Sienogranito – Milonítico – formado por cristais grosseiros, compõe-se de 53% de k-feldspato, 12% de plagioclásio, 18% de quartzo, 7% de anfibólio e 10% de mica. Apresenta um

fraturamento intenso em toda a superfície, principalmente nos cristais de quartzo; nos cristais de feldspatos, tanto potássios quanto plagioclásio as microfissuras e interstícios na superfície que ocultam as características distintas destas duas formações presentes;

- GVV: rocha caracterizada como ígnea plutônica isotrópica de composição sienogranítica, coloração esverdeada à levemente amarelada e granulação média a grossa, composta essencialmente por quartzo, feldspato, biotita e anfibólio: o feldspato potássico ocorre sob a forma de cristais que chegam facilmente a 1cm, exibindo diversas tonalidades da cor verde, compondo o mineral essencial da rocha; o quartzo ocorre sob a forma de cristais sub-arredondados a hexagonais e variam de 0,2 a 0,5 cm que, quando em contato com os K-feldspatos, adquire uma pseudo coloração esverdeada, a biotita, de cor marrom avermelhada, ocorre em aglomerados lamelares, podendo ultrapassar 0,5cm de espessura;
- GJPT: esta rocha tem a mesma formação da GVV, sendo a alteração da cor, que apresenta um marron ocre, deve-se ao intemperismo – oxidação e hidratação dos minerais que contêm ferro ferroso: a formação da biotita, que se apresenta em maior teor, e, por ter as bordas dos grãos na cor marrom avermelhado acentuam a cor da rocha;
- GBSP: rocha granítica, trondhjemitóide, ígnea-intrusiva, o litótipo é classificada como albíta granito: rocha, hololeucrática, tem coloração branca leitosa, textura granular fina a média, exibindo alguns cristais de granulação média, que grada para fina em pontos localizados, formado essencialmente por feldspatos (% plagioclásios > % kfeldspatos), quartzo e micas de coloração cinza;
- MBA: Este ensaio não se realizou, por falta de material.

A Figura 4.7 apresenta as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (contraste utilizando elétrons retroespalhados) dos limestones analisados.

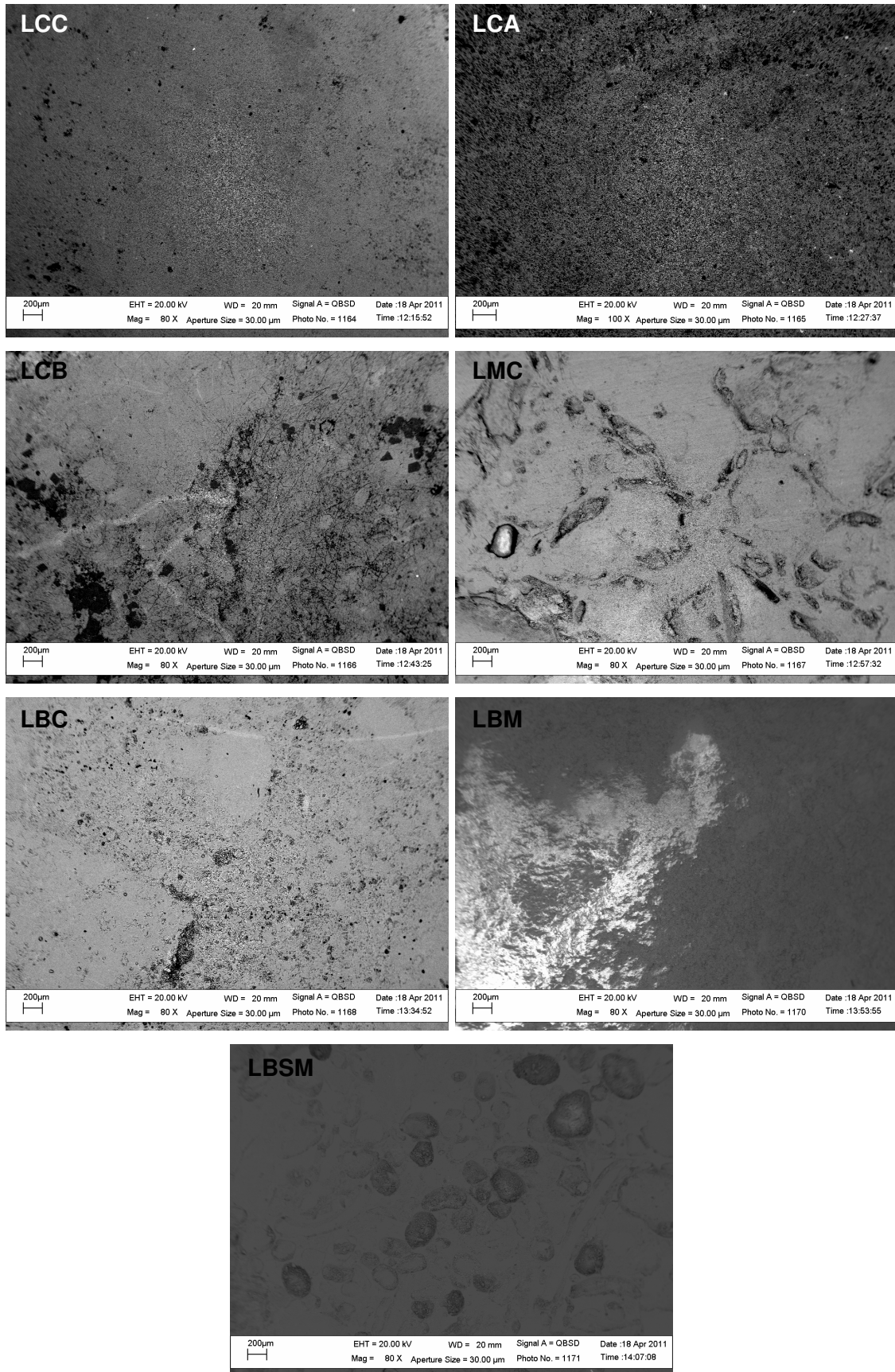


Figura 4.7. Micrografias de MEV dos limestones analisados

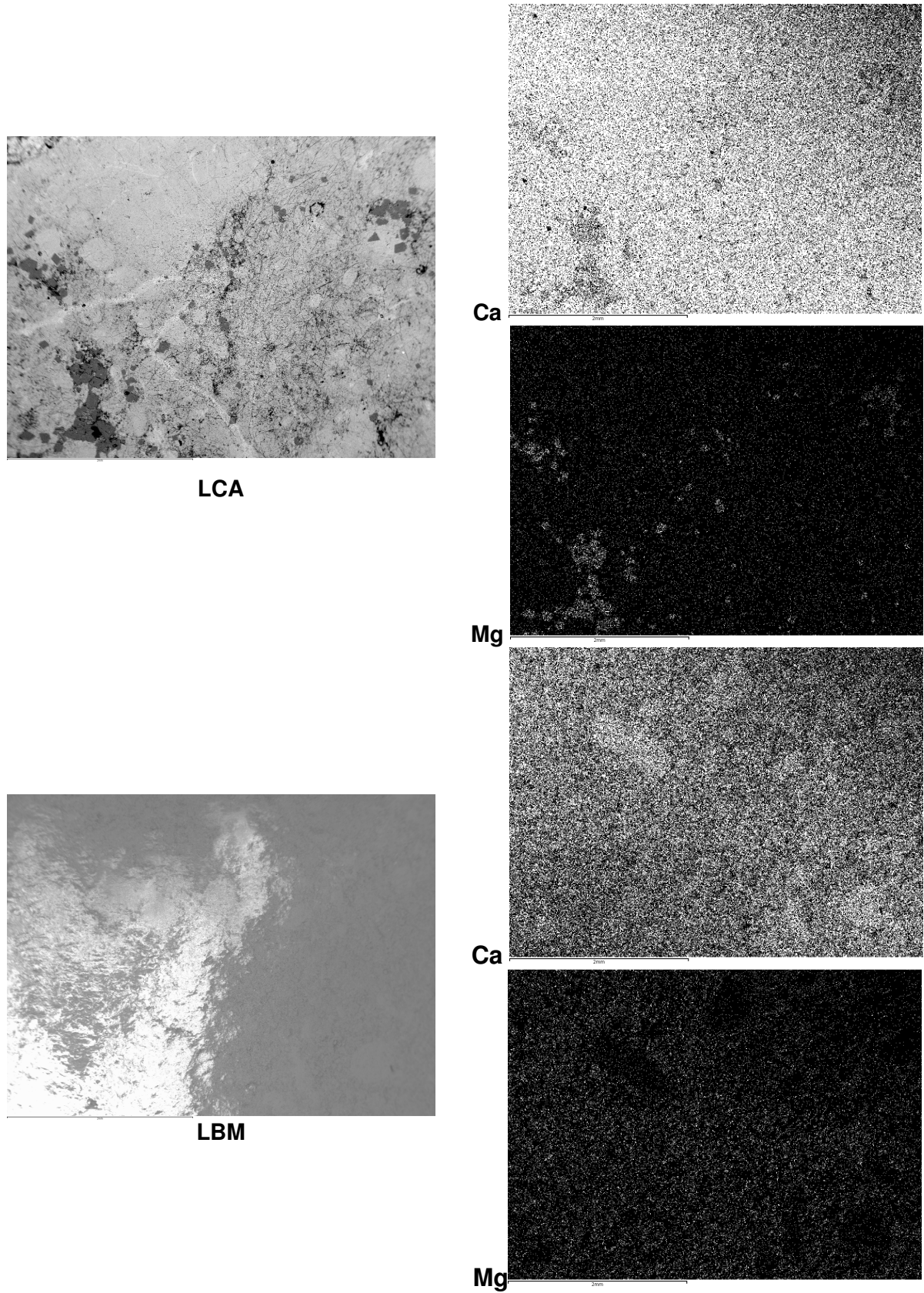


Figura 4.8. Micrografias e mapeamento de fluorescência de raios X das amostras LCA e LBM



Verifica-se que são materiais com elevada porosidade e sem contrastes acentuados de fases (foram utilizados elétrons retroespalhados e microanálise, com detector EDS), o que indica que o magnésio está distribuído homogeneamente na microestrutura, formando a dolomita (detectada na difração de raios X, Figura 4.1) uniformemente no material. No entanto, nas amostras LCA e LBM verifica-se que há concentração de magnésio em determinadas áreas da amostra, conforme evidenciado na Figura 4.8, que apresenta o mapeamento eletrônico de Ca e Mg efetuado nessas amostras. Isso indica que nessas amostras há regiões compostas por calcita e regiões por dolomita.

A Figura 4.9 apresenta as micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados. Pode-se observar que os granitos são, de forma geral, constituídos por uma matriz de feldspato, sódico/potássico ou sódico/cálcico ou potássico, com a presença de cristais de quartzo e de feldspato potássico no interior da matriz. Verifica-se também a presença de fases ricas em ferro e em cálcio e que em alguns granitos o ferro está disseminado na matriz dos mesmos.

Os resultados obtidos com a microanálise de fluorescência de raios X estão em acordo com os dados obtidos para as composições química dos materiais, que indicam elevados teores de  $K_2O$  e  $Na_2O$  e presença de  $CaO$  e  $Fe_2O_3$ . O mapeamento permite observar que os granitos analisados apresentam em sua microestrutura, de forma geral, grãos de quartzo imersos em uma matriz de feldspato. Essa matriz é constituída, na maioria dos granitos analisados por uma mistura de feldspato potássico com plagioclásio (um feldspato cálcio-sódico) ou por feldspato sódico-potássico com feldspato.

Isso é importante, porque, tal como evidenciado na revisão bibliográfica, o comportamento mecânico dos granitos está intimamente associado ao teor de feldspato presente na amostra e a sua granulometria. Com a microscopia observa-se que a presença de grãos pequenos e grandes e que o teor de feldspato nos materiais analisados é muito elevado.

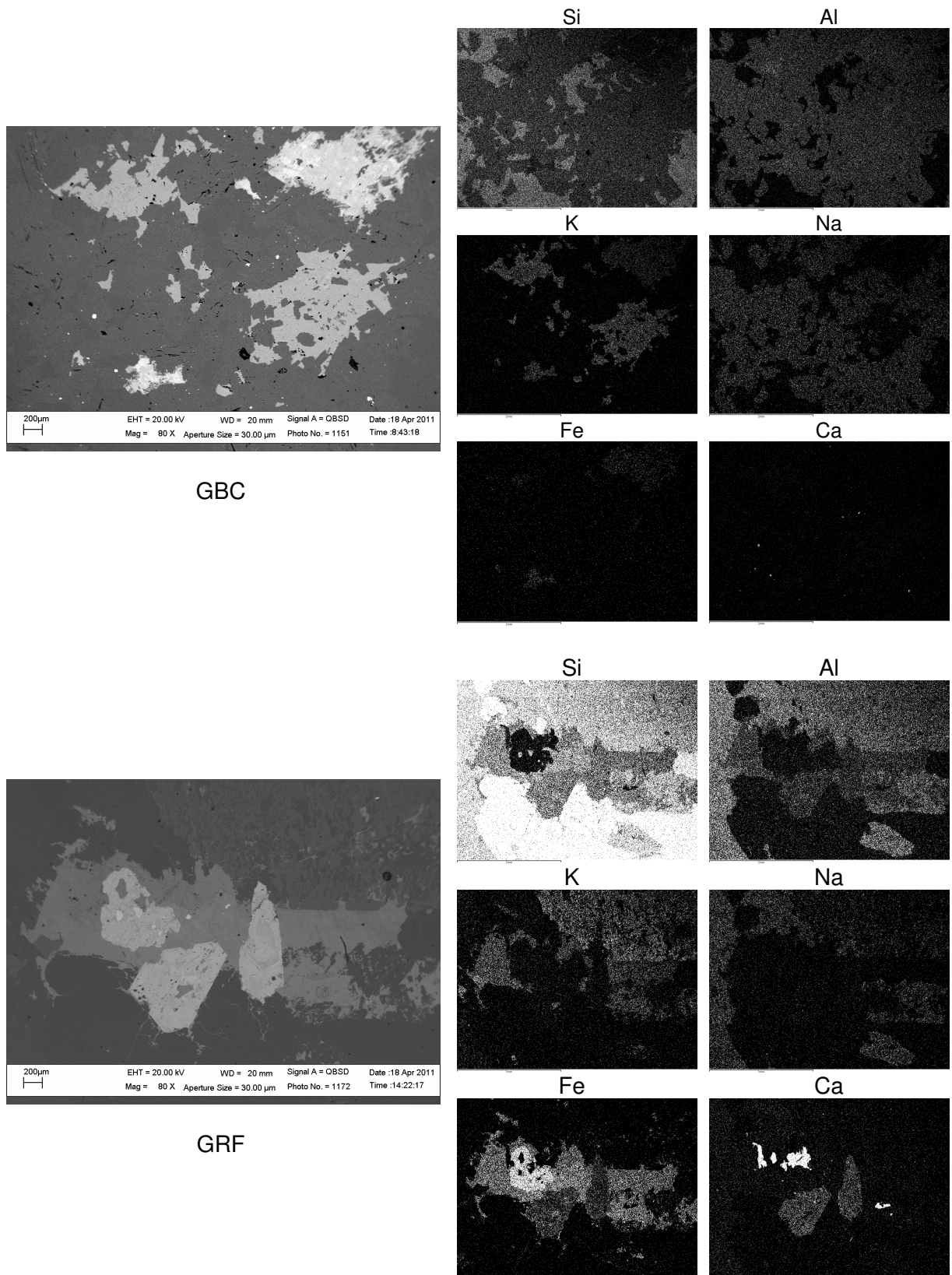


Figura 4.9. Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados

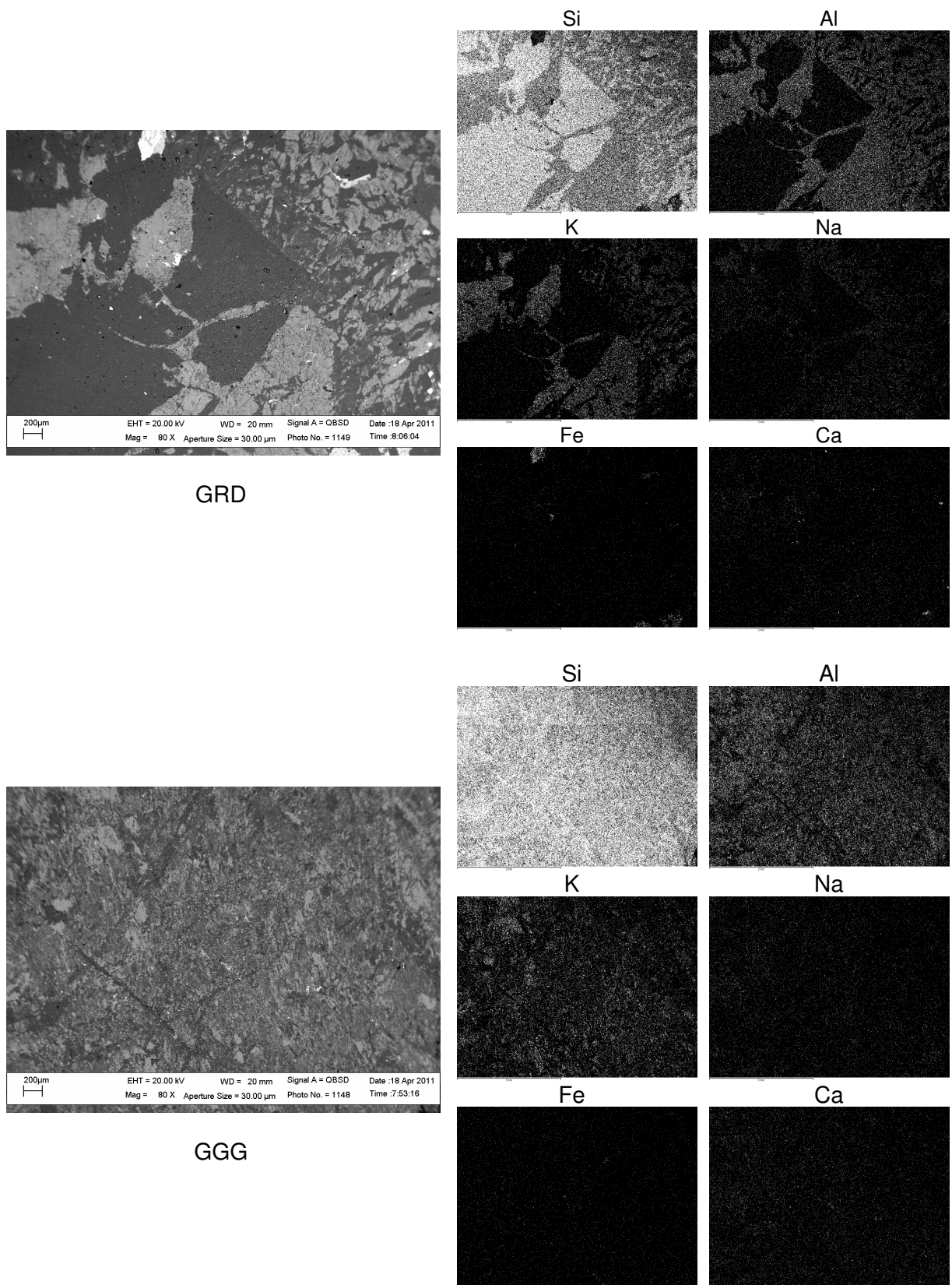


Figura 4.9 (continuação). Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados

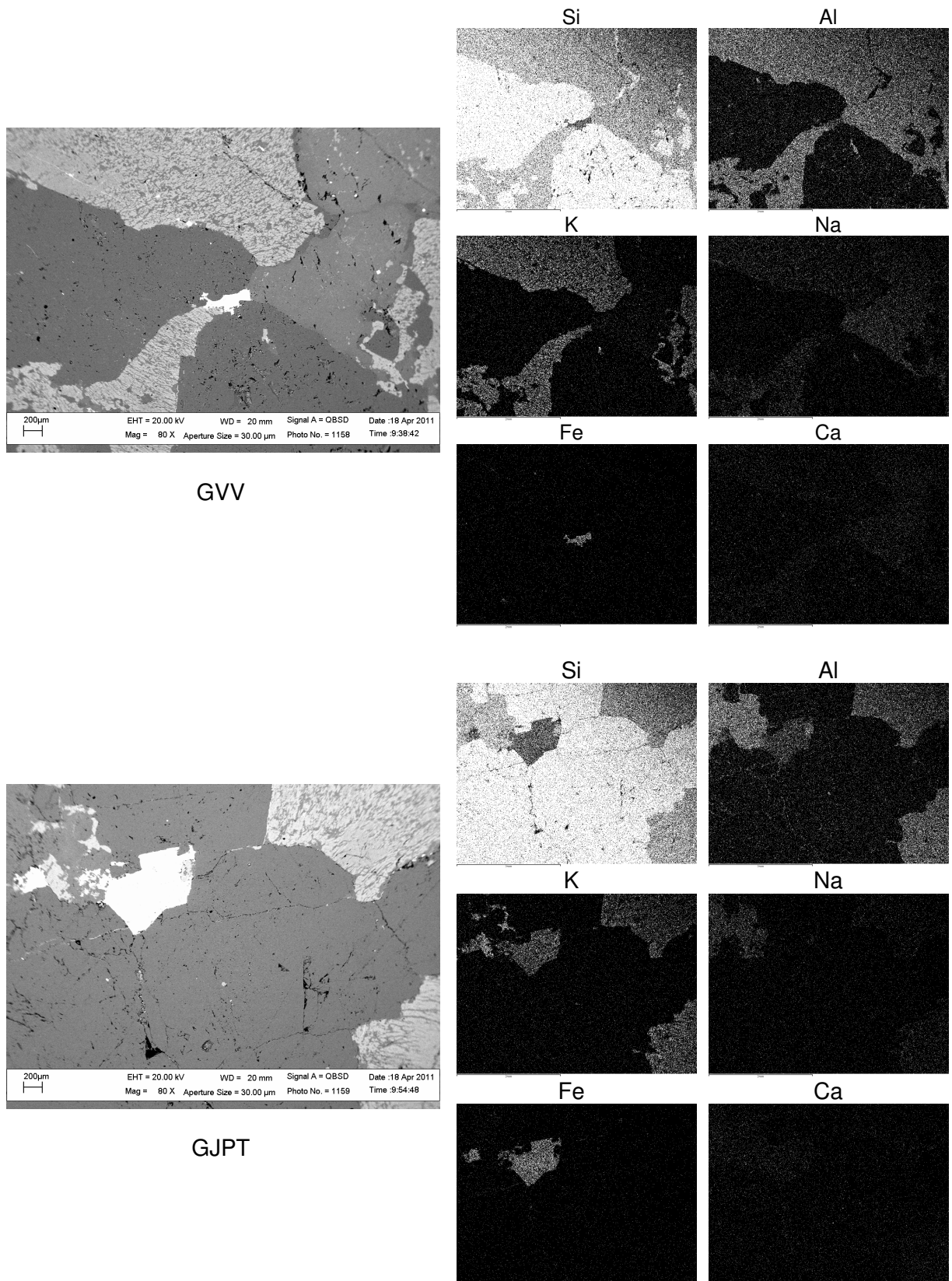


Figura 4.9 (continuação). Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados

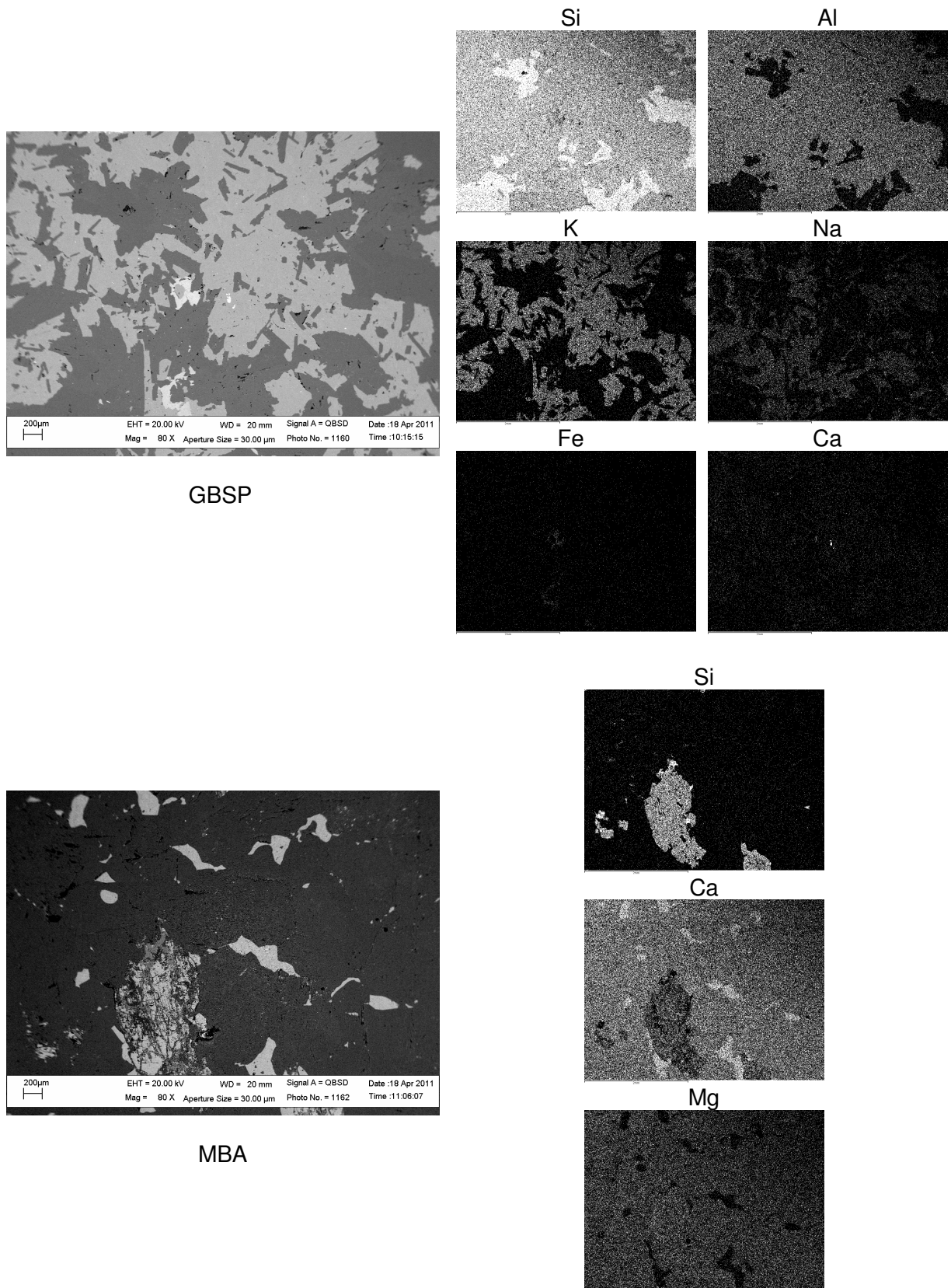


Figura 4.9 (continuação). Micrografias de MEV dos granitos e mármore analisados

O mapeamento indica também que em algumas amostras o cálcio se encontra concentrado em pontos localizados, o que, juntamente com a análise de difração de raios X é indicativo da presença de calcita em alguns granitos. Observa-se também que em algumas amostras há regiões onde o ferro se concentra, o que pode indicar a presença de fases ricas em ferro, como siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e /ou hidróxidos de ferro.

O mármore apresenta uma matriz composta por cálcio e magnésio, evidenciando seu caráter dolomítico, mas apresenta regiões ricas em cálcio sem a presença de magnésio, indicando a presença de calcita, o que está de acordo com os resultados obtidos com a difração de raios X. Através da microscopia verifica-se também a presença de impurezas ricas em silício, concentrada em pequena região da amostra.

## **4.2 Caracterização físico-mecânica**

### **4.2.1 Índices Físicos**

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos índices físicos: massa específica aparente (densidade aparente), porosidade aparente e absorção de água dos limestones, granitos e mármore analisados nessa pesquisa.

A determinação da massa específica aparente auxilia a determinação da compactidade, do empacotamento dos minerais, respondendo pelas condições de menor número de vazios, que comprometem a integridade da rocha.

Conforme a qualificação das rochas para revestimento segundo FRAZÃO e FARJALLAT (1996), observa-se que todos os granitos atendem aos valores sugeridos para rochas com fins ornamentais por apresentaram densidades superiores a  $2,56 \text{ g/cm}^3$ . Resultados válidos para (ABNT, 2010) que estabelece

densidades superiores a  $2,55 \text{ g/cm}^3$ . O mármore também atende a classificação proposta, apresentando valor de densidade aparente superior a  $2,8 \text{ g/cm}^3$ .

Tabela 4.2. Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água, das amostras analisadas

Amostras	Índices Físicos <sup>a</sup>			
	Densidade Aparente ( $\text{g/cm}^3$ )		Porosidade (%)	Absorção de água (%)
	Seca	Saturada		
LCC	$2,45 \pm 0,01$	$2,50 \pm 0,01$	$6,71 \pm 0,59$	$2,75 \pm 0,17$
LCA	$2,52 \pm 0,03$	$2,53 \pm 0,01$	$1,88 \pm 0,10$	$0,75 \pm 0,06$
LCB	$2,48 \pm 0,02$	$2,53 \pm 0,02$	$6,63 \pm 0,44$	$2,72 \pm 0,28$
LMC	$2,25 \pm 0,05$	$2,39 \pm 0,05$	$13,74 \pm 0,48$	$6,11 \pm 0,21$
LBC	$2,34 \pm 0,03$	$2,45 \pm 0,02$	$10,94 \pm 1,48$	$4,73 \pm 0,58$
LBM	$2,41 \pm 0,02$	$2,49 \pm 0,01$	$8,19 \pm 1,33$	$3,43 \pm 0,56$
LBSM	$2,37 \pm 0,05$	$2,47 \pm 0,04$	$10,12 \pm 1,74$	$4,29 \pm 0,86$
GBC	$2,62 \pm 0,01$	$2,62 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,01$
GRF	$2,62 \pm 0,01$	$2,63 \pm 0,01$	$0,43 \pm 0,03$	$0,16 \pm 0,02$
GRD	$2,60 \pm 0,01$	$2,61 \pm 0,01$	$0,81 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,02$
GGG	$2,69 \pm 0,01$	$2,69 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,09$	$0,14 \pm 0,05$
GVV	$2,62 \pm 0,01$	$2,62 \pm 0,01$	$0,80 \pm 0,05$	$0,29 \pm 0,04$
GJPT	$2,62 \pm 0,01$	$2,62 \pm 0,01$	$0,80 \pm 0,05$	$0,29 \pm 0,04$
GBSP	$2,64 \pm 0,01$	$2,65 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,04$	$0,10 \pm 0,04$
MBA	$2,86 \pm 0,02$	$2,87 \pm 0,02$	$0,31 \pm 0,07$	$0,11 \pm 0,05$

<sup>a</sup> valores médio  $\pm$  desvio padrão

Verifica-se que os granitos analisados apresentam porosidade aparente inferior a uma grande variedade de granitos, conforme comparação com dados da literatura (TUGRUL & ZARIF, 1999; YILMAZ et al., 2009; VAZQUEZ et al., 2010; RIVAS et al., 2010), onde observa-se que há grande quantidade de granitos com

porosidades entre 1 e 2% e poucos com porosidade aberta inferior a 1% (encontra-se também granitos com porosidades de até 5%). Vale salientar que dados da literatura (SOUSA et al., 2005) indicam que os granitos para serem utilizados em condições de exposição ao meio ambiente deveriam possuir porosidade aberta inferior a 3%, assim os granitos analisados se adequariam para esses fins.

Os limestones apresentam densidades variando de 2,25 a 2,52g/cm<sup>3</sup>, observando-se assim, que parte das amostras apresentam densidade superior a 2,4g/cm<sup>3</sup> e que os seguintes limestones: LMC, densidade de 2,25 ± 0,05 g/cm<sup>3</sup>; LBC, densidade de 2,34 ± 0,03g/cm<sup>3</sup> e LBSM, densidade de 2,37 ± 0,05g/cm<sup>3</sup> não atendem a classificação proposta por FRAZÃO & FARJALLAT (1996) para uso como rocha ornamental de revestimento.

No entanto, para se ter um panorama mais amplo da aplicabilidade desses materiais para fins de revestimento, outros ensaios físico-mecânicos devem ser realizados, em amostras equivalentes ao uso atual, que agreguem outros materiais como telas e resinas poliméricas, reforço usado em rochas ornamentais que apresentam fragilidade em virtude de elevada porosidade ou presença de trincas/defeitos.

Estudos evidenciam que o uso de limestones como revestimentos na construção civil deve levar muito em consideração a porosidade do material, em virtude do processo de deterioração que esse material apresentará em uso. Nesse sentido, com base em dados da literatura (BUJ et al., 2010; PIRES et al., 2010; KARAKA et al., 2011) observa-se que materiais com porosidades inferiores a 4% e na maioria dos casos a 2% são mais indicados para fins de revestimentos. Por outro lado, verifica-se também na literatura (TÖRÖK, 2003; CARDELL et al., 2008; CNUUDE et al., 2009; FRONTÉAU et al., 2010) relatos de materiais com porosidade variando de 10 a 45% utilizados para em revestimentos na construção civil. Isso evidencia que a aplicabilidade dos limestones como revestimento depende em muito do tipo de revestimento ao pretende-se submetê-lo. Assim, os limestones analisados podem ser aplicados como revestimentos (comparativamente aos dados da literatura), dependendo do local a ser empregado.

A classificação da ASTM para rochas ornamentais, Tabela 2.6, colocaria os limestones analisados na categoria de rochas calcárias de média densidade,



evidenciando que suas características se enquadram em determinada categoria de rochas usadas comercialmente.

Com base na Tabela 4.2 observa-se que a porosidade aparente e a absorção de água dos granitos e mármore são inferiores a 1%, enquanto os limestones apresentaram porosidade variando de aproximadamente 2 a 14% e absorção de água no intervalo de 0,75 a 6%. Isso indica que os limestones apresentam uma estrutura muito mais aberta e acessível à água que os granitos e o mármore, o que terá implicações em suas propriedades físicas. Assim, comparativamente aos granitos, algumas propriedades serão favorecidas, como por exemplo, isolamento térmico e acústico, enquanto outras, como resistência mecânica e ao desgaste abrasivo, não.

Os valores de absorção de água e porosidade dos limestones, juntamente com os resultados de caracterização microestrutural, indicam que as amostras analisadas, apesar de serem rochas calcárias de formação geológica similar, apresentam diferenças significativas nas suas macro e microestruturas. O que destaca a necessidade de sua adequada caracterização para a definição do uso mais apropriado para cada um dos limestones.

Comparando os resultados de absorção de água com os valores utilizados para a classificação de revestimentos cerâmicos, observa-se que os granitos seriam comparáveis, em termos de absorção de água (e conseqüentemente de porosidade aparente) com revestimentos porcelânicos (porcelanatos), enquanto que os limestones possuem absorção equivalente a de revestimentos grês ( $0,5\% < \text{absorção} < 3\%$ ) e semi-grês ( $3\% < \text{absorção} < 6\%$ ). Isso evidencia que os limestones apesar de possuírem porosidades elevadas para rochas ornamentais apresentam valores dentro da faixa observada comercialmente para revestimentos.

Conforme a sistemática de classificação de rochas ornamentais para revestimentos de HENRIQUE & TELLO (2006), Tabela 2.4, os granitos e o mármore analisados seriam, segundo suas porosidades e absorções de água classificados como de qualificação boa ou ótima para revestimentos. Os limestones, segundo essa sistemática, mostrada na tabela 4.5 adiante, seriam classificados como de qualificação média, regular e baixa.

Segundo os parâmetros definidos por CHIODI FILHO (2008) o valor médio proposto para a porosidade aparente das rochas ornamentais é de 1,0%, e de acordo com a (ABNT, 2010), todos os granitos atingiriam este índice e os limestones estariam fora da faixa proposta. O valor médio proposto para a absorção de água das rochas ornamentais, segundo CHIODI FILHO (2008) e de acordo com a (ABNT, 2010) é de 0,4%, assim, todos os granitos também atingiriam esse limite, exceto os limestones, como mostrado adiante na tabela 4.5.

#### 4.2.2 O Coeficiente de Dilatação Térmica

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos coeficientes de dilatação térmica das amostras analisadas. Observa-se que os valores dos coeficientes de expansão térmica dos granitos variaram de 7,7 a 11 mm/m°C 10<sup>-3</sup> para os valores determinados entre 30 e 50°C. Os coeficientes de expansão dos limestones variaram de 4,5 a 6,0 mm/m°C 10<sup>-3</sup> e o valor obtido para o mármore foi de 6,0 mm/m°C 10<sup>-3</sup>.

Tabela 4.3. Coeficientes de dilatação térmica das amostras analisadas<sup>a</sup>

Amostras	Coeficiente de expansão térmica (mm/m°C x 10 <sup>-3</sup> )	
	30 a 50°C	40 a 100°C
LCC	5,5	6,0
LCA	6,0	7,0
LCB	5,0	5,8
LMC	5,1	6,2
LBC	5,0	5,0
LBM	6,0	5,3
LBSM	4,5	5,1
GBC	8,5	9,8
GRF	7,7	9,0
GRD	8,8	8,7
GGG	9,0	8,8
GVV	9,0	9,0
GJPT	11,0	12,8
GBSP	9,0	8,7
MBA	6,0	8,8

<sup>a</sup> determinados por dilatométrica

O granito apresenta valores do coeficiente típicos de expansão térmica entre 6 e 9 mm/m°C 10<sup>-3</sup>, os limestones valores em torno de 6 mm/m°C 10<sup>-3</sup> e o mármore valores entre 4 e 7 mm/m°C 10<sup>-3</sup>. Isso indica que os valores determinados estão em acordo com esses valores gerais observados na literatura.

A larga faixa de variação do coeficiente de dilatação observada para os granitos esta provavelmente relacionada às diferenças nas suas características microestruturais, como, por exemplo, teor de quartzo, feldspato que constitui a matriz, presença de outras fases, etc.

A Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2011b), realizou ensaios de caracterização em rochas ornamentais brasileiras observando os seguintes valores para o coeficiente de expansão térmica dos granitos: entre 9,7 e 9,9mm/m°C 10<sup>-3</sup> e dos mármore: entre 3,1 e 11,9mm/m°C 10<sup>-3</sup>. Esses resultados indicam que os resultados obtidos para os granitos analisados divergem dos valores usados pela associação para esse material, apesar dos valores obtidos estarem em acordo com os dados da literatura mundial. O valor obtido para o mármore esta dentro da faixa indicada pela associação para esses materiais.

É interessante observar que o coeficiente de expansão térmica das rochas ornamentais pode ter implicações no seu comportamento de envelhecimento (degradação) frente a ciclos térmicos. Ciclos térmicos entre a temperatura ambiente e por exemplo -20°C (regiões onde há congelamento) ou 150°C (aplicações em proximidades de lareiras e fogões) são comuns em várias aplicações de rochas ornamentais. Estudos recentes (LAM dos SANTOS et al., 2011) evidenciam a influência de oscilações térmicas no comportamento mecânicos de uma rocha granítica e de um limestone. Assim, é interessante que o material, nesses usos, apresente os menores coeficientes térmicos de modo a evitar histereses durante o processo de dilatação e contração com o desenvolvimento de trincas e conseqüentemente a redução da resistência do material.

#### 4.2.3 Resistência à Compressão Uniaxial

A resistência à compressão é requerida para todos os revestimentos pétreos empregados na construção civil, sujeitos a esforços estruturais, pois indica a integridade de sua estrutura cristalina e o seu comportamento quando aplicada como rocha ornamental, sendo uma propriedade índice da rocha, que qualifica tecnologicamente o material. A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão, à flexão, impacto ao corpo duro e desgaste Amsler dos materiais analisados.

Com base na Tabela 4.4 observa-se que a resistência à compressão dos granitos é muito superior a dos limestones, tal como esperado. Fato justificado pela menor porosidade dos granitos e de sua constituição mineralógica.

Tabela 4.4. Resultados dos ensaios mecânicos das amostras analisadas<sup>a</sup>

Amostras	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Impacto ao corpo duro (m)		Desgaste Amsler	
			Fissura (m)	Ruptura (m)	500 (mm)	1000 (mm)
LCC	27,1 ± 2,3	14,9 ± 2,2	0,39 ± 0,07	0,44 ± 0,08	2,56	5,06
LCA	30,2 ± 4,8	24,7 ± 2,3	0,50 ± 0,07	0,55 ± 0,07	1,09	2,29
LCB	21,5 ± 6,0	13,2 ± 1,8	0,33 ± 0,06	0,39 ± 0,06	2,85	5,59
LMC	16,5 ± 6,5	3,4 ± 0,2	0,36 ± 0,06	0,42 ± 0,07	8,90	- <sup>b</sup>
LBC	29,3 ± 4,6	6,0 ± 0,4	0,32 ± 0,06	0,37 ± 0,06	5,78	8,85
LBM	34,3 ± 3,0	6,2 ± 0,6	0,35 ± 0,07	0,40 ± 0,07	5,30	8,59
LBSM	34,1 ± 3,9	5,4 ± 0,6	0,31 ± 0,06	0,37 ± 0,06	7,55	- <sup>b</sup>
GBC	211,6 ± 21,2	17,6 ± 0,6	0,47 ± 0,07	0,53 ± 0,06	0,25	0,51
GRF	96,4 ± 1,7	9,6 ± 1,2	0,52 ± 0,02	0,60 ± 0,04	0,34	0,74
GRD	115,6 ± 9,6	13,5 ± 1,9	0,51 ± 0,02	0,56 ± 0,04	0,34	0,77
GGG	122,6 ± 8,5	22,6 ± 4,1	0,52 ± 0,02	0,55 ± 0,07	0,23	0,48
GVV	95,2 ± 9,8	11,5 ± 1,2	0,55 ± 0,04	0,60 ± 0,03	0,51	0,75
GJPT	94,1 ± 13,3	13,6 ± 2,8	0,55 ± 0,05	0,61 ± 0,04	0,43	0,88
GBSP	125,5 ± 10,9	21,1 ± 1,8	0,69 ± 0,02	0,75 ± 0,03	0,11	0,43
MBA	- <sup>b</sup>	13,2 ± 4,8	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>

<sup>a</sup> valores dados como: média ± desvio padrão, <sup>b</sup> ensaio não realizado

Os granitos apresentam uma microestrutura composta por grãos cristalinos, em geral quartzo e mica, imersos em uma matriz que passa por um processo térmico de fusão, que ao resfriar e cristalizar da origem aos feldspatos (tal como observado nas micrografias na Figura 4.9), o que confere aos granitos uma baixa porosidade e uma estrutura de grãos e matriz interrelacionados entre si por forte ligações primárias.

Os limestones são rochas calcárias sedimentares formadas após a precipitação de hidróxido de cálcio e sua carbonatação.

Os limestones analisados apresentam estrutura lamelar (sedimentação de camada após camada), sendo a consolidação da sua estrutura dada pela conformação das camadas pela pressão da camada d'água acima do material sedimentado e por fracas interações entre as partículas. Assim, naturalmente, os limestones tendem a apresentar resistências menores que a dos granitos.

Os limestones analisados apresentam elevada porosidade, que, sendo os poros concentrados de tensão, intensificam o fato desses materiais terem comportamento mecânico inferior aos dos granitos.

Por outro lado, segundo a ASTM, Tabela 2.6, a maioria dos granitos apresentam valor de resistência a compressão superior ao valor limite (28MPa) indicado para materiais calcários classificados como de “média densidade”.

O LCA apresentou resultados de compressão e flexão superiores aos demais limestones, correspondendo a sua baixa porosidade, resultado provável do melhor fator de empacotamento, originado pela concentração de magnésio presente no arranjo atômico.

A compressão do GBC superior em mais 65% do GBSP, ambos de mesma origem e formação mineralógica, resulta provavelmente das dimensões e formas prismáticas dos grãos de quartzo (reforço na matriz feldspato por adesão mecânica – teoria dos compósitos). O GJPT apresentou o menor valor na compressão entre os granitos, correlacionado possivelmente pelas microfissuras na rede cristalina, confirmado por seu elevado coeficiente de expansão térmica.

De acordo com os parâmetros definidos por CHIODI FILHO (2005), o valor proposto para a compressão das rochas ornamentais é de 100MPa, assim, três

granitos (GRD, GVV e GJPT) apresentariam valores inferiores a esse limite e os demais valores superiores.

Os limestones, como observado na Tabela 4.4 não atingiriam esse valor limite. Segundo a sistemática de classificação de HENRIQUES & TELLO (2006), Tabela 2.5, observa-se que os granitos enquadrar-se-iam como de qualidade média e ótima, enquanto os limestones estariam agrupados nos materiais com qualidade baixa.

#### **4.2.4 Resistência à Flexão**

A resistência à flexão define a resistência das rochas aos esforços de tração e flexão. Situação comumente observada em peças de bancadas, em peças com bordas livres, em painéis de fachadas, ou outros tipos de fixação de bordas, além de outros empregos na construção civil. Os resultados de resistência à flexão, Tabela 4.4, evidenciam que os granitos apresentam, de forma geral, superior aos limestones analisados.

Deve-se observar que, como esperado, há uma redução na resistência à flexão nos materiais analisados comparativamente à resistência à compressão, entretanto, essa redução é significativamente maior nos granitos que nos limestones.

Essa redução está associada ao fato dos materiais em geral serem mais suscetíveis a esforços de tração (tal como provocado pelo ensaio de flexão) que a esforços de compressão, por esses últimos tenderem a fechar e reduzir a propagação de trincas, enquanto os primeiros tendem a intensificar a abertura e a propagação das trincas, tal como evidenciado pela teoria de Griffith (A.A. GRIFFITH deduziu em 1920 as equações válidas atualmente em mecânica das fraturas que determinam a fratura em trincas presentes em materiais elásticos e idealmente frágeis).

Os granitos, pela sua própria formação geológica apresentam uma matriz constituída por felsdpatos, que é um material que apresenta “fácil” clivagem (comparativamente aos demais materiais), além disso, apresenta grãos grandes e baixa porosidade, com poucas barreiras a propagação da trinca.

Assim, quando submetidos a esforços de tração esses materiais sofrem uma redução significativa de sua resistência, podendo propagar rapidamente através da trinca intergranular e transgranularmente.

Por outro lado, os limestones analisados são materiais com elevada porosidade e com característica laminar, assim, além de já possuir uma baixa resistência a compressão, quando submetido a flexão, ocorrerá a “morte” de algumas trincas que se propagam no material ao se encontrarem com os poros (deve-se destacar que poros não aumentam a resistência apenas podem melhorar um pouco a tenacidade de sistemas muito frágeis, mas elevada porosidade e reduz a resistência do sistema), além do fato da interface entre suas camadas serem caminhos preferenciais para propagação da trinca, consumindo energia e evitando que o material rompa rapidamente (vale ressaltar que o sentido do ensaio foi perpendicular a camadas da estrutura).

Deste modo, a redução nos valores de resistência é menos severa nos limestones analisados, fazendo, inclusive, com que os limestones com menor porosidades, LCC, LCA e LCB apresentem valores de resistência a flexão similar ao dos granitos.

Conforme a classificação de HENRIQUE & TELLO (2006) os limestones se enquadrariam em mais de um item, variando de qualidade baixa a média. Os granitos também se enquadrariam em mais de um item, havendo granitos de qualidade regular, média, boa e ótima. No que tange ao valor limite proposto por CHIODI & FILHO (2005) para a resistência a flexão (10MPa), ter-se-ia que um dos granitos, o GRF, não atingiria o valor limite.

Vale salientar que os resultados de resistência apresentados são influenciados pelas microfissuras na rede cristalina, que reduz a capacidade de suportar aos esforços aplicados sobre as mesmas, o que pode gerar valores de resistência inferiores aos esperados para tais rochas.

Apenas os limestones LCC, LCA e LCB atingiriam o valor limite proposto por CHIODI & FILHO (2005). Entretanto, segundo a ASTM, Tabela 2.6, todos os limestones estudados apresentam valores superiores ao limite indicado para rochas calcárias de média densidade, atingindo, inclusive, valores superiores ao indicado para rochas de alta densidade.

#### 4.2.5 Resistência ao Impacto

O ensaio de resistência ao impacto de corpo duro define a resistência da rocha à impactos e simula a resistência da rocha à queda do objeto, medindo a sua altura deste até a amostra, o que pode provocar fissuras e a ruptura. Conforme a classificação de HENRIQUE & TELLO (2006) os limestones se enquadrariam como de qualidade regular e os granitos como de qualidade média. Segundo os parâmetros definidos por CHIODI FILHO (2005), o valor médio proposto para a resistência ao impacto das rochas ornamentais é de 0,40m, assim, todos granitos atingem a este índice, os limestones não se enquadram, com exceção do LCA.

A pequena diferença entre os valores de resistência ao impacto dos granitos e dos limestones, apesar da significativa diferença de densidade e de resistência a compressão esta relacionada a motivos semelhantes aos descritos anteriormente, não havendo mecanismos para dissipação da força motriz de propagação das microtrincas formadas durante o impacto ou de pontos na microestrutura para sua “retenção” nos granitos.

A microestrutura dos granitos é formada por uma matriz vítrea que engloba materiais cristalinos e várias pequenas trincas. Essas pequenas trincas são concentradores de tensões e há campos de tensão no interior do material devido as diferenças nos coeficientes de dilatação entre a fase vítrea e os materiais imersos na matriz, principalmente o quartzo.

O quartzo, presente em todos os granitos, tem um coeficiente de dilatação duas vezes superior ao do feldspato, o que pode resultar em microfissuras em torno dos grãos do quartzo. O feldspato tem tendência a clivagem fácil quando sob tensão, provocando microtrincas.

Essas microfissuras ainda podem ser ampliadas a partir das etapas de beneficiamento das rochas, ampliando as tensões nos materiais. Este cenário propicia uma microestrutura que não tem como absorver a energia do impacto e as trincas formadas propagam rapidamente.

No caso dos limestones, os materiais apresentam elevada porosidade, o que concentra tensões e pode provocar a formação de trincas, mas ao mesmo tempo



também podem funcionar como pontos de impedimento a propagação das trincas. A trinca ao chegar a um grande poro não mais se propaga dentro do material.

Além disso, o caráter laminar desses materiais propicia uma série de planos para a propagação da trinca (regiões entre as lamelas da sedimentação), aumentando o caminho livre de propagação da trinca, o que consome a energia do impacto e minimiza danos ao material como um todo.

Assim, acredita-se que por isso os valores de resistência ao impacto dos granitos não diferiram em elevada magnitude dos valores dos limestones analisados.

#### **4.2.6 Determinação do desgaste por abrasão – Amsler**

O desgaste Amsler define a resistência ao esforço abrasivo e simula a resistência do revestimento (piso) quando sujeito ao tráfego. As perdas das camadas superficiais do piso são causadas pelo atrito no contato de pessoas, corpos diversos ou veículos.

Com base na sistemática de HENRIQUE & TELLO (2006) e nos dados presentes na Tabela 4.4 verifica-se que os granitos se enquadrariam como de qualidade boa e ótima. Os limestones teriam sua classificação variando de qualidade baixa à média.

Nesse tipo de esforço a porosidade tem uma influência significativa, já que quanto maior a porosidade menor a área útil para resistir ao esforço e maior a tensão, podendo-se verificar que o limestone com menor porosidade foi o que apresentou a maior resistência ao desgaste Amsler. Esse comportamento também é observado para os granitos, apresentando a maior resistência os menor porosidade.

A ausência dos valores para os limestones LMC e LBSM aos 1000m é devido ao seu grande desgaste. Segundo os parâmetros para 1000m, definidos por CHIODI FILHO (2005), os valores do desgaste Amsler devem ser avaliados conforme a utilização da rocha, sendo indicado para zonas de alto tráfego desgaste < 7 mm, para zonas de médio tráfego < 1,5mm e zonas de baixo tráfego < a 3 mm.

Nesse sentido, o único limestone que poderá ser utilizado como revestimento de pisos, em locais de pouco movimento (como unidades residenciais) seria o LCA. Os granitos podem ser especificados para uso em pavimentação de comércios, unidades públicas, etc, com melhor desempenho para os granitos GBC, GGG,

GBSP, que manteriam a camada polida de superfície, ao longo do tempo, mesmo sujeito a elevadas cargas de atrito, conforme os resultados da Tabela 4.4.

No entanto, verifica-se que no caso dos limestones os estudos evidenciam que sua resistência a abrasão pode ser significativamente afetada após degradação, particularmente quando sujeito a processos de cristalização (ou congelamento-descongelamento).

Nesse sentido, é interessante que os limestones apresentam baixa porosidade, inferior a 2%, a fim de não sofrerem processos mais acentuados de degradação durante a vida útil com a diminuição de sua resistência a abrasão.

Os limestones analisados, provavelmente podem, em virtude de suas elevadas porosidades, sofrer alterações na sua resistência a abrasão o que indicaria sua utilização para zonas de baixo tráfego e não expostas ao ambiente.

A Tabela 4.5 sumariza os resultados dos ensaios físico-mecânicos obtidos, possibilitando uma análise comparativa, qualitativa, dos materiais de forma rápida, classificando-os como de qualificação baixa, regular, média, boa ou ótima para uso como revestimento na construção civil.

Os resultados do MBA não constam na Tabela 4.5 devido aos seus ensaios terem sido incompletos.

Tabela 4.5. Análise comparativa e qualitativa das amostras analisadas (HENRIQUES &amp; TELLO, 2006)

Propriedade	Baixa	Regular	Media	Boa	Ótima
Absorção d'Água (%)	> 3,0 LCB, LMC, LBC, LBM, LBSM	1,0 – 3,0 LCC	0,4 – 1,0 LCA	0,1 – 0,4 Todos Granitos	< 0,1
Porosidade Aparente (%)	> 6,0 LCC, LCB, LMC, LBC, LBM, LBSM	3,0 – 6,0	1,0 – 3,0 LCA	0,5 – 1,0 GGG, GRF, GBSP	< 0,5 GBC, GRD, GVV, GJPT
Resistência à Compressão (MPa)	< 40 Todos Limestones	40 – 70 GRF	70 – 130 GRD, GGG, GVV, GJPT, GBSP	130 – 180	> 180 GBC
Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)	< 6 LMC, LBC, LBSM	6 – 12 LBM, GBC, GRF, GVV	12 – 18 LCC, LCB, GRD, GJPT	18 – 22 GBSP	> 22 LCA GGG
Resistência ao Impacto (m)	< 0,30	0,30 – 0,50 LCC, LCB, LBM, LBC, LBM, LBSM	0,50 – 0,70 LCA, GBC, GRF, GRD, GGG, GVV, GJPT	0,70 – 0,95 GBSP	> 0,95
Resistência ao Desgaste Amsler (mm)	> 6,0 LMC, LBC, LBM, LBSM	3,0 – 6,0 LCC	1,5 – 3,0 LCA, LCB, GRF, GRD, GVV, GJPT	0,7 – 1,5	< 0,7 GBC, GGG, GBSP

Estudos a cerca da resistência a abrasão de limestones (KARACA et al., 2010, 2011; UROSEVIC et al., 2011) e de granitos (MAHROUS et al., 2010; YILMAZ et al., 2011) evidenciam que a resistência dos granitos é maior, o que está de acordo com o observado, e que esse material não apresenta variações significativas na sua resistência após exposição a condições de uso e possível degradação.

### 4.3. Análise de Alterabilidade

Os ensaios de resistência aos agentes de ataque químico foram realizados, como mencionado anteriormente, nos laboratórios do IFET Ce - Campus Juazeiro do Norte. As Figuras 4.10 a 4.14 apresentam as fotografias das placas após serem

submetidas ao ensaio de alterabilidade por exposição ao cloreto de amônia, hipoclorito de sódio, ácido cítrico, ácido clorídrico e hidróxido de potássio, respectivamente.

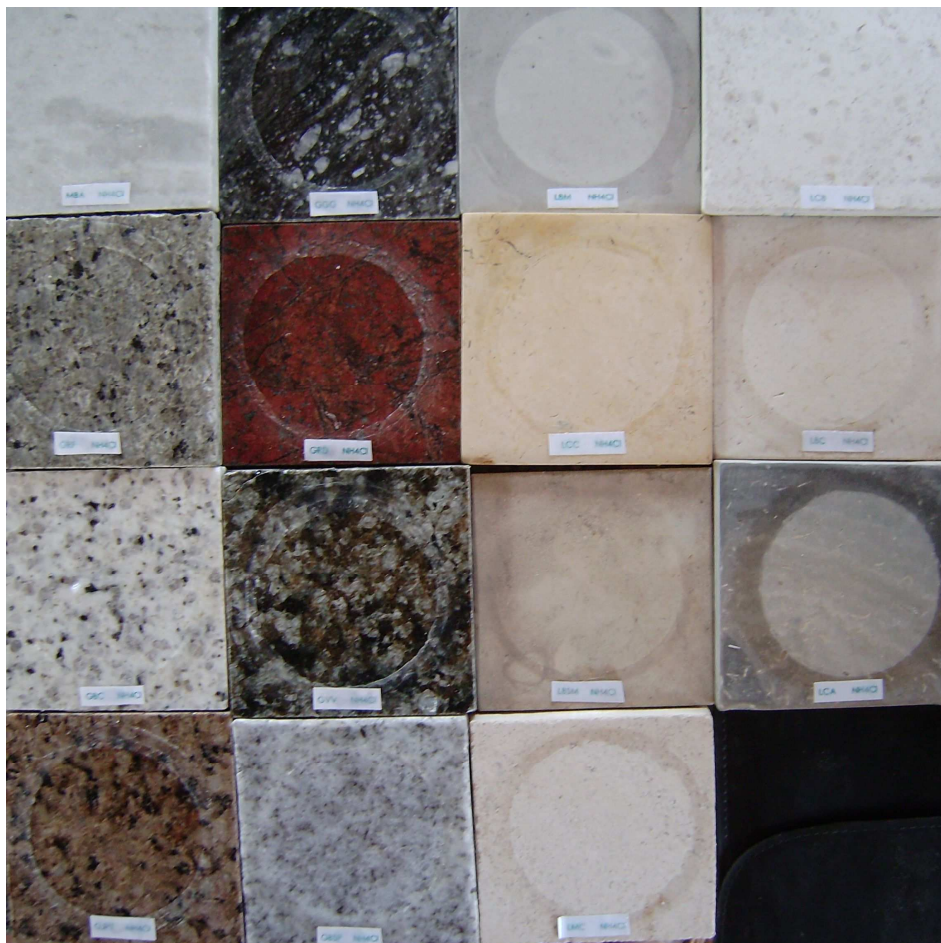


Figura 4.10. Fotografias das amostras analisadas após exposição ao cloreto de amônia

Com base nas Figuras 4.10 a 4.14 verifica-se no entorno do cilindro ou, comparativamente as amostras sem tratamento (Figuras 3.1 e 3.2), que algumas amostras apresentaram alteração de coloração e textura após exposição aos reagentes químicos.

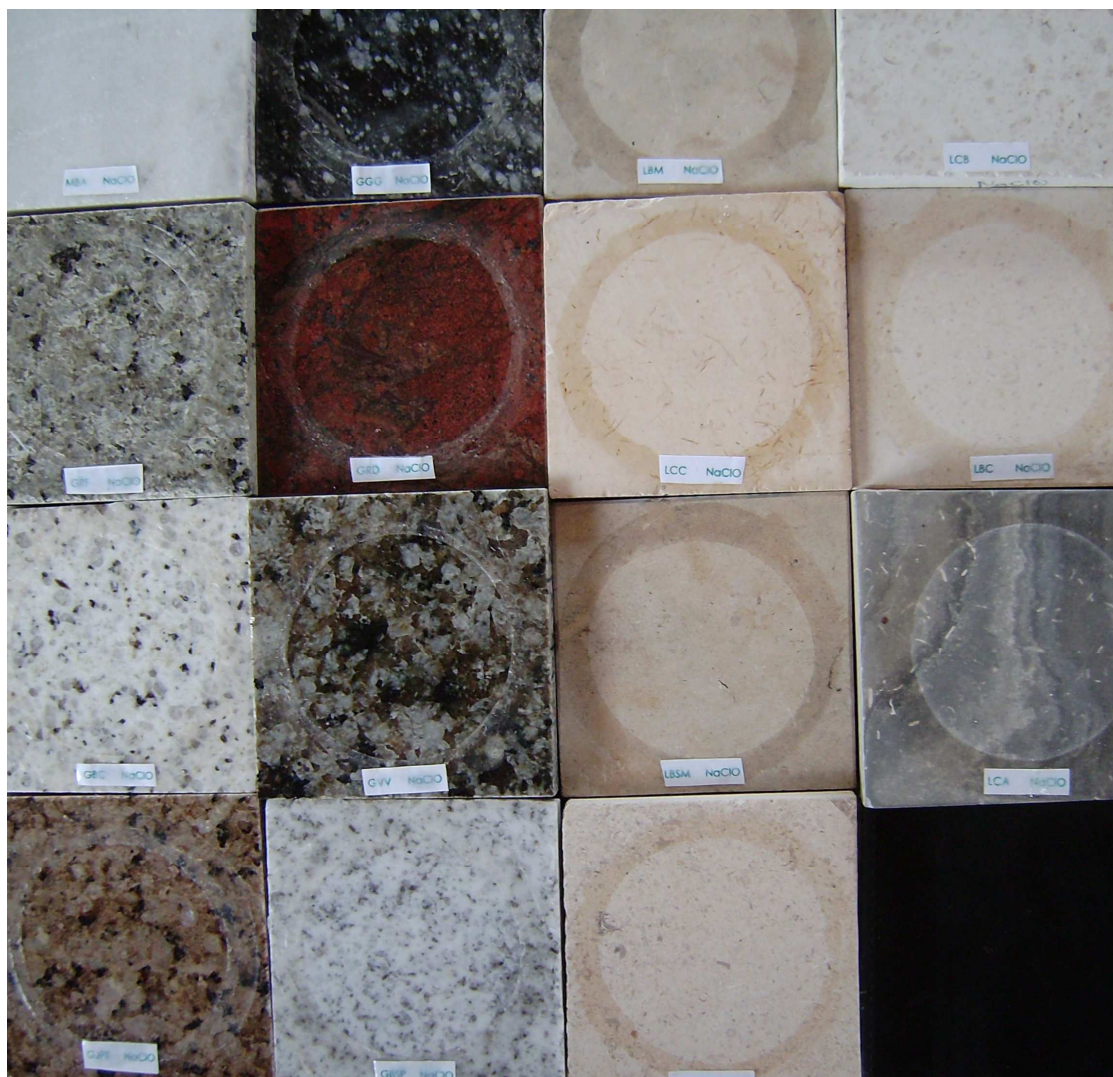


Figura 4.11. Fotografias das amostras analisadas após exposição ao hipoclorito de sódio

Observa-se que as amostras de limestones apresentaram brilho inicial significativamente inferior ao dos granitos. Isso se deve ao fato dos limestones serem rochas que são apreciadas por seu aspecto natural, onde o conceito de brilho – artificial dos granitos, não é apreciado pelos clientes. Assim, estes materiais conservam a sua condição original, sendo apenas calibrados, levigados e escovados com escovas diamantadas, de modo a a manter seu brilho natural, e, juntamente com sua elevada porosidade faz com que apresentem um brilho muito inferior aos dos granitos.

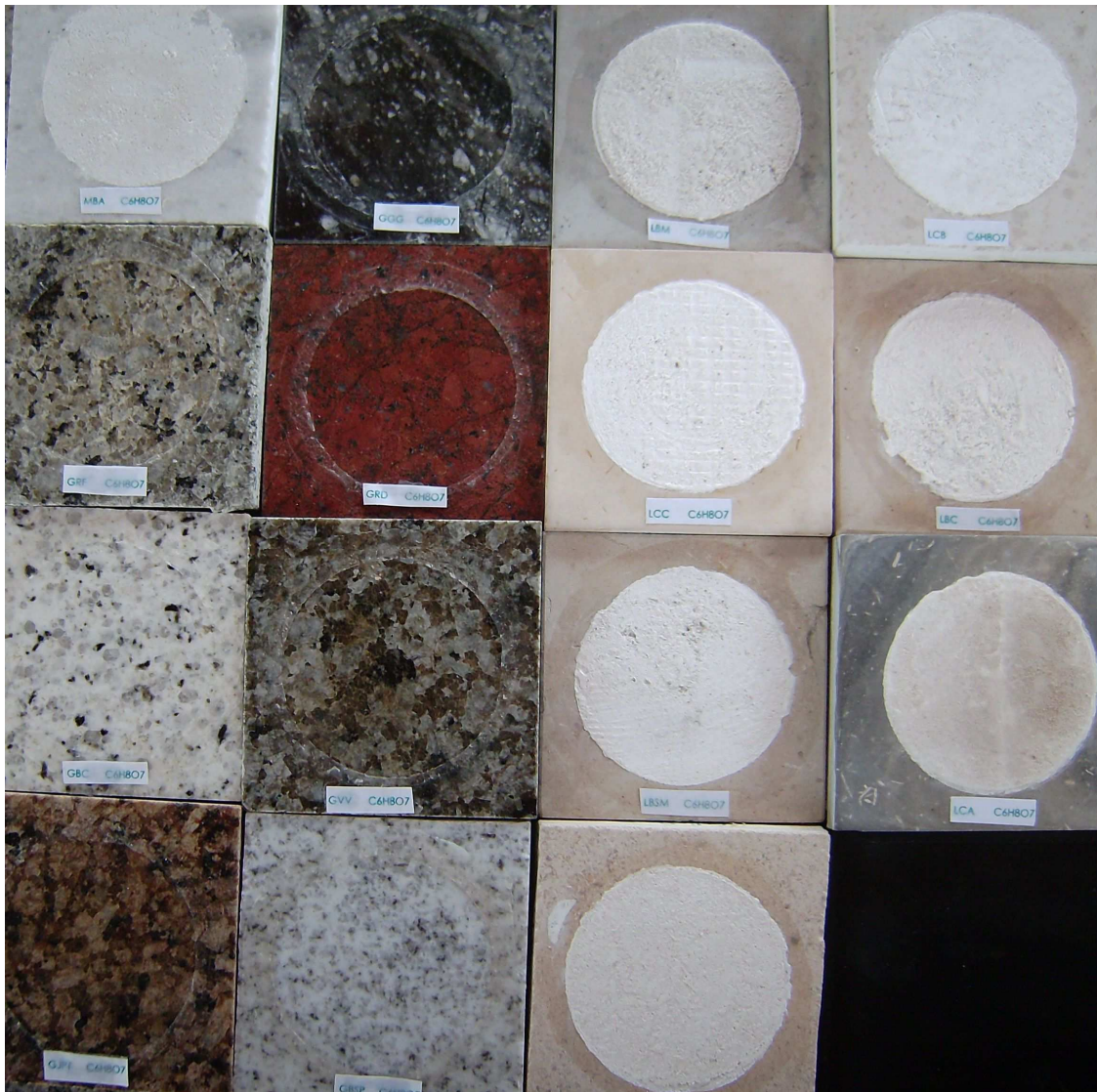


Figura 4.12. Fotografias das amostras analisadas após exposição ao ácido cítrico

A magnitude da alterabilidade variou conforme a amostra e o reagente utilizado, observando-se, de forma geral que os limestones foram mais afetados durante o ensaio que os granitos e os reagentes que provocaram maiores alterações nas rochas foram o ácido cítrico nos limestones e o ácido clorídrico nos granitos.



Figura 4.13. Fotografias das amostras analisadas após exposição ao ácido clorídrico

As maiores alterações dos limestones podem estar associadas as suas maiores porosidades e ao seu caráter laminar que favorecem a percolação dos reagentes e alterações nas microestruturas dos materiais.

Por outro lado, é conhecido que os carbonatos, principais constituintes dos limestones e também do mármore, sofrem ataque de soluções aciduladas, assim é esperado que os limestones apresentem menor resistência ao ataque de ácido que os granitos.

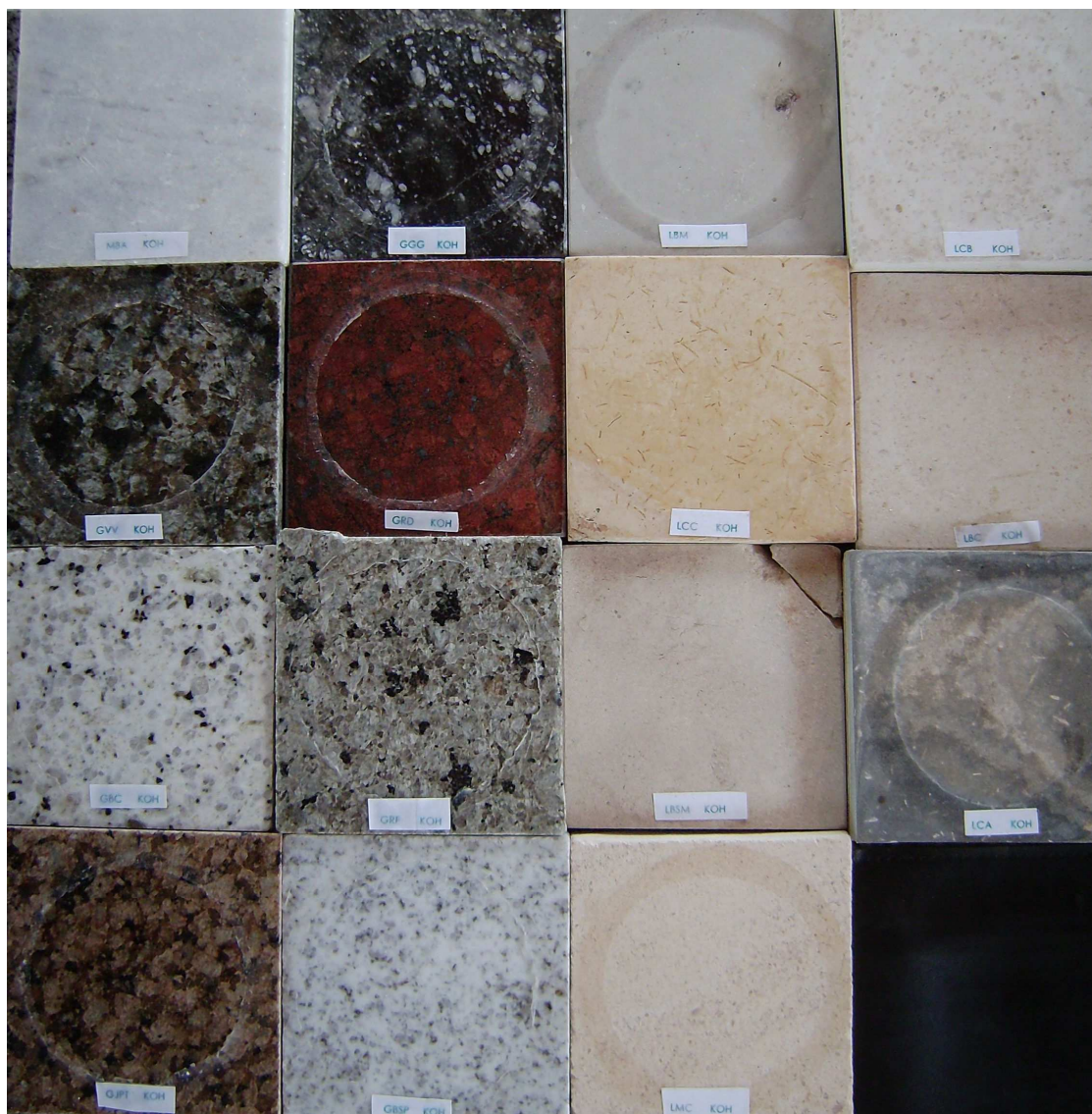


Figura 4.14. Fotografias das amostras analisadas após exposição ao hidróxido de potássio

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam os brilhos antes (brilho inicial) e após exposição (brilho final) aos reagentes das amostras analisadas. Com base nestas Tabelas, observa-se que a variação de brilho dos limestones (indicativo da magnitude de alterações superficiais provocadas pelos reagentes) foi, de forma, geral maior que nos granitos, e em alguns casos similar a do mármore.



Tabela 4.6. Brilho das amostras analisadas antes e após exposição ao cloreto de amônia,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  e ao hipoclorito de sódio,  $\text{NaClO}$ 

Amostras	Brilho Médio das Amostras					
	Cloreto de Amônia - $\text{NH}_4\text{Cl}$			Hipoclorito de Sódio - $\text{NaClO}$		
	Inicial	Final	Variação	Inicial	Final	Variação
LCC	05	04	01	03	02	01
LCA	06	05	01	05	03	02
LCB	34	30	04	30	26	04
LMC	01	01	0	03	02	01
LBC	06	05	01	07	06	01
LBM	02	01	01	02	01	01
LBSM	01	01	0	01	01	0
GBC	80	75	05	78	73	05
GF	82	67	15	80	77	03
GRD	79	64	15	76	71	05
GGG	77	74	03	78	76	02
GVV	81	76	05	83	79	04
GJPT	84	81	03	80	76	04
GBSP	78	70	08	76	73	03
MBA	52	38	14	60	58 <sup>a</sup>	02 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> foi observado que o mármore regiu com o hipoclorito de sódio

Observando as Figuras 4.12 e 4.13 e as Tabelas 4.6 a 4.8 torna-se muito importante a análise da severidade do ataque de substâncias ácidas aos limestones, porque essas substâncias são comuns em sucos cítricos, vinagres, refrigerantes e em vários agentes de limpeza, o que pode comprometer sua vida útil.

No entanto, os silicatos da família dos feldspatos também são sensíveis ao ácido clorídrico, o que justifica as alterações mais acentuadas observadas nos granitos ao serem expostos a esse ácido.

No que tange ao ácido cítrico verifica-se que os granitos sofrem perda de massa, mas ela é mais significativa nos limestones, tal como explicado anteriormente, pela vulnerabilidade dos carbonatos a ação de ácidos. Para o ácido clorídrico observa-se que ambos os materiais são atacados por esse ácido

Tabela 4.7. Brilho das amostras analisadas antes a após exposição ao ácido cítrico,  $C_6H_8O_7$ 

Amostras	Brilho Médio das Amostras			
	Inicial	Final	Variação	Observação
LCC	03	0	03	Reagiu - pó
LCA	05	0	05	Reagiu- pó
LCB	29	0	29	Reagiu- pó
LMC	02	0	02	Reagiu- pó
LBC	07	0	07	Reagiu- pó
LBM	02	0	02	Reagiu- pó
LBSM	01	0	01	Reagiu- pó
GBC	78	74	04	
GF	80	65	15	Manchas
GRD	78	73	05	
GGG	74	58	16	Manchas
GVV	63	40	23	Alteração de cor verde
GJPT	78	32	46	Alteração de cor
GBSP	74	69	05	
MBA	56	0	56	Reagiu- pó

Ao analisar a perda de massa oriunda da exposição ao hidróxido de potássio verifica-se que granitos e limestones são atacados por esse agente alcalinizante. Os álcalis atacam os minerais silicatados presentes nas rochas graníticas e granitoides em geral, o que justifica sua ação nos granitos analisados e a perda de massa observada. Apesar da pequena alteração de brilho efetuada pelo KOH nos granitos.

A perda de massa dos limestones e do mármore observada após exposição ao KOH pode esta provavelmente relacionada a uma reação alcali-carbonato. Esse tipo de reação ocorre quando alcalis, como o Na e K, em determinadas condições de pH atacam os carbonatos provocando a formação de hidróxidos, que podem ser lixiviados conforme o ambiente, recristalizar provocando tensões e danos no material (inclusive perda de massa) e/ou recarbonatar também provocando danos no material (SHERWOOD & NEWLON, 1964). Essa reação ocorre com mais intensidade nos dolomitos ou calcários dolomíticos, mas também é descrito a susceptibilidade da

calcita frente ao álcalis em determinadas condições de pH (SHERWOOD & NEWLON, 1964).

Tabela 4.8. Brilho das amostras analisadas antes a após exposição ao ácido clorídrico, HCl e ao hidróxido de potássio

Amostras	Brilho Médio das Amostras						
	Ácido Clorídrico - HCl				Hidróxido de Potássio - KOH		
	Inicial	Final	Variação	Observações	Inicial	Final	Variação
LCC	03	01	02	Reagiu	03	02	01
LCA	04	0	04	Reagiu manchas amarelas	04	02	04
LCB	30	0	30	Reagiu	34	31	03
LMC	02	0	02	Reagiu - cor escura	02	02	
LBC	08	0	08	Reagiu	06	05	01
LBM	02	0	02	Reagiu	01	01	0
LBSM	01	0	01	Reagiu	01	01	0
GBC	74	69	05		76	73	03
GF	79	65	14	Alteração cor amarela fissuras	78	76	02
GRD	78	73	05		74	70	04
GGG	75	56	19	Alteração com esfoliação	67	63	04
GVV	77	48	29	Alteração de cor amarela	77	72	05
GJPT	80	63	17	Alteração de cor	81	78	03
GBSP	70	67	03	Alteração leve cor amarela	77	74	03
MBA	55	0	55	Reagiu - pó	47	43	04

Uma outra maneira muito utilizada para se avaliar a magnitude das alterações nas rochas ornamentais provocadas pela ação de agentes químicos é mensurar a perda de massa devido ao ataque químico, procedimento não normatizado, feito conforme relatado na metodologia. Assim, a Figura 4.15 apresenta as variações de massa das amostras analisadas após exposição aos reagentes.

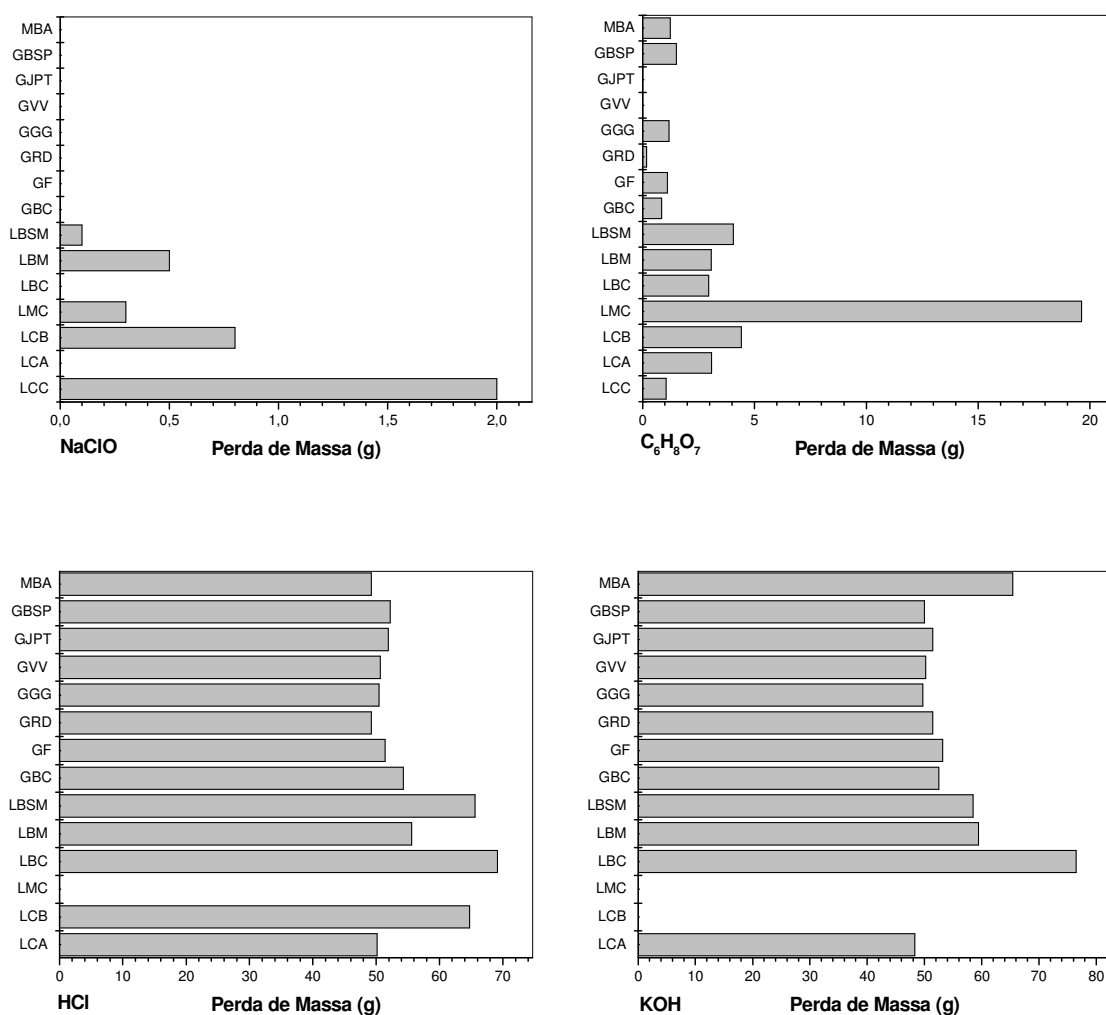


Figura 4.15. Perda de massa das amostras analisadas após exposição ao reagentes químicos

Pode-se observar na Figura 4.15 que os granitos praticamente não são afetados, em termos de perda de massa, quando expostos ao cloreto de amônio e ao hipoclorito de sódio. Os limestones apresentam perda de massa que varia em magnitude de amostra para amostra.

A análise da Figura 4.15 deve ser feita apenas de forma qualitativa haja vista que cada placa analisada possuía uma massa específica e esta sendo apresentado a perda de massa total e não sua porcentagem. Acredita-se que as variações negativas (representando ganhos de massa) são oriundas de oscilações na balança e foram entendidas, nessa análise como perda zero de massa.

Pode-se resumir os ensaios de alterabilidade da seguinte forma:

- solução de cloreto de amônia ( $\text{NH}_4\text{Cl}$  em 100g/l), que simula os produtos químicos utilizados na limpeza doméstica, apresenta nos limestones e granitos perdas de 5 a 10% no brilho, sem alteração de cor, e sem desgaste do mineral (corrosão): o mármore perde 26% do brilho sem outras alterações;
- solução de hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$  em 20g/l), que simula os alvejantes e desinfetantes, apresenta nos limestones uma perda de brilho entre 7 e 12%, e nos granitos, entre 2 e 3%, sem alterações de cor e sem corrosão: o mármore apresenta uma corrosão leve, perdendo 10% do brilho, mantendo a cor;
- solução de ácido cítrico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  – 100g/l), que simula produtos alimentícios, sucos, etc, provoca corrosão em todos os limestones, com depósitos de pó: os granitos GRF, GGG, GVV e GJPT apresentam corrosão com manchas e alteração de cor: os granitos GBC, GRD e GBSP perdem 5% do brilho e não apresentam mudança na cor: o mármore apresenta corrosão, e depósitos de pó na superfície;
- solução de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$  - 18%), que simula os produtos de limpeza pesada – ácido muriático e sucos digestivos humanos, apresenta corrosão em todos os materiais, a exceção dos granitos GBC e GRD, sem alterações de cor e perda de 6% do brilho: os limestones têm desgaste mineral acentuado com a formação de covas;
- solução de hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$  – 30g/l), que simula os sabões moles e líquidos, apresenta uma redução menor que 5% em todos os materiais, sem alteração de cor; nenhuma corrosão superficial foi observada.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar rochas ornamentais cearenses através de análises microestruturais e ensaios normatizados específicos. Com base nos resultados pode-se concluir que:

- os limestones analisados são rochas calcárias compostas por calcita ou calcita/dolomita com teores variados de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , etc, oriundos provavelmente de impurezas;
- os granitos analisados são constituídos predominantemente por feldspatos, quartzo e mica, apresentando como óxidos predominantes o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e teores variados de alcalinos e alcalinos terrosos;
- o mármore analisado é uma rocha calcítica dolomítica, constituída por calcita e dolomita, com elevado teor de magnésio, superior a 28%;
- os limestones analisados são materiais com elevada porosidade e através da microanálise no MEV, foram detectadas grandes quantidades de cálcio e magnésio distribuídos homogeneamente na microestrutura, formando dolomita, detectada na difração de raios X, indicando que as amostras da região são compostas por calcita e por dolomita.
- com o MEV observou-se que a presença diferentes teores de feldspato/quartzo com dimensões e formas tem importância no comportamento mecânico dos granitos.
- os granitos analisados apresentam em sua microestrutura, de forma geral, reforço de grãos de quartzo imersos em uma matriz de feldspato. A matriz é constituída por uma mistura de feldspato potássico com plagioclásio (feldspato cálcio-sódico) ou por feldspato sódico-potássico;
- as análises petrográficas confirmam parte dos resultados evidenciados nos demais ensaios de microestrutura.

- os limestones apresentam densidade aparente que os classifica como rochas calcárias com média densidade, apresentam elevadas porosidades aparentes e absorções de água;
- os granitos e o mármore apresentaram elevada densidade aparente, baixas porosidades aparente e absorções de água;
- os limestones analisados apresentaram resultados de ensaios físicos que os classificam como rochas ornamentais com qualificação para uso como revestimento entre baixa e média;
- os granitos analisados apresentaram resultados de ensaios físicos que os classificam como rochas ornamentais com qualificação entre média e ótima para uso como revestimento na construção civil;
- os limestones apresentaram alterações de coloração, brilho ou perda de massa quando expostos a todos os reagentes analisados, com a magnitude da alteração variando conforme o reagente;
- de forma geral, os granitos apresentaram alterações de coloração, brilho ou perda de massa quando expostos a todos os reagentes analisados, entretanto a alterabilidade não foi acentuada quando da exposição ao cloreto de amônia e hipoclorito de sódio;
- os limestones são mais susceptíveis aos reagentes químicos utilizados no ensaio de alterabilidade que os granitos;
- o mármore apresentou susceptibilidade aos reagentes, mas pequena alteração de brilho quando exposto ao hipoclorito de sódio e ao hidróxido de potássio;
- os granitos estudados podem ser utilizados como rochas ornamentais de revestimento para construção civil, mesmo em zonas de alto tráfego, mas evitando-se exposição a ácidos e soluções alcalinas;
- os limestones aparentam ser mais indicados para uso como rochas ornamentais de revestimento em ambientes interiores de baixo tráfego, sem exposição a soluções ácidas ou básicas fortes.

## 5.1 Conclusão Final

Após os estudos das propriedades físico-mecânicas, microestrutura e mineralogia dos limestones e dos granitos ornamentais, ficou evidenciado que estes parâmetros têm grande influência nas propriedades mecânicas destes materiais.

Os ensaios propostos e realizados de microestrutura – AQ, DRX, ATG, ATD, MEV confirmaram a ocorrência dos tipos de minerais, formas e dimensões dos grãos, os poros e trincas, que analisados juntos, podem provavelmente definir as características das rochas ornamentais para o uso específico do tipo de revestimento na construção civil, conforme suas propriedades intrínsecas.

Os resultados podem ser viáveis com maior abrangência para os limestones, cuja regularidade de seu arranjo atômico permite uma decisão razoável sobre as proteções e reforços adequados a complementarem suas características viáveis aos diferentes tipos de revestimentos propostos.

Diferentemente, o granito necessita de estudos mais específicos, pois sua origem magmática apresenta através de suas diferentes fases, uma complexa formação de micro-trincas, provavelmente ampliadas nas etapas de extração, beneficiamento e nas ações do meio quando aplicados.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho desenvolvido, pode-se sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- a caracterização dos granitos com porosimetria de mercúrio e adsorção de nitrogênio, pelo método de BET;
- a determinação da densidade dos materiais por picnometria de gás He;
- o desempenho das propriedades das rochas ornamentais com a incorporação de resinas poliméricas;
- o estudo estatístico da correlação entre as análises de MO, MEV e as propriedades físicas e mecânicas;
- o estudo da degradação química pelo ataque dos ácidos cítrico e clorídrico nas rochas ornamentais;
- a análise da evolução da porosidade dos materiais pétreos frente aos ataques de agentes químicos, previstos nos ensaios de alterabilidade;
- a análise da cinética de corrosão dos materiais pétreos frente aos ataques de agentes químicos, previstos nos ensaios de alterabilidade;

## 7. REFERÊNCIAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/>>. Acesso em: 27 de março de 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12766. **Rochas para Revestimento – Determinação da Massa Específica Aparente, Porosidade Aparente e Absorção d'água Aparente.** 2 p. 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12767. **Rochas para Revestimento – Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial.** 2 p., 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13818 – **Placas Cerâmicas para Revestimento – Métodos de Ensaio,** 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR - 13755:– **Revestimento de Paredes Externas e Fachadas com Placas Cerâmicas e com Utilização de Argamassa Colante** - 1996

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12763. **Rochas para Revestimento – Determinação da Resistência à Flexão.** 3 p. Rio de Janeiro, 1992 .

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12764. **Rochas para Revestimento – Determinação da Resistência ao Impacto de Corpo Duro.** 3 p. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 137596 **Rochas para Revestimento – Determinação da Resistência ao Impacto de Corpo Duro.** 3 p. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15844 **Rochas para Revestimento – Requisitos para granitos.** 2 p. ABNT 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15845 **Rochas para Revestimento – Métodos de ensaio.** 32 p. ABNT 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15846 **Rochas para Revestimento – Projeto, execução e inspeção de revestimento de fachadas de edificações com placas fixadas por insertos metálicos.** 11 p. ABNT 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12042. **Materiais Inorgânicos – Determinação do Desgaste por Abrasão**. 3 p. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13818 **Anexos – H Determinação da Resistência ao Ataque Químico**. Rio de Janeiro, 1997.

AIRES BARROS, L. **Alteração e Alterabilidade de Rochas**. Instituto Nacional de Investigação Científica – Centro de Petrologia e Geoquímica da Universidade Técnica de Lisboa – Portugal, 1991: 382 p.

AKESSON, U.; STIGH, J. LINDQVIST, J. E.; GÖRANSSON, M. **The influence of foliation on the fragility of granitic rocks**, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology* 68. 2003. p 275–288.

AMARAL, P. M.; FERNANDES, J. C.; ROSA, L. G. **Wear mechanisms in materials with granitic textures—Applicability of a lateral crack system model**, *Wear* 266. 2009. p 753–764.

AMARAL, P. M.; ROSA, L. G.; FERNANDES, J. C. **Assessment of fracture toughness in ornamental stones**. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45. 2008. p 554–563.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM - C 615. **Standard Specification for Granite Dimension Stone**. Philadelphia, USA.1992:

ARTUR, A.C.; MEYER, A. P.; WERNICK, E. **Características Tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização**. In: Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais do Nordeste, 1/ Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2, Salvador. **Anais...**Salvador: Museu Geológico da Bahia, 2001, p 13 -14.

BAMS, V.; & DEWAELE, S. **Staining of white marble, Materials characterization** 58. 2007. p 1052–1062.

BERTHOU, P.Y.; VIANA, M.S.; CAMPOS. D.A. 1990. **Coupe de la formation Santana dans le secteur de “Pedra Branca” (Santana do Cariri) Bassin d’Araripe, NE du Brésil). Contribution a l’étude de la sédimentologie et des paleoenvironments**. In: Simpósio Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste. 1. Atlas... DNPM Crato.1990. p173-189.

BRITO, NEVES, B. B., **A Bacia do Araripe no Contexto Geotectônico Regional**. In: 1º Simpósio Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste. Crato, **Atas**, DNPM/PICG/CPGA/SBP-NF. 1990. p21 – 33.

BUJ, O.; LÓPEZ, P. L.; GISBERT, J. **Caracterización del sistema poroso y de su influencia en el deterioro por cristalización de sales en calizas y dolomías explotadas en Abanto (Zaragoza, España)**. *Materiales de Construcción* 60. 299. 2010. p 99 -114.

CARDELL, C.; BENAVENTE, D.; RODRÍGUEZ-GORDILLO, J. **Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms**, *Materials Characterization* 59. 2008. p1371 – 1385.

CETEM/CETEMAG, SECITECE/FUNCAP. **Catálogo de Rochas Ornamentais do Ceará**, Fortaleza. Governo do Estado do Ceará, 1 CD-ROM. Fortaleza-CE. 2005.

CHIODI FILHO, C. **Balanço das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2004 - Novo Recorde Histórico de Crescimento**. In: Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, e Simpósio Brasileiro e Rochas Ornamentais, Anais. CETEM/CETEMAG, 1CD, Guarapari - ES. 2005.

CHIODI FILHO, C. **Ensaio e Análises Recomendados de Acordo com o Uso Pretendido do Material**. In: Feira da Indústria de Materiais de Acabamento, 2008.

CICCU, R. **Valutazione Sperimentale Delle Caratteristiche di lavoro Degli Utensili Diamantati**. In: Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas, 4., 1996, Canela. Anais: SBGE. Canela. 1996. p131-139.

CNUDE, V.; CWIRZEN, A.; MASSCHAELE, B.; JACOBS, P. J. S. **Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes**. *Engineering Geology* 103. 2009. p76–83.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to rock forming minerals**. 1 ed. London 528p: Longaman Group Ltd. 1966.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Anuário mineral Brasileiro, Parte II – Estatística das Unidades da Federação. Brasília, 2006.

DREESEN, R.; NIELSEN, P.; LAGROU, D. **The staining of blue stone limestones petrographically unraveled**, Materials Characterization. 2007. p1070 –1081.

EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION – CEN (2000). EN 12407. **Natural Stone Test Methods – Petrographic Examination**

FERRARI, C.. **O Uso das Rochas Ornamentais em Projetos Urbanos e Arquitetônicos**, I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2 – **Anais**. Salvador-BA/Brasil 2001. p 143 -145

FIEC – Federação das Industrias do Estado do Ceará. Disponível em: <<http://www.sfiec.org.br/noticias/pedracariri/100105.htm>>. Acesso em: 28 de março de 2011.

FIGUEIREDO, P.M.L.R. **Estudo tecnológico de rochas calcárias da região de Lisboa (Jurássico e Cretácio)**. 1977. Tese (Doutoramento) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1997.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade**. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais (SRONE); II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, **Anais**, 145 p. Salvador. 2001. p128 – 135.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais e de Revestimento: Estudo por Meio de Ensaios e Análises e das Patologias Associadas ao Uso**. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Recife. 2002. p1-7

FRASCÁ, M. H. B. O. **Estudos Experimentais de Alteração Acelerada em Rochas Graníticas para Revestimento**. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 264 p. São Paulo. 2003.

FRASCÁ, M.H.B.O. & QUITETE, E.B. 1999. Estudos diagnósticos de patologias em rochas de revestimento. *Memorias/Proceedings...* VII Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, Montevideú, Uruguai. Asiconpat/CIB: Montevideú. v. 2. p. 1367-1373.

FRAZÃO, E B; & FARJALLAT, J. E. S.. **Proposta de Especificação para Rochas Silicáticas de Revestimento**. In Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia,8, in: Anais –:ABGE. V-1. Rio de Janeiro. 1996. p369-380

FRONTEAU, G.; MOREAU, C.; THOMACHOT-SCHNEIDER, C.; BARBIN, V. **Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation.** Engineering Geology 115. 2010. p158-166.

GAYLARDE, C. C.; GAYLARDE, P. M.; BEECH, I. B. **Deterioration of limestone structures associated with copper staining,** International Biodeterioration & Biodegradation 62 .2008. p179–185.

GONZÁLEZ-MESONES, F. L. **La Utilización de la Piedra Natural en la Arquitectura en el Marco de la Nueva Normativa Europea.** Guarapari - ES I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais (CD ROM) 2005

GRASSELLI, G. **Shear Strenght of Rock Joints on Quantified Surface Description.** Tese de Doutorado. 124p. Lousanne. Escole Polytechnique Federal de Lousanee. 2001.

HENRIQUE & TELLO – **Manual da pedra Natural para a arquitetura.** In: - ABIROCHAS - I seminário de especificação e aplicação de rochas ornamentais Vitória, ES. 2008

HENNIES, W. T.; STELLIN JUNIOR, A. **Contribution to the Study of Cutting Mechanism of Capão Bonito Granite.** São Paulo State, Brazil. Rotterdam. Mine Planning and Equioment Selection. 2000. p 573 – 576.

JIMENEZ-LOPEZ, C.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; PIÑAR, G.; CARRILLO-ROSÚA, F. J.; RODRIGUEZ-GALLEGO, M.; GONZALEZ-MUÑOZ, M. T. **Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone,** Chemosphere 68 . 2007. p1929 –1936.

KARACA, Z.; DELIORMANLI, A. H.; ELÇI, H.; PAMUKCU, C. **Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones.** International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47. 2010. p 1207–1211.

KARACA, Z.; ÖZTANK, N.; GÖKÇE, M. V.; ELÇI, H. **Effects of surface-finishing forms and cement-filling on porous dimension limestone deterioration in cold regions.** Cold Regions Science and Technology 68. 2011. p 124 –129.

LAM dos SANTOS, J. P.; ROSA, L. G.; AMARAL, P. M. **Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones**. Construction and Building Materials 25. 2011. p 171–174.

LIMA J. J. C. **Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em revestimento de edificações**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.121 p.

LÓPEZ-ARCE, P.; VARAS-MURIEL, M. J.; FERNÁNDEZ-REVUELTA, B.; BUERGO, M. A.; FORT, R.; PÉREZ-SOBA, C. **Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification**, Catena 83. 2010. 170 –185.

MAHROUS, A. M.; TANTAWI, M. M.; EL-SAGEER, H. **Evaluation of the engineering properties of some Egyptian limestones as construction materials for highway pavements**, Construction and Building Materials 24 2010. p 2598 – 2603.

MARANHÃO, F. L.; BARROS, M. M. S. B. **Causas de Patologias e recomendações para a Produção de Revestimentos Aderentes com Placas de Rochas**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

MARAVELAKI-KALAITZAKI, P.; KALLITHRAKAS-KONTOS, N.; AGIOUTANTIS, Z.; MAURIGIANNAKIS, S.; KORAKAKI, D. **A Comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents**, Progress in Organic Coatings 62. 2008. p 49–60.

MARINONI, N.; PAVESE, A.; RIVA, A.; CELLA, F.; CERULLI, T. **Chromatic weathering of black limestone quarried in Varenna (Lake Como, Italy)**, Building and Environment 42 . 2007. p 68–77.

MARTILL, D. M. **Fossils of The Santana and Crato Formations, Brazil**, *Field Guides to Fossils*, nº X. Palaeontological Association. 159 p. London, 1993.

MATTOS, I. C, **Geologia, Petrografia, Geoquímica, Comportamento Físico-Mecânico e Alterabilidade das Rochas Ornamentais do Stock Granítico Serra do Barriga, Sobral (Ce)**, Tese de Doutorado em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas .260p. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro-SP. 2005.

MEDEIROS J.S. **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**, Tese de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1999.

MEDEIROS J.S; SABBATINI F.H. **Tecnologia de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**: EPUSP. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. 28 p. São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/246). 1999.

MENDES, V. A. & SANTOS, C. A. **Os Jazimentos de Rochas Ornamentais da Província Borborema**. In: Vidal. F. W. H.(Ed). **Anais IV Simpósio de Rochas no Nordeste**, Fortaleza. 2003. p 33 – 39.

MENEGAZZO, A. P. M. **Estudo da Correlação entre a micro estrutura e as Propriedades Finais de Revestimentos Cerâmicos do tipo Grés Porcelanatos**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo. 2001. 250p.

MESQUITA, M. P. S. **Composição, Estruturas, Propriedades Tecnológicas e Alterabilidade dos Granitos Ornamentais do Stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**..Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2002. p 171.

MEYER, A. P.; ARTUR, A. C.; NAVARRO, F. C. **Principais fatores condicionantes da resistência ao ataque químico em rochas de revestimento**. In: Anais Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Recife-PE. 2003. p153-164

MIRANDA, R. M.; QUINTINO, L. **Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones**, Materials Characterization 54. 2005. p370 – 377.

MOLINA, E.; CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; ALONSO, F. J.; CARRIZO, L.; GISBERT, J.; BUJ, O. **The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials**. Engineering Geology 118. 2011. p 110–121.

MONTANI, C. **STONE 2004: World Marketing Handbook**. Faenza: Grupo Editoriale Faenza. Editrice. 229p.



MOURA A. C.; GRADE, J.; RAMOS, J.M.T.; MOREIRA, A. D.; GOMES L. **Granitos e Rochas Similares de Portugal**. IGM Editora. 2000. 179p

NAVARRO, F.C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de “granitos” ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP. 2002a. 88p.

NOGUEIRA NETO, J.A., **Evolução geodinâmica das faixas granulíticas de Granja e Cariré, extremo Noroeste da Província Borborema**. 2000. 239 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

OLIVEIRA F. L.. **Reabilitação de Alvenaria pela Aplicação de Revestimentos de Argamassa Armada**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, S P. 2001. 203 p.

PIRES, V.; SILVA, Z. S. G.; SIMÃO, J. A. R.; GALHANO, C.; AMARAL, P. M. **“Bianco di Asiago” limestone pavement – Degradation and alteration study**, Construction and Building Materials 24 (2010) 686–694.

PONTE, F. C. - **Origem e evolução das pequenas bacias cretácicas do interior do nordeste do Brasil**. In: Simpósio sobre as bacias cretácicas brasileiras, 2, Rio Claro. *Resumos Expandidos...* Rio Claro, Unesp/Igce. p. 81-84, 1992.

RÍO, L. M. DEL; LÓPEZ, F.; ESTEBAN, F. J.; TEJADO, J. J.; MOTA, M.; GONZÁLEZ, I.; SAN EMETERIO, J. L.; RAMOS, A. **Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain)**, Ultrasonics 44. 2006. p 1057–1061.

RIVAS, T.; ALVAREZ, E.; MOSQUERA, M. J.; ALEJANO, L.; TABOADA, J. **Crystallization modifiers applied in granite desalination: The role of the stone pore structure**, Construction and Building Materials 24. 2010. p 766 –776.

ROBERTO, F. A. C.; VIDAL, F. W. H; SALES, F. A. C. B.; J. F.; MATTOS, I. C.; LIMA, M. A. B.; MORAIS, J. O. **O Setor de Rochas Ornamentais no Ceará – Brasil**. In: Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, 1 e Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais 2, **Anais**. Guarapari-ES. 2005.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; SEBASTIAN, E. **Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation**, *The Science of the Total Environment* 187. 1996. p 79-91.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E.; SEBASTIAN, E. **Influencing Crystallization Damage in Porous Materials through the Use of Surfactants: Experimental Results Using Sodium Dodecyl Sulfate and Cetyldimethylbenzylammonium Chloride**. *Langmuir* 16. 2000. p 947-954.

SALAS, H. T.; NALINI JR. H. A.; MENDES, J. C. **Radioactivity dosage evaluation of Brazilian ornamental granitic rocks based on chemical data, with mineralogical and lithological characterization**. *Environmental Geology* 49. 2006. p 520 – 526.

SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., 2005. CT2005-132-00: Calcário e Dolomito – Capítulo 15. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-132-00.pdf>, acessado em 31- 05 - 2009.

SELONEN, O.; LUODES H.; EHLERS, C. **Exploracion for Dimensional Stone – Implication and Examples from the Precambrian of Southern Finland**. *Engineering Geology*. Nº 56, p 275 – 291.

SIAL, A. N. & LONG, L.E. 1987. Mineral chemistry and stable isotope geochemistry of the Cambrian Meruoca and Mocambo plutons, Ceará, Northeast Brazil. *Int. Symp. Granites Associated Mineralizations*. Salvador, 1987, *Extended Abstracts...* Salvador, p 185 -188.

SILVA, Z. S. G.; SIMÃO, J. A. R. **The role of salt fog on alteration of dimension stone**, *Construction and Building Materials* 23 . 2009. p 3321–3327.

SIMÃO, J.; RUIZ-AGUDO, E.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. **Effects of particulate matter from gasoline and diesel vehicle exhaust emissions on silicate stones sulfation**, *Atmospheric Environment* 40. 2006. p 6905 – 6917.

SOUSA, L. M. O.; SUÁREZ DEL RÍO, L. M.; CALLEJA, L.; RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G.; REY, A. R. **Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites**. *Engineering Geology* 77. 2005. p 153 –168.

THOMAZ, E.. **Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação**. São Paulo: PINI, 1989. 194p.

TÖRÖK, A. **Surface strength and mineralogy of weathering crusts on limestone buildings in Budapest**, Building and Environment 38. 2003. p 1185 – 1192.

TUGRUL, A. & ZARIF, I.H.. **Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rocks from Turkey**. Engineering Geology. No. 51. 1999. p 303 – 317.

UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN-PARDO, E.; CARDELL, C. **Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test**, Construction and Building Materials 24. 2010. p 1438–1448.

UROSEVIC, M.; PARDO, E. S.; RUIZ-AGUDO, E.; CARDELL, C. **Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España**. Materiales de Construcción 61. 301. 2011. p 93-114.

VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B.; ALVES, C. A. S.; PAMPLONA, J. **Experimental characterization of the tensile behaviour of granites**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45 (2). 2008. p 268-277.

VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B.; ALVES, C. A. S.; PAMPLONA, J. **Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites**, Ultrasonics 48. 2008. p 453–466.

VÁZQUEZ, P.; ALONSO, F. J.; ESBERT, R. M.; ORDAZ, J. **Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network**. Construction and Building Materials 24. 2010. p 2536–2541.

VIDAL, F. W. H; PADILHA M. W. M. **A indústria extrativa da pedra Cariri no estado do Ceará**. In: Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. p. 199 - 210, Ceará. 2003.

WILARD, R.J. & McWILLIAMS, J.R. **Microstructural Techniques in the study of Physical Properties of Rocks**. International Journal Rock Mechanics Mining Sciences. 1969. p 1-12.

WONG, R. H. C.; LIN, P.; TANG, C. A. **Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression**. Mechanics of Materials 38. 2006. p 42–159.

XIANG, G.; RUI-TANG, G.; HONG-LEI, D.; ZHONG-YANG, L.; **Ke-Fa, C.** **Dissolution rate of limestone for wet flue gas desulfurization in the presence of sulfite**, Journal of Hazardous Materials 168. 2009. p 1059 – 1064.

YILMAZ, N. G.; KARACA, Z.; GOKTAN, R. M.; AKAL, C. **Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: Influence of mineral grain size**, Construction and Building Materials 23. 2009. p 370 – 375.

YILMAZ, N. G.; METEGOKTAN, R.; KIBICI, Y. **Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48. 2011. p 506 – 513.