

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

IGOR MAGALHÃES CLEMENTE

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, FÍSICO-MECÂNICA E DE  
ALTERABILIDADE DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS BACIAS  
POTIGUAR E DO ARARIPE (RN/CE)**

RIO CLARO - SP  
2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

IGOR MAGALHÃES CLEMENTE

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, FÍSICO-MECÂNICA E DE  
ALTERABILIDADE DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS BACIAS  
POTIGUAR E DO ARARIPE (RN/CE)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia Regional.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Artur

Co-orientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto

RIO CLARO - SP

2013

553.5  
C626c      Clemente, Igor Magalhães  
            Caracterização petrográfica, físico-mecânica e de alterabilidade dos  
            calcários ornamentais das Bacias Potiguar e do Araripe (RN/CE) / Igor  
            Magalhães Clemente. - Rio Claro, 2013  
            166 f. : il., figs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Antonio Carlos Artur

Coorientador: José de Araújo Nogueira Neto

1. Rochas ornamentais. 2. Limestone. 3. Rocha ornamental e  
revestimento. 4. Caracterização tecnológica. 5. Colorimetria. I. Título.

## Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Artur - Orientador  
IGCE/Unesp/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. Antônio Misson Godoy  
IGCE/Unesp/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. Guillermo Rafael Beltran Navarro  
IGCE/Unesp/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. Fabiano Cabañas Navarro  
UNIFAL – Campus de Poços de Caldas (SP)

---

Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro  
EESC/USP, São Carlos (SP)

Igor Magalhães Clemente  
Aluno

Resultado: Aprovado

Rio Claro, 29 de outubro de 2013



Aos meus pais, Clemente e Ednuzia,  
aos meus irmãos, Bruno e Cristiano,  
a meu querido sobrinho Guilherme,  
e a minha noiva Iliada Karnak.

A minha eterna gratidão pela  
diferença que fizeram.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro prestado a esta pesquisa - Processo 142944/2009-2 e, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) - Processo BEX 9226/12-5.

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia Regional do IGCE/UNESP, na pessoa do coordenador Prof. Dr. Norberto Morales, por terem disponibilizado toda a infraestrutura da UNESP, campus Rio Claro, necessárias para a realização da pesquisa.

Ao Centro de Petrologia e Geoquímica (CEPGIST) do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa que viabilizou a execução de estágio de doutoramento em convênio firmado com Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Artur, orientador e amigo, por todo apoio, pela inesgotável paciência e preciosa dedicação ao longo de todas as etapas de elaboração da tese.

Ao professor Dr. José de Araújo Nogueira Neto “Zeca”, pelas sugestões, orientações e toda ajuda concedida nas horas em que precisei dele como co-orientador, professor, amigo e guia turístico.

Aos Dr. Carlos Alberto Machado Figueiredo, investigador do CEPGIST no IST, pela disponibilidade e privilégio de amizade e sua orientação durante o estágio de doutorado sanduíche desenvolvido no IST.

Aos professores do IST, Dr. António Manuel Álvares Serrão Maurício e Manuel Francisco Costa Pereira, pelas importantes contribuições e discussões.

A todos funcionários no Departamento de Minas no IST que me acolheram e não mediram esforços nas ajudas com os estudos ou pessoalmente quando estava “perdido” em terra estrangeira, em especial ao Sr. Duarte e Francisco.

Às empresas visitadas que cederam suas matérias-primas tão necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos, as secretárias e aos agentes administrativos do Instituto de Geociências e

Ciências Exatas da UNESP, em especial a Rosângela sempre muito prestativa e preocupada com a bolsa, ao Adilson pela indispensável colaboração na preparação de amostras e realização dos ensaios e ao Júnior pela preparação de lâminas.

A amiga Leiliane por todas as ajudas nas fases pré-doutorado e doutorado, que me recebeu em Rio Claro e mostrou o “caminho das pedras” e todos os pontos turísticos da UNESP e da cidade, e sempre se prontificando em ajudar como pudesse.

Aos mais que amigos, verdadeiros irmãos da República Zé Comédia, Dr. Bolonini (Thiago), Papai Urso (Dennin), Léo (Leonardo) e Papito (Homero), pela amizade verdadeira, respeito, apoio, bons momentos em que faziam se uma verdadeira família mesmo longe de casa, aos momentos de lazer, momentos sérios e apoio aos estudos.

Aos amigos que conheci na pós que tornaram esse tempo mais feliz: Denise, Simone, Lara, Fanny, Cássio, Fred, Paulo, Adriano, , Fabiana, Sofia, Ethel, Juliano, Patrick, Deborah, José Ricardo, Fernanda, Rodox, Renato e todos os outros, que dividiram almoços, jantares e as “bagunças” realizadas.

À minha querida e inestimável família, pelo importante apoio e pela compreensão quando eu estava tão longe.

Aos meus pais, Clemente e Ednuzia, meus maiores professores de exemplo de vida.

A minha noiva, Ilíada Karnak, pelo carinho, paciência, incentivo e compreensão durante os intermináveis períodos de ausência.

Aos irmãos, Cristiano e Bruno, pela amizade e ajuda sempre que requisitados e aos incentivos diários “Vai pra tua aula mah!”.

Manifesto o meu agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Enfim, a Todos os amigos de quem tive passar longos períodos distante em função dos estudos e meu crescimento profissional.

Por último e não menos importante a Deus, que me deu a vida e proporcionou esta magnífica oportunidade de ser geólogo.

Muito Obrigado.

*“mas nós vibramos em outra frequência  
sabemos que não é bem assim  
se fosse fácil achar o caminho das pedras  
tantas pedras no caminho não seria ruim”*

Humberto Gessinger

## RESUMO

Foram estudadas cinco amostras de calcários das Bacias Potiguar e Araripe (RN/CE) visando suas utilizações como materiais ornamentais e para revestimento em obras civis. Três deles de diferentes níveis da Formação Jandaíra da Bacia Potiguar e dois do Membro Crato da Bacia do Araripe. Os primeiros correspondem a calcários calcíticos maciços e os da Bacia do Araripe a calcários calcíticos finamente laminados. Os estudos envolveram análises petrográficas, caracterização tecnológica, porosimetria por intrusão de mercúrio, permeabilidade a gás e alterabilidades químicas sob ação de atmosferas saturadas em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e de substâncias agressivas simulando materiais de limpeza e solicitações do cotidiano. Os resultados mostraram que as rochas estudadas correspondem a calcários de alta densidade, com propriedades físico-mecânicas que superam os valores de referência sugeridos pela ASTM, qualificando-os para utilização como materiais de revestimento em construções civis. Os testes de porosimetria qualificaram os calcários estudados como detentores de baixa a média porosidade e permeabilidade. Sob efeito de atmosfera saturada em SO<sub>2</sub> mostraram alterações cromáticas medianas com fraco escurecimento das superfícies tanto à vista desarmada quando através de avaliações com fotoclorímetro. Já sob efeitos de substâncias químicas aciduladas sofreram intensidades de alterabilidade variadas, intensa para ácido clorídrico e ácido cítrico e discretos para os demais reagentes (cloreto de amônia, hipoclorito de sódio e hidróxido de potássio). Os testes indicaram que os calcários estudados são indicados preferencialmente para ambientes de interiores, de baixo tráfego humano e preferencialmente secos.

**Palavras Chave:** Calcário; Rocha Ornamental; Caracterização Tecnológica; Alterabilidade; Porosidade

## ABSTRACT

There were investigated five samples of limestone from Potiguar Basin and Araripe Basin (RN / CE) for their use as dimension stones. Three of them were collected from different levels of Jandaíra Formation of Potiguar Basin, and two from Crato Member of Araripe Basin. The first set is classified as massif calcitic limestones, and those from Araripe Basin are classified as finely laminated calcitic limestones. The studies involved petrographic analysis, technological characterization, mercury intrusion porosimetry and gas permeability and changeability chemical effect on the atmosphere saturated with sulfur dioxide and aggressive substance simulating the field of cleaning and everyday requests. The results show that these correspond to high density limestones with physical and mechanical properties that exceed the reference values suggested by the ASTM, qualifying them for use as coating materials in civil buildings. Porosimetry tests qualified the limestones studied as having low to medium porosity and permeability. Under the effect of atmosphere SO<sub>2</sub> saturated showed chromatic alterations medians with weak darkening of surfaces both view when using assessments photochlorimeter. Already under the effect of chemical substances acidulated suffered changeability intensities varied, intense to hydrochloric acid and citric acid, and low for the other reagents (ammonium chloride, sodium hypochlorite and potassium hydroxide). Tests indicate that the materials studied are indicated preferably indoor, low-traffic floors and dry environments.

**Keywords:** Limestone; Dimension Stone; Technological Characterization; Alterability; Porosity

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Mapa de localização das áreas de coleta.....	19
<b>Figura 2.1</b> – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar .....	20
<b>Figura 2.2</b> – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar.....	21
<b>Figura 2.3</b> – Carta estratigráfica da Bacia do Araripe.....	25
<b>Figura 2.4</b> – Frente de lavra do calcário Mont Charmot. ....	28
<b>Figura 2.5</b> – Membro Crato calcário laminado comercializado como Pedra Cariri.....	29
<b>Figura 2.6</b> – Frente de lavra da Pedra Cariri, Pedreira do Idemar.....	30
<b>Figura 3.1</b> – Extração e estocagem do calcário Mont Charmot na Mineração Apodi.....	32
<b>Figura 3.2</b> – Extração da Pedra Cariri. ....	33
<b>Figura 3.3</b> – Utilização do calcário Mont Charmot em fachadas de prédios. ....	35
<b>Figura 3.4</b> – Diversas utilizações do calcário Mont Charmot. ....	36
<b>Figura 3.5</b> – Diversas utilizações do calcário Pedra Cariri. ....	37
<b>Figura 4.1</b> – Placas polidas do calcário proveniente da Formação Jandaíra Bacia Potiguar comercializadas como Mont Charmot.....	39
<b>Figura 4.2</b> – Placas polidas do calcário proveniente da Formação Santana Bacia do Araripe comercializadas como Pedra Cariri. ....	40
<b>Figura 5.1</b> – Anisotropia no nível P2 da Bacia Potiguar segundo corte normal à estratificação. ....	46
<b>Figura 5.2</b> – Visão macroscópica dos calcários da Bacia Potiguar. ....	47
<b>Figura 5.3</b> – Placas serradas do calcário do nível P1 mostrando diferentes tipos de concentrações de cristais de calcita. ....	47
<b>Figura 5.4</b> – Placas serradas do calcário do nível P2 mostrando estilólitos. ....	48
<b>Figura 5.5</b> – Placas serradas do calcário do nível P3 mostrando cristais de calcita e feições de dissolução preenchidas por cristais de calcita. ....	48
<b>Figura 5.6</b> – Fotomicrografias da amostra P1 (nicóis cruzados).....	49
<b>Figura 5.7</b> – Fotomicrografias da amostra P2 (nicóis cruzados).....	50
<b>Figura 5.8</b> – Fotomicrografia da amostra P3 (nicóis cruzados).....	51
<b>Figura 5.9</b> – Calcário laminado A1 da Bacia do Araripe. ....	51
<b>Figura 5.10</b> – Calcário laminado A2 da Bacia do Araripe. ....	52
<b>Figura 5.11</b> – Fotomicrografias das amostras A1 e A2 da Bacia do Araripe (nicóis cruzados). ....	53
<b>Figura 6.2</b> – Correlação entre resultados do desgaste abrasivo Amsler (percursos de 500 m e 1.000 m nas direções perpendicular e paralela à estratificação) e da porosidade aparente para as amostras estudadas. ....	61
<b>Figura 6.3</b> - Correlações entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e saturadas em água. ....	65
<b>Figura 6.4</b> – Correlações entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para os calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da	

ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e após 25 ciclos de congelamento e degelo. ....	65
<b>Figura 6.5</b> - Planos de fraqueza, <i>vugs</i> preenchidos por calcita, em corpo de prova após rompimento em ensaio de compressão uniaxial. ....	67
<b>Tabela 6.5</b> – Valores médios da resistência à flexão por carregamento em 3 pontos (módulo de ruptura) para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) e valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade. ....	71
<b>Figura 6.7</b> - Correlação da resistência à flexão pelo método dos três pontos em condições: seca, satura em água e após ciclos de congelamento/degelo vs. $V_p$ e valor de referência da ASTM C568 (ASTM, 2010). ....	72
<b>Figura 6.8</b> - Aspectos gerais mostrando diferenças no comportamento das superfícies de ruptura de corpos de prova de calcário Mont Charmot (A) e da Pedra Cariri (B) após ensaios de flexão pelo método 3 pontos. ....	73
<b>Figura 6.9</b> - Correlação dos resultados da resistência à flexão por carregamento em 4 Pontos vs. $V_p$ nas condições secas e saturadas para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe. ....	77
<b>Figura 6.10</b> – Superfícies de rupturas dos corpos de prova após realização do ensaio de flexão pelo método 4 pontos. ....	78
<b>Figura 7.1</b> – Vista geral do perneirômetro. ....	82
<b>Figura 7.2</b> – Aparelho de porosimetria por intrusão de mercúrio Autopore III 9400. ....	83
<b>Figura 7.3</b> – Aparelho utilizado para medir a permeabilidade. ....	85
<b>Figura 7.4</b> – Câmara de ensaios climáticos (FITOCLIMA 300 EDTU). ....	86
<b>Figura 7.5</b> - Variação da temperatura e umidade para cada ciclo em câmara climática. ....	87
<b>Figura 7.6</b> – Distribuição da porosidade para os calcários Mont Charmot e Pedra do Cariri em rocha sã (ciclo 0) e alteradas após 25 e 50 ciclos na câmara climática. ....	90
<b>Figura 7.8</b> – Distribuição dos poros nos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri) determinado por porosimetria de intrusão de mercúrio. ....	92
<b>Considerações</b> . ....	93
<b>Figura 7. 9</b> – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 25 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri). ....	94
<b>Figura 7. 10</b> – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 50 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri). ....	94
<b>Figura 7. 11</b> – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 100 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri). ....	95
<b>Figura 7.12</b> – Variação da permeabilidade em relação a análise antes e após o envelhecimento dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri). ....	95
<b>Figura 8.1</b> – Aplicação dos reagentes nas placas utilizando copos descartáveis. ....	99
<b>Figura 8.2</b> – Pedra Cariri. Imagens das placas e histogramas individuais de cor para as componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B) antes (rocha sã) e após ataque (rocha alterada) com os reagentes. ....	104
<b>Figura 8.3</b> – Mont Charmot. Imagens das placas e histogramas individuais de cor para as componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B) antes (rocha sã) e após ataque (rocha alterada) com os reagentes. ....	105



<b>Figura 8.4</b> – Gráfico da variação (percentagem na função modular) das características cromáticas dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri obtidos através da análise de imagem da amostra sã e alterada após ataque químico. ....	106
<b>Figura 8.5</b> – Curvas de distribuição granulométrica por abertura e fechamento obtidas das imagens antes e após os ataques químicos. ....	109
<b>Figura 9.1</b> – Coordenadas no sistema CIELAB $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ . ....	112
<b>Figura 9.2</b> – Aparelho espectrofotômetro, Minolta, modelo CM-508i, utilizado para realização das medidas de cor dos calcários naturais e após os ciclos de envelhecimento. ....	113
<b>Figura 9.3</b> – Variações no calcário Mont Charmot dos parâmetros cromáticos $\Delta L^*$ , $\Delta a^*$ , $\Delta b^*$ e cor total $\Delta E^*$ após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática com atmosfera saturada em dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). ....	116
<b>Figura 9.4</b> – Variações no calcário Pedra Cariri dos parâmetros cromáticos $\Delta L^*$ , $\Delta a^*$ , $\Delta b^*$ e cor total $\Delta E^*$ após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática com atmosfera saturada em dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). ....	116

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 5.1</b> – Síntese das características petrográficas dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri.....	54
<b>Tabela 6.1</b> - Valores referência da norma ASTM C 568 (ASTM, 2010) que definem calcários de baixa, média e alta densidades e valores médios dos calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2). .....	56
<b>Tabela 6.2</b> - Resultados médios dos índices físicos para os calcários Mont Charmot (P1; P2; P3) e Pedra Cariri (A1; A2) e valores de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010). ...	57
<b>Tabela 6.3</b> – Resultados médios dos desgastes abrasivos Amsler para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) após ensaios simulando percurso de 500 m e 1.000 m nas direções perpendiculares e paralelas à estratificação. ....	61
<b>Tabela 6.4</b> - Resultados médios da resistência à compressão uniaxial para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) e valor de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010). .....	64
<b>Tabela 6.6</b> - Resultados médios da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos para os calcários Mont Charmot da Baica Potiguar (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri da Baica do Araripe (A1 e A2).....	76
<b>Tabela 7.1</b> – Resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para os calcários Mont Charmot em rocha sã e alteradas em câmara climática com 25 e 50 ciclos. ....	89
<b>Figura 7.7</b> – Distribuição dos diâmetros médios dos poros nas rochas dos calcários das Bacias Potiguar (Mont Charmot) e do Araripe ( Pedra do Cariri).....	91
<b>Tabela 7.2</b> - Valores da média da permeabilidade (darcy) para cada dos calcários das Bacias Potiguar (Mont Charmot) e do Araripe (Pedra Cariri), em rocha sã e após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática.....	96
<b>Tabela 8.1</b> – Reagentes, fórmula química, concentração, classe de reagente/produtos e tempo de ataque. ....	99
<b>Tabela 8.2</b> – Valores dos espectros RGB obtidos através da análise de imagem dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri em amostra sã e alterada após ataque químico. ....	102
<b>Tabela 8.3</b> – Variação dos valores dos espectros RGB obtidos através da análise de imagem dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri em amostra sã e alterada após ataque químico. ....	105
<b>Tabela 8.4</b> – Valores das distribuição de tamanhos (granulometria em mm) para as amostras antes (rocha sã) e após (rocha alterada) o ataque com os reagentes, nos calcários Pedra Cariri e Mont Charmot. ....	108
<b>Tabela 9.1</b> – Media dos parâmetros das características cromáticas no sistema CIELAB dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri. ....	115

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 Objetivos.....	17
1.2 Localização das áreas de estudo .....	17
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E GEOLOGIA LOCAL</b> .....	20
2.1 Geologia da Bacia Potiguar .....	20
2.2 – Geologia da Bacia do Araripe .....	24
2.3 Geologia Local .....	27
2.3.1 Mont Charmot – Formação Jandaíra da Bacia Potiguar.....	27
2.3.2 Pedra Cariri – Formação Santana da Bacia do Araripe .....	28
<b>3 LAVRA, MERCADO E USO DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS MONT CHARMOT E PEDRA CARIRI</b> .....	31
3.1 Lavra.....	31
3.1.1 Característica da extração do Mont Charmot .....	31
3.1.2 Característica da extração da Pedra Cariri.....	32
3.2 Mercado .....	34
3.3 Uso dos Calcários Mont Charmot e Pedra Cariri .....	35
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	38
4.1 Calcários Utilizados na Pesquisa.....	38
4.2. Análise Petrográfica .....	40
4.3 Ensaio de Caracterização Tecnológica e de Alterabilidade .....	41
4.3.1 Caracterização Tecnológica (ensaio físico-mecânicos) .....	41
4.3.2 Porosidade e Permeabilidade.....	43
4.3.3 Ensaio de Alterabilidade Química e em Câmaras com Dióxido de Enxofre .....	43
<b>5 ANÁLISE PETROGRÁFICA</b> .....	45
5.1 Calcários da Bacia Potiguar.....	45

5.2 Calcários da Bacia do Araripe .....	51
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS</b> ....	<b>55</b>
6.1 Índices Físicos .....	56
6.2 Desgaste Abrasivo Amsler .....	60
6.3 Resistência à Compressão Uniaxial.....	62
6.4 Resistência à Flexão por Carregamento em 3 Pontos (Módulo de Ruptura).....	70
6.5 Resistência à Flexão por Carregamento em 4 Pontos.....	75
6.6 Considerações Finais .....	79
<b>7 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E PERMEABILIDADE DOS CALCÁRIOS EXPOSTOS A AMBIENTES SATURADOS EM DIÓXIDO DE ENXOFRE</b> .....	<b>80</b>
7.1 Metodologia para o Estudo da Porosidade e Permeabilidade.....	81
7.1.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).....	81
7.1.2 Permeabilidade através da injeção de gás.....	84
7.1.3 Ensaios em Câmara com Atmosfera Saturada em Dióxido de Enxofre .....	85
7.2 Resultados.....	87
7.2.1 Resultados da Porosidade .....	87
7.2.2 Resultados da Permeabilidade .....	93
7.3 Considerações Finais .....	97
<b>8 ANÁLISE DE IMAGENS NA AVALIAÇÃO DOS CALCÁRIOS SOB ATAQUE QUÍMICO</b> .....	<b>98</b>
8.1 Metodologia para avaliação dos calcários sob ataque químico .....	98
8.1.1 Ataque químico.....	98
8.1.2 Aquisição e análise das imagens .....	99
8.2 Resultados.....	101
8.2.1 Cor .....	101
8.2.3 Características morfológicas.....	107
8.3 Considerações Finais .....	109

<b>9 ESTUDO CROMÁTICO DOS CALCÁRIOS EXPOSTOS À AMBIENTE COM DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO<sub>2</sub>)</b> .....	111
9.1 Metodologia para Análise Cromática dos Calcários em Estudo .....	111
9.1.1 Princípio da Técnica de Colorimetria .....	111
9.1.2 Procedimentos do ensaio .....	112
9.2 Resultados.....	114
9.3 Considerações Finais .....	117
<b>10 CONCLUSÕES</b> .....	118
<b>11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	121
APÊNDICE A .....	131
APÊNDICE B .....	135
APÊNDICE C .....	141
APÊNDICE D .....	147
APÊNDICE E .....	153
APÊNDICE F .....	159

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o setor de rochas ornamentais cresceu sensivelmente no tocante à exportação de rochas processadas, envolvendo produtos acabados e semiacabados. Isto também se refletiu no aumento da demanda interna de materiais pétreos voltados para revestimento de pisos, paredes e fachadas, o que se reflete na maior exigência de tecnologias por parte do mercado para aplicação destes materiais.

Para tanto, foram adotadas novas técnicas no processamento e acabamento de rochas ornamentais, com o crescente uso de resinas para melhoria do lustro ou até das características físico-mecânicas do material. Aliado a tais fatores, novos parâmetros tecnológicos para exportação têm sido reclamados pelos principais países importadores, a exemplo de medição radiométrica em rochas de composição granítica.

O uso das técnicas de processamento não tem sido adequadamente acompanhado de estudos tecnológicos para verificação, quantificação e qualificação dos resultados obtidos com a sua adoção, ocorrendo degradações resultantes, tanto do desconhecimento das características dos produtos pétreos, quanto das técnicas de colocação, procedimentos na manutenção e limpeza desses materiais.

Este contexto motivou a realização desta pesquisa, a qual envolveu o estudo de caracterização tecnológica e de alterabilidade de rochas calcárias das Bacias Potiguar e do Araripe utilizadas como rochas ornamentais e para revestimento. A escolha destas rochas calcárias para a presente pesquisa deveu-se, além da escassez de estudos tecnológicos sobre estes calcários, à crescente demanda que esses materiais vem experimentado nos últimos anos como rochas para revestimento tanto pelos mercados locais quanto, mais recentemente, pelos demais estados brasileiros e em termos de exportações para alguns países europeus.

As rochas carbonáticas (calcários) das regiões da Bacia Potiguar e Bacia do Araripe exploradas como rochas ornamentais e para revestimento são, respectivamente, comercializadas sob as designações de “Mont Charmot” e “Pedra Cariri”. As primeiras são extraídas da Formação Jandaíra, da Bacia Potiguar, e a Pedra Cariri correspondendo ao calcário laminado do Membro Crato da Formação Santana, Bacia do Araripe, localizados respectivamente nos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Cabe ressaltar que na área de ocorrência do calcário Mont Charmot ocorre o desenvolvimento de sistemas cársticos (cavernas, espeleotemas e relevos ruiformes) e que a Bacia Potiguar enseja importantes ocorrências de reservatórios de hidrocarbonetos, sítios paleontológicos, e minerais e rochas de aplicação industrial e da construção civil. Tais

litótipos acima citados apresentam coloração creme clara, podendo ser observados entre os cristais de calcitas referente à presença de micro-fósseis. Apresentam estrutura maciça, de granulação fina, sendo reconhecidos por vezes níveis porosos causados pelo crescimento de geodos de calcita.

Na área de ocorrência do calcário Pedra Cariri, Bacia do Araripe, esta localizada um dos mais importantes sítios paleontológicos do Brasil. Nessa bacia há importantes ocorrências de gipsita que são utilizados na indústria e construção civil. Esse calcário apresenta-se de forma laminada com alternância de bandas claras e escuras, por vezes são encontrados níveis fossilíferos.

## 1.1 OBJETIVOS

Esse estudo tem como objetivo principal a caracterização petrográfica, físico-mecânica e de alterabilidade dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri provenientes das Bacias Potiguar e do Araripe.

Os objetivos específicos com vista ao alcance dos fins anteriormente ressaltados são:

- Análise petrográfica;
- Caracterização tecnológica dos calcários ornamentais, com estudo das propriedades físico-mecânicas, utilizando ensaios de desgaste abrasivo *Amsler*, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão por carregamento em 3 pontos (módulo de ruptura), resistência à flexão por carregamento em 4 pontos e propagação de ondas ultrassônicas longitudinais;
- Análise da variação de cor nos espectros de RGB, após ataque com substâncias químicas, utilizando técnica de processamento digital de imagem;
- Análise após processo de alteração acelerada em atmosfera saturada em dióxido de enxofre do comportamento das propriedades de porosidade, permeabilidade e cromáticas no sistema CIELAB.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Nessa pesquisa foram selecionadas duas áreas constituídas por rochas carbonáticas no interior das Bacias Potiguar e do Araripe do nordeste brasileiro, onde são explorados calcários para fins ornamentais e para revestimento (Figura 1.1). As amostras utilizadas nos testes de caracterização tecnológica e de alterabilidade foram coletadas nas pedreiras da Mineração

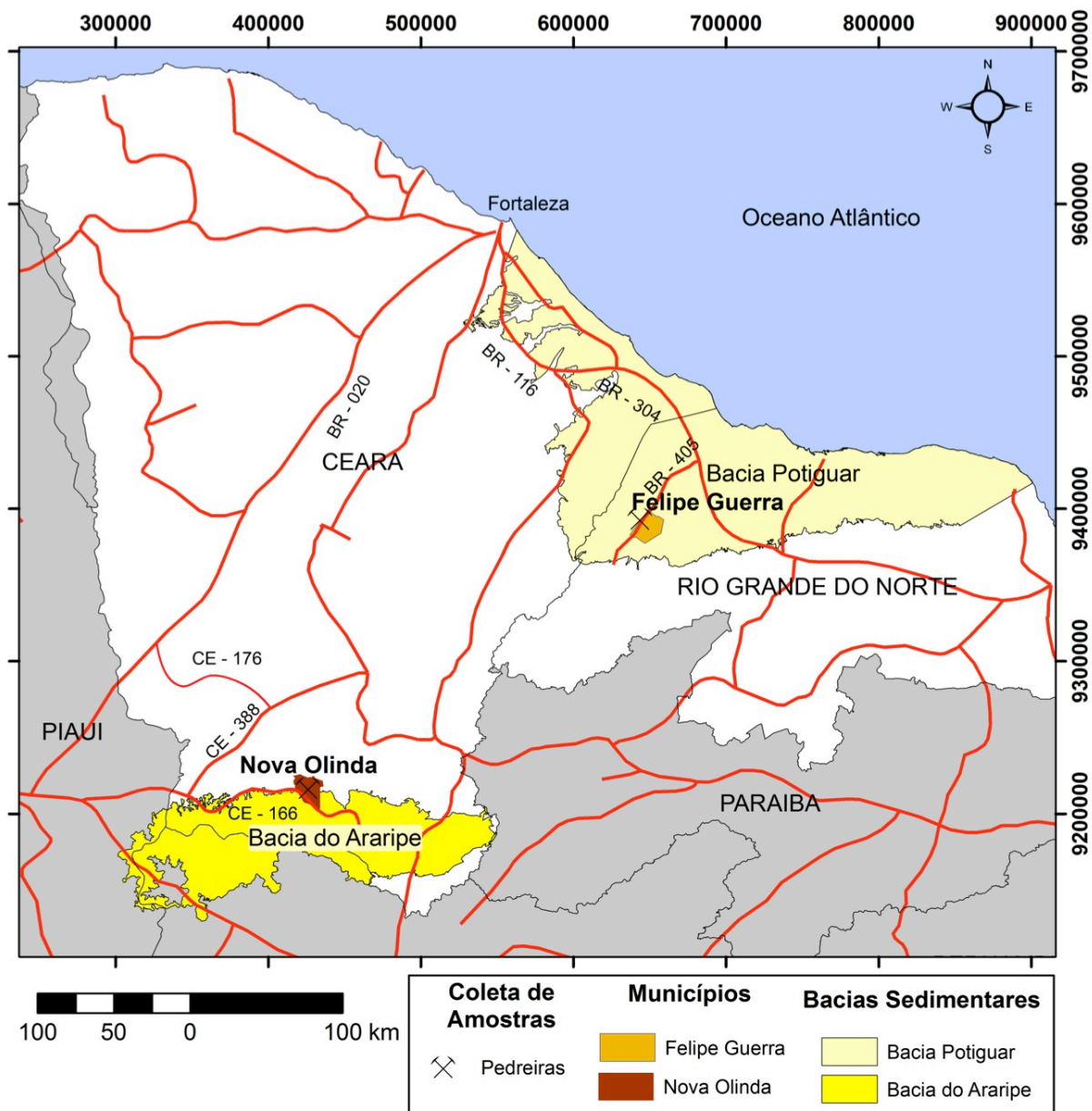
Apodi e do Idemar, respectivamente localizadas nas Bacias Potiguar e do Araripe.

A primeira área situa-se no município de Felipe Guerra - RN, microrregião da Chapada do Apodi pertencente à mesorregião Oeste Potiguar. O acesso partindo-se da cidade de Fortaleza é feito inicialmente pela rodovia federal BR-116 percorrendo cerca de 115 km até o entroncamento com a BR-304 e, a partir daí, mais 140 km até a cidade de Mossoró, onde se pega a BR-405 por mais 60 km até a localidade de Miraselva e desta por mais 10 km para noroeste por estrada carroçável até a pedreira da Mineração Apodi.

A segunda área localiza-se no município de Nova Olinda - CE, microrregião do Cariri, mesorregião do Sul Cearense. O acesso partindo da cidade de Fortaleza pode ser feito pela rodovia federal BR-020 percorrendo-se 340 km até a cidade de Tauá onde continua pela rodovia estadual CE-176 em direção a cidade de Antonina do Norte por 98 km, continuando pela CE-388 por 58 km até a cidade de Nova Olinda de onde segue-se pela CE - 166 no sentido a Santana do Cariri por 4,7 km, lado direito da rodovia situado no Sítio Pedra Branca, onde se localiza a Pedreira do Idemar.



Figura 1.1 – Mapa de localização das áreas de coleta.

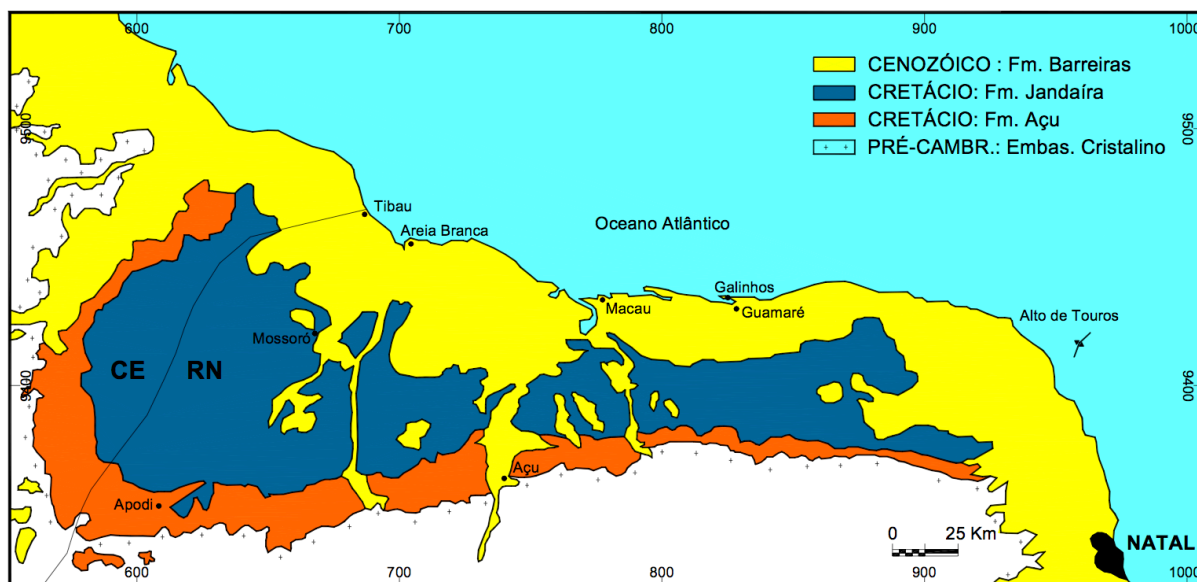


## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E GEOLOGIA LOCAL

### 2.1 GEOLOGIA DA BACIA POTIGUAR

A Bacia Potiguar localiza-se na interseção da Margem Continental Equatorial com a Margem Continental Leste Brasileira, ocupando a metade setentrional do Rio Grande do Norte e a região nordeste do Ceará. Sua área total está estimada em 60.000 km<sup>2</sup>, dos quais 21.000 km<sup>2</sup> estão na parte emersa (Figura 2.1). Limita-se a leste com a Bacia Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Touros; a noroeste com a Bacia do Ceará, pelo Alto de Fortaleza; a sul com embasamento cristalino e a norte até a cota batimétrica de 200m (BERTANI et al.,1990).

**Figura 2.1** – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar



**Fonte:** (DANTAS, 1998 in GOMES, 2008).

Esta é uma bacia tipo rifte, formada a partir do Neojurássico, durante a separação das placas sul-americana e africana. Sua origem está ligada à formação do Oceano Atlântico Sul e relacionada a uma série de bacias neocomianas intracontinentais, que compõem o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (MATOS, 1992).

Atualmente, a coluna estratigráfica mais utilizada é aquela elaborada por Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008), que dividiram a Bacia Potiguar em três grupos, distribuídos da base para o topo da seguinte forma (Figura 2.2):

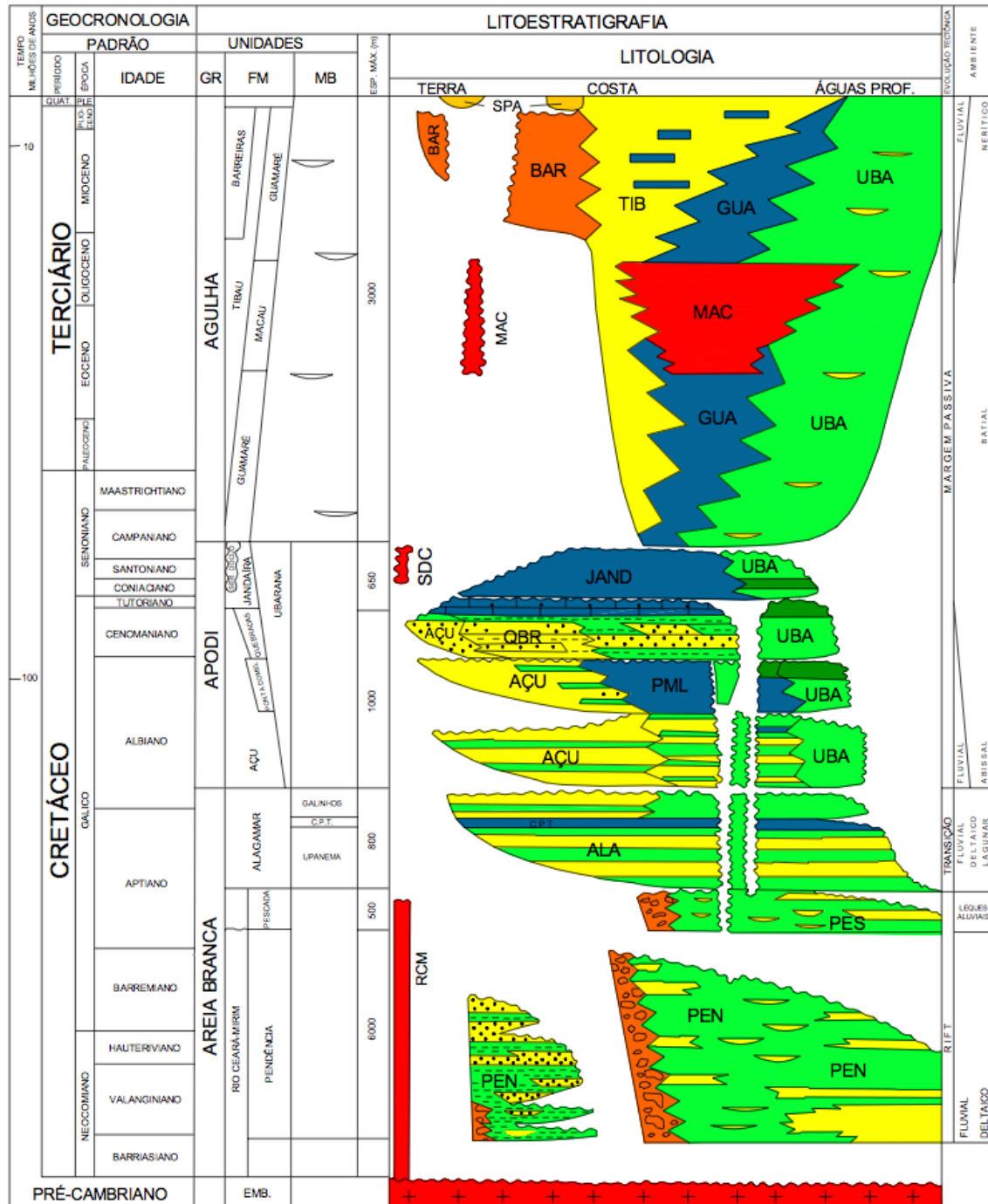
(i) Grupo Areia Branca – predominantemente siliciclástico, engloba as Formações Pendência, Pescada e Alagamar.

(ii) Grupo Apodi – com significativo aumento de rochas carbonáticas para o topo, é

representado pelas Formações Açú, Ponta do Mel, Jandaíra e Ubarana.

(iii) Grupo Agulha – de composição siliciclástica e carbonática, constituído pelas Formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras.

**Figura 2.2** – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar.



Fonte: (ARARIPE; FEIJÓ, 1994 in GOMES, 2008).

## **Grupo Apodi**

Composto por rochas carbonáticas das Formações Açú, Jandaíra, Ponta do Mel e Quebradas, situando-se sobreposto à Formação Alagamar e em contato superior, discordante, com o grupo Agulha. Datações apontam idades entre o Albiano e Mesocampaniano (107-74 Ma.).

Este trabalho visa o estudo de rochas da Formação Jandaíra do Grupo Apodi, por isso as outras unidades não serão descritas.

### ***Formação Jandaíra***

A Formação Jandaíra é uma seqüência carbonática, de idade eoturoniana-eocampaniana, que se caracteriza pela predominância de carbonatos marinhos, de águas rasas e agitadas, tanto em superfície quanto em subsuperfície (TIBANA; TERRA, 1981).

Em superfície, os afloramentos se estendem na direção W-E, por quase toda a Chapada do Apodi, com exceção da zona litorânea, onde são cobertos por sedimentos terciários e por aluviões e dunas quaternárias. Em subsuperfície, vão desde a parte emersa da bacia até a plataforma continental. A maior espessura desta unidade é estimada em 600 m e as menores estão localizadas nos extremos leste e oeste da bacia (TIBANA; TERRA, op. cit.; SOUZA, 1982).

A transição entre os arenitos da Formação Açú e os calcários da Formação Jandaíra é representada pela entrada do mar na bacia, marcada pela presença de um arenito calcífero, considerado estratigraficamente como a parte superior da Formação Açú. Sua espessura varia muito dependendo do ponto da bacia, podendo apresentar 30m nas proximidades da cidade de Upanema ou ser muito reduzido, como na região de Apodi.

Nos limites meridionais da bacia o contato entre as formações Jandaíra e Açú pode ser observado nos afloramentos localizados nos cortes de estradas. Uma característica dessa fase de transição é a ocorrência de camadas de folhelhos intercaladas com os primeiros sedimentos calcários.

Na área localizada entre o limite ocidental da Formação Jandaíra até o rio Açú, predominam calcários creme-claros, com textura detrítica, variando de calcarenítica a oolítica, tanto em afloramento quanto em poço. Ocorrem também calcários microcristalinos, às vezes nodulosos ou coquinoideais, com bancos fossilíferos, podendo apresentar intercalações de folhelho preto e carbonoso. Arenitos cinzentos, argilosos, calcíferos, contendo abundantes

fragmentos de conchas de moluscos, são encontrados na área a leste do rio Açú. Uma fácies dolomítica pode ser observada nos calcários que afloram na parte central da bacia, na área situada entre o rio Açú e um pouco além da margem leste do rio Amargoso. Essa mesma fácies ocorre abaixo dos sedimentos cenozóicos, na região próxima à cidade de Macau (SAMPAIO; SCHALLER, 1968).

Ao norte da cidade de Upanema, logo após o topo da *cuesta* que limita a Chapada do Apodi, ocorrem bancos calcários com foraminíferos miliolídeos, principalmente *Quinqueloculina*, intercalados com calcários compactos, muito recristalizados e espessos. Os calcários variam de branco ou amarelo até acinzentado. A estratificação não é distinta, podendo apresentar-se em alguns locais como lajeada ou nodulosa. Tratam-se de calcários detríticos, onde a presença dos miliolídeos indicam águas quentes e pequenas profundidades. A presença de calcários oolíticos aponta para uma fácies de águas mais agitadas, entretanto esse tipo de calcário é raro na formação (BEURLLEN, 1967).

Na região de Soledade, próximo à cidade de Apodi, apresenta-se com superfícies de carstificação. A análise dos calcários revelou baixo teor de dolomita e ausência de argila e areia. Essa última característica poderia indicar que a área próxima ao litoral era plana, sem relevo acidentado ou então predominava um clima semi-árido, impossibilitando a formação de grandes rios transportadores de materiais provenientes do intemperismo continental (BEURLLEN, op. cit.).

Tibana e Terra (1981) dataram a seqüência carbonática que compreende a Formação Jandaíra no Turoniano-Maastrichtiano. Souza (1982), considerou como mais provável o intervalo Turoniano-Campaniano inferior.

Na parte emersa da bacia predominam as fácies de laguna e de planície de maré, caracterizadas por calcarenitos com bioclastos de moluscos, algas verdes, briozoários e equinóides, calcarenitos com miliolídeos, calcilutitos bioclásticos e calcilutitos com *birdseyes*.

Cordoba *et al.* (1996) estabeleceram um modelo deposicional de um sistema de planície de maré integrando as zonas de supra-, inter- e inframaré, em uma paleofisiografia de baía. Estes autores identificaram cinco fácies deposicionais nos carbonatos, sendo três atribuídas à sedimentação em barras de maré, uma em fácies de planície de maré e uma em laguna.

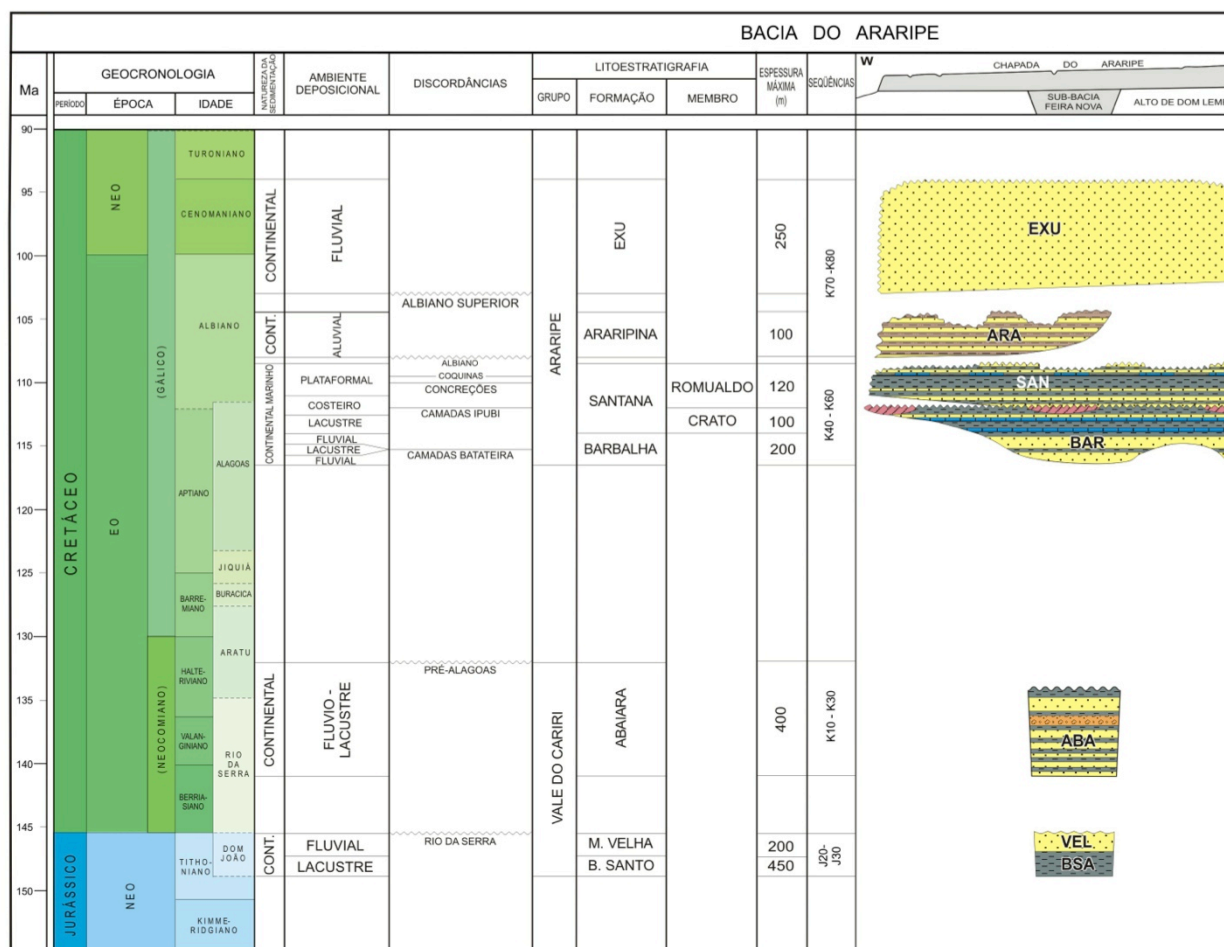
## 2.2 – GEOLOGIA DA BACIA DO ARARIPE

A Bacia do Araripe está localizada entre as bacias do Parnaíba, Potiguar e do Tucano-Jatobá, na região de fronteira dos estados do Ceará, Pernambuco, Piauí e Parnaíba, interior do Nordeste do Brasil. Sua área total é de aproximadamente 9.000 km<sup>2</sup>.

A Bacia do Araripe é caracterizada por uma estratigrafia complexa onde as sequências sedimentares estão superpostas e separadas de modo discordante (PONTE, 1996), daí se admitir para esta uma evolução tectônica poli-histórica (BRITO NEVES, 1990; ASSINE, 1992). A Bacia do Araripe possui afinidades litológicas e paleontológicas consideráveis com várias bacias relativamente próximas, a exemplo da Bacia do Grajaú, Bacia do Recôncavo e Bacia Tucano-Jatobá (CAMPOS, 1964; BRAUN, 1966; SANTOS; CARVALHO, 2009). Assine (1994) demonstrou que tais sequências, limitadas por discordâncias regionais, constituem fragmentos de diferentes bacias superpostas em um mesmo espaço geográfico, sendo esta opinião reforçada por Arai (2006). Hessel e Freitas (2009) enfatizaram que as fases estratigráficas descritas das bacias marginais brasileiras formadas entre o Neojurássico-Eocretáceo, durante a fragmentação do Gondwana (fases pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte), não se aplicam no entendimento da gênese da Bacia do Araripe. Os autores ainda propuseram que esta bacia teria um desenvolvimento estrutural diferenciado, semelhante ao processo de formação de bacias pull-apart, formada em regime transcorrente.

Um resumo esquemático dos principais detalhes litoestratigráficos pode ser consultado na figura 2.3.

**Figura 2.3** – Carta estratigráfica da Bacia do Araripe.



Fonte: (Adaptado de ASSINE, 2007).

### Grupo Araripe

O Grupo Araripe engloba uma seqüência sedimentar depositada durante a fase pós-rifte da evolução tectono-sedimentar da Bacia do Araripe, incluindo uma porção datada do Aptiano (Formações Rio da Batateira e Crato), uma porção do Albiano ao Cenomaniano (Formações Santana e Arajara) e uma porção cenomaniana (Formação Exu).

Este trabalho visa o estudo de rochas do Membro Crato da Formação Santana do Grupo Araripe, por isso as outras unidades não serão descritas.

### Formação Santana

A Formação Santana aflora principalmente na porção leste da bacia do Araripe. Em certos períodos, registra uma extensa sedimentação lacustre que, aparentemente por razões

climáticas, teve a coluna aquosa dos lagos evaporada. Ela ocorre no sopé das escarpas que contornam a chapada do Araripe, e no morro-testemunho Serra do Mãozinha. A Formação Santana é constituída, da base para o topo, pelos Membros Crato, Ipubi e o Romualdo (PONTE; APPI (1990).

### *Membro Crato*

O Membro Crato é formado por calcários micríticos laminados de cor cinza claro a creme, dispostos em bancos descontínuos, onde se encontram interdigitados lateralmente com folhelhos acinzentados. É caracterizado por camadas centimétricas de calcarenitos maciços e uma sequência com acamadamento rítmico de lâminas escuras e claras, resultado da precipitação autigênica de calcita da coluna de água acima, provavelmente induzida e/ou mediada por atividade pico e fitoplanctônica (HEIMHOFER et al., 2009). Esta deposição ocorreu sob condições anóxicas e, especialmente em determinadas ocasiões, em águas de fundo hipersalinas, evidenciada pela ausência da fauna bentônica, pelo padrão virtualmente não perturbado da laminação e pela ocorrência de cristais pseudomórficos de halita. A diversificação taxonômica no registro fóssil é notável, com uma flora e fauna excepcionalmente bem preservadas. Pode-se destacar a presença de invertebrados (ostracodes, conchostráceos, aracnídeos e principalmente insetos), vertebrados (anuros, quelônios, lagartos, pterossauros e especialmente peixes), vegetais (algas, samambaias, gimnospermas e angiospermas), icnofósseis (coprólitos e rastros de invertebrados) e palinomorfos (MARTILL et al., 2007). A rica associação dos fósseis no Membro Crato, assinalada pela ausência de formas tipicamente marinhas, indica uma deposição em ambiente de sedimentação lacustre (SILVA, 1988; NEUMANN, 1999). Evidências litológicas e dados isotópicos de oxigênio e carbono indicam a deposição em um sistema de lagos fechados ou semi-fechados (HEIMHOFER et al., op. cit.). Petri (1998) enfatiza que a predominância de fósseis de Grillidae no Membro Crato, em relação aos de Tettigoniidae, indica a existência de um paleoclima quente, tropical e árido. Hessel et al. (2006), com base em estudos de ostracofauna, observou que os únicos bardiáceos mencionados na Bacia do Araripe estão no Membro Crato, o que sugere certa salinização no ambiente aquático. É interessante ressaltar que os calcários laminados deste membro não ocorrem na porção oeste da Bacia do Araripe.



## 2.3 GEOLOGIA LOCAL

Os materiais adotados para estudo correspondem três amostras oriundas do estado do Rio Grande do Norte e duas do estado do Ceará. As cinco amostras são calcários, sendo as três do estado do Rio Grande do Norte correspondem a um calcário maciço (comercializado sob denominação de Mont Charmot) provenientes de diferentes níveis estratigráficos da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar, aflorante em vários municípios na Chapada do Apodi. As duas amostras do estado do Ceará são representadas por calcários laminados (comercialmente denominado de Pedra Cariri) proveniente de dois níveis estratigráficos da Formação Santana na Bacia do Araripe, localizado no município de Nova Olinda e Santana do Cariri na Chapada do Araripe.

### 2.3.1 Mont Charmot – Formação Jandaíra da Bacia Potiguar

É uma sequência de sedimentação carbonática, de idade eoturoniana-eocampaniana, caracterizada principalmente pela predominância de carbonatos marinhos, de águas rasas e agitadas, tanto em superfície como em subsuperfície. Composta por calcarenitos e calcilutitos bioclásticos, com nível evaporítico na base. Predominam calcários creme-claros, com textura detritica, variando de calcarenítica a oolítica na área entre o limite ocidental da Formação Jandaíra até o Rio Açu. Calcários microcristalinos, tanto nodulosos ou coquinoidais, com bancos fossilíferos, às vezes com intercalações de folhelhos negros e carbonosos (CASSAB, 2003).

A Formação Jandaíra é conhecida como uma região de Lajedo, com formação de cavernas e abrigos. O desenvolvimento de feições cársticas é atribuído a fácil dissolução pelo ácido carbônico, ácido fraco mais eficiente para dissolver seu principal mineral constituinte, o carbonato de cálcio (GOMES, 2008).

Na área de extração da Mineração Apodi a Formação Jandaíra é predominante, onde as camadas de calcários encontram-se dispostas horizontalizadas. Apresentam uma coloração creme clara, de granulação fina a muito fina e uma estrutura maciça. Planos estilolíticos são presentes, e predominantemente fraturas são preenchidas por recristalização de calcita. O seu conteúdo fossilífero é diversificado, com associações típicas de ambientes marinhos rasos, predominando moluscos bivalvíos.

As três amostras estudados da Bacia Potiguar (P1, P2 e P3) são provenientes de três níveis distintos da mesma frente de lavra (Figura 2.4A), com a seguinte distribuição da base

para o topo P3 (3 a 2,2 m), P2 (2,2 a 0,8 m) e P1 (0,8 a 0,3 m) (Figura 2.4B) e são separadas entre si por camadas de argila com espessuras entre 2 a 5 cm (Figura 2.4C).

**Figura 2.4** – Frente de lavra do calcário Mont Charmot.



**Legenda:** (A) Frente de lavra em processo de extração; (B) Frente de lavra com linhas pontilhadas demarcando os limites entre os níveis P1, P2 e P3; (C) Camada de argila de cerca de 4 cm de espessura presente entre os níveis P2 e P3.

### 2.3.2 Pedra Cariri – Formação Santana da Bacia do Araripe

A Formação Santana é subdividida em três membros distintos, denominadas de Membro Crato (porção inferior), Membro Ipubi (porção intermediária) e Membro Romualdo

(porção superior) (BEURLLEN, 1971).

Os calcários estudados são provenientes do Membro Crato (Figura 2.5), que compõe-se de calcário laminado, conhecido comercialmente como Pedra Cariri, em níveis descontínuos e fossilíferos, de baixa dureza, cor creme, exibindo finos bandamentos (em torno de 2 cm) com a presença também de óxido de manganês dendrítico, de tom marrom escuro.

**Figura 2.5** – Membro Crato calcário laminado comercializado como Pedra Cariri.



No perfil da frente de lavra foi observado uma sucessão litofaciológica característica do Membro Crato, de onde foram estudadas amostras de dois níveis diferentes (A1 e A2) (Figura 2.6A).

O nível A2 corresponde a base da seção com cerca de 1,5 m de espessura com laminação de caráter planar a plano-ondulado com presença de *microslumps* e às vezes cortada por falhas normais com rejeitos centimétricos (Figura 2.6C). Esta subfácies corresponde a microfácies Sm1 e Sm4 de Neumann (1999) e Silva et al. (2002).

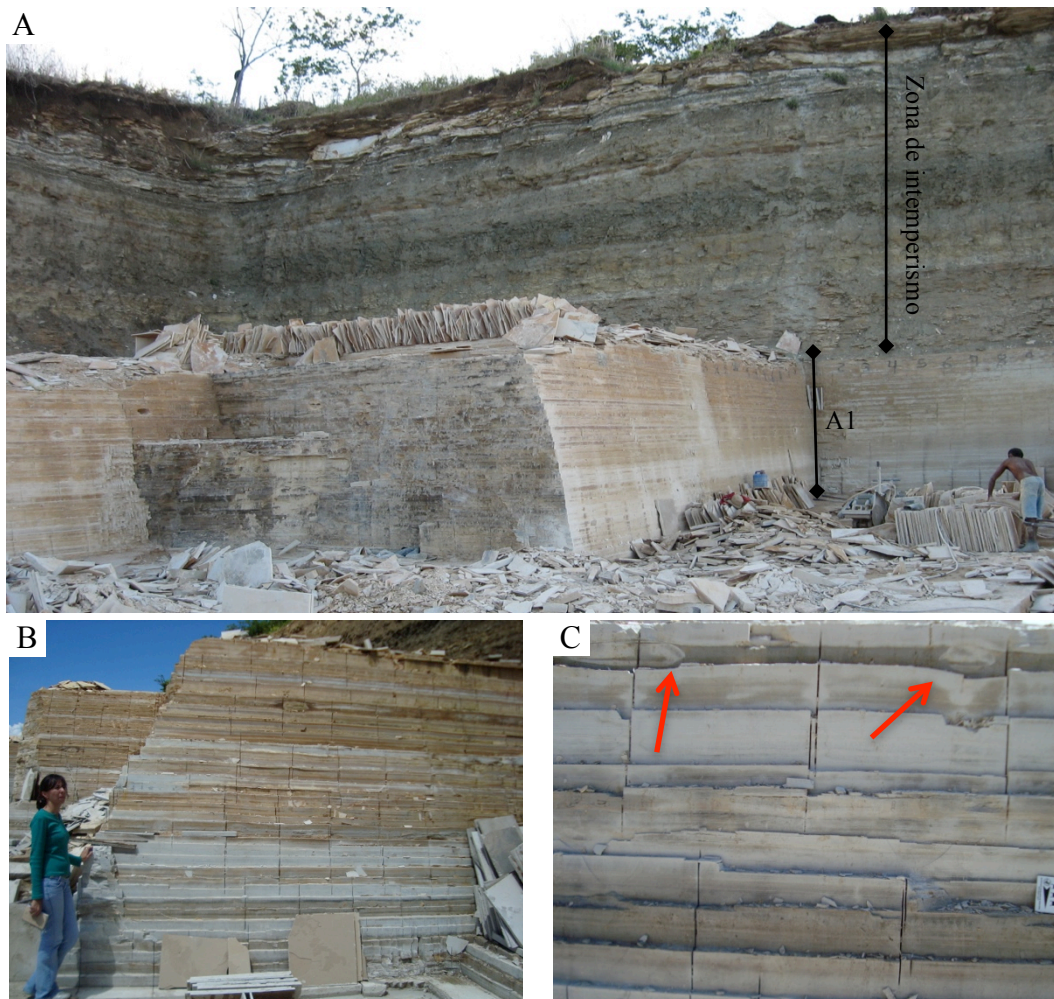
O nível A1 corresponde a uma subfácies com cerca de 9 m de espessura composto por laminação plano-paralelas e plano-onduladas (Figura 2.6B). As lâminas alternantes são de dois tipos, uma de cor bege, constituída por calcita micrítica, e outra de cor marrom, formada também por calcita micrítica, porém de granulometria mais fina que a anterior. Na parte inferior média desta subfácies ocorrem nódulos carbonáticos, de origem diagenética, com até 80 cm de diâmetro, que apresentam laminação deformada em seu interior. Ocorrem fósseis de peixes, vegetais (folhas, flores, frutos, caules e outros) e mais raramente insetos. Associados aos fósseis ocorrem pseudomorfo de sal, que cortam e deformam a laminação. Esta subfácies foi denominada de microfácies Sm5 por Neumann (1999) e Silva et. al. (2002).

O nível superior (topo) é uma zona de intemperismo, não comercial, encontra-se bastante alterado, apresentando níveis métricos argilosos resultantes da pedogênese dos



calcários laminados, que podem ser confundidos com folhelhos (SILVA, 2003).

**Figura 2.6** – Frente de lavra da Pedra Cariri, Pedreira do Idemar.



**Legenda:** (A) Nível A1 e zona superior alterada por intemperismo; (B) Nível A1 laminação plano-paralela com alternância das cores; (C) Nível A2 com laminação de caráter planar a plano-ondulado com presença de *microslumps*.

### **3 LAVRA, MERCADO E USO DOS CALCÁRIOS ORNAMENTAIS MONT CHARMOT E PEDRA CARIRI**

O presente capítulo expõe sobre o método de lavra empregada na extração dos calcários ornamentais comercialmente conhecidos como Mont Charmot e Pedra Cariri das Bacias Potiguar e Araripe, seguido de um panorama do mercado desses calcários e uso ao qual estão sendo destinados.

#### **3.1 LAVRA**

A correta determinação do método de lavra em pedreiras de rochas ornamentais é considerado um fator importante, erro na definição do método poderá gerar custos de produção excessivamente altos e menor vida útil da pedreira (REIS; SOUSA, 2003).

Os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri apresentam características geológicas distintas e são utilizados métodos diferentes na extração do material para comercialização, sendo utilizada métodos mecanizados para a extração do Mont Charmot e semi mecanizados para a Pedra Cariri.

##### **3.1.1 Característica da extração do Mont Charmot**

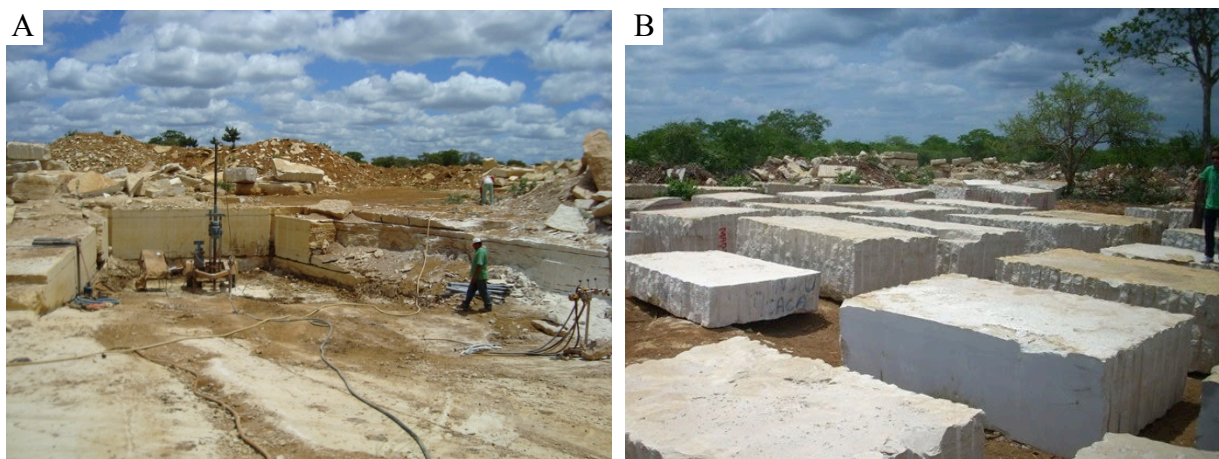
A presença de uma superfície plana a levemente ondulada, característica da feição geomorfológica da Chapada do Apodi, é determinante para o uso do método de lavra em fossa onde o desenvolvimento da lavra se situa-se imediatamente abaixo do nível do terreno (Figura 3.1A).

Devido esse calcário ser composto por camadas praticamente horizontalizadas e contínuas a extração de blocos atinge profundidade média máxima de 4 m e apresenta um desenvolvimento de lavra lateral.

Para o desmonte da rocha são utilizadas as tecnologias de fio diamantado e divisão mecânica por cunhas. Os blocos são extraídos com espessuras variadas, normalmente entre 0,5m - 1,5m, determinadas pela espessura da camada a qual está sendo extraída (Figura 3.1B).

A produção destinada ao mercado interno é beneficiada nos estados do Ceará e do Espírito Santo, enquanto a produção destinada à exportação (China, Europa e Japão) são geralmente comercializados na forma de blocos sem beneficiamento.

**Figura 3.1** – Extração e estocagem do calcário Mont Charmot na Mineração Apodi.



**Legenda:** (A) Frente de lavra do calcário Mont Charmot; (B) Pátio de estoque de blocos do calcário Mont Charmot. Fonte: (A) Autor; (B) Oliveira (2010).

### 3.1.2 Característica da extração da Pedra Cariri

O método de lavra usado para exploração do calcário Pedra Cariri é desenvolvido a céu aberto de forma seletiva. Em muitas frentes de lavra a geometria de cada frente fica condicionada (empiricamente) à zonas de capeamento, segundo as unidades estratigráficas de classificação das rochas. A técnica de lavra utilizada, em sua grande maioria, é conduzida sem nenhuma mecanização, de forma manual, para a produção de placas e posterior esquadreamento do ladrilho visando seu uso *in natura* como piso e revestimento, na construção civil (VIDAL; PADILHA, 2003).

Existe, ainda, um tipo de lavra semimecanizada, onde utiliza-se retroescavadeira e caminhão caçamba para a retirada da zona de intemperismo (Figura 3.2A). Segue-se com a utilização de policorte, com disco diamantado geralmente elétrico, para iniciar o padrão de corte (50 cm x 50 cm). No entanto, a placa obtida não ultrapassa a espessura de 18cm (Figura 3.2B). Em seguida os blocos de calcários são levantados por meio de alavanca (Figura 3.2C) e após são “abertos” em três ou quatro lajotas com espessuras entre 2 cm a 3 cm, segundo a estratificação, utilizando martelo e talhadeira (Figura 3.2D).

A operação posterior à etapa de lavra é o beneficiamento (esquadreamento das placas de rochas), executado nas serrarias, por máquina de corte do tipo bandeira (Figura 3.2E) (VIDAL et al., 2005).

Praticamente toda a produção é beneficiada em instalações muito próximas às frentes de lavra, onde geralmente as instalações são precárias e com distribuição muito próximas do estoque, rejeito, galpão de beneficiamento e escritório (Figura 3.2F).



**Figura 3.2** – Extração da Pedra Cariri.



**Legenda:** (A) Retirada da zona de intemperismo com o uso de retroescavadeira e caminhão caçamba; (B) Utilização policorte para iniciar o padrão de corte (50 cm x 50 cm); (C) Uso de alavanca para levantar um bloco de calcário; (D) Uso de martelo e talhadeira para dividir o bloco em lajotas variando entre 2 cm e 3 cm de espessura; (E) Esquadrejamento das placas de rocha; (F) Instalações (pátio de estocagem, rejeitos, galpão de beneficiamento e escritório).  
 Fonte: (A, B, C, D)- Moreira (2009); (E) Vidal et al (2005); (F) Autor.

### 3.2 MERCADO

O uso das rochas ornamentais teve seu início quando o homem utilizava as cavernas para abrigo e proteção, hoje a “idade da pedra” possui a aplicação das rochas ornamentais como elemento estrutural de monumentos, fabricação de concreto e na construção civil, além da utilização na arquitetura em diversos aspectos.

O calcário comercialmente conhecido como *Mont Charmot* é proveniente da Chapada do Apodi, localizada na Bacia Potiguar, onde tem uma reserva significativa de calcário. A razão é que nesta região afloram mais de 20 mil km<sup>2</sup> de rocha calcária (com espessura que varia de 50 a 400 metros). Esse calcário é matéria prima para inúmeros produtos da construção civil, indústria química, açucareira, entre outros segmentos industriais. Essa região já possui fábrica de cimento instalada há quase 40 anos e nas últimas duas décadas pelo menos oito grandes grupos demonstraram interesse de instalar unidades industriais na região (IBRAM, 2011).

Diante da grande oferta do recurso mineral no município, a logística privilegiada do estado e a política de apoio do governo do estado foram fatores fundamentais para o investimento desde 2002 na exploração do calcário para uso como rocha ornamental e de revestimento (SEDEC, 2002).

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro 2010, a produção mineral em 2009 de calcários com fins ornamentais teve a produção de 10.586 t.

A maioria do calcário extraído é transportado até Vitória no Espírito Santo onde é feito o beneficiamento e em seguida vendido para o mercado nacional e exportado para a Europa, China e Japão (OLIVEIRA, 2010). Em 2011 foi registrado um aumento nas exportações de 28,7% (IDEMA, 2013).

A extração do calcário conhecido comercialmente como *Pedra Cariri*, proveniente da Chapada do Araripe localizada na Bacia do Araripe, constitui um importante pólo mineral e responsável pela economia básica dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, respondendo por cerca de 15% da produção de rochas ornamentais e de revestimento do Estado do Ceará (AMARAL FILHO; CAMPOS, 2006).

Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), as reservas minerais da Pedra Cariri são de 114,5 milhões m<sup>3</sup>, ou seja, cerca de 275 milhões de toneladas (AMARAL FILHO op. cit.).

A produção de Pedra Cariri no Arranjo Produtivo em estudo é de 80 mil toneladas/ano e a exploração do material é feita por aproximadamente 60 microempresas, em cerca de 300



frentes de lavra e serrarias, em que apenas 30% dessas empresas utilizam máquinas cortadoras de placas. Já na etapa de beneficiamento, existem apenas máquinas para esquadrejamento das placas. Há uma perda de 80% dos materiais nas etapas de lavra e de beneficiamento, até chegar ao produto final. O rejeito da produção (carbonato de cálcio) é aproveitado somente na indústria de cimento (AMARAL FILHO; CAMPOS, 2006 apud VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, s.n.t).

O destino das vendas realizadas pelas microempresas concentra cerca de 75% mercado local e no estado, e para os outros estados do Brasil cerca de 25%. Já a produção das pequenas empresas, responsáveis pela maior parte da produção (cerca de 82%), é destinada ao mercado brasileiro (Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Maranhão, Pará, Bahia e Piauí), para o estado cerca de 15%, mercado local cerca de 1% e exportação, principalmente para Portugal, cerca de 2% da produção (AMARAL FILHO; CAMPOS, 2006).

### 3.3 USO DOS CALCÁRIOS MONT CHARMOT E PEDRA CARIRI

Os calcários comercialmente conhecidos como *Mont Charmot* e *Pedra Cariri*, provenientes das Bacias Potiguar e Araripe, recebem as mais diferentes formas de utilização envolvendo a comercialização de materiais brutos e produtos acabados ou semi-acabados.

Habitualmente o calcário *Mont Charmout* são utilizados em ambientes de interiores e exteriores (Figura 3.3 e 3.4), utilizando todos os tipos de acabamento: polido, escovado, levigado, flameado, apicoado, jateado, ranhurado, entre outros em chapas ou placas de 2 cm a 3 cm (OLIVEIRA, 2010).

**Figura 3.3** – Utilização do calcário Mont Charmot em fachadas de prédios.



**Legenda:** (A) Fachada Rio Sul; (B) Fachada Construtora Racional.

Fonte: (A) [www.Limestoneor.no](http://www.Limestoneor.no); (B) [www.imarf.com.br](http://www.imarf.com.br).

**Figura 3.4** – Diversas utilizações do calcário Mont Charmot.



**Legenda:** (A) Aplicação no entorno de banheira; (B) Utilização no entorno de piscina na orla da praia; (C) Utilização em pisos de escada; (D) Utilização em revestimento do piso e paredes em banheiro de shopping; (E) Pisos 50 x 50 cm. Fonte: (A) [www.imarf.com.br](http://www.imarf.com.br); (B) [http://galeria.cuiket.com.br/foto/limestone-mont-charmot\\_8516.html](http://galeria.cuiket.com.br/foto/limestone-mont-charmot_8516.html); (C) <http://limestonefloripa.blogspot.com.br>; (D) Autor; (E) [www.imarf.com.br](http://www.imarf.com.br).

Os calcários *Pedra Cariri* frequentemente no mercado local são utilizadas para revestimentos de interiores e exteriores ou como pisos em diversos ambientes, sendo comum o uso no entorno de piscinas (Figura 3.5).

São utilizados como laje almofada, ou seja, como placas ao natural (sem polimento) com ou sem esquadrejamento com dimensões e espessuras variadas. As placas são esquadrejadas em diferentes dimensões, mais comumente nos tamanhos de 50x50cm, 40x40cm, 30x30cm, 20x20cm, etc., e também são utilizados na fabricação de mesas e artesanato para decoração.



**Figura 3.5** – Diversas utilizações do calcário Pedra Cariri.



**Legenda:** (A) Utilizada em piso em área externa, esquadrejada com face bruta obtida por deslocamento; (B) Utilizada como piso em calçada, esquadrejada com face bruta obtida por deslocamento; (C) Utilizada como piso sem esquadrejamento com face bruta obtida por deslocamento no entorno de piscina; (D) Utilizada em ambiente interno, esquadrejada e com face lisa; (E) Utilizada na fabricação de mesa com face polida e no piso, esquadrejada e polida; (F) Utilizada em tampo de mesa com face polida.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da presente pesquisa adotou-se a interação das atividades de campo-laboratório-gabinete visando a caracterização geológica, petrográfica e tecnológica de variedades de rochas calcárias de alguns níveis estratigráficos das Bacias Potiguar e do Araripe exploradas para fins ornamentais e de revestimento.

Os trabalhos de campo envolveram atividades relacionadas à seleção dos níveis estratigráficos dos estratos calcários de ambas as bacias visando a coleta de amostras destinadas aos estudos pretendidos. Também foram realizados levantamentos geológicos específicos nos locais de coleta das amostras a fim de se caracterizar as diferenças composicionais, estruturais e texturais entre os diferentes níveis estratigráficos selecionados para a coleta das amostras, bem como para permitir o posicionamento dos referidos níveis no âmbito da estratigrafia das bacias envolvidas.

As atividades de gabinete se referem à pesquisa bibliográfica dirigida aos aspectos geológicos regionais e locais de interesse e às metodologias aplicadas na caracterização tecnológica e de alterabilidade química para rochas ornamentais e de revestimento, além daquelas relacionadas à organização, tratamento e interpretação dos dados e resultados obtidos nas análises, ensaios e testes então realizados.

As atividades laboratoriais visando a caracterização tecnológica e de durabilidade das rochas envolveram análise petrográfica, determinação de propriedades físico-mecânicas, testes de porosimetria e permeabilidade conjugados a ambientes saturados em dióxido de enxofre, de alterabilidade química e de envelhecimento em câmaras de SO<sub>2</sub> avaliados, respectivamente, através de técnicas relacionadas a análise de imagens e por variações cromáticas.

### 4.1 CALCÁRIOS UTILIZADOS NA PESQUISA

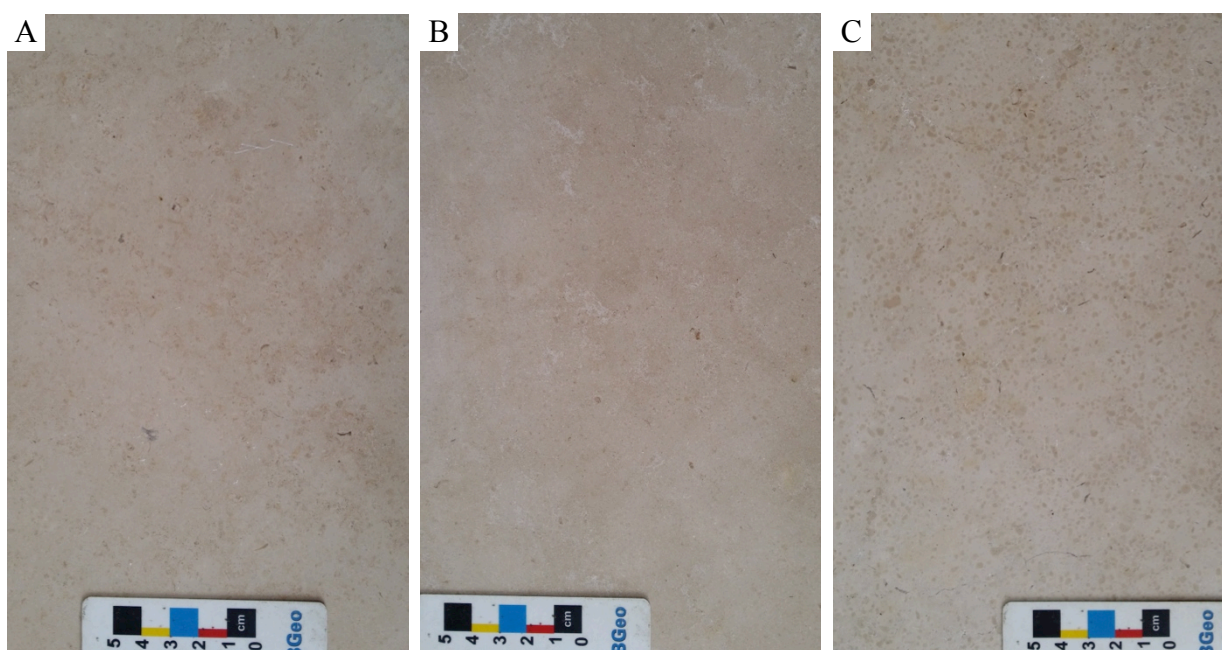
Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas cinco diferentes amostras de calcários sendo três conhecidas comercialmente como Mont Charmot, provenientes de diferentes níveis de uma mesma frente de lavra da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar (amostras P1; P2 e P3) e duas amostras conhecidas como Pedra Cariri provenientes de dois níveis de uma frente de lavra no interior do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe (amostras A1 e A2).

As amostras P1, P2 e P3 foram coletadas na pedreira da Mineração Apodi, município

de Felipe Guerra - RN, cuja frente de lavra e correspondentes níveis estratigráficos de coleta das amostras são descritos no Capítulo 2 - Geologia Local e detalhados conforme ilustrações expressas pelas fotografias das Figuras 2.4A, B e C. Os aspectos petrográficos de suas superfícies brutas estão representados nas fotografias das Figuras 5.2A, B e C do Capítulo 5 - Análise Petrográfica e as superfícies polidas na Figura 4.1.

As amostras A1 e A2 foram coletadas na Pedreira do Idemar, município de Nova Olinda - CE, cuja frente de lavra e correspondentes níveis estratigráficos de coleta das amostras são descritos no Capítulo 2 - Geologia Local e detalhados conforme ilustrações expressas pelas fotografias das Figuras 2.6A, B e C. Os aspectos petrográficos de suas superfícies brutas estão representados nas fotografias das Figuras 5.9, para amostra A1, e 10A, B e C, para a amostra A2, do Capítulo 5 - Análise Petrográfica. As fotografias das Figuras 4.2A e B mostram aspectos gerais de superfícies de placas polidas da Pedra Cariri, com o calcário A2 com superfície polida em um plano levemente oblíquo à laminação.

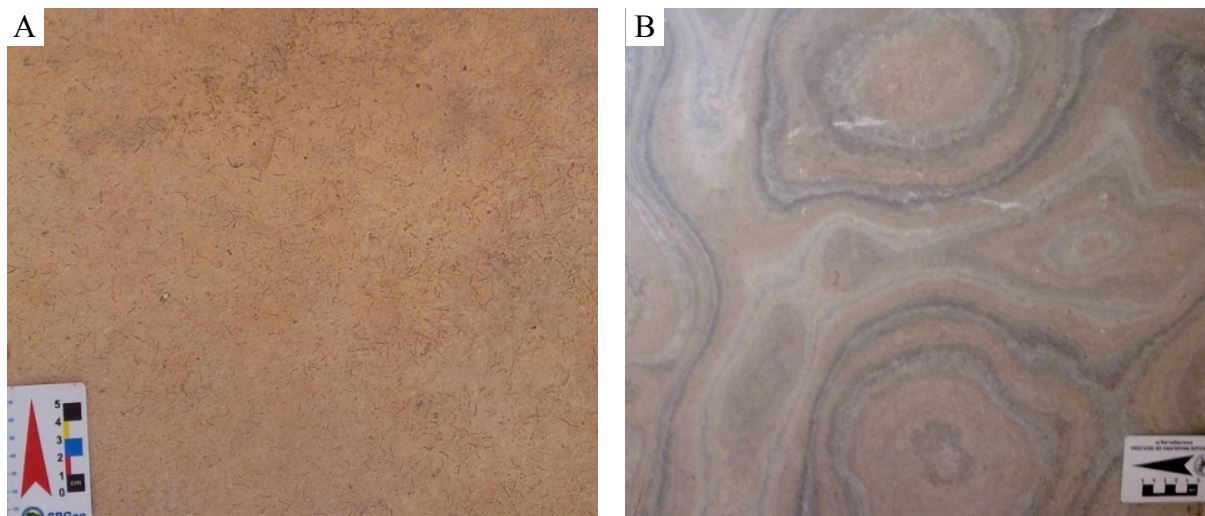
**Figura 4.1** – Placas polidas do calcário proveniente da Formação Jandaíra Bacia Potiguar comercializadas como Mont Charmot.



**Legenda:** (A) amostra de placa polida do nível P1; (B) amostra de placa polida do nível P2; (C) amostra de placa polida do nível P3.



**Figura 4.2** – Placas polidas do calcário proveniente da Formação Santana Bacia do Araripe comercializadas como Pedra Cariri.



**Legenda:** (A) amostra do nível A1; (B) amostra do nível A2.

#### 4.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica fundamentou-se na caracterização mineralógica, textural e estrutural dos cinco calcários ornamentais, tomando-se por base as diretrizes gerais da norma ABNT NBR 12.768 (ABNT, 1992a) e as orientações contidas em Rodrigues et al. (1997) e Navarro (1998). Em função da natureza dos estudos, voltados para a avaliação do comportamento físico-mecânico e alterabilidade de rochas destinadas a revestimentos em obras civis, especial atenção foi atribuída para além de classificar também destacar as características que poderiam influenciar nos resultados da caracterização tecnológica.

Para a descrição petrográfica das rochas calcárias compreendeu a caracterização dos aspectos composicionais, texturais e estruturais. Observando à disposição e arranjo dos grãos, relações, tipos e quantificação de fraturas, incluindo também a descrição dos materiais de preenchimento e comunicabilidade das fissuras.

Para a classificação da porosidade foi seguida a proposta de Scholle e Ulmer-Scholle (2003). O grau de empacotamento foi avaliado seguindo a proposta de Holz e Simões (2002), que classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz. E classificadas segundo a nomenclatura de Folk (1959, 1962), que correlaciona a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos.

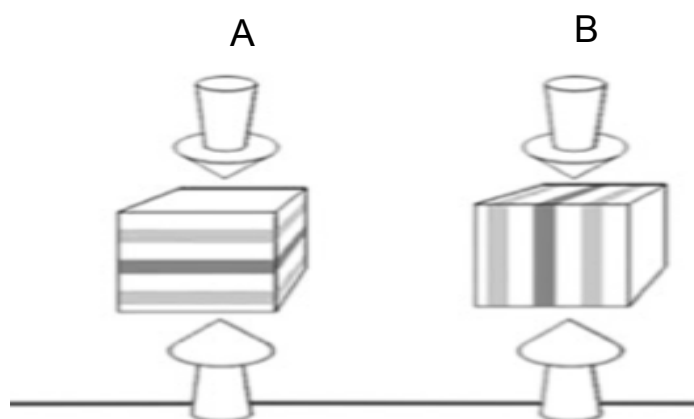
### 4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E DE ALTERABILIDADE

#### 4.3.1 Caracterização Tecnológica (ensaios físico-mecânicos)

A bateria de ensaios físico-mecânicos foi realizada no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE/UNESP - Campus de Rio Claro e inclui determinação de índices físicos (massa específica aparente; porosidade aparente; absorção d'água), resistências à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura (flexão pelo método dos 3 pontos), à flexão pelo método 4 pontos, ao desgaste abrasivo Amsler e propagação de ondas ultrassônicas. Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios físico-mecânicos seguiram diretrizes estabelecidas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT e da American Society for Testing and Materials-ASTM, conforme discriminadas no Capítulo 6 onde são apresentados e discutidos os resultados dos referidos ensaios.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial e de desgaste abrasivo *Amsler* foram realizados com a aplicação de esforços e ações de desgastes perpendiculares e paralelos aos planos de estratificação das rochas, conforme representação esquemática na Figura 4.3. Para a determinação das resistências aos esforços flexores (módulo de ruptura; flexão por carregamento em 4 pontos) os ensaios foram realizados com aplicação dos esforços no sentido perpendicular à estratificação das rochas, o que corresponde às superfícies de deslocamentos dos calcários.

**Figura 4.3** – Sentido da aplicação dos esforços para o ensaio de compressão uniaxial e de desgaste abrasivo Amsler.



**Legenda:** (A) sentido perpendicular; (B) paralelo à estratificação. (Modificado, GARCÍA-DEL-CURA et al., 2012).

Para os ensaios mecânicos (compressão uniaxial; esforços flexores) foram efetuados testes em corpos-de-prova secos em estufa à 70 °C e saturados em água, tendo por finalidade avaliar o possível *enfraquecimento hidráulico* de cada rocha em relação aos esforços nelas exercidos. O coeficiente de enfraquecimento hidráulico **R** (KOWALSKI, 1970 apud MESQUITA, 2002) relaciona a resistência de um material seco e saturado e permite avaliar o efeito da água na resistência dos materiais rochosos. O coeficiente de enfraquecimento hidráulico é obtido com a seguinte equação:

$$R = \frac{\sigma_{\text{sat}}}{\sigma_{\text{seco}}},$$

onde  $\sigma_{\text{seco}}$  e  $\sigma_{\text{sat}}$  correspondem à tensão de ruptura do material em estados seco e saturado, respectivamente.

Também foram executados ensaios de resistência ao congelamento e degelo conjugados à compressão uniaxial e módulo de ruptura (flexão por 3 Pontos). Os resultados obtidos para o ensaio de congelamento e degelo conjugados à compressão uniaxial e flexão 3 Pontos são correlacionados com os respectivos resultados das resistências ao natural de forma a se obter o coeficiente de enfraquecimento **K** (NBR 12767, ABNT 1992a; NBR 15845, ABNT 2010), através da relação entre os valores representados pela equação:

$$K = \frac{\sigma_{\text{cd}}}{\sigma_{\text{nat}}}$$

onde:

**K** = coeficiente de enfraquecimento da rocha

$\sigma_{\text{cd}}$  = valor médio de resistência mecânica dos corpos-de-prova após ciclos de congelamento e degelo (MPa)

$\sigma_{\text{nat}}$  = valor médio de resistência mecânica dos corpos-de-prova em condições secas (MPa)

Destaca-se que todos os corpos-de-prova utilizados nos ensaios mecânicos foram submetidos a determinação de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais antes da realização dos respectivos testes de resistência.



### 4.3.2 Porosidade e Permeabilidade

Os ensaios para avaliação da porosidade foram efetuados através da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP) e da permeabilidade através da Injeção de Gás e realizados no Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), em Lisboa.

Estes ensaios tiveram por objetivo a avaliação do comportamento dos referidos calcários em termos de suas características de porosidade e permeabilidade ao natural e após serem submetidos ao envelhecimento acelerado em atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o qual simula ambientes de grandes cidades e áreas industrializadas.

As amostras utilizadas para a realização destes testes correspondem aos materiais dos mesmos níveis estratigráficos amostrados para a realização dos ensaios físico-mecânicos, ou seja, dos calcários ornamentais Mont Charmot provenientes de diferentes níveis da Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (amostras P1; P2 e P3) e duas amostras conhecidas comercialmente como Pedra Cariri provenientes de níveis do Membro Crato da Formação Santana da Bacia do Araripe (amostras A1 e A2). Os testes, sempre que possível, foram realizados em duas direções: perpendicular e paralela à estratificação das rochas.

Os princípios das técnicas da porosimetria por intrusão de mercúrio e de permeabilidade a gás, bem como os procedimentos para realização dos referidos ensaios, são descritos no Capítulo 7, o qual trata dos resultados fornecidos pelas rochas calcárias.

### 4.3.3 Ensaios de Alterabilidade Química e em Câmeras com Dióxido de Enxofre

Os ensaios de alterabilidade química objetivaram a *avaliação da resistência da superfície das placas de calcários ao ataque químico sob efeito de reagentes agressivos* e foram realizados no Laboratório de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE-campus de Rio Claro. A avaliação dos efeitos causados pelo ataque das substâncias químicas nas superfícies das placas foi através da quantificação das características cromáticas no espectro RGB e das características morfológicas da textura, técnicas embasada na análise digital da imagem. Os procedimentos adotados para a realização dos testes de alterabilidade e técnicas para avaliação dos efeitos são pormenorizados no Capítulo 8, juntamente com a análise dos resultados obtidos.

Os ensaios de *alterabilidade química em câmeras com atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)* foram realizados no Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), em Lisboa, e foram aplicados nos corpos de prova utilizados na

avaliação da porosidade de mercúrio e da permeabilidade à injeção de gás (cujos resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 7) e em placas dos calcários a fim de acelerar, em laboratório, os processos de envelhecimento e intemperismo das rochas.

A avaliação das alterações cromáticas ocorridas nas superfícies das placas pelos testes de envelhecimento nas câmaras saturadas em SO<sub>2</sub> foi efetuada pela quantificação/medida das variações das cores através de técnica de análise cromática por instrumento utilizando o sistema de cores CIELAB, procedimentos estes detalhados no Capítulo 9 onde são apresentados e discutidos os resultados dos referidos testes.

As rochas para revestimento quando em uso em obras civis estão sujeitas a inúmeras solicitações como incidência de radiação solar, pluviosidades, oscilações de temperatura, pressões de vento, exposição a gases poluentes, desgaste provocado por atrito e impacto de partículas em suspensão durante o vento, ação agressiva de produtos de limpeza, dependendo do tipo de ambiente (exteriores ou interiores) no qual estão aplicadas.

O comportamento das rochas frente aos processos de deterioração está na dependência de um conjunto de fatores intrínsecos e extrínsecos, resultante da interação das características petrográficas, físico-mecânicas e químicas das rochas com os agentes do meio ambiente e os procedimentos de limpeza e conservação do material.

O conhecimento das características tecnológicas e químicas do material pétreo é de fundamental importância para a prevenção da integridade da rocha, as quais estarão sujeitas a alterações dos mais diversos tipos como a perda de brilho, manchamentos, desintegração de minerais, alterações cromáticas, diminuição da resistência mecânica, escamações, esfoliações, entre outros fatores.

## 5 ANÁLISE PETROGRÁFICA

A seguir são apresentadas as análises petrográficas dos calcários ornamentais das Bacias Potiguar e do Araripe utilizados nos estudos de caracterização tecnológica e de alterabilidade química da presente pesquisa de doutorado.

Conforme expresso no capítulo 4 (Materiais e Métodos), foram utilizadas cinco diferentes amostras de calcários, sendo três deles comercialmente conhecidos como *Mont Charmot* e coletados em diferentes níveis de uma mesma frente de lavra da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar (amostras P1; P2 e P3) e duas amostras conhecidas como *Pedra Cariri* provenientes de dois níveis de uma frente de lavra no interior do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe (amostras A1 e A2).

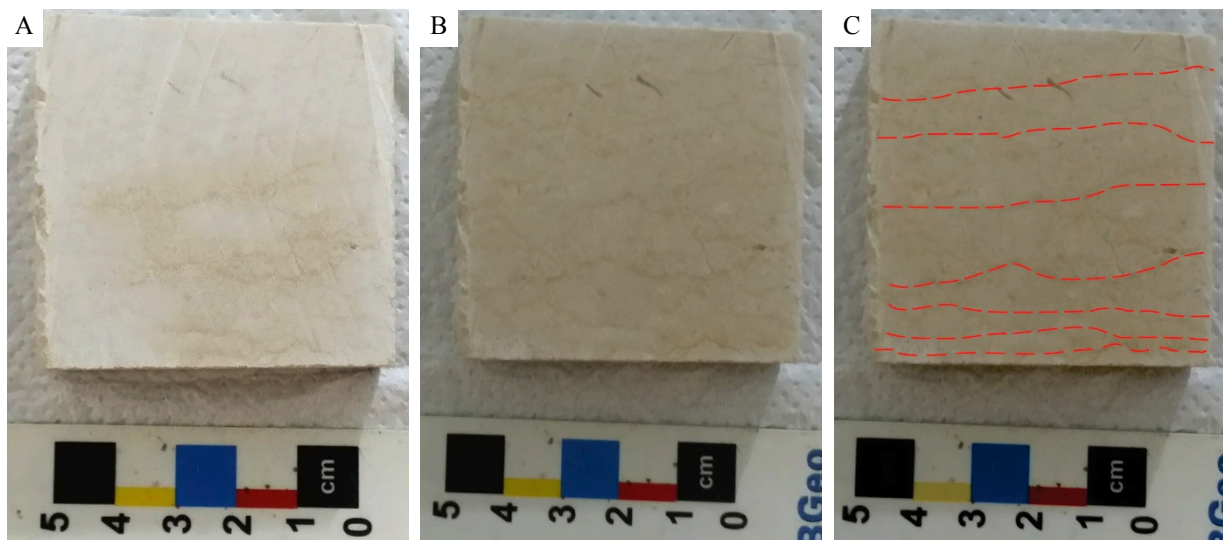
Os dados das análises petrográficas (aspectos composicionais, texturais e estruturais) abaixo apresentados são, nos capítulos subsequentes, correlacionados com os dados tecnológicos, de alterabilidade química e de durabilidade dos calcários estudados objetivando a avaliação do comportamento dos mesmos frente às várias solicitações a que estarão sujeitos quando em uso em obras de engenharia civil.

A síntese das principais características petrográficas dos calcários estudados é apresentada na Tabela 5.1, no final do capítulo. Os tipos petrográficos da Bacia Potiguar são classificados como calcários calcíticos (GOMES, 2008) e os da Bacia do Araripe são classificados como calcários calcíticos laminados. As variações entre os níveis da mesma bacia são sutis, com pequenas diferenças na quantidade dos componentes e na textura.

### 5.1 CALCÁRIOS DA BACIA POTIGUAR

Apesar da nítida estratificação observada ao nível de afloramento, as amostras dos calcários coletados no interior dos três níveis da Bacia Potiguar (amostras P1, P2 e P3) exibem estruturas maciças a levemente anisotrópicas, sendo que, no geral, a identificação da anisotropia só é possível quando a rocha está úmida (Figura 5.1). Estes calcários (P1, P2 e P3) apresentam coloração creme claro quando secos a creme quando úmidos. A textura, no geral, é lutítica maciça nos três níveis.

**Figura 5.1** – Anisotropia no nível P2 da Bacia Potiguar segundo corte normal à estratificação.



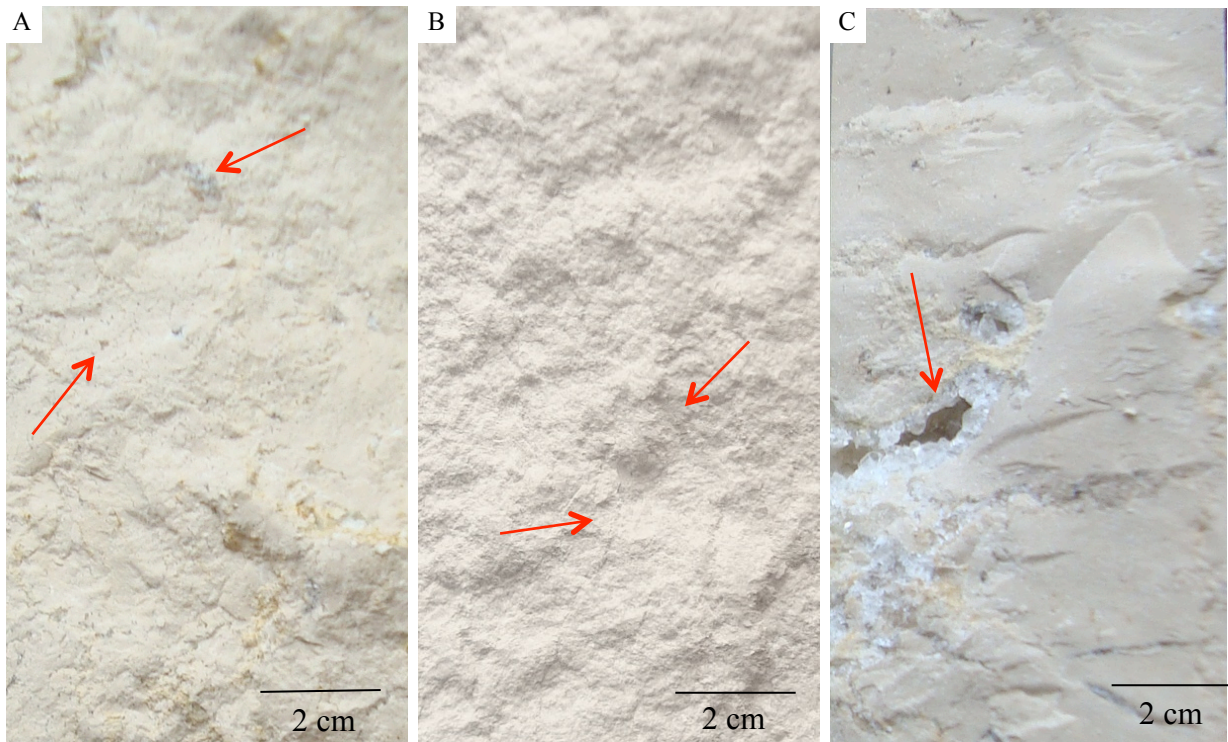
**Legenda:** (A) – amostra seca, anisotropia quase imperceptível; (B) – amostra umedecida, anisotropia mais visível; (C) – linhas pontilhadas delimitando a anisotropia.

As fotos da Figura 5.2 fornecem uma visão geral dos aspectos macroscópicos dos calcários dos três níveis estudados. As superfícies são naturais, não serradas, cujas feições estruturais e texturais representadas nas respectivas fotos e discriminadas na legenda são discutidas ao longo do texto abaixo.

O nível P1 (Figuras 5.2-A e 5.3) apresenta concentrações de cristais de calcita com formas lenticulares/alongadas com dimensões milimétricas a poucos centímetros (largura entre 0,5 a 3 mm e comprimento entre 1 a 4 cm, predominantemente), equigranulares com granulação entre 0,5 e 2 cm. Por vezes as concentrações são circulares a ovaladas/achatadas, com contornos tanto regulares quanto irregulares, com diâmetro médio de 0,5 cm (Figura 5.3-A). Estas concentrações de cristais de calcita representam ao redor de 10% da rocha e apresentam distribuição heterogênea, são irregularmente espaçadas, e estão dispersas em meio a matriz micrítica.

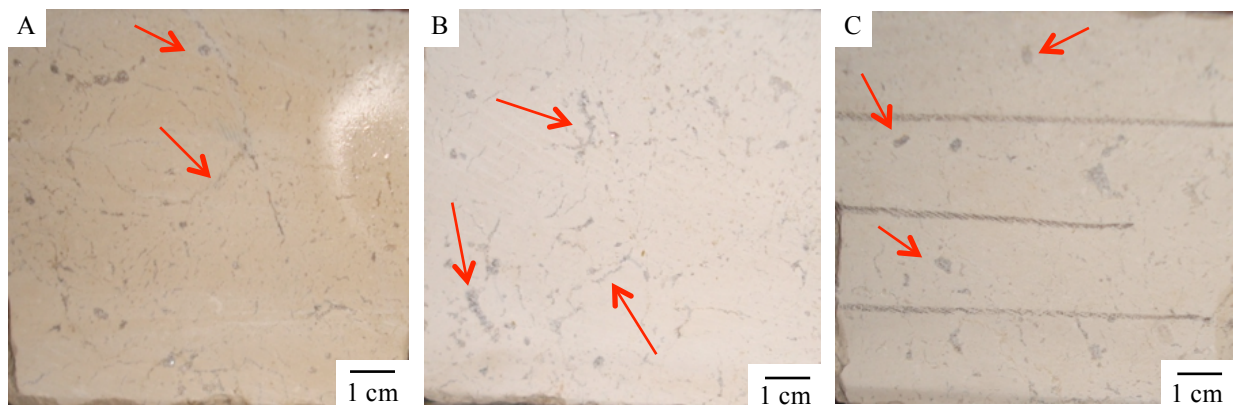
O nível P2 (Figuras 5.2-B e 5.4) apresenta também um calcário maciço com uma matriz homogênea micrítica, onde a granulação é muito fina ( $< 0,063$  mm). São reconhecidos estilólitos dispostos tanto perpendicularmente quanto paralelos aos planos de estratificação, os quais ocupam até 10% do volume da rocha, distribuídos de forma heterogênea e irregularmente espaçados na massa rochosa. Possuem espessuras milimétricas ( $\pm 0,2$  mm) e comprimentos centimétricos, variando entre 1 a 15 cm. Os calcários deste nível não apresentam concentrações de calcita como encontrado nos níveis P1 e P3.

**Figura 5.2** – Visão macroscópica dos calcários da Bacia Potiguar.



**Legenda:** (A) - nível P1 exibindo textura maciça com presença de concentração de cristais de calcita; (B) - nível P2 com textura maciça com estilólitos; (C) - nível P3, textura maciça com geodos lenticulares e cristais de calcita.

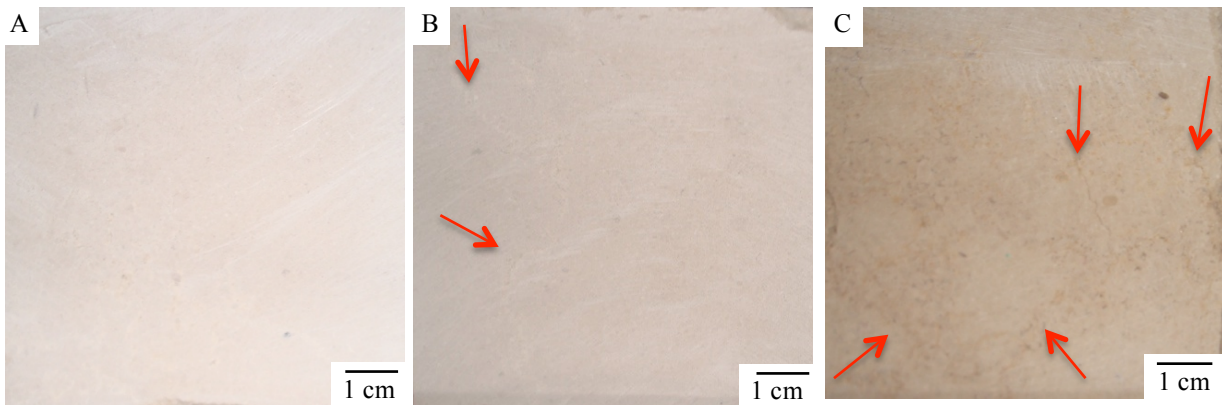
**Figura 5.3** – Placas serradas do calcário do nível P1 mostrando diferentes tipos de concentrações de cristais de calcita.



**Legenda:** (A) e (B) – concentrações de cristais de calcita na matriz micrítica com formas lenticulares e circulares; (C) – concentrações de cristais de calcita com formas circulares.



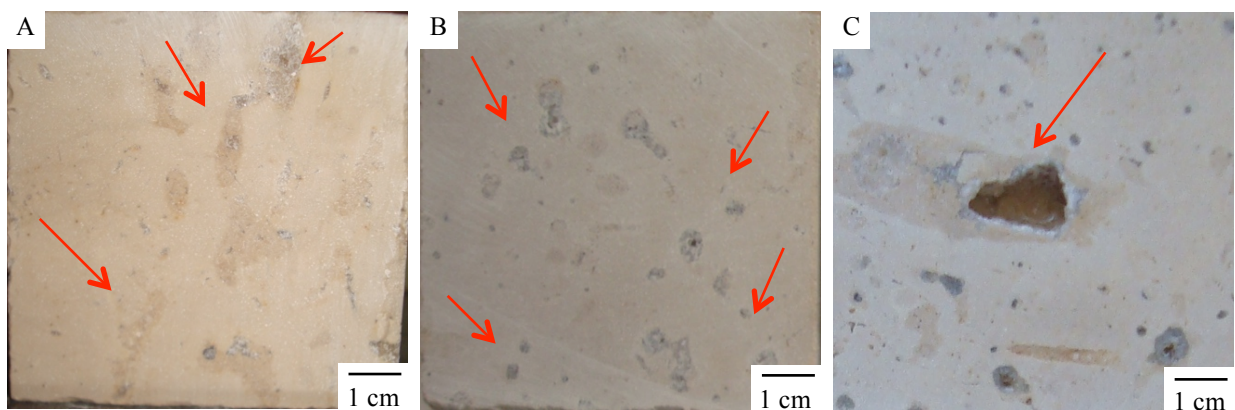
**Figura 5.4** – Placas serradas do calcário do nível P2 mostrando estilólitos.



**Legenda:** (A) e (B) – calcário micrítico com matriz homogênea apresentando estilólitos; (C) – calcário maciço com estilólitos.

As amostras dos calcários do nível P3 (Figuras 5.2-C e 5.5) apresentam uma granulação mais densa da matriz em relação aos calcários nos níveis P1 e P2, com cerca de 15% de lentes de cristais de calcita com tamanhos que variam de milimétricos a centimétricos (larguras entre 0,2 a 2 cm e extensões entre 0,5 a 6 cm), com granulação dos cristais de calcita entre 0,5 e 2 mm. Por vezes são observados geodos, onde *vugs* de dissolução apresenta cristalização de calcita nas bordas mantendo o núcleo vazio (poros), desenvolvendo típicos geodos (Figura 5.5-C). Apresenta ainda cerca de 10% de cristais de calcita com formas circulares irregulares com diâmetros entre 2 e 5 mm, não comunicáveis entre si (Figura 5.5-C). As concentrações de cristais de calcita apresentam distribuição homogênea, irregularmente espaçadas, em meio a matriz micrítica.

**Figura 5.5** – Placas serradas do calcário do nível P3 mostrando cristais de calcita e feições de dissolução preenchidas por cristais de calcita.



**Legenda:** (A) – concentrações de cristais de calcita dispostos de forma alongadas; (B) – concentrações de cristais de calcita dispostas de forma circulares; (C) – Feições de dissolução de dimensões centimétricas preenchidas por cristais de calcita.

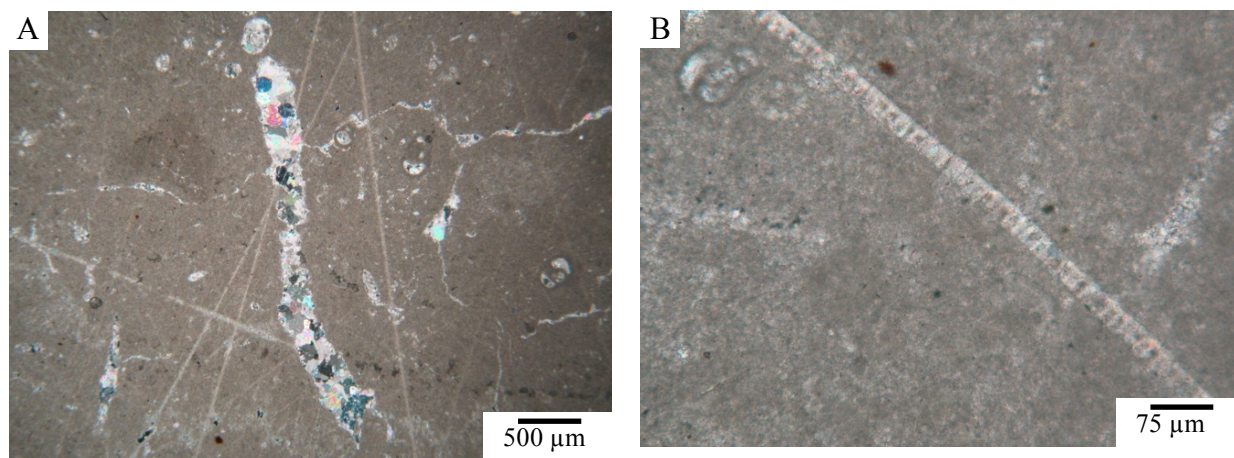
Tomando-se por base a classificação proposta por Grabau (1960), a qual leva em consideração o tamanho médio dos grãos, os calcários dos três níveis (P1, P2 e P3) se enquadram na classe dos calcilutitos.

Já segundo a classificação de Folk (1959, 1962), que correlaciona a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos, a amostra P1 corresponde a um biopelasparito, a amostra P2 a um biomicro e a amostra P3 a um micrito com bioclastos.

Ainda segundo a proposta de Scholle e Ulmer-scholle (2003) a amostra P1 apresenta porosidade muito baixa (5%), do tipo primária/intergranular. O grau de empacotamento é avaliado como frouxo/disperso seguindo a proposta de Holz e Simões (2002), que o classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz.

São encontrados na amostra P1 planos estiolíticos (0,02 a 10 cm) preenchidos por recristalização de carbonato de cálcio (calcita) (Figura 5.6-A) e fragmentos de equinoides (Figura 5.6-B).

**Figura 5.6** – Fotomicrografias da amostra P1 (nicóis cruzados).



**Legenda:** (A) - Matriz micrítica com planos estiolíticos preenchidos por recristalização de calcita. (B) - Fragmentos de equinoides na matriz micrítica.

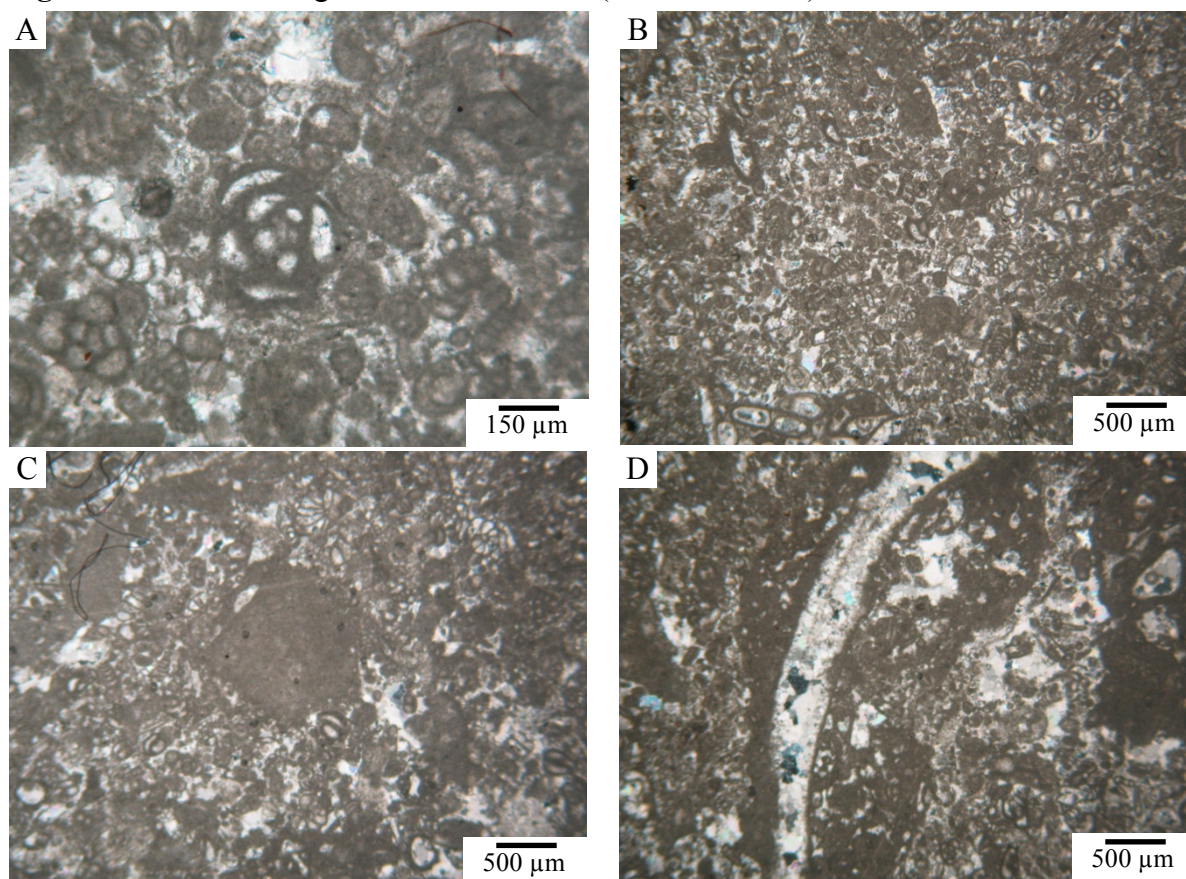
A amostra P2 segundo a proposta de Scholle e Ulmer-Scholle (2003) apresenta porosidade muito baixa (5%), do tipo secundária/intragranular. O grau de empacotamento avaliado seguindo a proposta de Holz e Simões (2002) quanto à disposição física dos bioclastos na matriz é classificado como denso. A rocha se trata de um calcário compacto com matriz micrítica e abundante conteúdo de microfósseis (60%), presentes gastrópodes e foraminíferos (Figura 5.7-A), com distribuição em geral homogênea com formas esféricas a elipsoidais e com diâmetros entre 300 a 500 µm (Figura 5.7-B).

São encontrados aglomerados micríticos que constituem planos de descontinuidade,



cuja textura e estruturação interna permitem considera-los intraclastos (Figura 5.7-C), e fragmentos de gastrópodo levemente recristalizado (Figura 5.7-D).

**Figura 5.7** – Fotomicrografias da amostra P2 (nicóis cruzados).



**Legenda:** (A) Gastrópode, foraminíferos e cimentação; (B) Microfósseis com formas esféricas a elipsoidais com diâmetros entre 300 a 500  $\mu\text{m}$ ; (C) Aglomerado micrítico que podem ser considerados intraclastos; (D) Fragmento de gastrópodo levemente recristalizado.

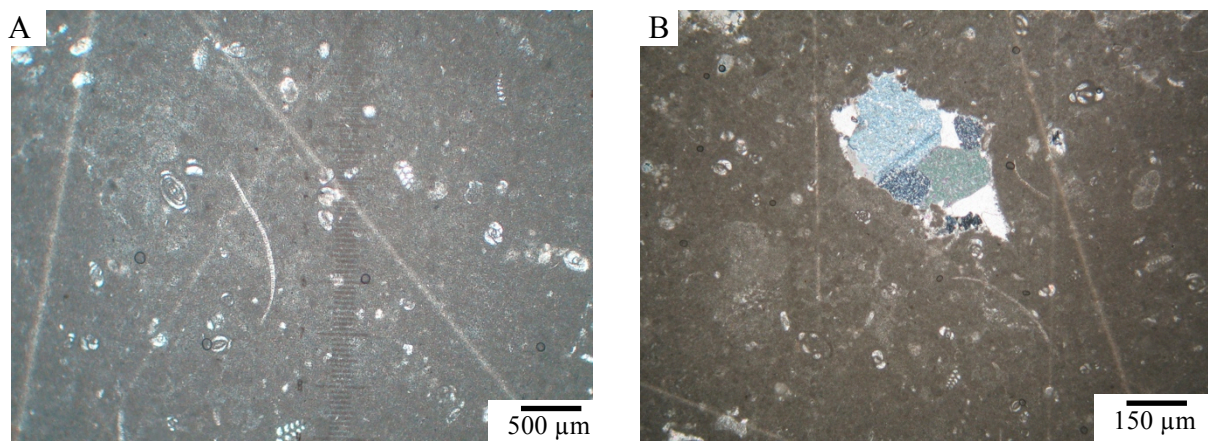
A amostra P3 possui matriz com textura micrítica com recristalizações, que conforme a classificação de Folk (1962) representa um micrito com bioclastos. Segundo a proposta de Scholle e Ulmer-Scholle (2003) apresenta porosidade muito baixa (<5%) do tipo primária/intergranular. O grau de empacotamento é avaliado como frouxo seguindo a proposta de Holz e Simões (2002) que classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz. São encontrados fragmentos de equinoides e foraminíferos (100  $\mu\text{m}$ ) distribuídos de forma homogênea, e com tamanho médio em torno de 70  $\mu\text{m}$  (Figura 5.8-A).

O calcário do nível P3, diferentemente dos outros dois níveis, exibe a presença de feições de dissolução, que são observados tanto a nível macroscópico quanto microscópico, em forma de poros circulares a irregulares, às vezes ligados a seções alongadas formando veios completamente preenchidos por calcita espática com proporção de cerca de 10% (Figura



5.8-B). Esses podem chegar a verdadeiros geodos como observado na Figura 5.2-C, onde a cavidade apresenta cristalização de calcita nas bordas mantendo o núcleo vazio (poros).

**Figura 5.8** – Fotomicrografia da amostra P3 (nicóis cruzados).



**Legenda:** (A) Fragmentos de equinóides e foraminíferos distribuídos de forma homogênea; (B) Feições de dissolução preenchida por calcita espática.

## 5.2 CALCÁRIOS DA BACIA DO ARARIPE

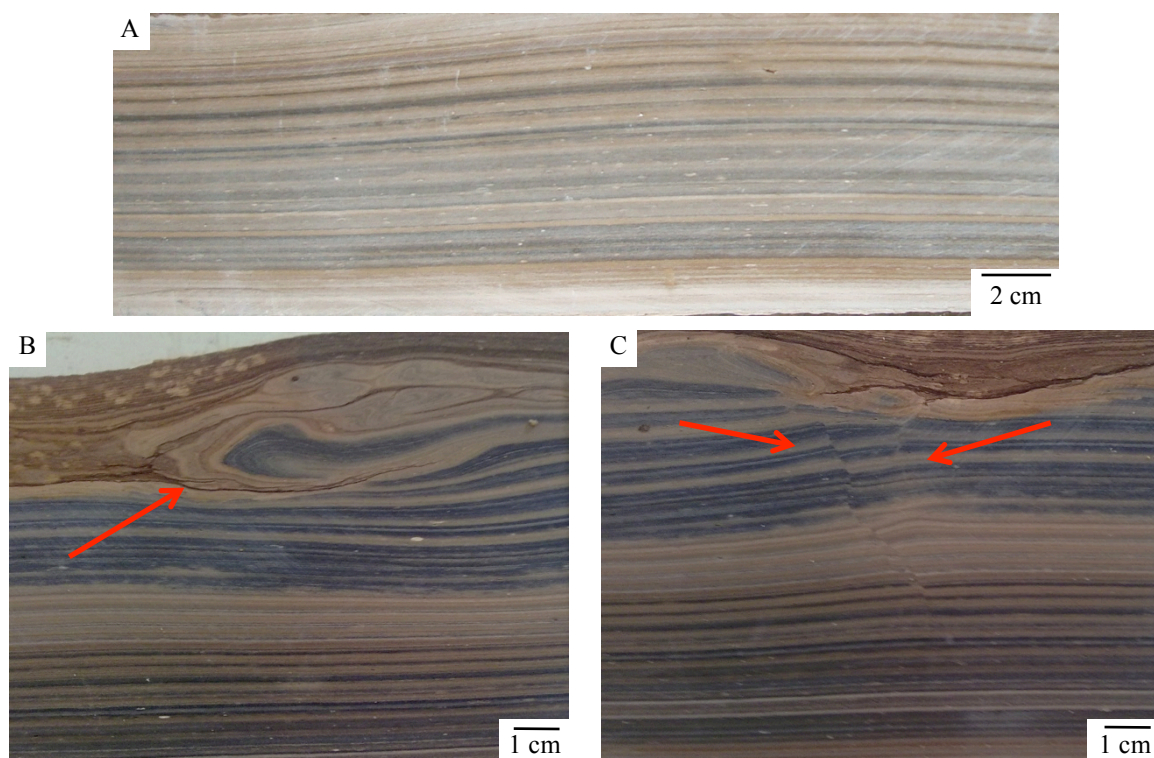
Foram estudados dois níveis de calcários na Bacia do Araripe (amostras A1 e A2). Estes, segundo a proposta da classificação de Grabau (1960) são classificadas como calcilitos laminados. Macroscopicamente apresentam lâminas milimétricas (aproximadamente 2 mm nas bandas escuras e 5 mm nas bandas claras). As alternâncias de bandas são marcadas pela coloração creme claro, amarelo, cinza claro e marrom claro. A amostra A1 apresenta estrutura de laminação plano-paralela (Figura 5.9) e a amostra A2 apresenta estrutura plano-paralela com ondulações (Figura 5.10-A). Além da laminação, pode apresentar estruturas internas de escorregamento (*slump*) e microfalhas (Figura 5.10-B e C).

**Figura 5.9** – Calcário laminado A1 da Bacia do Araripe.



**Legenda:** Calcário com laminação dada pela alternância entre bandas claras e escuras. As bandas escuras se caracterizam pela maior concentração de minerais opacos.

**Figura 5.10** – Calcário laminado A2 da Bacia do Araripe.



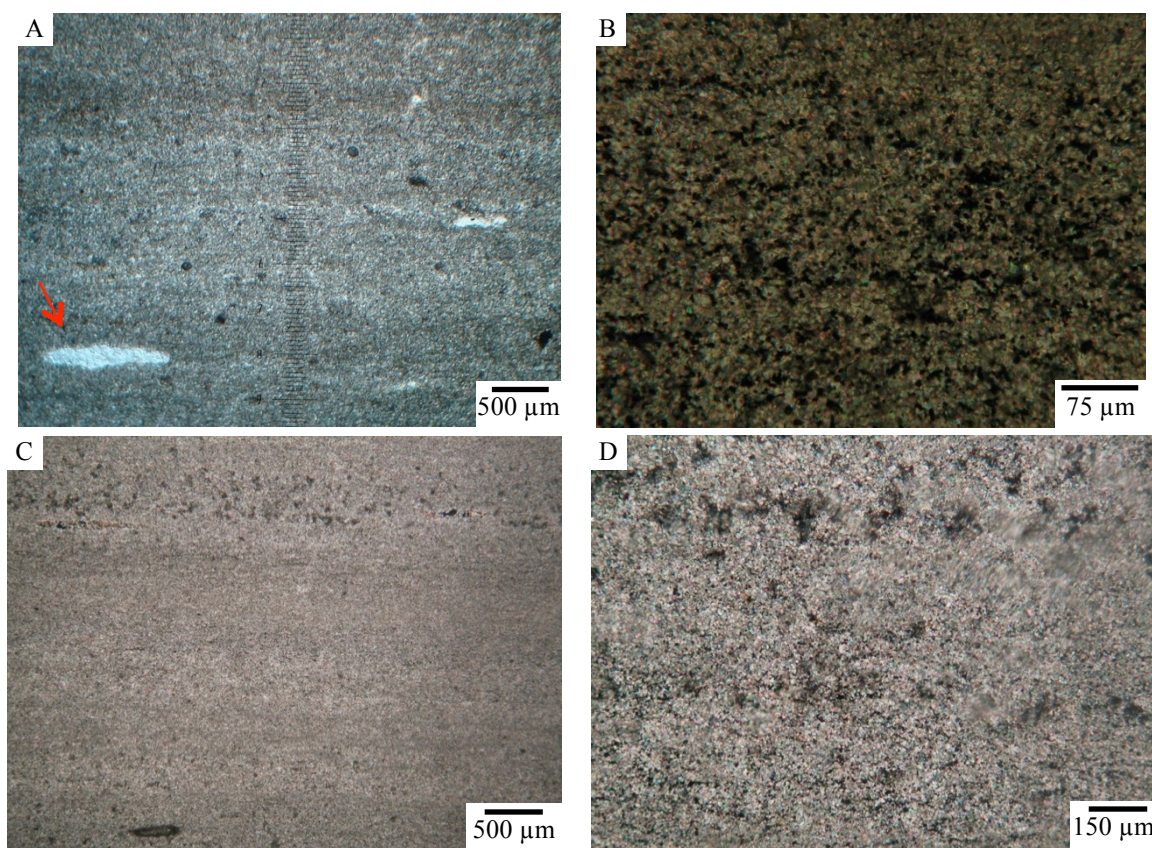
**Legenda:** (A) laminação plano-paralela ondulada; (B) estruturas internas de escorregamento (*slump*); (C) microfalhas normal com rejeito centimétrico.

Quando observadas em microscópio as amostras A1 e A2 possuem texturas micríticas a microcristalinas. As principais diferenças petrográficas entre as laminações se caracterizam por diferenças texturais dos componentes calcíticos e pela maior concentração de minerais opacos nas bandas escuras. As bandas escuras apresentam contatos entre os minerais opacos mais engrenados entre si, aumentando a resistência dessas camadas (Figura 5.11). Nas bandas claras, os cristais microespáticos apresentam textura em mosaico, com contatos retilíneos, e com tendência de rearranjo dos cristais de forma perpendicular à laminação. Na amostra A1 são encontradas lentes alongadas preenchidas por calcita espática (com dimensões médias 0,2 mm de largura e 1 mm de comprimento) em proporção menor que 5% e com granulação média de 0,02 a 0,10 mm.

Conforme a classificação de Folk (1959, 1962) a amostra A1 representa um micrito. Segundo a proposta de Scholle e Ulmer-scholle (2003) apresenta porosidade muito baixa (< 5%) do tipo primária/intergranular. O grau de empacotamento é avaliado como disperso seguindo a proposta de Holz e Simões (2002), a qual classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz.



**Figura 5.11** – Fotomicrografias das amostras A1 e A2 da Bacia do Araripe (nicóis cruzados).



**Legenda:** (A) fotomicrografia da amostra A1, laminação plano-paralela e lentes alongadas preenchidas por calcita espática; (B) fotomicrografia da amostra A1, bandas escuras apresentando contatos dos minerais opacos mais engrenados entre si; (C) fotomicrografia da amostra A2, laminação destacadas pelo acumulo de minerais opacos; (D) fotomicrografia da amostra A2 mostrando o contato entre as bandas escuras e claras.

**Tabela 5.1** – Síntese das características petrográficas dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri.

		Bacia Potiguar			Bacia do Araripe		
		Mont Charmot			(Pedra Cariri)		
		P1	P2	P3	A1	A2	
Textura	Estrutura	leve anisotropia	leve anisotropia	leve anisotropia	laminações plano-paralelas	laminações plano-paralelas com microfalhas	
	Empacotamento	denso/disperso	denso	frouxo	disperso	disperso	
	Grãos (%)	20	65	25	5	2	
	Matriz (%)	70	25	67	92	95	
	Cimento (%)	5	5	5	-	-	
	Poros(%)	5	5	3	2	2	
Composição	Matriz	micritica	micritica	micritica, com recristalização	micrítica a microcristalina	micrítica a microcristalina	
	Cimento	calcítico	calcítico com mosaico	calcítico microcristalino	-	-	
	Grãos	Bioclastos (%)	5	60	10	95	95
		Pellets (%)	15	15	30	-	-
		Oolitos (%)	-	20	20	-	-
		Intraclasto (%)	75	5	40	5	5
	Fratura	preenchidas por calcita (pervasividade 0,02 a 10 cm)	-	preenchidas por calcita (pervasividade 0,02 a 10 cm)	-	-	
Porosidade	Primária / Intergranular	Secundária / Intragranular	Primária / Intergranular	Primária / intergranular	Primária / intergranular		
Observações	<i>Vugs</i> com preenchimento de cristais de calcita (2 cm)	-	<i>Vugs</i> com preenchimento de cristais de calcita (3 cm)	-	-		
Classificação	Grabau, (1960)	Calclutito	Calclutito	Calclutito	Calclutito laminados	Calclutito laminados	
	Folk (1959, 1962)	Biopelasparito	Biomicrita	Micrito com bioclastos	Micrita com fósseis	Micrita	

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

O presente capítulo expõe e discute os resultados dos ensaios físico-mecânicos fornecidos pelos calcários ornamentais e para revestimento das Bacias Potiguar e Araripe.

Conforme expresso no capítulo materiais e métodos foram utilizados cinco diferentes amostras de calcários, três delas conhecidas comercialmente como Mont Charmot, provenientes de diferentes níveis de uma mesma frente de lavra da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar (amostras P1; P2 e P3), e duas amostras conhecidas como Pedra Cariri provenientes de dois níveis de uma frente de lavra no interior do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe (amostras A1 e A2).

Os ensaios físicos-mecânicos incluíram a determinação dos índices físicos, determinação da resistência ao desgaste abrasivo, compressão uniaxial, flexões pelos métodos 3 e 4 pontos e avaliação das velocidades das ondas ultrassônicas. Os resultados tiveram por objetivo a obtenção de informações necessárias para a avaliação do comportamento destes calcários frente às solicitações a que estarão sujeitos quando em uso e subsidiar uma correta utilização das referidas rochas como materiais para revestimento em obras civis.

Na medida do possível os resultados físico-mecânicos obtidos são correlacionados com as respectivas propriedades petrográficas dos calcários estudados visando o melhor entendimento da influência dos aspectos mineralógicos, texturais e estruturais no comportamento tecnológico dos referidos calcários, o que poderá fornecer subsídios para futuras aplicações das propriedades petrográficas na avaliação preliminar de determinadas características físico-mecânicas de rochas carbonáticas destinadas a revestimentos em obras civis.

A Tabela 6.1 reúne uma síntese dos resultados físicos e mecânicos médios fornecidos pelos calcários estudados e os valores referência da norma ASTM C 568 (ASTM, 2010) empregados para se definir os tipos de calcários quanto à baixa, média ou alta densidade de acordo com as respectivas densidade aparente, absorção de água, compressão uniaxial e módulo de ruptura para este grupo de rochas. Observa-se pela comparação dos resultados obtidos com os da referida norma que os calcários “Mont Charmot” (P1, P2 e P3) da Bacia Potiguar apresentaram valores que os classificam como calcários de alta densidade. Já os calcários “Pedra Cariri” (A1 e A2) da Bacia do Araripe apresentam valores de absorção de água, compressão uniaxial e módulo de ruptura que os definem como calcários de alta densidade, mas valores de densidade aparente (amostra A1 com  $2.538 \text{ kg/m}^3$  e amostra A2 com  $2.504 \text{ kg/m}^3$ ) abaixo da referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010) para calcários de alta

densidade ( $\geq 2.560 \text{ kg/m}^3$ ). Entretanto, foram definidos como calcários de alta densidade pelo fato dos mesmos apresentarem densidades próximas às de referência para esta categoria de calcário, além de exibirem demais valores de referência (absorção de água, compressão uniaxial e módulo de ruptura) que melhor se adaptam aos limites definidos para calcários de alta densidade.

**Tabela 6.1** - Valores referência da norma ASTM C 568 (ASTM, 2010) que definem calcários de baixa, média e alta densidades e valores médios dos calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2).

Tipo de calcário		Densidade Aparente ( $\text{kg/m}^3$ )	Absorção de água (%)	Compressão uniaxial (Mpa)	Módulo de ruptura (Mpa)	Flexão em 4 pontos (Mpa)
ASTM (C 568)	baixa densidade	$\geq 1.760$	$\leq 12$	$\geq 12$	$\geq 2,9$	n.e.
	média densidade	$\geq 2.160$	$\leq 7,5$	$\geq 28$	$\geq 3,4$	n.e.
	alta densidade	$\geq 2.560$	$\leq 3$	$\geq 55$	$\geq 5,9$	n.e.
Bacia Potiguar (Mont Charmot)	P1	2.608	1,3	111,31	11,10	9,43
	P2	2.618	1,1	138,57	17,10	14,21
	P3	2.648	0,5	98,57	11,60	8,28
Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	A1	2.538	1,2	78,72	26,00	13,10
	A2	2.504	2,3	125,89	22,70	20,52

## 6.1 ÍNDICES FÍSICOS

Os índices físicos obtidos em conformidade com a norma ABNT NBR 15845 - anexo B (ABNT, 2010) compreendem a densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Os resultados médios para os índices físicos fornecidos pelos calcários, bem como os respectivos valores de referência considerados pela norma ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, encontram-se reunidos na Tabela 6.2, sendo que as planilhas com os resultados completos estão no Apêndice A. A Figura 6.1 trás a representação gráfica dos resultados médios dos índices físicos dos calcários estudados.

Conforme acima comentado, com exceção das densidades das amostras dos calcários Cariri da Bacia do Araripe que se situam pouco abaixo dos  $2.560 \text{ kg/m}^3$ , as densidades das amostras *Mont Charmot* da Bacia Potiguar e absorção de água de todas as amostras dos calcários estudados se situam no grupo dos calcários de alta densidade.

**Tabela 6.2** - Resultados médios dos índices físicos para os calcários Mont Charmot (P1; P2; P3) e Pedra Cariri (A1; A2) e valores de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010).

	Bacia Potiguar (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C568)
	P1	P2	P3	A1	A2	Alta Densidade
Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2.608	2.618	2.648	2.538	2.504	≥ 2.560
Máximo	2618	2627	2658	2583	2603	n.e.
Mínimo	2593	2597	2631	2469	2255	
s	7	8	11	44	148	
δ	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	
Porosidade Aparente (%)	3,4	2,8	1,3	3,0	5,4	n.e.
Máximo	4,0	3,4	1,9	4,1	13,2	n.e.
Mínimo	3,1	2,6	1,0	1,9	2,6	
s	0,2	0,2	0,4	0,9	4,3	
δ	0,1	0,1	0,3	0,3	0,8	
Absorção de Água (%)	1,3	1,1	0,5	1,2	2,3	≤ 3
Máximo	1,5	1,3	0,7	1,7	5,9	n.e.
Mínimo	1,2	1,0	0,4	0,7	1,0	
s	0,1	0,1	0,1	0,4	2,0	
δ	0,1	0,1	0,3	0,3	0,9	

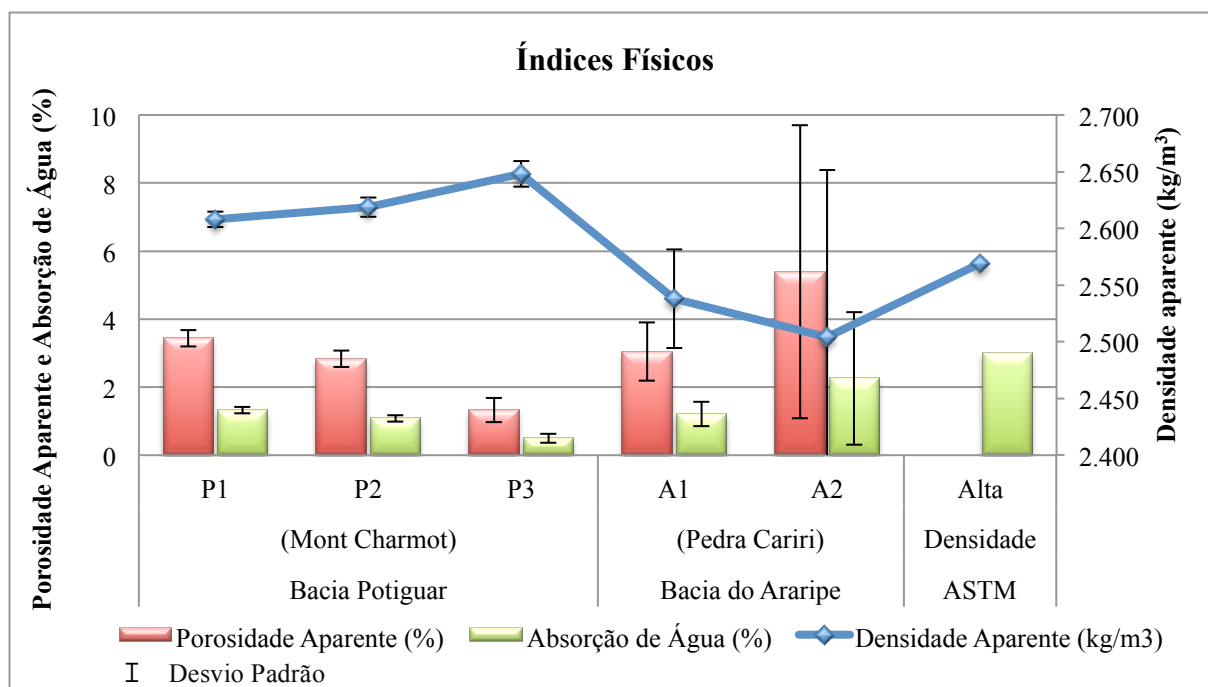
\*amostragem = 10 corpos de prova para cada amostra; s - desvio padrão; δ - coeficiente de variação; n.e. - não especificado

Destaca-se que os valores dos índices físicos (densidade; porosidade; absorção de água) são inter-relacionados. Por exemplo, quanto menor a densidade, tanto maior se pode estimar o volume de espaços vazios existentes na rocha. Sendo maior o volume de espaços vazios, maior será a porosidade aparente e, possivelmente a porosidade efetiva (aberta). Quanto maior a porosidade aberta, que traduz a existência de poros e/ou cavidades intercomunicantes, maior será a absorção de água esperada para a rocha e provavelmente menor a sua resistência (BECERRA, 2009). Assim, o valor da densidade aparente é diretamente influenciada pela maior ou menor absorção d'água da rocha e constitui aspecto importante na especificação da rocha como material para revestimento em obras civis.

Comparativamente as amostras da Bacia do Araripe apresentam as menores densidades e conseqüentemente maiores valores relativos de porosidade e de absorção de água (Tabela 6.2; Fig. 6.1). Os principais fatores considerados como responsáveis pela menor densidade estariam relacionados à menor compactação destes calcários em relação aos da

Bacia Potiguar, nitidamente mais maciços, e pela estrutura finamente laminada caracterizada por diferenças na composição mineralógica entre os microleitos o que induz a planos de descontinuidades físicas responsáveis pela menor compactidade da rocha. No caso das amostras A2, do nível estratigráfico inferior, as menores densidades (média de  $2.504 \text{ kg/m}^3$ ) estariam, ainda, relacionadas à presença de estruturas laminadas onduladas com frequentes feições de estruturas internas de escorregamento (*slump*) com dobras fechadas, isoclinais, além de planos de microfalhas, que conduzem a planos interestratigráficos semiabertos com preenchimentos de óxidos e hidróxidos de ferro (Figuras 5.10A, B, C; capítulo 5 - Caracterização Petrográfica). A heterogeneidade estrutural das amostras devida a laminação plano-paralela se reflete no maior desvio padrão do conjunto de corpos de prova em relação aos desvios padrão dos conjuntos de amostras da Bacia Potiguar utilizados na determinação da densidade, respectivamente de 44 para o conjunto de corpos de prova da amostra A1 e 148 para o conjunto da amostra A2, e correspondentes coeficientes de variação com 2% para o conjunto A1 e 6% para o conjunto A2. Este último conjunto, com valores bem mais elevados, refletiria a maior diversidade estrutural interna dos corpos de prova como ondulações da laminação composicional, planos de microfalhas e estruturas de escorregamentos com dobras isoclinais que induzem a certo relaxamento entre os planos de microleitos e desenvolvimento de microfissuras abertas e preenchidas por óxidos/hidróxidos de ferro.

**Figura 6.1** - Representação gráfica dos resultados médios dos índices físicos.





Da mesma forma, as maiores porosidade (5,4%) e absorção de água (2,3%) apresentado pelo conjunto de corpos de prova da amostra A2 em relação ao conjunto de corpos de prova da amostra A1 (3% para a porosidade e 1,2% para a absorção de água) é consequência da maior heterogeneidade estrutural interna do primeiro conjunto devidas a ondulações da estratificação plano-paralela, presença de microfalhas e microfissuras abertas com preenchimentos e estruturas de escorregamentos (*slump*) caracterizadas por dobras fechadas e abertas que facilitam a infiltração e percolação da água. Esta heterogeneidade também se reflete no maior desvio padrão e coeficientes de variação do conjunto de corpos de prova da amostra A2 (coeficientes de variação de 80% para a porosidade e 90% para a absorção de água) em relação ao conjunto de corpos de prova da amostra A1 com coeficientes de variação de 3% para a porosidade e para a absorção de água.

As maiores densidades apresentadas pelos calcários da Bacia Potiguar devem-se as suas estruturas maciças a levemente anisotrópicas e, principalmente, pelas texturas microcristalinas compactas, dos tipos calcilitos com porosidades relativamente baixas.

Entre as amostras (P1, P2 e P3) da Bacia Potiguar (Tabela 6.2; Figura 6.1), o nível P1 apresenta a menor densidade  $2.608 \text{ kg/m}^3$ , as maiores porosidade e absorção de água, respectivamente 3,4% e 1,3%, enquanto o nível P3 apresenta o maior valor de densidade  $2.648 \text{ kg/m}^3$  e menores valores de porosidade aparente e absorção de água 1,3% e 0,5%. O nível P2 apresenta valores intermediários entre os dois outros conjuntos de amostras, respectivamente com densidade média  $2.618 \text{ kg/m}^3$ , porosidade de 2,8% e absorção de água de 0,5%. As variações nos valores destes parâmetros físicos entre os referidos conjuntos de amostras estão relacionadas à diferenças nas granulações gerais, heterogeneidades texturais/estruturais internas dadas pela presença ou não de concentrações granulares calcíticas, relações entre cimento/teor e tipo de fósseis/intraclastos dos calcários, densidade de *vugs* e de microfissuras exibidas pelas variedades de calcários dos diferentes níveis.

Assim, a maior densidade e as menores porosidade e absorção de água das amostras do nível P3 deve-se a granulação extremamente fina/densa deste calcário, com matriz micrítica com recristalizações, contendo cerca de 15% de lentes de cristais de calcita com dimensões e granulações bem menores (lentes com espessuras entre 0,2 a 2 cm e extensões entre 0,5 a 6 cm, com granulação entre 0,5 e 2 mm) que às presentes nos calcários do nível P1 que exibem dimensões milimétricas a poucos centímetros (lentes com largura entre 0,5 a 3 mm e comprimento entre 1 a 4 cm, predominantemente equigranulares com granulação entre 0,5 e 2 cm). Entretanto, destaca-se que apesar das menores porosidade e absorção de água média apresentada pelo calcário do nível P3 se caracterizam por elevadíssimo coeficiente de

variação do conjunto de corpos de prova utilizado na determinação da porosidade (coeficiente de variação de 30%) e da absorção de água (coeficiente de variação igualmente de 30%), o que se relaciona a elevada heterogeneidade textural/estrutural do referido calcário devidas a existência de feições de dissolução preenchidas por cristais de calcita e esparsos geodos irregulares com até 2 cm de extensão (Figura 5.2C - capítulo 5).

As amostras de calcário do nível P2 apresenta granulação intermediária entre os calcários dos outros dois níveis, significativamente mais fina que a do calcário do nível P1, com uma matriz homogênea micrítica de granulação muito fina ( $< 0,063$  mm). Os calcários do nível P2 não apresentam concentrações de calcita como encontrado nos níveis P1 e P3.

Apesar da granulação maior dos calcários dos níveis P1 e P2, se caracterizam por uma homogeneidade textural/estrutural mais evidente que o exibido pelo calcário P3, o que é corroborado pelo menor coeficiente de variação para o conjunto de corpos de prova dos mesmos ao redor de 10% tanto para a porosidade quanto para a absorção de água.

## 6.2 DESGASTE ABRASIVO AMSLER

A resistência ao desgaste abrasivo de uma rocha está diretamente relacionada à sua composição mineralógica, granulação, arranjo e coesão de seus minerais e porosidade do material rochoso. Portanto, uma rocha será tanto mais desgastável ou abrasível quanto menor for a sua dureza, que por sua vez está relacionada com a composição mineral (FRAZÃO, 2002). A resistência à abrasão é um indicador de qualidade importante para rochas aplicadas como revestimento em áreas de tráfego intenso.

Os testes de abrasão *Amsler* foram realizados em superfícies perpendiculares e paralelas à estratificação e executados de acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR 12042 (ABNT, 1992a). Os resultados médios da resistência à abrasão *Amsler* fornecidos pelos calcários estão reunidos na Tabela 6.3 e representados graficamente na Figura 6.2. As planilhas com os resultados completos no Apêndice B.

Os resultados dos desgastes abrasivos *Amsler* após o percurso total de 1.000 metros (Tabela 6.3; Figura 6.2) revelam que na média os calcários “Mont Charmot” da Bacia Potiguar, com valores de desgastes entre 2,03 e 2,58 mm, são mais resistentes que os calcários “Pedra Cariri” da Bacia do Araripe, os quais exibem desgastes entre 2,06 e 4,07 mm. A menor resistência abrasiva da Pedra Cariri estaria relacionada à estrutura finamente laminada desses calcários (entre 1 e 3mm), caracterizados por elevada repetitividade de planos de descontinuidades física que além de conduzirem a maior porosidade induz à menor

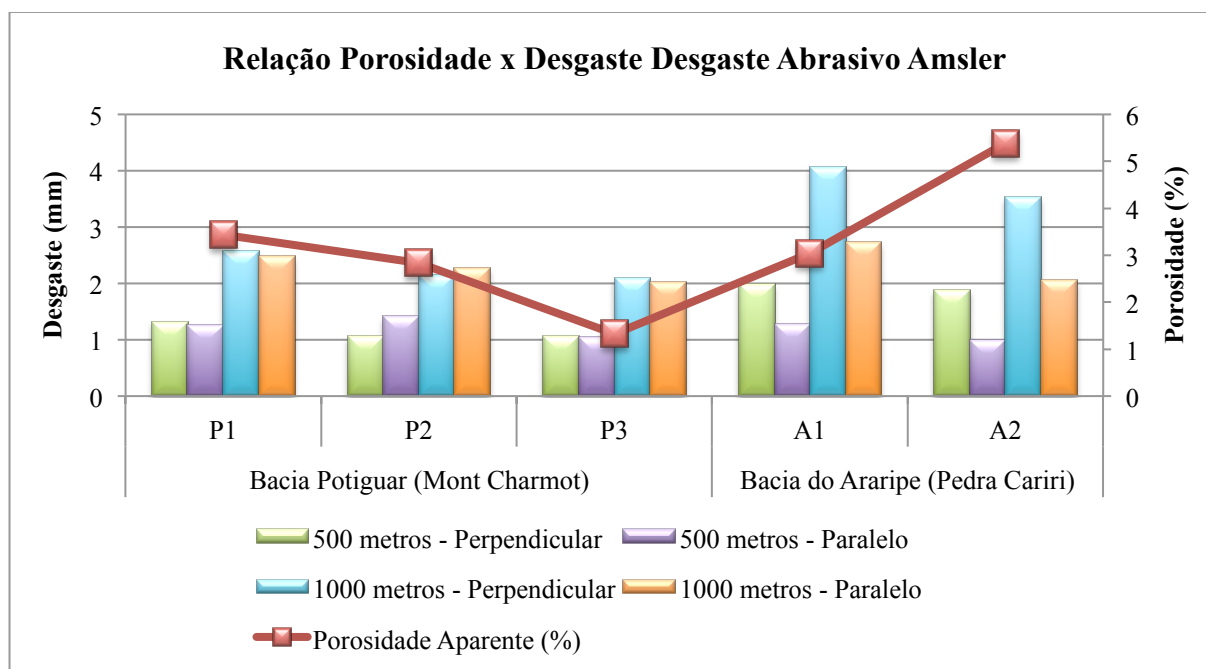
compacidade destes calcários em relação aos tipos Mont Charmot de aspecto geral maciço.

**Tabela 6.3** – Resultados médios dos desgastes abrasivos Amsler para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) após ensaios simulando percurso de 500 m e 1.000 m nas direções perpendiculares e paralelas à estratificação.

		Superfície da placa submetida à abrasão	Bacia Potiguar (Mont Charmot)			Bacia Araripe (Pedra Cariri)	
			P1	P2	P3	A1	A2
Resistência ao desgaste abrasivo Amsler (mm)	Ciclo 500 metros	Perpendicular	1,33	1,05	1,07	1,99	1,89
		Paralela	1,26	1,41	1,05	1,29	1,00
	Ciclo 1000 metros	Perpendicular	2,58	2,14	2,10	4,07	3,53
		Paralela	2,48	2,28	2,03	2,73	2,06

\*amostragem = 2 corpos de prova em cada direção.

**Figura 6.2** – Correlação entre resultados do desgaste abrasivo Amsler (percursos de 500 m e 1.000 m nas direções perpendicular e paralela à estratificação) e da porosidade aparente para as amostras estudadas.



Os resultados apresentados pelos calcários da Bacia Potiguar são bastante similares entre si, sendo que o do nível P1 exibe os maiores desgastes abrasivo (2,58 mm para a superfície perpendicular à estratificação e 2,48 mm para a paralela à estratificação) e do nível P3 os menores (2,10 mm e 2,03 mm, respectivamente para as superfícies perpendicular e

paralela), com os do nível P2 com valores intermediários de 2,14 mm para a superfície perpendicular à estratificação e 2,28 para a superfície paralela. Em termos gerais observa-se a existência de uma correlação direta entre os resultados de desgaste abrasivo e as respectivas porosidades dos calcários (Figura 6.2), o que estaria coerente com a redução da resistência dos mesmos. Por outro lado, também há de se considerar que a granulação destes calcários decresce da amostra P1 para a P3, além da maior heterogeneidade textural da primeira que se caracteriza pela presença de agregados de cristais de calcita que podem atingir alguns centímetros de extensão e granulação entre 0,5 e 2 cm; fatores estes que interferem significativamente na resistência à abrasão.

Destaca-se, também, que os calcários da Bacia Potiguar apresentaram desgastes muito similares nas direções perpendiculares e paralelos (Figura 6.2), enquanto que os calcários da Bacia do Araripe apresentam diferenças mais significativas entre as superfícies perpendiculares e paralelas testadas. Estas diferenças no comportamento dos conjuntos de calcários das Bacias Potiguar e do Araripe se devem à baixa anisotropia estrutural dos primeiros e à pronunciada laminação dos calcários da Bacia do Araripe.

A menor resistência ao desgaste abrasivo, na casa dos 40%, apresentada pelas superfícies perpendiculares em relação às superfícies paralelas dos conjuntos de calcários da Bacia do Araripe (Tabela 6.3; Figura 6.2), estaria relacionada ao serrado sistema de superfícies planares da laminação estratigráfica que sob ação do atrito favorecem a liberação de micropartículas minerais com conseqüente aceleração no processo de desagregação da superfície da rocha.

### **6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL**

Os valores fornecidos pelo ensaio de compressão uniaxial oferecem uma indicação da resistência das rochas ao cisalhamento quando submetidas à pressão de carga compressiva através da determinação do valor máximo de tensão que a rocha suporta antes de sua ruptura. A resistência à compressão uniaxial representa o valor da carga máxima suportada pelo corpo de prova durante o teste, dividido pela seção onde foi aplicada a carga, e corresponde a um importante parâmetro de qualidade dos materiais pétreos, principalmente quando utilizados como elementos estruturais.

Conforme expresso no capítulo de materiais e métodos, os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados com a aplicação de esforços perpendiculares e paralelos aos planos de estratificação das rochas em corpos de prova sob condições secas e saturadas

em água e executados de acordo com procedimentos ditados pela norma ABNT NBR 12767 (ABNT, 1992b), que determina um mínimo de seis corpos de prova no caso de rochas anisotrópicas, sendo três deles com esforços aplicados em superfícies paralelas e três em superfícies normais à estruturação planar da rocha. Destaca-se que para evitar possível degradação dos corpos de prova a secagem dos mesmos foram em estufa ventilada a 70 °C, e não a 110 °C conforme indicação da referida norma. Também destacamos que os corpos de prova dos calcários do nível A2 nas condições saturadas apresentaram problemas durante a realização dos ensaios, provocadas pelo rompimento dos mesmos sob baixa pressão de carga, motivo pela qual seus resultados não foram considerados.

Também foram executados ensaios de resistência ao congelamento e degelo conjugados à compressão uniaxial com a finalidade de se avaliar o possível coeficiente de enfraquecimento **K** dos calcários analisados. Os ensaios foram executados segundo diretrizes da norma ABNT NBR 12769 (ABNT 1992c), com secagens dos corpos de prova em estufa ventilada a 70 °C, e não a 110 °C conforme indicado pela referida norma.

Os resultados médios da resistência à compressão uniaxial fornecidos pelos calcários das Bacias Potiguar e do Araripe estão listados na Tabela 6.4 e suas correspondentes representações gráficas representadas nas Figuras 6.3 e 6.4, onde os referidos resultados são correlacionados com as respectivas propagação de ondas ultrassônicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios. As planilhas com os resultados completos dos ensaios, e respectivos cálculos, estão incluídas no Anexo C.

Os valores das resistências à compressão uniaxial (Tabela 6.4) apresentados pelos calcários estudados se situam acima do valor mínimo de 55 MPa estabelecido pela norma ASTM C 568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, exceto para a amostra do nível A1 da Bacia do Araripe que após congelamento e degelo se situou pouco abaixo (44,6 MPa).

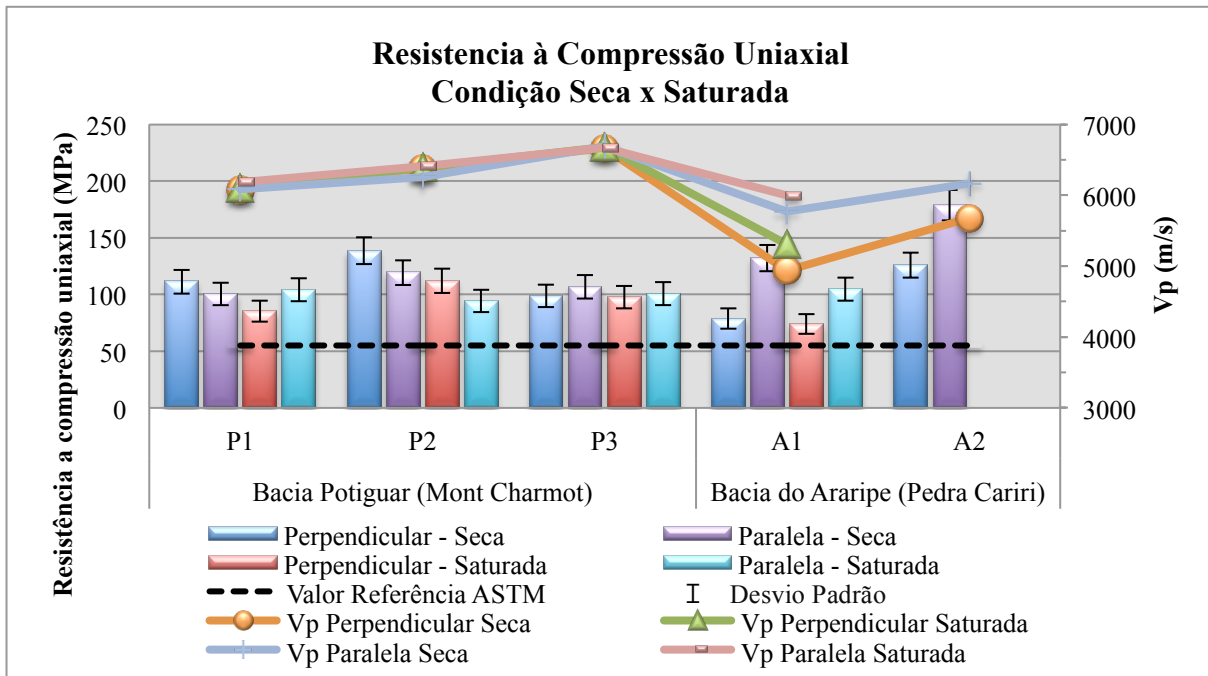
A análise das Figuras 6.3 e 6.4 evidencia que as amostras dos calcários P1, P2 e P3 da Bacia Potiguar apresentam maior homogeneidade dos resultados da resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova nas condições secas, saturadas e congelamento/degelo, tanto para esforços aplicados perpendicularmente quanto paralelamente à estratificação, que os resultados fornecidos pelos calcários A1 e A2 da Bacia do Araripe, principalmente em relação aos esforços aplicados nos sentidos paralelos e perpendiculares à estratificação. Este comportamento apresentado pelos calcários refletem as respectivas diferenças estruturais dos mesmos, ou seja, praticamente maciços para os primeiros e finamente laminados para os calcários A1 e A2 da Bacia do Araripe.

**Tabela 6.4** - Resultados médios da resistência à compressão uniaxial para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) e valor de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010).

Condição	Direção da aplicação dos esforços		Bacia Potiguar (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C568)
			P1	P2	P3	A1	A2	Alta Densidade
Seca n = 3	Perpendicular	$\sigma_c$ (MPa)	111,31	138,57	98,57	78,72	125,89	≥55
		s	10,55	11,77	9,93	8,87	11,21	
		$\delta$	0,09	0,08	0,07	0,11	0,08	
		Vp (m/s)	6080	6387	6659	4937	5679	
	Paralela	$\sigma_c$ (MPa)	100,37	119,28	106,75	131,97	178,72	
		s	10,02	10,92	10,33	11,49	13,37	
		$\delta$	0,10	0,09	0,04	0,09	0,07	
		Vp (m/s)	6086	6260	6693	5770	6167	
Saturada n = 3	Perpendicular	$\sigma_c$ (MPa)	85,28	111,93	97,39	73,91	n.a.	
		s	9,23	10,58	9,87	8,60	n.a.	
		$\delta$	0,11	0,09	0,10	0,12	n.a.	
		Vp (m/s)	6090	6391	6684	5306	n.a.	
	R	0,77	0,81	0,99	0,94	n.a.		
	Paralela	$\sigma_c$ (MPa)	104,28	94,18	100,66	104,58	n.a.	
		s	10,21	9,70	10,03	10,23	n.a.	
		$\delta$	0,10	0,10	0,10	0,10	n.a.	
Vp (m/s)		6188	6405	6674	5998	n.a.		
Congelamento e Degelo n = 5	Perpendicular	$\sigma_c$ (MPa)	103,05	108,94	89,13	44,63	103,93	
		s	10,15	10,44	9,44	6,68	10,19	
		$\delta$	0,10	0,10	0,11	0,15	0,10	
		Vp (m/s)	5972	6327	6447	4959	5844	
	K	0,93	0,79	0,90	0,57	0,83		
	Paralela	$\sigma_c$ (MPa)	114,02	118,63	98,92	92,99	117,23	
		s	10,68	10,89	9,95	9,64	10,83	
		$\delta$	0,09	0,08	0,10	0,10	0,09	
Vp (m/s)		5933	6322	6390	5698	6117		
K	1,14	0,99	0,93	0,70	0,66			

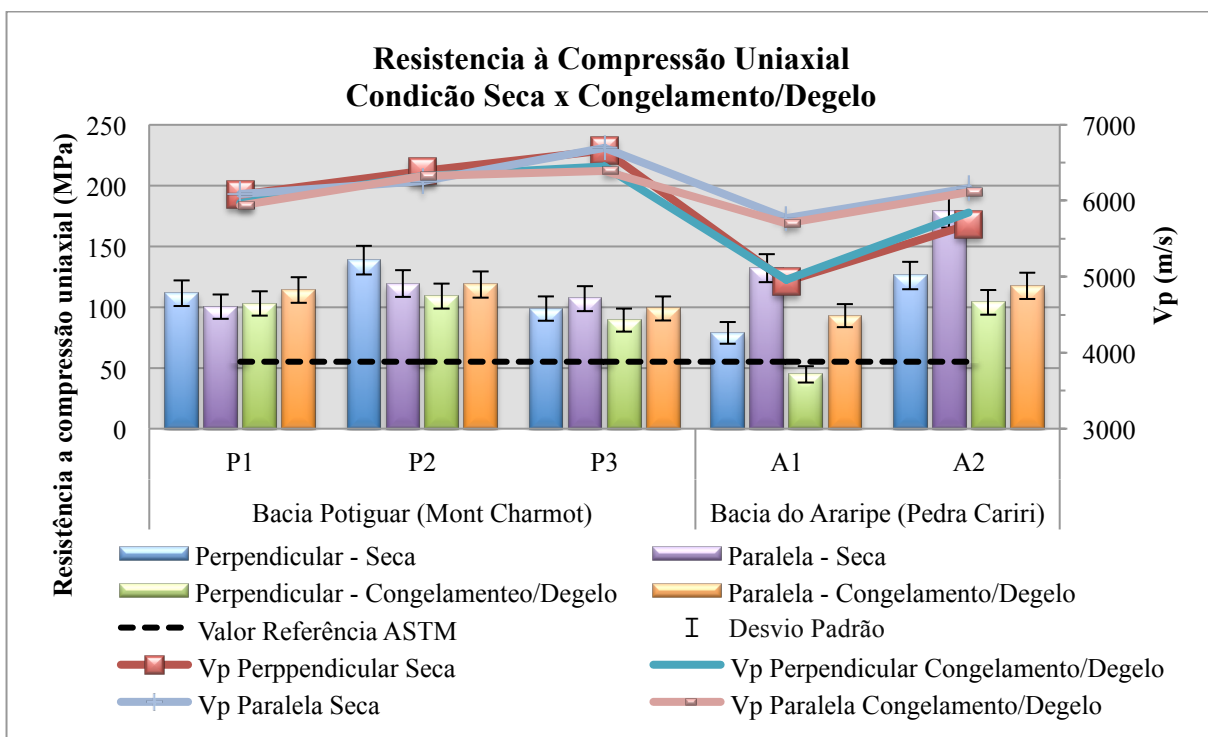
$\sigma_c$  (MPa) - resistência à compressão uniaxial; s - desvio padrão;  $\delta$  - coeficiente de variação; Vp - propagação de onda ultrassônica; R - coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K - coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo; n – número de corpos de prova; n.a. - não avaliado.

**Figura 6.3** - Correlações entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e saturadas em água.



Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais

**Figura 6.4** – Correlações entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para os calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e após 25 ciclos de congelamento e degelo.



Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais

Dentre os calcários da Bacia Potiguar, o do nível P2 apresenta na média resultados de resistências pouco superiores às apresentadas pelos outros dois calcários (níveis P1 e P3), tanto em relação às condições secas quanto saturadas (exceto para condição saturada com aplicação dos esforços paralelos à estrutura da rocha) e sob congelamento e degelo, no geral com maiores resistências sob esforços aplicados perpendicularmente à estruturação. Os maiores valores de resistência à compressão uniaxial do calcário P2 nas condições secas são de 138,57 MPa para esforços aplicados perpendicularmente à estrutura da rocha e 119,28 MPa para esforços no sentido paralelo à estrutura, com coeficientes de variação de 8% e 9%, respectivamente. O enfraquecimento hidráulico (R) foi ao redor de 20% e o coeficiente K após os 25 ciclos de congelamento/degelo foi de 21% para esforços aplicados no sentido normal à estratificação e de apenas 1% com esforços no sentido paralelo à estruturação da rocha (Tabela 6.4), cujos coeficientes de variação oscilaram entre 8% e 9% para os ensaios sob condições saturadas e de congelamento/degelo.

A resistência à compressão uniaxial pouco mais elevada para o calcário do nível P2 em relação aos dos níveis P1 e P3 da Bacia Potiguar, bem como a boa coerência entre os resultados sob as várias condições de realização dos ensaios, é reflexo de sua matriz micrítica e da maior homogeneidade textural e estrutural deste calcário, ou seja, microfosséis não orientados em escala manométrica e pela ausência de *vugs*, geodos e agregados de cristais de calcita presentes nos outros dois calcários e que influenciam na resistência mecânica da rocha.

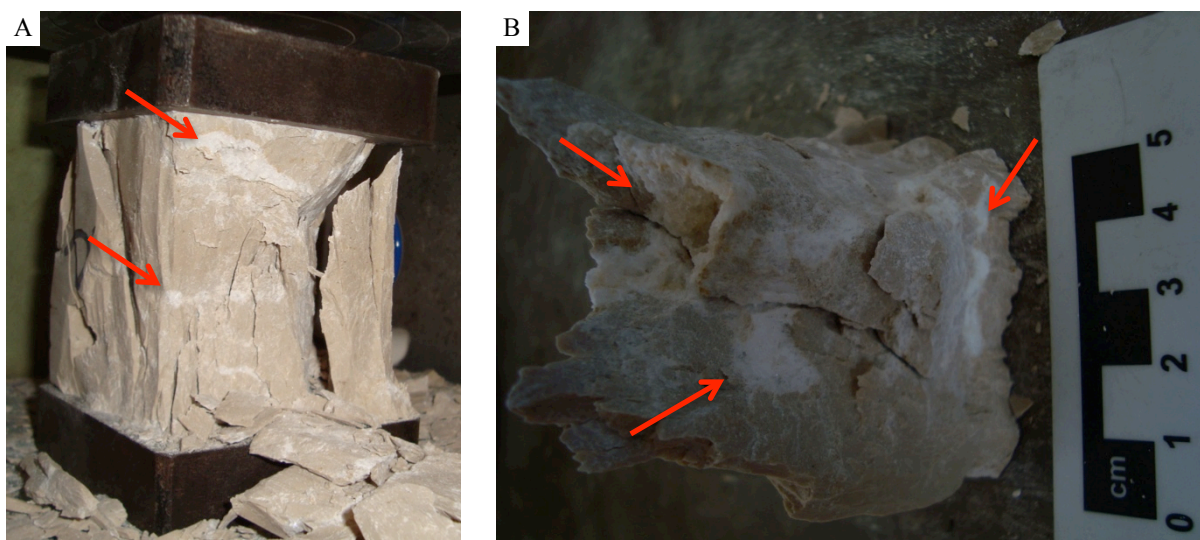
Os calcários dos níveis P1 e P3 apresentam maior oscilação dos valores de resistência à compressão uniaxial entre as várias condições de execução dos ensaios, ora com maior resistência segundo aplicação dos esforços no sentido normal ora paralela à estratificação das rochas, situação esta atribuída à maior heterogeneidade textural/estrutural destes calcários. Destaca-se, entretanto, que no geral esta variação entre os resultados médios da resistência à compressão, com ampla predominância de valores entre 111 MPa e acima de 97 MPa e apenas dois resultados com 85 MPa e 89 MPa, se situa dentro dos intervalos dos coeficientes de variação da dispersão das tensões de ruptura dos conjuntos de corpos-de-prova, com intervalo entre 4% e 11% (Tabela 6.4).

Esta oscilação dos valores de resistência à compressão uniaxial apresentada pelos calcários P1 e P2 poderia estar relacionada à representatividade dos corpos de prova utilizados nos ensaios tendo em vista que estes calcários se caracterizam pela presença de concentrações venulares de cristais de calcita com formatos, dimensões e granulações variadas, bem como de *vugs* preenchidos por calcita recristalizada, que no conjunto perfazem cerca de 10% a 15% do volume das rochas e se mostram heterogeneamente dispersas em meio a matriz micrítica



destes calcários. A presença destas feições venulares e dos *vugs* representam uma descontinuidade física na massa micrítica dos calcários, o que conduz ao desenvolvimento de superfícies e pontos de fraqueza no interior da rocha com conseqüente redução da resistência mecânica da rocha. As fotografias da Figura 6.5 registram a presença de superfícies e pontos de fraqueza em corpos de prova submetidos aos testes de compressão uniaxial.

**Figura 6.5** - Planos de fraqueza, *vugs* preenchidos por calcita, em corpo de prova após rompimento em ensaio de compressão uniaxial.

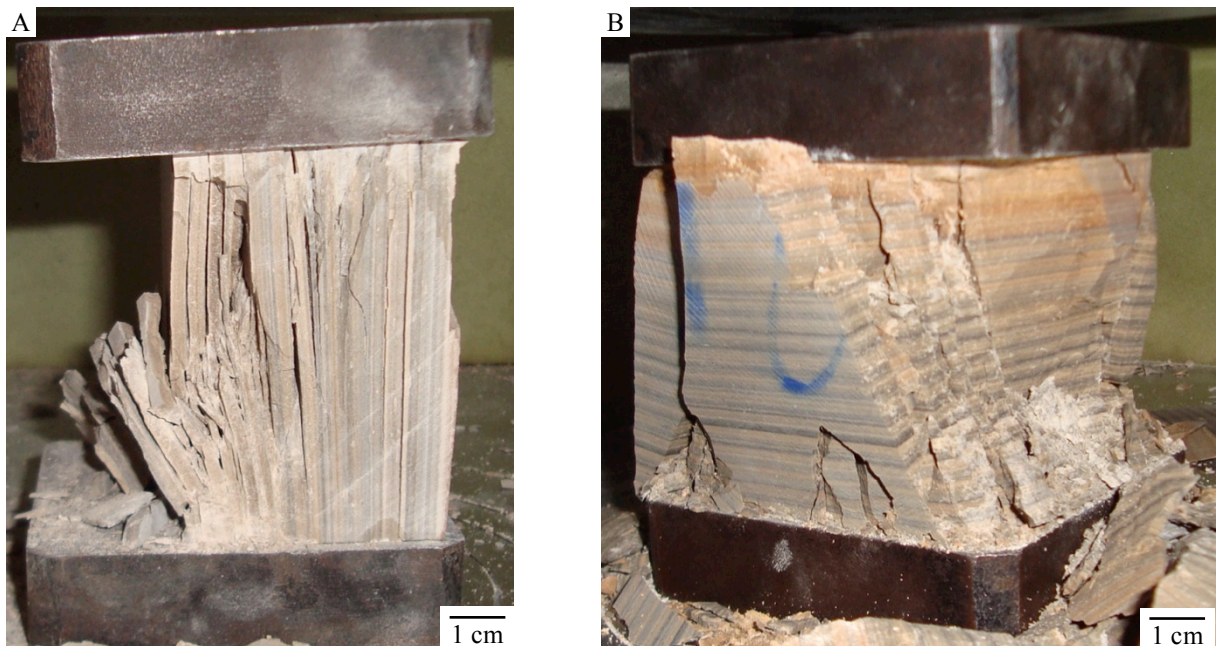


Os calcários da Bacia do Araripe apresentam, diferentemente do esperado, maior resistência à compressão uniaxial segundo aplicação dos esforços no sentido paralelo aos planos de estratificação das rochas em todas as condições de realização dos ensaios (Tabela 6.4; Figuras 6.3 e 6.4). Os resultados sob condições secas para a amostra A1 são de 131,97 MPa para aplicação dos esforços no sentido paralelo à estratificação da rocha contra 78,72 MPa para esforços normais à estratificação e no caso da amostra A2 de 178,72 MPa para a aplicação dos esforços no sentido paralelo à estratificação da rocha contra 125,89 MPa para esforços normais à estratificação. Destaca-se que a diferença nas resistências mecânicas nestes casos superam com boa margem os respectivos coeficientes de variação, os quais se situam entre 7% e 11%.

Este comportamento apresentado pelos referidos calcários poderia resultar, conforme observado pela fotografia da Figura 6.6-A, pelo efeito da separação (deslocamento) das finas laminações da estratificação ao invés da simples quebra da rocha (Figura 6.6-B), fato este que ocorre pela maior resistência das bandas escuras da laminação. Essas bandas escuras possuem os minerais melhores engrenados entre si e com o crescimento dos cristais ocorrendo na

direção perpendicular aos planos de laminações, que reforçam a estrutura e agem como se fossem “placas de ferro” suportando maior carga quando os esforços de compressão são aplicados no sentido paralelo aos planos de estratificação da rocha.

**Figura 6.6** - Diferentes formas de ruptura dos corpos de prova de acordo com a direção dos planos de laminações estratigráficas.



**Legenda:** (A) direção do esforço perpendicular a laminação, ruptura com separação (desplacamento) das finas laminações da estratificação; (B) direção do esforço paralelo a laminação, ruptura pela quebra da rocha.

No geral destaca-se que os valores de compressão uniaxial fornecidos pelos calcários são maiores no estado seco do que no saturado, o que era de se esperar, haja visto que a saturação pode provocar uma diminuição de energia sobre a superfície entre os grãos (BESSA, 2004) favorecendo o enfraquecimento da rocha. O nível P3 (perpendicular) apresentou o menor enfraquecimento hidráulico (1%) e os maiores enfraquecimentos ocorreram nos níveis P1 (perpendicular) e P2 (paralela), respectivamente com 23% e 21% (Tabela 6.4; Figura 6.3). O elevado enfraquecimento hidráulico desses níveis é explicado pela alta quantidade de fraturas presentes nos calcários do nível P1, alta quantidade de fósseis e o tipo de porosidade (secundária/intragranular) nos calcários do nível P2. No nível A1 o enfraquecimento hidráulico atuou de forma diferenciada para as duas direções, com 6% na condição perpendicular e 19% na paralela, resultado este atribuído ao efeito da saturação da água que facilita o escorregamento da massa rochosa ao longo dos planos de laminação pela diminuição de energia sobre a superfície entre as mesmas.

O coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento e degelo atuou de forma mais intensa nos calcários da Bacia do Araripe. O calcário do nível A1 apresentou o maior coeficiente de enfraquecimento K médio com 43% para esforços aplicados perpendicularmente à laminação da rocha e de 30% para esforços paralelos à laminação (Figura 6.4), com coeficientes de variação respectivamente de 15% e 10%. O calcário do nível A2 apresentou coeficiente de enfraquecimento K pouco menor, mas também elevado, com coeficiente K de 17% para esforços normais à laminação e de 34% para esforços paralelos à laminação, e coeficientes de variação de 10% e 9%, respectivamente. Esses resultados mostram que a fina laminação desses calcários, decorrentes de um empacotamento relativamente frouxo, contribuem para a maior degradação dos referidos calcários em ambientes úmidos.

As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais apresentadas pelos calcários (Tabela 6.4; Figuras 6.3 e 6.4) são elevadas, situadas entre 6.693 m/s e 4.937 m/s para corpos de prova em condições secas, sugerindo alto grau de integridade para estas rochas.

Observa-se pelas Figuras 6.3 e 6.4 que os calcários da Bacia Potiguar em condições secas apresentam velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas mais elevadas que a média apresentada pelos calcários da Bacia do Araripe. Este fato se deve ao aspecto mais compacto/cristalino dos primeiros em relação aos calcários laminados da segunda bacia sedimentar e, portanto, com menor compacidade, além da maior percentagem da porosidade destes últimos.

Embora os calcários da Bacia Potiguar apresentem, no geral, velocidades de propagação das ondas ultrassônicas pouco maiores no sentido paralelo à estruturação da rocha as diferenças das referidas propagações nos sentidos normais e paralelos à estruturação das rochas são bastante próximas entre si, mesmo nas diferentes condições dos corpos de prova (condições secas, saturadas e de congelamento/degelo), o que reflete o aspecto maciço a levemente estratificado destes calcários. Dentre os calcários da Bacia Potiguar, o calcário do nível P3 é o que apresenta as maiores velocidades médias das ondas ultrassônicas (Figuras 6.3 e 6.4), provavelmente em função de sua menor porosidade (Figura 6.1) e granulação nitidamente mais fina a densa em relação aos calcários P1 e P2.

Já, os calcários da Bacia do Araripe apresentam velocidades das ondas ultrassônicas significativamente maiores no sentido paralelo à estratificação das rochas (Figuras 6.3 e 6.4). Os corpos de prova em condições secas do calcário A1 apresentam propagação de ondas ultrassônicas de 5.770 m/s no sentido paralelo e de 4.937 no sentido normal à estratificação

(diferença de 833 m/s) e os corpos de prova do calcário A2 propagação de 6.167 m/s no sentido paralelo e 5.679 m/s no sentido normal à laminação (diferença de 488 m/s). As maiores velocidades das ondas ultrassônicas no sentido paralelo à laminação se devem ao maior entrelaçamento mineral ao longo das lâminas composicionais, ao passo que no sentido normal à estratificação as ondas ultrassônicas perdem velocidades ao atravessarem os diversos planos das laminações com diferenças composicionais, os quais representam planos de descontinuidades físicas.

As maiores velocidades de propagação das ondas ultrassônicas dos corpos de prova sob condições saturadas em relação aos corpos de prova sob condições secas para todos os tipos de calcários analisados (Tabela 6.4) estão coerentes na medida que os espaços vazios das rochas são preenchidos pela água, a qual exibe maior velocidade de propagação em relação a do ar deslocado por ação da absorção da água por capilaridade.

Por outro lado, a menor velocidade de propagação das ondas verificadas, por exemplo, para os corpos de prova dos calcários A1 e A2 após serem submetidos a 25 ciclos de congelamento e degelo em relação às propagações das ondas dos corpos de prova secos, mas sem passarem pelos procedimentos de congelamento/degelo (Tabela 6.4; Figura 6.4), também estão coerentes tendo em vista que os procedimentos de congelamento dos corpos de prova saturados em água à temperaturas negativas de aproximadamente 30 °C, seguidos pelo degelo à temperatura ambiente (na média 40 °C), conduzem a um certo fadigamento da rocha dada pela propagação e expansão das microfissuras existentes e dos planos das estruturas laminadas levando a um aumento da porosidade, e portanto com conseqüente redução da propagação das ondas.

#### **6.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM 3 PONTOS (MÓDULO DE RUPTURA)**

Os ensaios para a determinação da resistência ao módulo de ruptura foram executados para todas as variedades de calcários das Bacias Potiguar (níveis P1; P2; P3) e do Araripe (níveis A1; A2) com aplicação dos esforços apenas no sentido perpendicular à estratificação das rochas, a qual corresponde às superfícies de deslocamentos dos calcários e, portanto, a utilizada na exploração e na produção das placas para revestimentos. Os testes foram realizados em corpos de prova nas condições secas, saturadas e após ciclos de congelamento e degelo.

Os ensaios foram executados segundo diretrizes das normas ABNT NBR 12763 (ABNT, 1992c), utilizando-se corpos de prova com dimensões médias padrão

(100mm x 50mm x 30mm) sendo em número de três para os testes em condições secas e saturadas e entre 3 e 6 para os testes de congelamento e degelo. Os procedimentos de secagem dos corpos de prova foram em estufa ventilada à 70 °C e não à 110 °C como recomendado pela referida norma, no intuito de evitar fadigamentos durante os referidos processos.

Os resultados médios para as resistências à flexão por carregamento em 3 pontos fornecidos pelos calcários das Bacia Potiguar e do Araripe encontram-se relacionados na Tabela 6.5 e representados graficamente na Figura 6.7. Os resultados completos e respectivos cálculos encontram nas planilhas incluídas no Apêndice D.

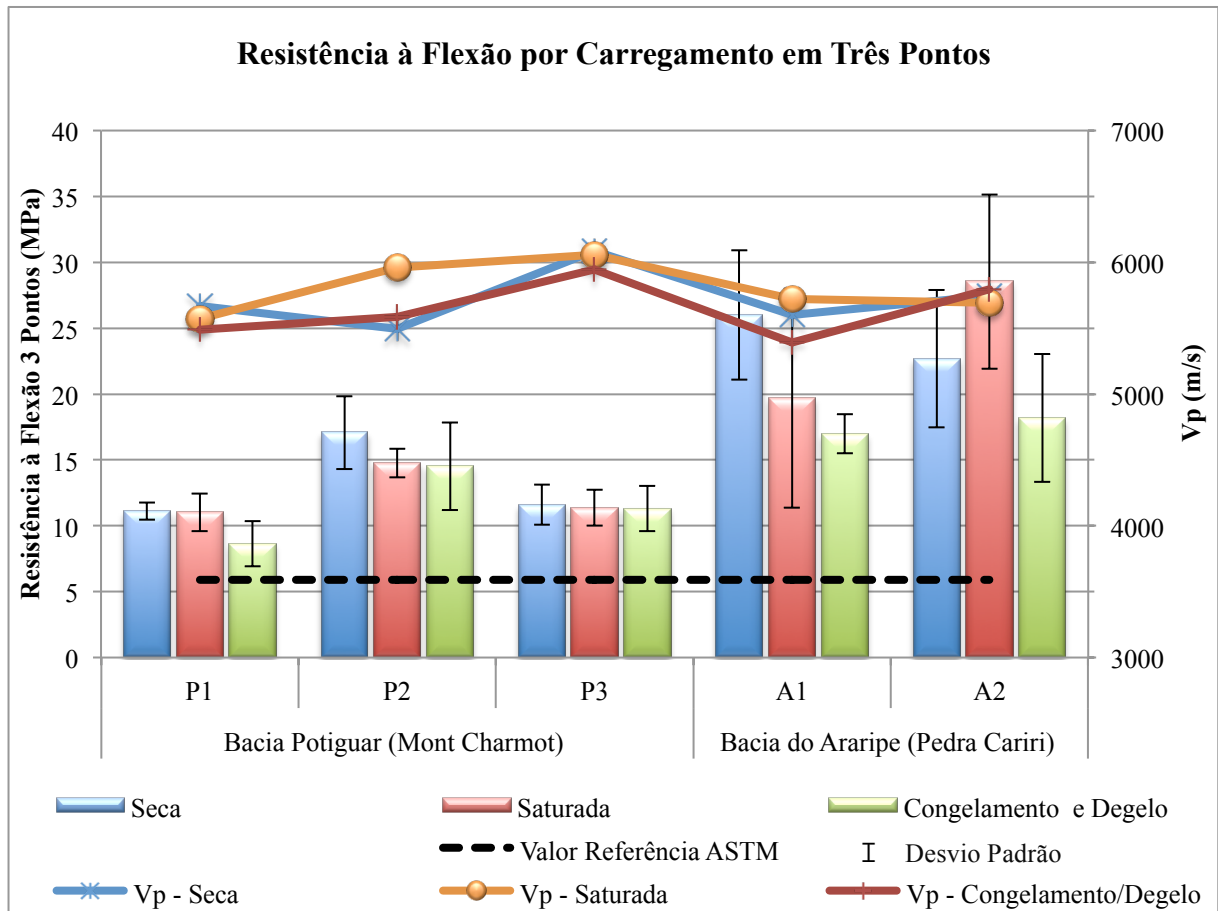
Os valores médios de resistência à flexão 3 pontos fornecidos pelos calcários (Tabela 6.5), principalmente nas condições secas, superam com larga margem o valor mínimo de 5,9 MPa para calcários de alta densidade estabelecido pela norma americana ASTM C 568 (ASTM, 2010), denotando boa resistência mecânica para estas rochas.

**Tabela 6.5** – Valores médios da resistência à flexão por carregamento em 3 pontos (módulo de ruptura) para os calcários Mont Charmot (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri (A1 e A2) e valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade.

Condição		Bacia Potiguar (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C586)
		P1	P2	P3	A1	A2	Alta Densidade
Seca n = 3	$\sigma_c$ (MPa)	11,12	17,07	11,61	26,01	22,69	$\geq 5,9$
	s	0,65	2,76	1,53	4,92	5,21	
	$\delta$	0,06	0,16	0,13	0,19	0,23	
	Vp (m/s)	5669	5495	6087	5600	5745	
Saturada n = 3	$\sigma_c$ (MPa)	11,02	14,77	11,37	19,69	28,55	
	S	1,42	1,09	1,36	8,32	6,63	
	$\delta$	0,13	0,07	0,12	0,42	0,23	
	Vp (m/s)	5573	5959	6059	5721	5693	
	R	0,99	0,87	0,98	0,76	1,26	
Congelamento e Degelo	$\sigma_c$ (MPa)	8,64	14,53	11,31	16,99	18,20	
	S	1,71	3,33	1,72	1,49	4,86	
	$\delta$	0,20	0,23	0,15	0,09	0,27	
	Vp (m/s)	5488	5587	5946	5391	5794	
	K	0,78	0,85	0,97	0,65	0,80	
	n	6	5	5	3	3	

$\sigma_c$  (MPa) - resistência à flexão; s - desvio padrão;  $\delta$  - coeficiente de variação; Vp - propagação de onda ultrassônica; R - coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K - coeficiente de enfraquecimento após gelo e degelo; n - número de corpos de prova utilizado.

**Figura 6.7** - Correlação da resistência à flexão pelo método dos três pontos em condições: seca, satura em água e após ciclos de congelamento/degelo vs. Vp e valor de referência da ASTM C568 (ASTM, 2010).



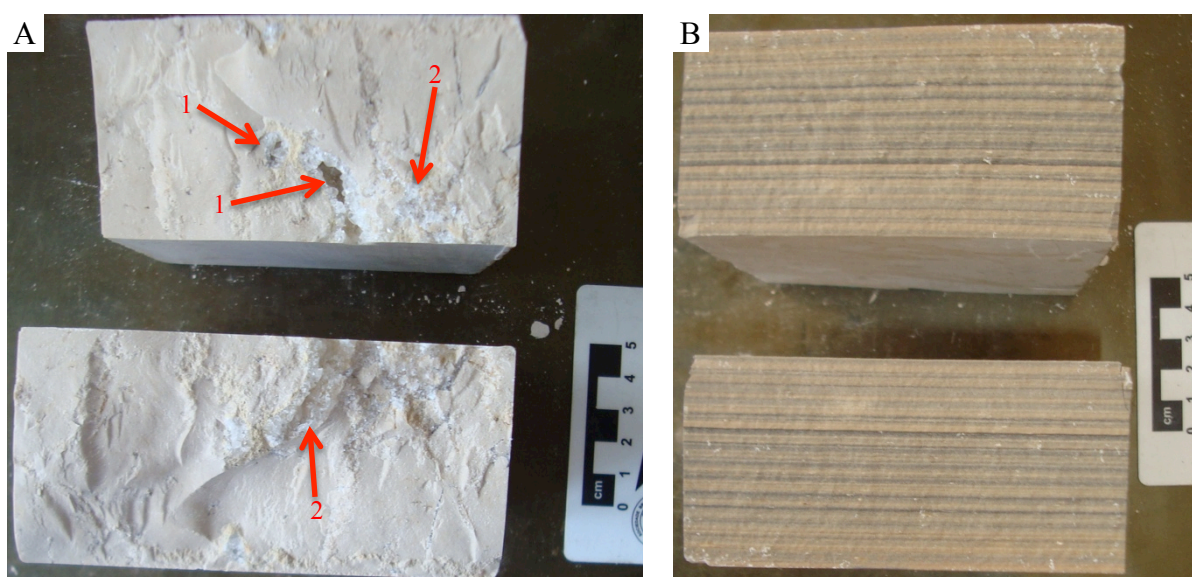
Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais

Os calcários da Bacia do Araripe mostram resistências consideravelmente superiores às apresentadas pelos calcários da Bacia Potiguar (Figura 6.7). Em condição seca o mais resistente foi o calcário A1 da Bacia do Araripe com 26,01 MPa, seguida pelo calcário A2 com 22,69 MPa, enquanto o mais resistente da Bacia Potiguar foi o calcário P2 com 17,07 MPa. À semelhança do verificado para a resistência à compressão uniaxial quando aplicado força perpendicular a estratificação dos calcários, a análise dos resultados da resistência à flexão pelo método 3 pontos também expressa a boa correlação entre o comportamento dos materiais e suas respectivas feições petrográficas gerais. Assim a Pedra Cariri da Bacia do Araripe caracterizada por finas camadas laminadas (entre 1 mm e 3 mm) suportam maior carga que os calcários Mont Charmot da Bacia Potiguar, que apesar de exibirem aspectos estruturais maciços a discretamente estratificados os calcários P1 e P3 possuem frequentes planos de fraqueza relacionados à feições venulares com cristais de calcita e *vugs* calcíticos de granulações mais grossas, irregularmente espaçadas na massa



rochosa, e os calcários do nível P2 são detentores de estilólitos, os quais ocupam até 10% do volume da rocha, igualmente distribuídos de forma heterogênia e irregularmente espaçados na massa micrítica da rochosa. As fotografias da Figura 6.8 mostram superfícies de rupturas dos corpos de prova do calcário P3 “Mont Charmot” (Figura 6.8A) e A1 da “Pedra Cariri” (Figura 6.8B), onde se observa presença de microgeodos, *vugs* e concentrações de cristais de calcita de granulação mais grossa em meio à massa micrítica do calcário P3.

**Figura 6.8** - Aspectos gerais mostrando diferenças no comportamento das superfícies de ruptura de corpos de prova de calcário Mont Charmot (A) e da Pedra Cariri (B) após ensaios de flexão pelo método 3 pontos.



**Legenda:** (A) Mont Charmot - presença de geodo (1) e concentrações de cristais de calcita de granulação mais grossa em meio à massa micrítica do calcário (2); (B) finas camadas laminadas (entre 1 mm e 3 mm).

Dentre as amostras da Bacia Potiguar, o calcário do nível P2 apresenta as maiores resistências à flexão 3 pontos nas três condições (condições seca com 17,12 MPa; saturada em água com 14,77 MPa e após os 25 ciclos de congelamento e degelo 14,53 MPa) (Tabela 6.5; Figura 6.7). Esta maior resistência estaria relacionada ao aspecto estrutural mais homogêneo deste calcário que, além de apresentar granulação fina, é praticamente desprovido em *vugs* e feições venulares com cristais de calcitas mais desenvolvidos, bastante comuns nos calcários dos níveis P1 e P3.

Os calcários dos níveis P1 e P3 apresentam valores de resistências à flexão 3 pontos bastante similares entre si para ensaios sob condições secas e saturadas, com valores na casa dos 11 MPa e com coeficientes de variação entre 6% e 13%. A maior diferença da resistência entre estes dois calcários é registrada para a condição de congelamento e degelo, onde o

calcário P1 apresenta a menor resistência, de 8,64 MPa e um coeficiente de variação relativamente elevado (cerca de 20%), contra uma resistência de 11,3 MPa para o A2 que exhibe um coeficiente de variação pouco menor (15%). Esta menor resistência e coeficiente de variação mais elevado para o calcário P1 pode estar relacionado à sua maior heterogeneidade textural/estrutural dada pela maior granulação dentre os calcários estudados e presença de fraturas preenchidas por calcita e feições venulares igualmente calcítics significativamente mais desenvolvidas que os presentes no calcário P3, o que poderia torná-lo mais susceptível aos efeitos dos ciclos de congelamento e degelo.

Os coeficientes de enfraquecimento hidráulico R são extremamente baixos para os calcários P1 (1%) e P2 (2%), para coeficientes de variação para os ensaios sob condições saturadas de 13% e 12%, respectivamente, e de 13% para o calcário P2 para um coeficiente de variação menor, de 7%.

Dentre os dois calcários da Bacia do Araripe, o calcário do nível A1 é o que apresenta a maior resistência à flexão por carregamento em 3 pontos na condição seca, com 26 MPa o A1 e 22,69 MPa para o A2, mas menores para condições saturadas e após congelamento e degelo, respectivamente 19,69 e 16,99 MPa para o A1 e 28,55 e 18,20 MPa para o A2 (Tabela 6.5; Figura 6.7).

Destaca-se o caso da disparidade entre os resultados médios apresentados pelos conjuntos de corpos de prova do calcário A2 nos ensaios sob condições secas (22,69 MPa) e saturadas (28,55%), com coeficientes de variação na casa dos 23%, cujo coeficiente de enfraquecimento hidráulico R foi de 1,26, ou seja, um aumento da resistência de cerca de 26% na condição saturada. Tal disparidade poderia refletir problemas na representatividade dos corpos de prova, agravado pelo pequeno número de corpos de prova utilizados (3 corpos de prova) para cada um dos referidos ensaios, já que este calcário apresenta estratos com certa heterogeneidade estrutural dadas por ondulações da estratificação plano-paralela, presença de microfalhas e microfissuras abertas com preenchimentos de óxidos e hidróxidos de ferro e estruturas de escorregamentos (*slump*) caracterizadas por dobras fechadas e abertas conforme pode ser observado nas fotos da Figura 5.10 do capítulo 5 sobre análise petrográfica.

Já, as amostras dos calcários do nível A1 apresentam resultados aparentemente mais coerentes entre as várias condições de ensaios, com o maior valor médio para a condição seca com consequentes coeficientes de enfraquecimento hidráulico R de 24% e de 35% após congelamento e degelo. Destaca-se, entretanto, que os coeficientes de variação para os conjuntos de corpos de prova utilizados nos ensaios foram bastante elevados, com 19% nas condições secas e de 42% após congelamento e degelo, em parte devidos ao pequeno número

de corpos de prova (em número de 3) utilizados para os referidos testes.

Com relação à propagação das ondas ultrassônicas, a norma americana ASTM C 568 (ASTM, 2010) não traz valores referenciais para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. Contudo, os valores médios de propagação das ondas ultrassônicas oferecidas por todos os calcários são elevados, entre 6.087 m/s e 5.391 m/s (Tabela 6.5; Figura 6.7), indicando alto grau de integridade para estas rochas.

Apesar da pequena diferença entre os valores médios de propagação das ondas ultrassônicas apresentadas pelos calcários sob condições secas e saturados, destaca-se que com exceção dos calcários P2 e A1 os demais apresentam velocidades de propagação das ondas pouco maiores para as condições secas, o que contraria o esperado que seriam maiores velocidades médias para corpos de prova nas condições saturadas. Este fato pode resultar da dificuldade da infiltração/percolação da água no interior dos corpos de prova, já que os corpos de prova utilizados para estes testes apresentam dimensões de 20cm x 10cm x 5cm. Para o caso dos calcários da Bacia Potiguar poderia, ainda, indicar baixa inter-comunicabilidade entre os planos de fraturas/microfissuras e das feições venulares presentes na matriz micrítica destas rochas.

Situação similar é constatada para os valores de propagação de ondas ultrassônicas após congelamento e degelo apresentados pelos diferentes conjuntos de calcários, onde as amostras dos conjuntos de corpos de prova dos calcários P2 e A2 apresentam velocidades pouco superiores às fornecidas em condições secas e os conjuntos de corpos de prova P1, P3 e A1 velocidades pouco inferiores aos das condições secas, indicando, nestes últimos casos pequeno efeito de degradação dos calcários. Da mesma forma que o considerado para o caso anterior, este fato poderia se relacionar à menor saturação de água nas partes mais internas dos corpos de prova em virtude das maiores dimensões dos referidos corpos de prova utilizados nestes ensaios.

## **6.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM 4 PONTOS**

Os ensaios para a determinação da resistência à flexão por carregamento em 4 pontos foram executados para todas as variedades de calcários das Bacias Potiguar (níveis P1; P2; P3) e do Araripe (níveis A1; A2) com aplicação dos esforços apenas no sentido perpendicular à estratificação das rochas, a qual corresponde à superfície das placas utilizadas nos revestimentos. Os testes foram realizados em corpos de prova com dimensões padrão de aproximadamente 380 mm x 100 mm x 30 mm, nas condições secas e saturados e executados

de acordo com as diretrizes da norma americana ASTM C880 (ASTM, 2005). Os procedimentos de secagem dos corpos de prova foram em estufa ventilada à 70 °C, no intuito de evitar fadigamentos das amostras testadas.

Os resultados médios fornecidos pelos calcários das Bacia Potiguar e do Araripe encontram-se relacionados na Tabela 6.6 e representados graficamente na Figura 6.9. Os resultados completos e respectivos cálculos encontram nas planilhas do Apêndice E.

**Tabela 6.6** - Resultados médios da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos para os calcários Mont Charmot da Baica Potiguar (P1, P2 e P3) e Pedra Cariri da Bacia do Araripe (A1 e A2).

<b>Resistência a flexão por carregamento em 4 pontos (perpendicular a estratificação)</b>						
		<b>Bacia Potiguar (Mont Charmot)</b>			<b>Bacia do Araripe (Pedra Cariri)</b>	
<b>Condição</b>		<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>
<b>Seca</b>	$\sigma_f$ (MPa)	9,43	14,21	8,28	13,10	20,52
	s	0,44	0,64	1,77	0,99	0,49
	$\delta$	0,05	0,05	0,21	0,02	0,02
	Vp (m/s)	5732	5870	5874	5665	5570
<b>Saturada</b>	$\sigma_f$ (MPa)	9,30	11,87	8,41	14,40	17,88
	s	0,39	0,20	1,15	0,56	1,56
	$\delta$	0,04	0,02	0,14	0,04	0,09
	Vp (m/s)	5718	5825	6037	5592	5675
	R	0,99	0,84	1,02	1,10	0,87

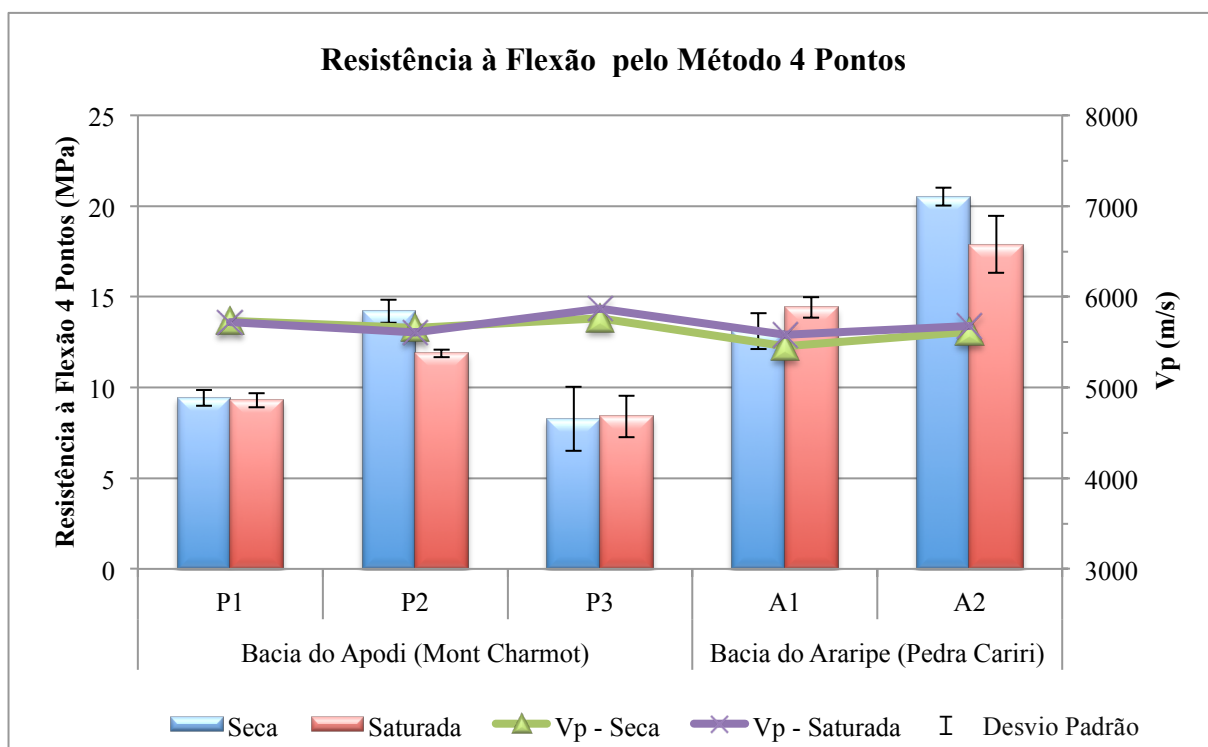
\*amostragem = 3 corpos de prova para cada amostra, exceto em P3 que foram 2;  $\sigma_f$  (MPa) - resistência à flexão; s - desvio padrão;  $\delta$  - coeficiente de variação; Vp - propagação de onda ultrassônica; R - coeficiente de enfraquecimento hidráulico.

Os resultados mostram que as amostras da Pedra Cariri (Bacia do Araripe) quando submetidas à carga no sentido normal à laminação são, na média, mais resistentes à flexão por carregamento em 4 pontos que as amostras dos calcários Mont Charmot (Bacia Potiguar) (Figura 6.9). Este comportamento da Pedra Cariri, como também verificado para a resistência à flexão pelo método 3 Pontos destes calcários, estaria relacionado à maior plasticidade destes calcários cuja ruptura só ocorre após vencido determinado estágio de resistência do escorregamento ao longo dos planos das lâminas composicionais.

Dentre os calcários da Bacia Potiguar, o do nível P2 foi o que exibiu destacadamente a maior resistência à flexão 4 pontos, com 14,21 MPa na condição seca e 11,87 MPa na condição saturada em água, portanto, com um coeficiente de enfraquecimento hidráulico de

16%. Os calcários dos níveis P1 e P3 apresentam valores de resistências relativamente similares entre si (Tabela 6.6; Figura 6.9), respectivamente de 9,43 MPa na condição seca e 9,30 MPa na condição saturada para os primeiros e de 8,28 MPa na condição seca e 8,41 MPa na condição saturada para o P3, com coeficientes de enfraquecimento hidráulico praticamente nulos, cujas diferenças das resistências se situam dentro dos intervalos dos referidos coeficientes de variação, entre 4% e 21%. A maior resistência do calcário do nível P2 deve-se, conforme já comentado anteriormente para os casos das resistências mecânicas dos ensaios anteriores, ao aspecto estrutural mais homogêneo deste calcário que, além de apresentar granulação fina, é praticamente desprovido em *vugs* e feições velunares com cristais de calcitas mais desenvolvidos, bastante comuns nos calcários dos níveis P1 e P3. Neste sentido as fotografias da Figura 6.10 mostram superfícies de rupturas de corpos de prova dos calcários da Bacia Potiguar, onde se observa que os planos de rupturas dos calcários P1 e P3 ocorreram preferencialmente em regiões dominadas pela presença de fraturas e por feições venulares enriquecidas em cristais de calcita de granulação mais desenvolvida e de *vugs*, enquanto que no caso do calcário P2, desprovido de tais feições texturais/estruturais, a superfície de ruptura se processa na matriz micrítica.

**Figura 6.9** - Correlação dos resultados da resistência à flexão por carregamento em 4 Pontos vs. Vp nas condições secas e saturadas para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe.



Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais

**Figura 6.10** – Superfícies de rupturas dos corpos de prova após realização do ensaio de flexão pelo método 4 pontos



**Legenda:** (A) nível P1 a ruptura foi preferencialmente em regiões dominada pela presença de fraturas preenchidas por calcita; (B) nível P2 sem estruturas texturais/estruturais de fraqueza a ruptura ocorreu na matriz micrítica; (C) nível P3 ruptura ocorreu em regiões dominadas pela presença de fraturas e por feições venulares enriquecidas em cristais de calcita de granulação mais desenvolvida e de *vugs*.

Para as amostras da Bacia do Araripe, o calcário do nível A2 apresenta resistências nas condições secas (20,52 MPa) e saturadas (17,88 MPa) significativamente maiores que o calcário do nível A1, respectivamente com 13,10 MPa e 14,40 MPa. Uma possível explicação para tal disparidade dos resultados entre materiais detentores de aspectos composicionais, texturais e estruturais bastante similares seria a representatividade petrográfica dos corpos de prova, o que poderia, ainda, adquirir maior dimensão tendo em vista o pequeno número de corpos de prova (apenas três para condição de ensaio) utilizados nos testes.

Também apresentam coeficientes de enfraquecimento hidráulico distintos, com o calcário A1 exibindo coeficiente hidráulico positivo (1,10) e o calcário A2 enfraquecimento de 13%, o que viria a reforçar situações de representatividade dos corpos de prova.

As velocidades médias de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais (Figura 6.9) exibidas pelos calcários são elevadas, entre 6.037 m/s e 5.592 m/s, indicando boa integridade das rochas analisadas. Os calcários da Bacia do Araripe apresentam propagação das ondas ultrassônicas pouco inferiores (entre 5.570 m/s e 5.675 m/s) às apresentadas pelos calcários da Bacia Potiguar (entre 6.037 m/s e 5.718 m/s), o que estaria coerente considerando-se que os calcários da Bacia Potiguar apresentam estruturas mais homogêneas, maciça a discretamente estratificada, e que a determinação da propagação das ondas dos calcários da Bacia do Araripe foi efetuada no sentido normal à laminação.

Também chama a atenção o fato da similaridade das velocidades das ondas ultrassônicas exibidas pelos calcários entre as condições secas e saturadas em água, sendo que os calcários P1, P2 e A1 apresentam velocidades pouco superiores nas condições secas e somente nos casos dos calcários P3 e A2 as velocidades das ondas foram discretamente



superiores nas condições saturadas, o que poderia indicar baixa absorção de água pelos corpos de prova utilizados na determinação da resistência à flexão 4 pontos.

## 6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os calcários Mont Charmot (Bacia Potiguar) e Pedra Cariri (Bacia do Araripe) apresentam resultados das propriedades físicas-mecânicas compatíveis com calcários de alta densidade, os quais correspondem aos tipos de calcários que apresentam as menores absorções de água e maiores resistências às solicitações mecânicas.

O calcário Mont Charmot (Bacia Potiguar) em relação a Pedra Cariri (Bacia do Araripe) apresentou maiores densidades e conseqüentemente as menores porosidades e absorções de água, este resultado estão diretamente ligados as características petrográficas dos calcários estudados e também são observados no ensaio de desgaste abrasivo, onde a menor porosidade do calcário Mont Charmot influenciou o menor desgaste em relação a Pedra Cariri.

Nos ensaios de compressão uniaxial, flexão pelo método 3 e 4 pontos foi observado que os calcários Mont Charmot são influenciados pelas proporções fraturas e *vugs* preenchidos por calcita assim como a maior resistência do nível P2 pela ausência de planos de descontinuidades.

Nos calcários Pedra Cariri não foi observado relação com as estruturas de micro-falhas e redução da resistência, sendo observado uma maior resistência quando aplicado força no sentido paralelo as camadas da estratificação.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e físicos-mecânicos qualificam os cinco níveis de calcários como detentores de boa qualidade, cujos parâmetros tecnológicos apresentado são, no geral, superiores ou próximos aos valores limítrofes estabelecidos para diversas utilizações como rochas ornamentais e de revestimento, contudo não sendo recomendável a utilização em pisos de ambiente de alto tráfego, ambientes úmidos, externos e fachadas. São apropriados para uso como obras de artes, revestimento de interiores, pisos em locais de baixa circulação, bancadas, mesa, dentre e outros.

## 7 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E PERMEABILIDADE DOS CALCÁRIOS EXPOSTOS A AMBIENTES SATURADOS EM DIÓXIDO DE ENXOFRE

Os ensaios para avaliação da porosidade foram efetuados através da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP) e da Permeabilidade através da Injeção de Gás em corpos de prova ao natural e após ciclos de envelhecimento acelerado em câmara com atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

As amostras utilizadas para a realização destes testes correspondem, conforme expresso no capítulo de Materiais e Métodos, aos calcários dos mesmos níveis estratigráficos amostrados para a realização dos ensaios físico-mecânicos, ou seja, três amostras do calcário ornamental conhecido como *Mont Charmot* (amostras P1; P2 e P3) provenientes de diferentes níveis de uma mesma frente de lavra na Formação Jandaíra da Bacia Potiguar e duas amostras conhecidas comercialmente como *Pedra Cariri* coletadas em dois níveis do Membro Crato da Formação Santana da Bacia do Araripe (amostras A1 e A2). Os testes, sempre que possível, foram realizados nas direções perpendicular e paralela à estratificação das rochas.

Estes calcários das Bacias Potiguar e do Araripe são bastante utilizados no mercado local e, nos últimos anos, vem ganhando espaço e boa aceitação no mercado internacional como pedras para revestimento. Encontram aplicações tanto em ambientes de interiores quanto de exteriores como pisos, fachadas e bancadas, estando, portanto, sujeitos a vários tipos de degradações como, por exemplo, às devidas a ação de agentes atmosféricos agressivos.

Como se sabe a rochas calcárias são susceptíveis aos processos de deteriorização sob ambientes com atmosfera poluída. Muitas vezes esses processos são irreversíveis, pois afetam a estrutura física da rocha, sendo caro e demorado o processo de reparação levando, muitas vezes, à necessidade da substituição das rochas então aplicadas.

Neste contexto, os ensaios aqui realizados tiveram por objetivo a avaliação do comportamento dos referidos calcários em termos de suas características de porosidade e de permeabilidade ao natural e após serem submetidos ao envelhecimento acelerado em atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o qual simula ambientes de grandes cidades e áreas industrializadas.

## **7.1 METODOLOGIA PARA O ESTUDO DA POROSIDADE E PERMEABILIDADE**

### **7.1.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)**

Este é um método destrutivo indireto usado para obter o espectro dos poros da rocha através da injeção de mercúrio. Os ensaios foram realizados com o porosímetro Autopore III 9400 da marca Micromeritic's, com resolução que permite a determinação de diâmetros de poros na faixa entre 360 a 0,005  $\mu\text{m}$ .

#### ***Princípio da Técnica de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio***

O estudo de porosimetria de mercúrio possibilita o acesso à estrutura porosa de um determinado material permitindo a caracterização e quantificação de informações relacionadas com geometria, diâmetro dos poros e porosidade total, permitindo, desta forma, estabelecer a proporção macroporos e mesoporos como elementos facilitadores dos processos de degradação dos materiais rochosos, especialmente os relacionados com a absorção capilar (GAURI; BANDYOPADHYAY, 1999; MANGANELLI DEL FÀ, 2002; STEIGER, 2003).

A técnica é baseada no modelo de poros cilíndricos e na Equação de Washburn, mundialmente utilizada. Esta equação descreve o fluxo capilar em meios porosos (ANGELI, 2007).

Esta análise consiste na intrusão forçada de um fluido não molhante, o mercúrio. O mercúrio é um líquido que apresenta esse tipo de comportamento para a maioria dos sólidos com ângulos de contato que variam de 130° a 140°.

Materiais porosos colocados em contato com o mercúrio não serão penetrados pelo mesmo e para que haja penetração deve ser introduzida uma força externa que seja superior a tensão superficial do mercúrio, sendo por isso empregado como líquido de intrusão nos ensaios de porosimetria (WEBB; ORRC, 1997).

#### ***Procedimentos do ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio***

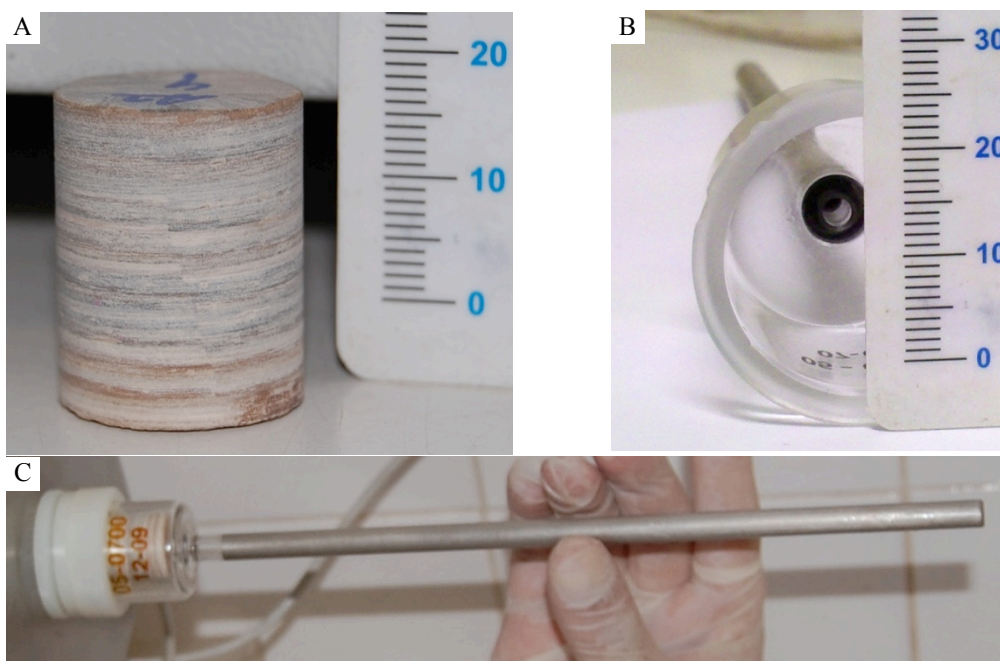
O procedimento para a realização dos ensaios foi o indicado pelo próprio manual do porosímetro Autopore III da Micromeritic's, o qual é rotineiramente utilizado no Laboratório do Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), de Lisboa, e abaixo descrito. Estudos detalhados sobre o método de porosimetria por intrusão de mercúrio, com procedimentos similares aos aplicados no presente trabalho, são apresentados por Mata et al. (2001a, b).

Para a realização dos ensaios foram confeccionados 6 corpos de prova no formato cilíndrico com 20 mm de diâmetro e altura de 20 mm para cada uma das variedades de calcário pesquisadas (Figura 7.1-A), sendo 2 corpos de prova para testes com a rocha em seu estado natural (1 para cada sentido da estratificação), 2 corpos de prova (1 para cada sentido da estratificação) para testes de porosimetria após 25 ciclos e 2 corpos de prova (1 para cada sentido da estratificação) para testes de porosimetria após 50 ciclos de envelhecimento acelerado em atmosfera saturada em dióxido de enxofre em câmara climática.

Os corpos de prova da rocha ao natural foram lavados com água destilada e colocados em estufa a uma temperatura de  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  por 48 horas, após o que foram retirados da estufa e resfriados no dessecador. No caso da condição pós ciclagens na câmara climática (25 e 50 ciclos) os corpos de prova foram retirados da câmara e igualmente preparados, ou seja, lavados com água destilada e colocados em estufa a uma temperatura de  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  por 48 horas ou até alcançarem massa constante, retirados da estufa e resfriados no dessecador.

Após sua preparação e pesagem, cada amostra foi montada em um porta amostra, penetrômetro (Figura 7.1-B), o qual foi previamente lavado com água morna, passado por álcool isopropílico e seco em estufa a  $30^\circ\text{C}$  durante 12 horas. Após a montagem o conjunto foi pesado (porta amostra + amostra) (Figura 7.1-C).

**Figura 7.1** – Vista geral do penetrômetro.



**Legenda:** (A) visão do interior do penetrômetro; (B) corpo de prova utilizado para análise de porosimetria; (C) conjunto completo do penetrômetro, amostra + porta amostra.

Após a pesagem, o conjunto foi instalado no aparelho que tem a análise subdividida em dois estágios sob baixa e alta pressão (Figura 7.2-A). Primeiramente o penetrômetro é acoplado na porta de baixa pressão (Figura 7.2-B), onde foi aplicado vácuo para que o mercúrio ocupasse todo o espaço vazio do porta amostra e, posteriormente, aplicado pressão de até 30 psia. O penetrômetro foi removido e novamente pesado (porta amostra + corpo de prova + mercúrio) e acoplado na câmara hidráulica de alta pressão (Figura 7.2-C) onde foi aplicada pressão crescente entre 25 psia a 30.000 psia; esta etapa é chamada de intrusão. Em seguida, ocorre a extrusão do mercúrio, à medida que se reduz a pressão por patamares até atingir a pressão atmosférica.

**Figura 7.2** – Aparelho de porosimetria por intrusão de mercúrio Autopore III 9400.



**Legenda:** (A) aparelho de porosimetria por intrusão de mercúrio; (B) porta de baixa pressão; (C) câmara hidráulica de alta pressão.

### **7.1.2 Permeabilidade através da injeção de gás**

O estudo de permeabilidade a gás é um método não destrutivo que é realizado através da injeção de gás utilizando um aparelho Gás Permeameter modelo GP-M100A, fabricado e adaptado para o uso com material pétreo pela Porous Materials Inc (PMI). Em linhas gerais o permeâmetro é constituído por um sistema pneumático que transforma uma pequena pressão, fornecida por uma garrafa de gás nitrogênio comprimido ( $N_2$ ), gerenciado em um sistema de computador acoplado por um software específico, *CapWin*.

#### ***Princípio da Técnica de Permeabilidade a Gás***

A permeabilidade corresponde a propriedade que a rocha possui de permitir a passagem de quaisquer fluidos através de seus vazios ou interstícios, sem que ocorra deformação estruturalmente ou deslocamento relativo de suas partes. O movimento do fluido só é possível quando os poros estão interconectados. Quando os poros de uma rocha não estão em contato uns com os outros, ou quando existem apenas fissuras ou fraturas semi-fechadas, haverá uma maior dificuldade de circulação do fluido e conseqüentemente uma redução na permeabilidade.

A permeabilidade se comporta como uma constante de proporcionalidade característica de cada meio. Para análise e mensuração da permeabilidade torna-se necessário uma equação que regulasse o fluxo, na qual interviessem todos os parâmetros. A equação de maior utilização prática para o estudo de fluxo em meios porosos foi formulada por Henry Darcy, em 1856, ao estudar problemas de tratamento de água através de filtros de areia.

O gás nitrogênio é inerte e absolutamente legítimo para calcular a permeabilidade a partir da fórmula original de Darcy, uma vez que reflete o fluxo de um fluido em termos de volume e fluxo massa.

#### ***Procedimentos do ensaios através da injeção de gás***

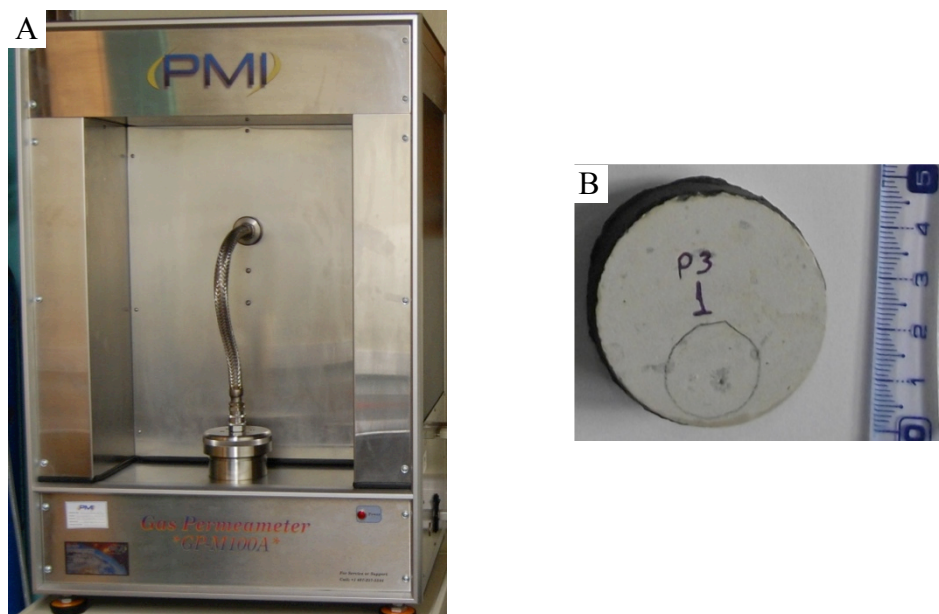
O procedimento para a realização dos ensaios foi o indicado pelo próprio manual do aparelho Gás Permeameter modelo GP-M100A da Porous Materiais, Inc. (Figura 7.3-A), o qual é rotineiramente utilizado no Laboratório do Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), de Lisboa, e abaixo descrito.

Para a realização dos ensaios foram realizados a aplicação do gás ( $N_2$ ) em duas direções ortogonais entre si, uma perpendicular e outra paralela à estratificação das rochas, em



corpos de prova sob 4 condições: rocha ao natural, após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática com atmosfera saturada em SO<sub>2</sub>. Para tanto foram utilizados 6 corpos de prova com formato cilíndrico (48 mm de diâmetro e 15 mm de altura) com as laterais resinadas afim de evitar o escape do gás (Figura 7.3-B), para cada uma das variedades de calcário pesquisadas, sendo 3 para cada sentido da aplicação do gás. Os mesmos corpos de prova foram analisadas as permeabilidades três vezes antes e três após os ciclos, uma vez que este é um ensaio não destrutível, e utilizadas as médias das análises de cada amostra. Os corpos de prova foram retirados da câmara climática secos em estufa a temperatura  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  por 48 horas ou até alcançarem massa constante, e após retirados da estufa foram resfriados no dessecador e realizado a análise da permeabilidade.

**Figura 7.3** – Aparelho utilizado para medir a permeabilidade.



**Legenda:** (A) aparelho Gás Permeameter modelo GP-M100A utilizado para medição da permeabilidade; (B) corpo de prova utilizado para realização do ensaio, resina nas laterais para evitar o escape do gás.

### 7.1.3 Ensaios em Câmara com Atmosfera Saturada em Dióxido de Enxofre

O ensaio teve como finalidade acelerar em laboratório, utilizando a Câmara de Ensaios Climáticos (FITOCLIMA 300 EDTU) (Figura 7.4), os processos de envelhecimento e intemperismo da rocha. Para isso foram realizados ciclos controlados de variações da temperatura e umidade (baseado no projeto de norma europeia prEN BBB 1995), na presença de uma atmosfera saturada de 25 ppm em dióxido de enxofre.

**Figura 7.4** – Câmara de ensaios climáticos (FITOCLIMA 300 EDTU).



**Legenda:** corpos de prova no interior da câmara para realização do ensaio de envelhecimento acelerado com variações da temperatura e umidade em ambiente com atmosfera saturada de 25 ppm em dióxido de enxofre.

A preparação e quantidade dos corpos de prova seguiu o método de cada ensaio ao qual está conjugado.

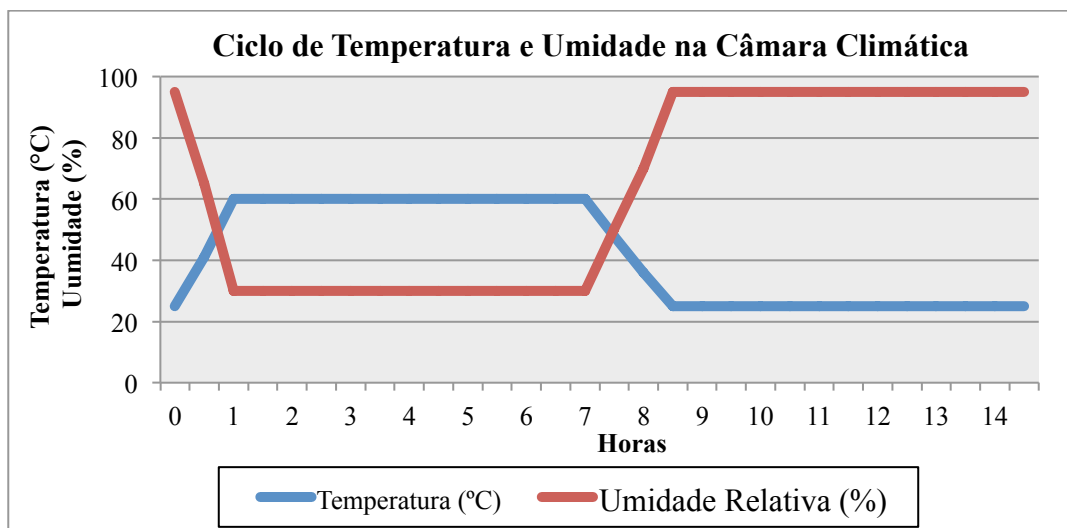
Inicialmente as amostras foram lavadas com água destilada e postas para secar em estufa a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  durante, pelo menos, 48 horas até alcançarem massa constante (diferença entre duas pesagens sucessivas, num intervalo de 24h, for menor que 0,1%), retirados da estufa e resfriados no dessecador.

O ensaio foi efetuado ao final dos ciclos 0, 25, 50 para porosidade e também ao final do ciclo 100 para ensaio de permeabilidade, sendo o ciclo “0” realizado com rocha ao natural e os demais ciclos (25, 50 e 100) submetidos à alteração acelerada. A programação da variação de temperatura e umidade utilizada na câmara para cada ciclo durante a realização do ensaio, conforme esquema da Figura 7.5, foi a seguinte:

- 1 hora para estabilizar a temperatura em  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $30 \pm 5\%$ ;
- 6 horas em temperatura de  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $30 \pm 5\%$ ;
- 1h e 30 minutos para nova estabilização na temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  e na umidade relativa de  $95 \pm 5\%$ ;

- 6 horas em temperatura de  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $95\pm 5\%$ , totalizando 14h e 30 minutos.

**Figura 7.5** - Variação da temperatura e umidade para cada ciclo em câmara climática.



## 7.2 RESULTADOS

### 7.2.1 Resultados da Porosidade

Os resultados obtidos pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) para as variedades de calcários pesquisados das Bacias Potiguar (P1, P2 e P3) e do Araripe (A1 e A2), respectivamente Mont Charmot e Pedra Cariri, permitem determinar diferentes intervalos de raios de poros encontrados nos calcários ornamentais.

Em relação à porosidade, os resultados obtidos por MIP mostram a mesma tendência dos valores determinados pelos índices físicos, mas com resultados maiores, correspondentes à identificação de um intervalo muito maior de tamanhos de poros do que é possível identificar quando é a água o fluido que circula no sistema poroso da rocha (BECERRA, 2009).

Após os ensaios de porosimetria foram obtidos os valores do volume de mercúrio intrudido, área total dos poros, diâmetros médios dos poros, densidade e porosidade para as amostras de cada nível estudado em rocha sã e após serem alteradas em câmara climática em 25 e 50 ciclos (Tabela 7.1).

Analisando a Tabela 7.1 pode-se perceber que a porosidade total variou entre as

amostras, sendo a máxima para a amostra sã (A2) quando realizado ensaio na direção paralela à estratificação (8,95%), e a mínima para a amostra P3 perpendicular à estratificação após 25 ciclos na câmara climática (1,29%); estes apresentando também respectivamente o maior tamanho médio dos poros e menor.

O nível P3 apresentou a menor porosidade entre todas as amostras analisadas pois este nível apresenta a granulação mais fina entre todas, com fraturas preenchidas por calcita recristalizada e *vugs* de dissolução que se apresentam preenchidos por cristalizações de calcitas mantendo o núcleo vazio (poros) não comunicáveis.

As porosidades mais elevadas foram encontradas nas amostras dos níveis A1 e A2 da Bacia do Araripe nas três condições analisadas (rocha sã, após 25 e 50 ciclos de alteração na câmara climática com atmosfera saturada em dióxido de enxofre) (Figura 7.6). Este fato ocorre devido aos calcários da Bacia Potiguar serem mais maciços com a granulação muito fina, o que reduz a porosidade e reduz também o efeito da alteração acelerada, pois o poder de adsorção é menor. Por outro lado, os calcários da Bacia do Araripe são laminados e em comparação com os calcários da Bacia Potiguar possuem maior granulação dos grãos e contato menos engrenados nas laminações de cores claras se comportam como camadas mais friáveis e possuem maior porosidade.

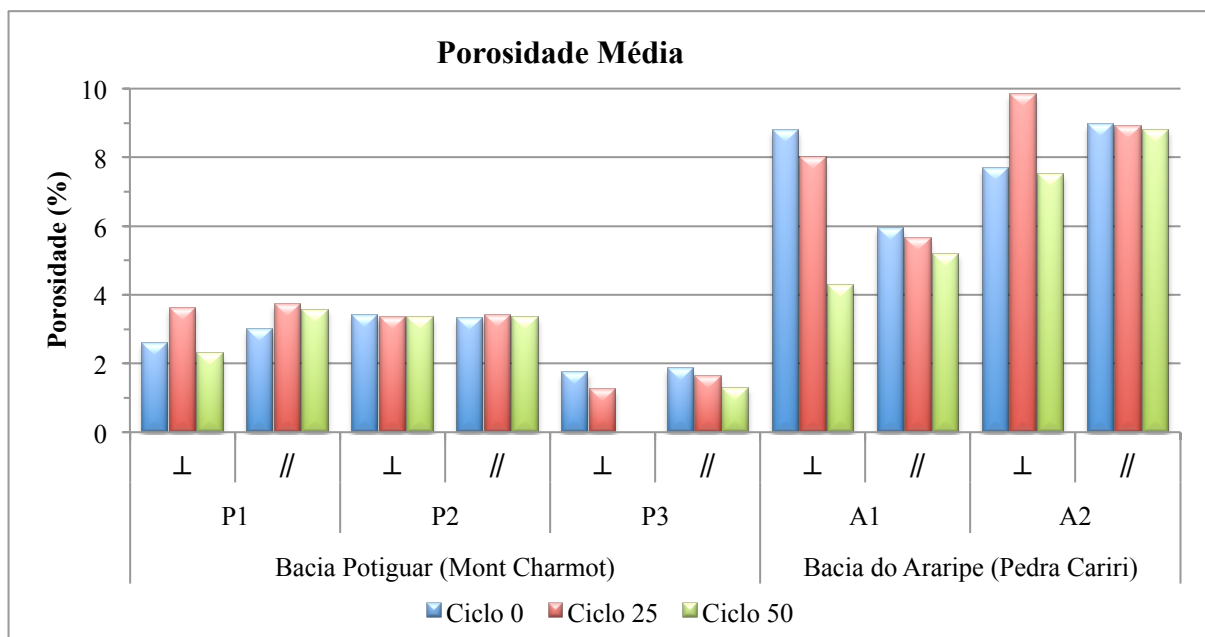
A porosidade maior apresentada pelos calcários da Bacia do Araripe permite a fixação nos microporos de água, umidade e acúmulo de gases, facilitando dessa forma os processos de deterioração (BECERRA, 2009).

Tabela 7.1 – Resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para os calcários Mont Charmot em rocha sã e alteradas em câmara climática com 25 e 50 ciclos.

Rocha		Direção	Nº de ciclos na câmara climática	Volume de intrusão total (mL/g)	Área total dos poros (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro médio do poro (µm)	Densidade (g/mL)	Densidade Aparente (g/mL)	Porosidade (%)
Bacia Potiguar (Mont Charmot)	P1	⊥	0	0,0098	1,80	0,0218	2,63	2,70	2,59
			25	0,0139	1,95	0,0286	2,60	2,70	3,62
			50	0,0087	2,01	0,0174	2,64	2,70	2,30
		//	0	0,0151	1,94	0,0312	2,59	2,70	3,01
			25	0,0142	2,16	0,0264	2,62	2,72	3,73
			50	0,0137	2,21	0,0249	2,60	2,69	3,57
	P2	⊥	0	0,0129	1,63	0,0317	2,64	2,73	3,40
			25	0,0129	1,54	0,0336	2,59	2,68	3,35
			50	0,0127	1,72	0,0296	2,64	2,73	3,36
		//	0	0,0128	1,84	0,0277	2,61	2,70	3,32
			25	0,0132	1,71	0,0307	2,60	2,69	3,42
			50	0,0129	1,77	0,0291	2,60	2,69	3,35
	P3	⊥	0	0,0066	2,13	0,0124	2,64	2,69	1,74
			25	0,0047	1,71	0,0111	2,65	2,69	1,26
			50	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
		//	0	0,0072	2,30	0,0126	2,55	2,60	1,85
			25	0,0061	2,13	0,0115	2,66	2,71	1,63
			50	0,0049	1,96	0,0100	2,64	2,67	1,29
Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	A1	⊥	0	0,0351	2,37	0,0592	2,51	2,75	8,79
			25	0,0317	2,34	0,0542	2,52	2,74	8,00
			50	0,0165	2,59	0,0254	2,61	2,72	4,29
		//	0	0,0230	2,39	0,0385	2,58	2,75	5,94
			25	0,0215	2,43	0,0354	2,63	2,79	5,65
			50	0,0196	2,42	0,0324	2,64	2,78	5,18
	A2	⊥	0	0,0294	3,17	0,0371	2,62	2,84	7,69
			25	0,0396	2,41	0,0658	2,49	2,76	9,85
			50	0,0291	3,21	0,0363	2,58	2,78	7,50
		//	0	0,0351	2,90	0,0484	2,55	2,80	8,95
			25	0,0349	2,73	0,0512	2,55	2,80	8,90
			50	0,0346	2,64	0,0524	2,55	2,80	8,82

⊥ - corpos de prova perpendicular à estratificação da rocha; // - corpos de prova paralela à estratificação da rocha; n.a. – não avaliado

**Figura 7.6** – Distribuição da porosidade para os calcários Mont Charmot e Pedra do Cariri em rocha sã (ciclo 0) e alteradas após 25 e 50 ciclos na câmara climática.

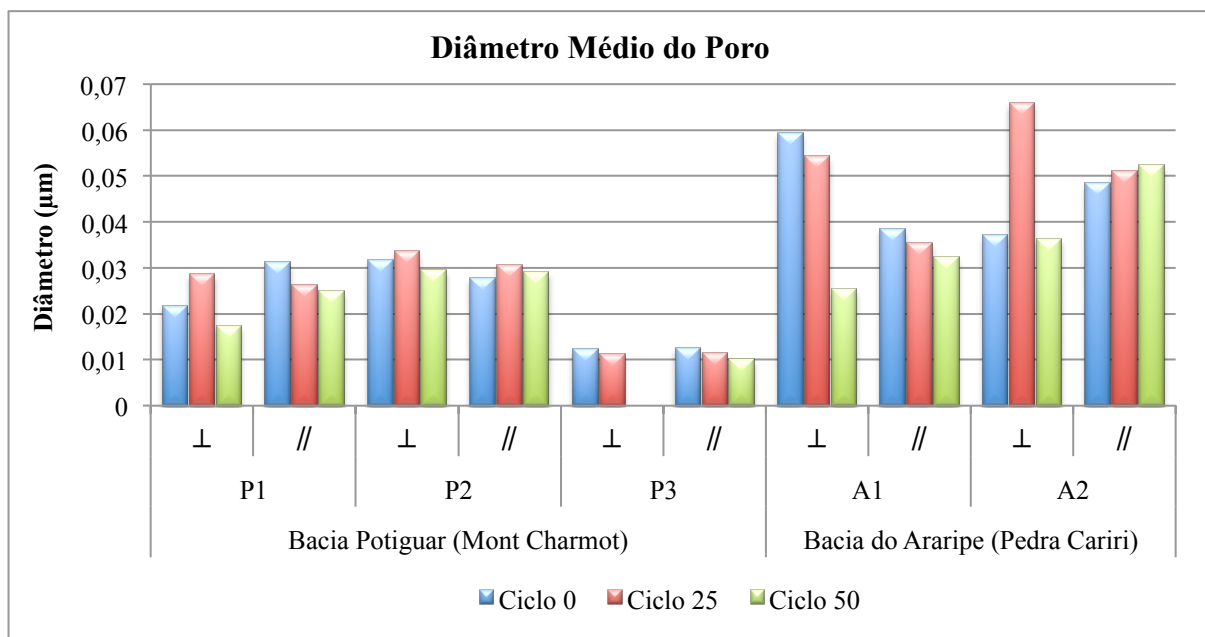


O diâmetro médio dos poros está em geral relacionado com o valor da porosidade, sendo, assim, quanto maior a porosidade maior o diâmetro médio dos poros. As rochas ensaiadas podem ser divididas em 3 grupos em relação aos seus diâmetros de poros, sendo que as amostras provenientes da Bacia do Araripe são as que possuem diâmetros superiores a  $0,03 \mu\text{m}$ , e as amostras dos níveis P1 e P2 da Bacia Potiguar são as que possuem diâmetros médios entre  $0,02$  e  $0,03 \mu\text{m}$ , e as amostras do nível P3 possui diâmetro próximo a  $0,01 \mu\text{m}$  (Figura 7.7).

Esses resultados estão de acordo com os resultados observados no capítulo 5 *análise petrográfica*, onde os calcários da Bacia Potiguar são maciços apresentando uma granulação muito fina e entre os três níveis as amostras do nível P3 apresentam uma granulação mais fina que P1 e P2. Os calcários da Bacia do Araripe se apresentam com uma granulação maior que os da Bacia Potiguar e possuindo laminações, onde as de cores claras possuem um menor engrenamento dos minerais que resulta em maiores vazios (poros) entre os grãos.



**Figura 7.7** – Distribuição dos diâmetros médios dos poros nas rochas dos calcários das Bacias Potiguar (Mont Charmot) e do Araripe ( Pedra do Cariri).



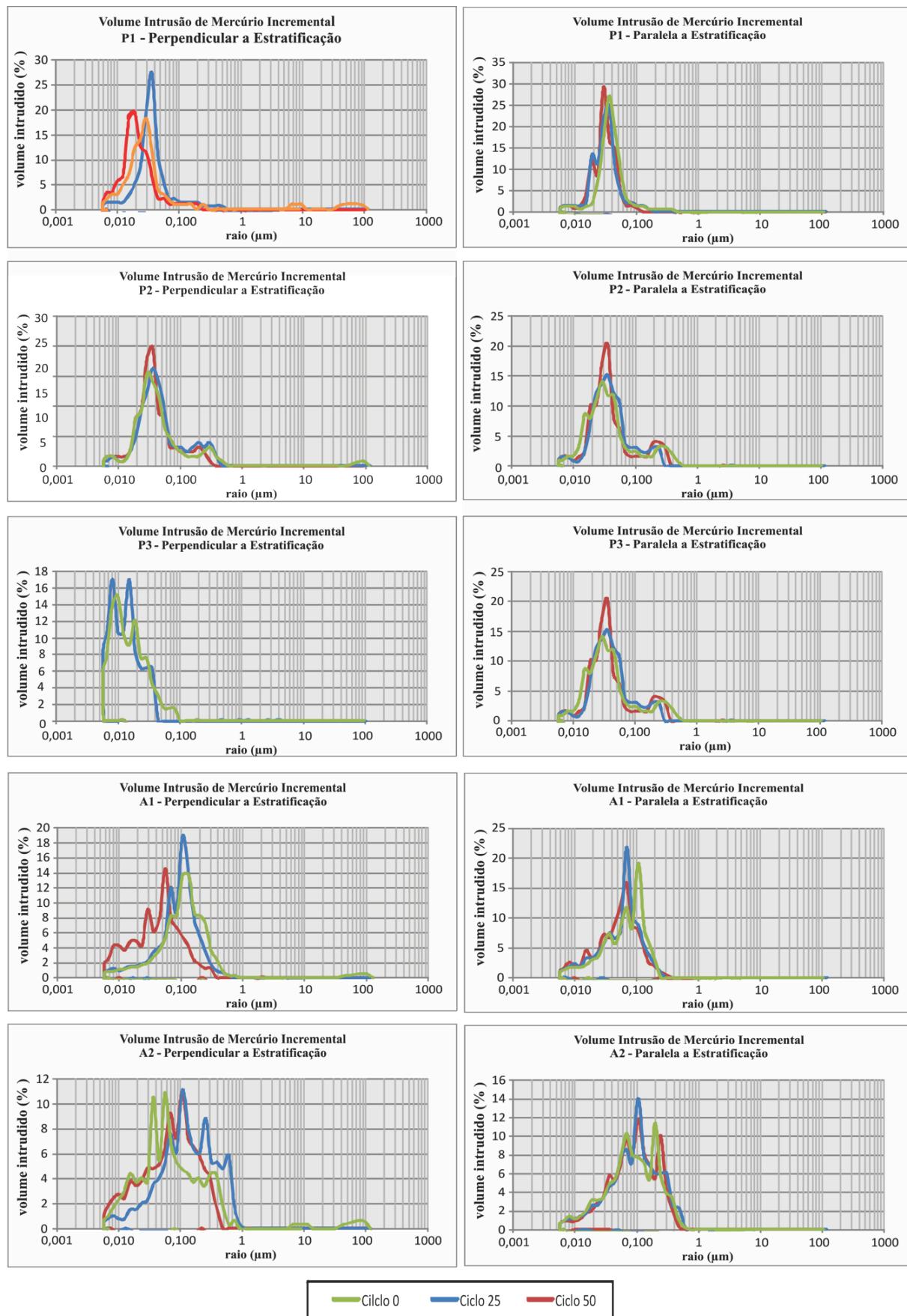
Os calcários da Bacia Potiguar apresentam uma distribuição sub-unimodal de tamanho de entrada de poros. Os calcários da Bacia do Araripe possuem distribuições mais irregulares e diferentes dos anteriores, por vezes apresentando dois ou mais picos de raios de poro (Figura 7.8).

O nível P1 é o que apresenta uma distribuição principal mais homogênea do raio de poro, compreendendo um intervalo entre 0,01 e 0,1 µm. Os calcários do nível P2 apresentam uma distribuição bimodal que está condicionada a constituição da rocha com presença de fósseis e matriz micrítica de granulação muito fina.

Os corpos de prova que foram submetidos a 50 ciclos de alteração antes do ensaio de porosimetria apresentam um padrão muito irregular nos poros menores, intervalo de 0,01 a 0,05 µm, que é resultado do início da alteração da rede porosa das amostras. Os microporos conseguem fixar água no seu interior, facilitando dessa forma, os processos de deterioração.

O nível A1 e A2 apresentam elevadas porosidades em relação aos calcários da Bacia Potiguar, apresentam ainda distribuição bimodal dos tamanhos dos poros, sendo mais evidente nas amostras analisadas do nível A2, fato ligado a diferença composicional das finas camadas laminadas, onde, as camadas escuras possuem presença de minerais opacos intercrescidos preferencialmente na direção perpendicular ao plano de estratificação com maior engrenamento, reduzindo assim nas camadas escuras a porosidade.

**Figura 7.8** – Distribuição dos poros nos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri) determinado por porosimetria de intrusão de mercúrio.



## Considerações

Alguns níveis mostram uma porosidade maior após os ciclos de alteração acelerada, bem notáveis no nível P1 da Bacia Potiguar e no nível A2 da Bacia do Araripe, fato considerado como comportamento normal, pois, durante o processo de envelhecimento das rochas no interior da câmara a rocha sofre uma degradação, o qual está relacionado com o desenvolvimento de novos poros e fissuras e assim aumenta a porosidade.

Em outros níveis foram observados aparentemente uma diminuição da porosidade ao longo do processo de alteração, fato ligado ao bloqueio de alguns pontos da rede porosa após os ciclos de alteração, impedindo a entrada do mercúrio (BECERRA, 2009).

### 7.2.2 Resultados da Permeabilidade

Como este ensaio é não destrutivo, optou-se por utilizar os mesmo corpos de prova antes e após os ciclos de alterabilidade para especificar a variação.

Os calcários da Bacia Potiguar (P1, P2 e P3) não apresentaram diferenças significativas quando realizado os ensaios nas diferentes direções da estratificação. Já para os calcários da Bacia do Araripe a diferença em relação a realização do ensaio perpendicular e paralela à estratificação foi mais significativa, mostrando um tendência a valores mais elevados nos ensaios realizados na direção paralela à estratificação (Tabela 7.2).

Esse comportamento é explicado devido a baixa anisotropia das rochas provenientes da Bacia Potiguar, o que não ocorre nos calcários da Bacia do Araripe que são separadas por finas laminações, que por vezes possuem finas camadas argilosas.

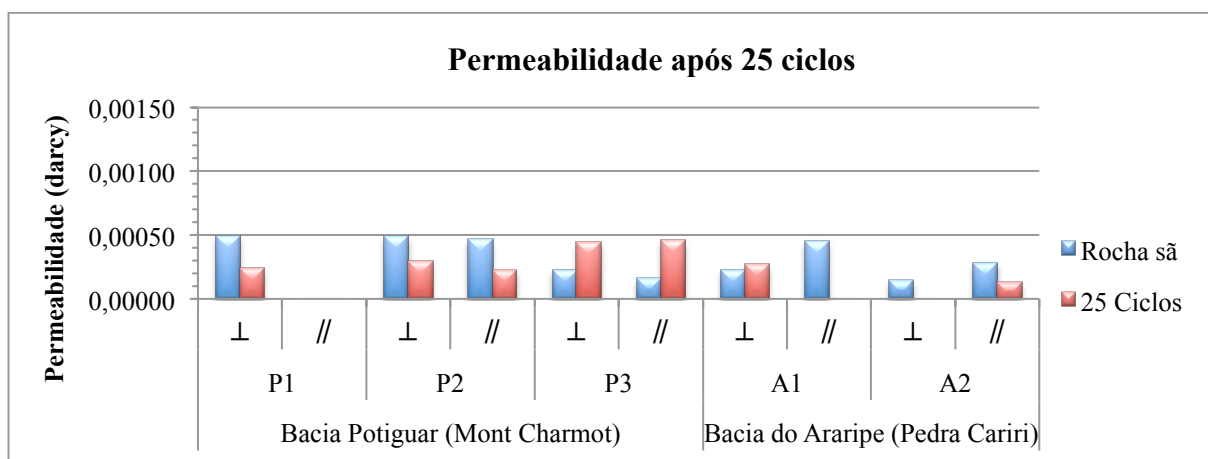
Os ensaios de permeabilidade realizado durante os ciclos pré-determinados de alteração na câmara climática mostrou uma redução da permeabilidade após 25 ciclos (Figura 7.9). Ao longo dos demais ciclos (50 e 100) foi observado uma tendência direta entre o aumento da permeabilidade e o aumento da quantidade de ciclos de alteração Figura 7.10 e 7.11).

A alteração ocorreu em dois estágios, sendo o primeiro até 25 ciclos que altera os calcários reduzindo suas permeabilidades, esse fato ocorre pelo deslocamento de partículas e obstrução rede porosa (canais) que conectam um poro a outro. E um segundo estágio, a partir dos 50 ciclos, onde a permeabilidade dos calcários aumentam, fato que ocorre pela maior degradação e aumento da capacidade de transmissividade através da rede (Figura 7.12).

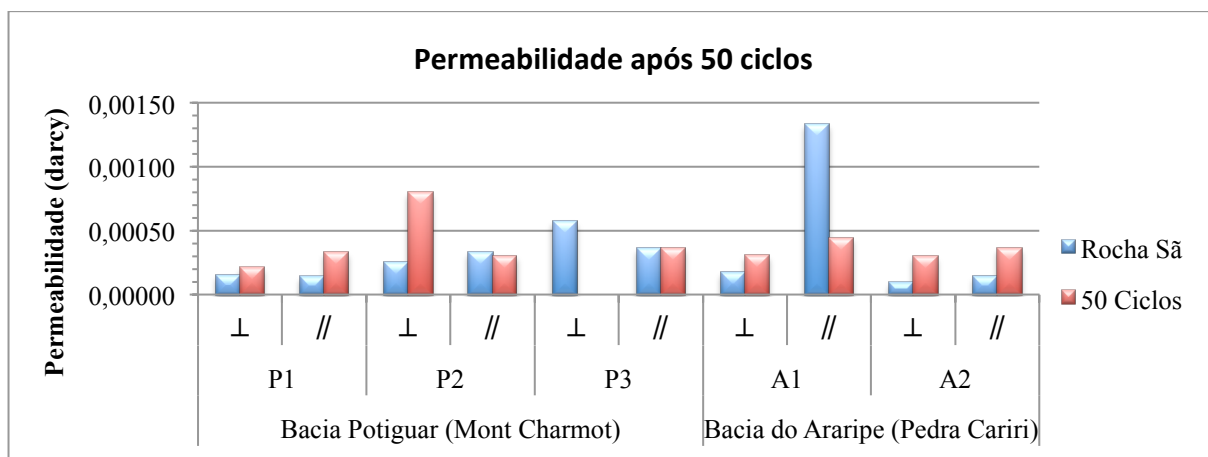
A maior permeabilidade ocorre devido a alteração ocorrido com o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), os gases contaminantes e as partículas podem reagir com a superfície da rocha e, neste

caso, ocorre a chamada deposição seca ácida. O  $\text{SO}_2$ , por meio de diversas reações de oxidação e combinação com gotículas de água de chuva ou mesmo de névoa, transforma-se em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), um dos mais potentes ácidos inorgânicos (BECERRA, 2009).

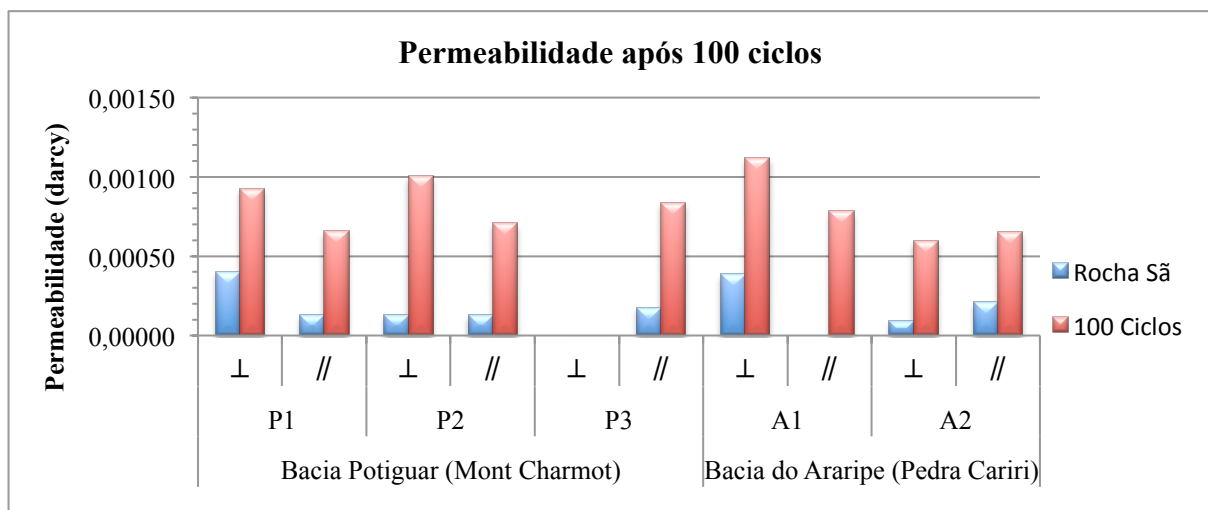
**Figura 7. 9** – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 25 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri).



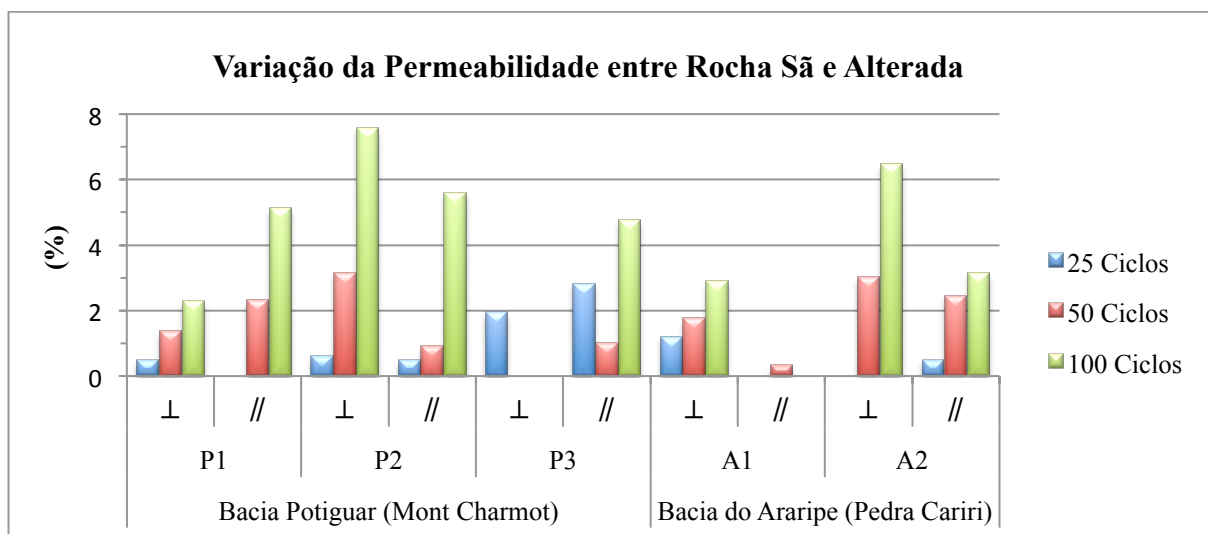
**Figura 7. 10** – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 50 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri).



**Figura 7.11** – Permeabilidade antes (rocha sã) e após 100 ciclos na câmara climática dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri).



**Figura 7.12** – Variação da permeabilidade em relação a análise antes e após o envelhecimento dos calcários da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri).



**Tabela 7.2** - Valores da média da permeabilidade (darcy) para cada dos calcários das Bacias Potiguar (Mont Charmot) e do Araripe (Pedra Cariri), em rocha sã e após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática.

Rocha		direção	Permeabilidade (darcy)		
			Rocha sã	Rocha Alterada	$\Delta$ Alterada/Sã
25 Ciclos					
Bacia Potiguar (Mont Charmot)	P1	⊥	0,00049	0,00024	0,48609
		//	n.a	n.a.	n.a
	P2	⊥	0,00049	0,00029	0,60185
		//	0,00047	0,00023	0,48686
	P3	⊥	0,00023	0,00044	1,93717
		//	0,00016	0,00046	2,81891
Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	A1	⊥	0,00023	0,00027	1,19571
		//	0,00045	n.a.	n.a.
	A2	⊥	0,00014	n.a.	n.a.
		//	0,00028	0,00013	0,47184
50 Ciclos					
Bacia Potiguar (Mont Charmot)	P1	⊥	0,00016	0,00021	1,36886
		//	0,00014	0,00033	2,31254
	P2	⊥	0,00025	0,00080	3,15075
		//	0,00033	0,00030	0,91318
	P3	⊥	0,00058	n.a.	n.a.
		//	0,00036	0,00037	1,01087
Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	A1	⊥	0,00018	0,00031	1,75574
		//	0,00133	0,00044	0,33201
	A2	⊥	0,00010	0,00030	3,01206
		//	0,00015	0,00036	2,45445
100 Ciclos					
Bacia Potiguar (Mont Charmot)	P1	⊥	0,00040	0,00092	2,2942
		//	0,00013	0,00066	5,1244
	P2	⊥	0,00013	0,00100	7,5683
		//	0,00013	0,00071	5,5751
	P3	⊥	n.a.	n.a.	n.a.
		//	0,00018	0,00084	4,7460
Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	A1	⊥	0,00039	0,00112	2,8908
		//	n.a.	0,00078	n.a.
	A2	⊥	0,00009	0,00060	6,4856
		//	0,00021	0,00065	3,1403

⊥ - perpendicular à estratificação da rocha; // - paralela à estratificação da rocha; n.a. – não avaliado



### 7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do ensaio de alteração acelerada conjugado aos ensaios de porosidade e permeabilidade determinam que os calcários da Bacia Potiguar e Bacia do Araripe são susceptíveis aos processos de deterioração quando aplicados em regiões com atmosferas sujeitas a chuvas ácidas. As características da porosidade e os raios dos poros são fatores que influenciam a rocha à condições favoráveis à alteração. Embora as características de porosidade e permeabilidade desses calcários sejam menos favoráveis ao processo de deterioração que outros calcários da bibliografia este processo possui grande probabilidade de acontecer quando expostos a ambientes com alta concentração de dióxido de enxofre devido a as próprias características químicas dos calcários, portanto é recomendado a adoção de medidas para proteger os calcários já utilizados e de aplicação de substâncias impermeabilizantes que permitam melhorar o desempenho destes calcários e retardar as alterações.

É recomendada a aplicação desses calcários preferencialmente em ambientes de interiores, garantido a durabilidade e conservação desses materiais, quando em ambientes externos não é recomendável em locais que ocorram com frequência chuvas ácidas.

## 8 ANÁLISE DE IMAGENS NA AVALIAÇÃO DOS CALCÁRIOS SOB ATAQUE QUÍMICO

A avaliação dos efeitos causados pelo ataque das substâncias químicas nas superfícies das placas foi realizado através da quantificação das características cromáticas no espectro RGB e das características morfológicas da textura, técnicas embasada na análise digital da imagem.

Os ensaios de alterabilidade química objetivaram a *avaliação da resistência da superfície das placas de calcários ao ataque químico sob efeito de reagentes agressivos* e foram realizados no Laboratório de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE-campus de Rio Claro.

Para estes testes foi selecionado um dos calcários da Bacia Potiguar (correspondente a amostra P1) e outro da Bacia do Araripe (correspondente a amostra A1), respectivamente designados comercialmente por *Mont Charmot* e *Pedra Cariri* que são provenientes respectivamente da Formação Jandaíra da Bacia Potiguar e do Membro Crato da Formação Santana da Bacia do Araripe. Os testes foram realizados apenas na direção utilizada comercialmente com a face das placas paralelas a estratificação.

### 8.1 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS CALCÁRIOS SOB ATAQUE QUÍMICO

#### 8.1.1 Ataque químico

O ensaio foi realizado utilizando os reagentes, e tempo de exposição, aplicados para testes em placas cerâmicas, norma NBR 13818/97 anexo H da ABNT.

Foram utilizados 5 (cinco) corpos de prova de cada tipo de calcário com dimensões 10 x 10 x 3 cm, sendo o Mont Charmot com face e polida a Pedra Cariri utilizado com face bruta simulando, assim, a forma de uso habitual desses materiais.

As placas foram inicialmente lavadas com água destilada e colocadas na estufa a 70°C por 24 horas. Para a viabilização na aplicação dos reagentes foi fixado um copo descartável com diâmetro de 7 cm em uma das superfícies de cada placa (Figura 8.1). Foram aplicados os reagentes sobre as placas, no interior dos copos, pelo tempo determinado para cada substância, conforme indicado na norma (Tabela 8.1). Após a retirada das substâncias as amostras foram lavadas em água corrente, secas naturalmente, as superfícies foram digitalizadas, processadas no *software* ImageJ e avaliados os efeitos dos ataques químicos na alteração da cor.

**Figura 8.1** – Aplicação dos reagentes nas placas utilizando copos descartáveis.



**Tabela 8.1** – Reagentes, fórmula química, concentração, classe de reagente/produtos e tempo de ataque.

Reagente	Fórmula Química	Concentração	Classe de Reagente/Produtos	Tempo de Ataque (h)
Cloreto de Amônia	NH <sub>4</sub> Cl	100g/l	Produtos químicos domésticos / detergentes e sabões.	24
Hipoclorito de Sódio	NaClO	20mg/l	Produto para tratamento de água / água sanitária, cloro.	24
Ácido Cítrico	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	100g/l	Acido de baixa concentração / suco de frutas cítricas, vinagre e refrigerantes.	96
Hidróxido de Potássio	KOH	100g/l	Álcalis de alta concentração / sabões em geral	96
Acido Clorídrico	HCl	3%	Acido de baixa concentração / ácido muriático.	96

Adaptado da norma NBR 13818 anexo H (ABNT, 1997).

### 8.1.2 Aquisição e análise das imagens

A aquisição e análise das imagens visam a avaliação dos efeitos dos ataques químicos; conforme acima comentado. A aquisição depende de dois fatores, os quais se encontram relacionados com as resoluções espectrais e espaciais que se desejam obter (BESSA et al, 2008).

A resolução espectral se relaciona com os parâmetros de regulação do sistema de aquisição (brilho e contraste), enquanto a resolução espacial está relacionada com a escala de trabalho e depende da resolução espacial máxima permitida pelo equipamento.

A aquisição de imagem das placas ocorreu em duas etapas do ensaio, antes e após o ataque químico. A digitalização foi realizada com *scanner* na resolução de 600 dpi.

As imagens digitais adquiridas foram processadas utilizando o *software* ImageJ (open source) e realizada a extração de características das imagens. Um resumo dos fundamentos matemáticos do estudo deste software está descrito em Dias (2008).

A extração de características das imagens foi realizado de acordo com as técnicas de Rodenacker e Bengtsson (2003), que é um conjunto de operações de processamento e análise das imagens que teve como finalidade obter valores numéricos (parâmetros estatísticos) que caracterizam as imagens.

As características da imagem que foram extraídas para analisar a variação antes e depois do ensaio de alterabilidade foram agrupadas em duas categorias: cromáticas e morfológicas.

As características cromáticas descrevem a cor ou composição espectral da radiação emitida ou refletida dos objetos, quantificada pela intensidade dos pixels em diferentes bandas espectrais. Para estudo da cor foram extraídas diretamente de cada banda do espectro RGB que compõe a imagem das medidas estatísticas das intensidades (frequência dos níveis de cinza), média, moda, desvio padrão, máximos e mínimos.

As características morfológicas descrevem a forma dos objetos que compõem as imagens. Elas não levam em conta a intensidade dos pixels e são calculadas sobre imagens binárias. Com essa metodologia foram comparados os objetos estruturantes das imagens que estão baseados em histogramas que delimitam espaços reais os quais formam áreas que podem ser interpretadas como granulações independentes.

Para chegarmos aos resultados finais foram utilizadas combinações das operações fundamentais da morfologia matemática erosão e dilatação (DOUGHERTY; LOTUFO, 2003). A erosão faz desaparecer todos os conjuntos inferiores ao elemento estruturante e permite também separar conjuntos que estiverem próximos. A dilatação permite conectar conjuntos separados e preenche todos os furos que são menores do que o elemento estruturante (DIAS, 2008).

A dilatação e erosão foram empregadas em pares sendo definidas como:

Abertura - erosão da imagem seguida da dilatação da imagem erodida e;

Fechamento - dilatação da imagem seguida da erosão da imagem dilatada.

A operação de abertura suaviza o contorno dos objetos da imagem com a eliminação de ruídos (pixels isolados). A operação de fechamento também suaviza seções do contorno da imagem unindo linhas próximas e preenche pequenos vazios.

Essas operações atuam como filtro aos contornos dos elementos através da eliminação de detalhes da imagem menores que o elemento estruturante sem distorção geométrica dos detalhes.

As alterações impostas sob certas condições a que podem ser submetidos os materiais rochosos podem modificar, de modo intenso, a textura dos mesmos, transformando o arranjo estrutural (dispersão) e as propriedades (cor, forma, ordem, etc.) das suas unidades estruturais elementares (elementos de textura), principalmente, pela formação de heterogeneidades de natureza variada como vazios, alterações, etc. (FIGUEIREDO, MAURÍCIO; AIRES-BARROS, 1995, 1996).

Dentre os vários aspetos que podem ser estudados através das técnicas de análise de imagem, optou-se por avaliar as características cromáticas e morfológicas, a partir de imagens adquiridas através de digitalização das superfícies de placas das rochas estudadas antes e depois do ataque químico.

## **8.2 RESULTADOS**

As alterações mais evidentes foram observadas após contato com os ácidos cítrico e clorídrico (Tabela 8.2). Outras alterações menores e quase não perceptíveis a vista humana foram identificadas através da extração de características da imagem digital.

As duas amostras estudadas são calcários de composições similares mas apresentam variações em sua textura devido as diferentes formas de deposição da qual foram formadas. Em geral ocorrem os mesmos tipos de alterações, sendo diferenciadas pela intensidade na variação da cor, fatos ligado ao arranjo dos grãos da matriz.

### **8.2.1 Cor**

A alteração na cor dessas rochas são evidentes através de análise visual e direta das imagens correspondentes às fases do ensaio, e reforçada pela análise das curvas individuais de cada componente de cor no espectro RGB (vermelho, verde e azul), as quais normalmente exibem formas unimodais com leves deslocamentos para os valores mais altos dos níveis de cinzento.

Os parâmetros estatísticos obtidos no espectro RGB estão apresentados na Tabela 8.2 e mostram semelhanças quando comparados aos valores medidos antes do ataque químico (rocha sã).

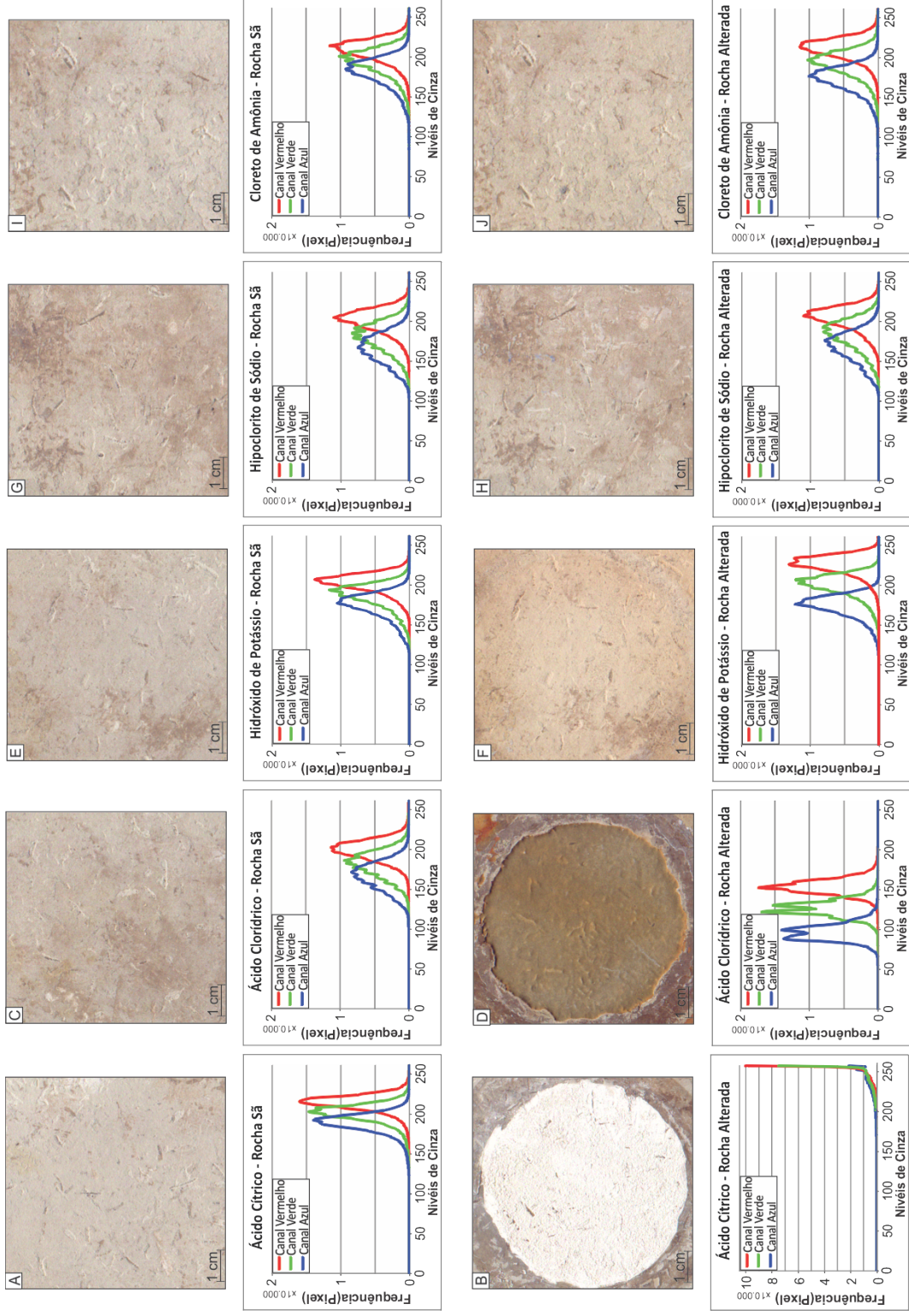
**Tabela 8.2** – Valores dos espectros RGB obtidos através da análise de imagem dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri em amostra sã e alterada após ataque químico.

Reagente	Valor	Pedra Cariri						Mont Charmot					
		Rocha Sã			Rochas Alterada			Rocha Sã			Rochas Alterada		
		Canais			Canais			Canais			Canais		
		R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Ácido Cítrico	<b>Média</b>	208,58	195,93	183,93	246,33	241,11	234,81	226,87	204,05	188,46	253,41	252,96	248,94
	Máximo	255	255	251	255	255	255	255	241	231	255	255	255
	Mínimo	99	83	77	76	73	72	150	115	107	166	163	152
	Moda	211	198	188	255	255	255	231	203	189	255	255	251
	Dv. Padrão	10,95	12,45	12,56	13,72	17,95	19,74	7,74	9,18	10,27	3,84	5,04	5,34
Ácido Clorídrico	<b>Média</b>	194,61	177,34	162,53	150,21	123,60	94,19	218,80	196,61	179,96	223,79	204,85	189,82
	Máximo	255	248	243	207	216	186	253	249	237	255	251	255
	Mínimo	115	83	84	94	55	34	133	99	95	156	125	104
	Moda	198	182	168	149	119	97	220	198	182	222	205	191
	Dv. Padrão	12,66	15,88	16,76	9,37	10,13	10,18	6,20	7,76	9,63	7,13	7,95	8,94
Hidróxido de Potássio	<b>Média</b>	197,65	182,17	169,32	220,51	194,98	169,98	233,99	213,61	197,53	224,31	199,93	180,72
	Máximo	255	248	234	255	248	232	255	255	244	255	245	244
	Mínimo	110	95	76	130	96	90	109	75	92	121	96	91
	Moda	202	189	173	222	203	173	235	215	198	225	199	180
	Dv. Padrão	11,91	14,91	15,85	12,51	14,45	13,91	7,09	8,01	8,37	6,86	7,82	8,75
Hipoclorito de Sódio	<b>Média</b>	196,21	176,44	161,41	199,27	179,38	163,58	228,34	206,28	189,99	225,25	205,41	190,20
	Máximo	255	255	248	255	253	241	255	255	247	255	255	255
	Mínimo	104	81	75	116	94	85	131	100	100	139	116	106
	Moda	200	181	163	202	188	172	231	208	192	229	206	192
	Dv. Padrão	14,66	17,95	18,20	14,91	18,37	18,75	7,24	9,02	10,76	6,67	8,24	10,00
Cloreto de Amônia	<b>Média</b>	203,72	189,59	176,59	206,49	188,15	169,15	234,28	213,34	197,03	232,18	219,61	211,81
	Máximo	255	255	252	255	252	234	255	245	238	255	254	253
	Mínimo	104	87	83	101	72	71	146	118	99	161	141	131
	Moda	209	196	181	209	193	173	235	215	199	234	222	213
	Dv. Padrão	13,91	16,62	17,26	13,41	15,86	15,86	5,51	6,72	7,58	5,93	6,73	7,22

Como pode ser visto nas Figuras 8.2 e 8.3, após aplicação dos reagentes químicos nas superfícies das placas foram observados danos irreversíveis às características cromáticas da rocha.

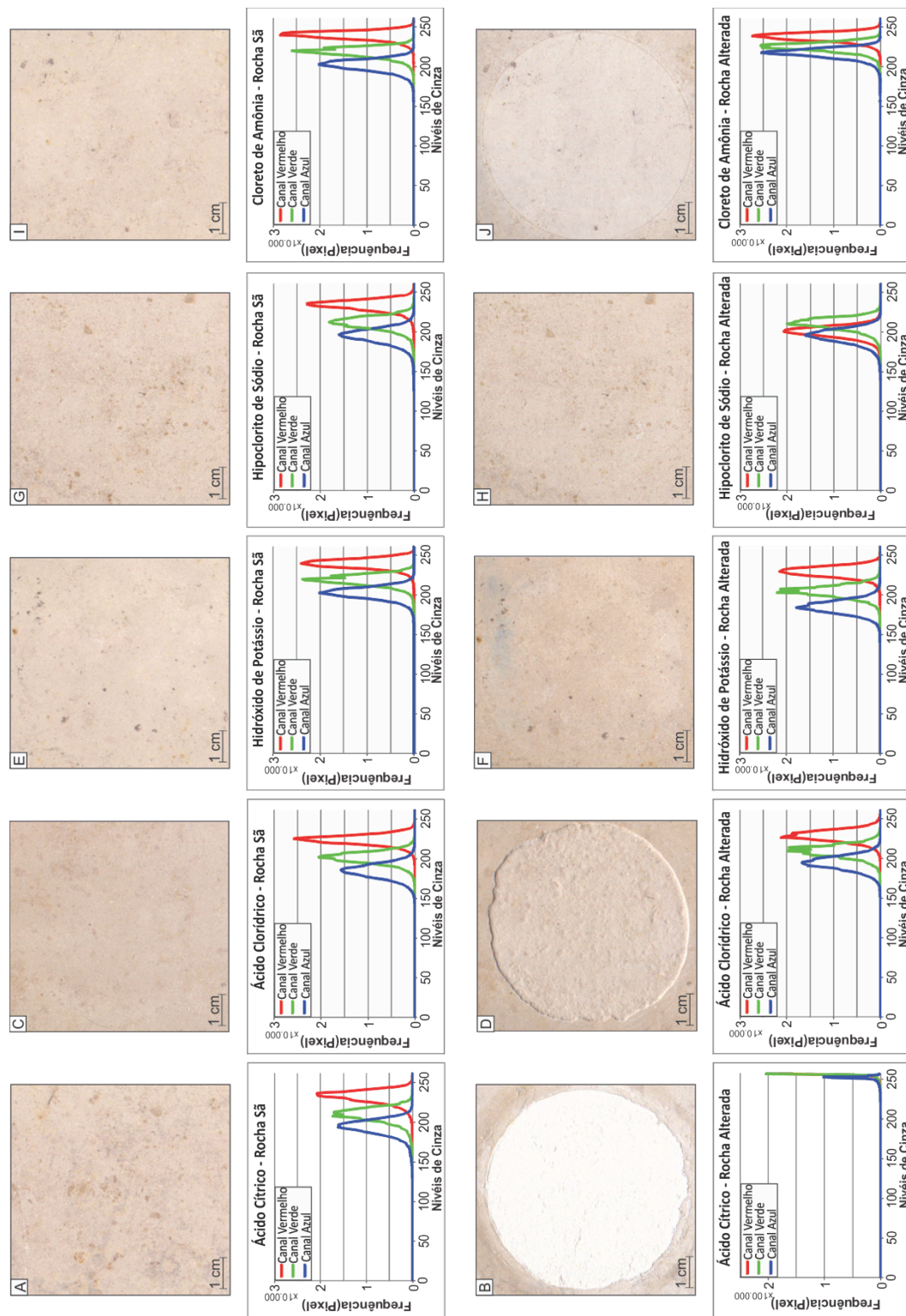


**Figura 8.2** – Pedra Cariri. Imagens das placas e histogramas individuais de cor para as componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B) antes (rocha sã) e após ataque (rocha alterada) com os reagentes.



**Legenda:** (A e B) ácido cítrico; (C e D) ácido clorídrico; (E e F) hidróxido de potássio; (G e H) hipoclorito de sódio e (I e J) cloreto de amônia.

**Figura 8.3** – Mont Charmot. Imagens das placas e histogramas individuais de cor para as componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B) antes (rocha sã) e após ataque (rocha alterada) com os reagentes.



**Legenda:** (A e B) ácido cítrico; (C e D) ácido clorídrico; (E e F) hidróxido de potássio; (G e H) hipoclorito de sódio e (I e J) cloreto de amônia.

Na Tabela 8.3, são mostrados a variação dos valores médios dos espectros RGB para cada reagente nas duas amostras.

Com o reagente ácido cítrico foi observado um padrão na alteração das características cromáticas. A Pedra Cariri e o Mont Charmot tiveram uma elevação na frequência dos espectros RGB, ficando a média dos níveis de cinza nos três canais de cores muito próximo do valor 255 (valor da cor branca em imagem digital RGB).

O ácido clorídrico reagiu com as rochas corroendo-as, reação esperada por se tratarem de rochas calcárias. Entretanto, foi observado que a Pedra Cariri sofreu uma perda nos níveis de cinza dos espectros RGB de 22,81%, 30,31% e 42,05% (Tabela 8.3), o que caracteriza um escurecimento da cor, enquanto no Mont Charmot houve um ganho de cerca de 5% dos espectros RGB, caracterizando um leve clareamento da rocha. Esse resultado ocorreu devido as diferenças petrográficas das amostras, a Pedra Cariri é um calcário finamente laminado com intercalações de cores mais escuras nas finas camadas que contem óxido de manganês. O ácido corroeu a placa deixando exposta uma nova camada, que contem óxido de manganês em sua composição e ficando mais escura que a camada inicial.

Nos demais reagentes (hidróxido de potássio, hipoclorito de sódio e cloreto de amônia) as mudanças foram diferenciadas para as duas rochas, mas mantendo os mesmos níveis de alteração quando são comparadas em valores modulares. Na Pedra Cariri o hidróxido de potássio afetou mais as características do espectro vermelho, enquanto no Mont Charmot o espectro azul sofreu maior variação das características. O espectro verde teve alterações similares mas em direções opostas, na Pedra Cariri ocorreu aumento de 7%, enquanto no Mont Charmot houve uma redução de 6% da média (Tabela 8.3).

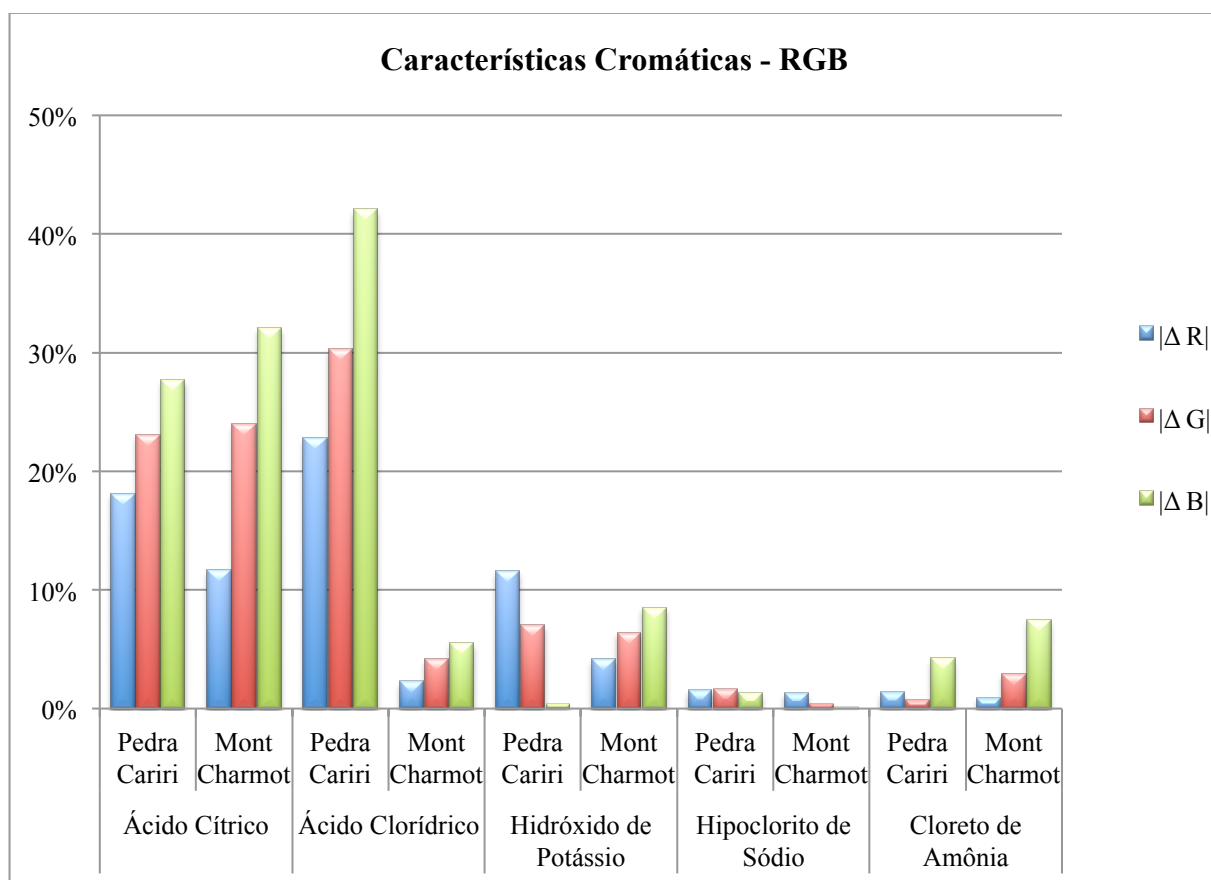
**Tabela 8.3** – Variação dos valores dos espectros RGB obtidos através da análise de imagem dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri em amostra sã e alterada após ataque químico.

Rocha	Reagente	$\Delta R$	$\Delta G$	$\Delta B$
<b>Pedra Cariri</b>	Ácido Cítrico	18,10%	23,06%	27,67%
	Ácido Clorídrico	-22,81%	-30,31%	-42,05%
	Hidróxido de Potássio	11,57%	7,03%	0,39%
	Hipoclorito de Sódio	1,56%	1,66%	1,34%
	Cloreto de Amônia	1,36%	-0,76%	-4,22%
<b>Mont Charmot</b>	Ácido Cítrico	11,70%	23,97%	32,09%
	Ácido Clorídrico	2,28%	4,19%	5,48%
	Hidróxido de Potássio	-4,14%	-6,40%	-8,51%
	Hipoclorito de Sódio	-1,36%	-0,43%	0,11%
	Cloreto de Amônia	-0,90%	2,94%	7,50%

O hipoclorito de sódio foi o reagente que modificou menos os três espectros (vermelho, verde e azul), tendo para as duas amostras uma variação menor que 2% (Figura 8.4).

O cloreto de amônia modificou pouco os espectros vermelho e verde (Figura 8.4), ocorrendo maior variação no espectro azul (-4% Pedra Cariri e 7% Mont Charmot).

**Figura 8.4** – Gráfico da variação (percentagem na função modular) das características cromáticas dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri obtidos através da análise de imagem da amostra sã e alterada após ataque químico.



As curvas dos níveis de cinza no espectro RGB mostram variações das características em todas as placas, alguns reagentes para níveis mais elevados e em outros reduzindo. Isso mostra que as características cromáticas das rochas se alteram de forma diferente para os diferentes reagentes. Todos podem ser vistos como nocivos para a manutenção das cores originais dos produtos, tendo nesse trabalho maior efeito nos calcários Pedra Cariri. Este resultado é devido as suas características petrográficas onde as finas laminações e maior granulometria da sua textura facilitam a percolação dos ácidos, fator acentuado por serem habitualmente utilizadas na forma bruta.

### 8.2.3 Características morfológicas

A aplicação dos processos de abertura e fechamento possibilitou a análise dos padrões morfológicos das imagens, obtendo-se curvas de distribuição granulométrica (Figura 8.5) referentes à distribuição de tamanho (granulometria) e os respectivos parâmetros básicos (Tabela 8.4).

Os resultados obtidos mostram que após o ataque químico nas placas ocorreu redução na média dos tamanhos dos grãos. Foi observado nos histogramas de distribuição aumento na frequência de grãos com dimensões maiores que 1 mm. Este fato demonstra que os elementos representados na fase fechamento se tornam cada vez mais finos e granulometricamente mais homogêneos após o ataque químico.

As alterações das dimensões das características da morfologia das imagens após ataque químico se comportaram de forma padrão com relação aos reagentes ácido clorídrico, hidróxido de potássio, hipoclorito de sódio e cloreto de amônia. E o ácido cítrico afetou as características de forma diferenciada, principalmente na Pedra Cariri.

O hidróxido de potássico foi a substância que menos afetou as dimensões dos grãos, tanto na fase de abertura quanto no fechamento.

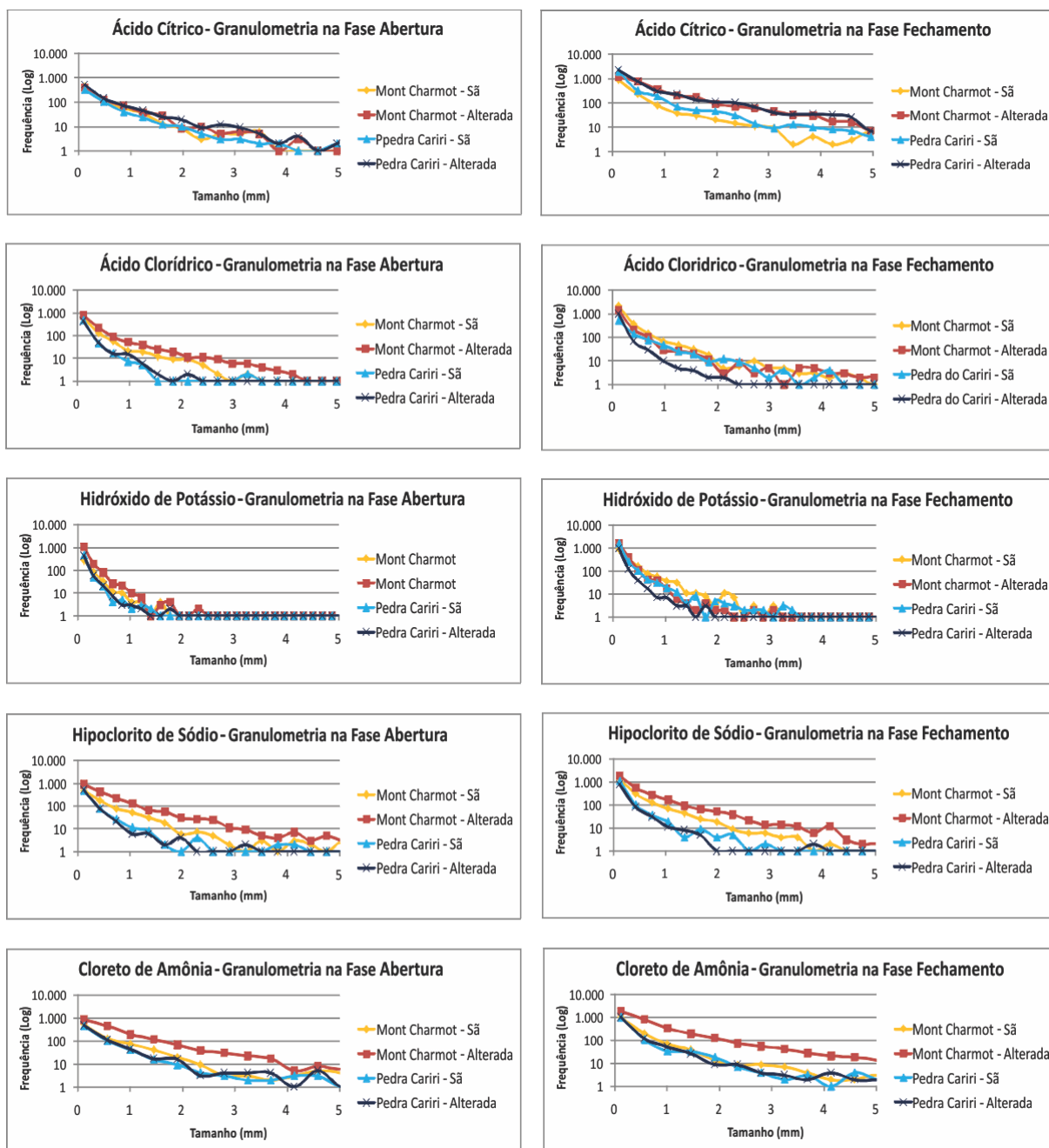
O deslocamento das curvas granulométricas no aumento da frequência é associado ao aparecimento de elementos claros na textura de maiores dimensões. A textura assim será mais grosseira que a inicial.

**Tabela 8.4** – Valores das distribuição de tamanhos (granulometria em mm) para as amostras antes (rocha sã) e após (rocha alterada) o ataque com os reagentes, nos calcários Pedra Cariri e Mont Charmot.

Reagente	Valor	Pedra Cariri				Mont Charmot			
		Abertura		Fechamento		Abertura		Fechamento	
		Rocha Sã	Rocha Alterada	Rocha Sã	Rocha Alterada	Rocha Sã	Rocha Alterada	Rocha Sã	Rocha Alterada
Ácido Cítrico	<b>Média (mm)</b>	<b>0,88</b>	<b>0,67</b>	<b>0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>0,92</b>	<b>0,48</b>	<b>0,66</b>	<b>0,30</b>
	Moda	0,36	0,36	0,12	0,12	0,36	0,26	0,12	0,09
	Dv. Padrão	0,85	0,5	0,77	0,63	1,07	0,35	1,18	0,35
Ácido Clorídrico	<b>Média (mm)</b>	<b>0,95</b>	<b>1,09</b>	<b>0,45</b>	<b>0,48</b>	<b>0,78</b>	<b>0,86</b>	<b>0,41</b>	<b>0,59</b>
	Moda	0,36	0,36	0,12	0,12	0,36	0,22	0,12	0,07
	Dv. Padrão	2,06	2,33	1,55	1,84	0,93	1,15	1,17	1,48
Hidróxido de Potássio	<b>Média (mm)</b>	<b>0,93</b>	<b>1,04</b>	<b>0,46</b>	<b>0,59</b>	<b>0,75</b>	<b>0,70</b>	<b>0,45</b>	<b>0,41</b>
	Moda	0,36	0,36	0,12	0,12	0,36	0,22	0,12	0,07
	Dv. Padrão	1,75	1,92	1,17	1,77	0,68	1,57	0,62	1,29
Hipoclorito de Sódio	<b>Média (mm)</b>	<b>1,16</b>	<b>1,08</b>	<b>0,56</b>	<b>0,76</b>	<b>0,81</b>	<b>0,64</b>	<b>0,54</b>	<b>0,45</b>
	Moda	0,36	0,36	0,12	0,12	0,36	0,22	0,12	0,07
	Dv. Padrão	1,94	2,16	1,92	2,43	0,75	0,68	1,10	0,87
Cloreto de Amônio	<b>Média (mm)</b>	<b>1,07</b>	<b>1,06</b>	<b>0,65</b>	<b>0,67</b>	<b>0,93</b>	<b>0,58</b>	<b>0,59</b>	<b>0,39</b>
	Moda	0,36	0,36	0,12	0,12	0,36	0,22	0,12	0,07
	Dv. Padrão	1,53	1,46	1,88	1,89	1,03	0,60	1,43	0,68

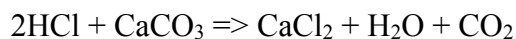


**Figura 8.5** – Curvas de distribuição granulométrica por abertura e fechamento obtidas das imagens antes e após os ataques químicos.



### 8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O carbonato de cálcio em contato com o ácido clorídrico desencadeia uma reação formando água, gás carbônico e cloreto de cálcio, corroendo a rocha onde o reagente ficou em contato, como a reação a seguir.



(8.1)

As outras substâncias afetaram em menor grau, sendo observadas alterações nos padrões do espectro RGB da imagem na seguinte ordem crescente de alteração: hidróxido de potássio, cloreto de amônia e hipocloreto de sódio.

Em ambas as rochas foram observadas as seguintes alterações após o contato com as substâncias. O cloreto de amônia alterou as superfícies embranquecendo sua cor original, com variação menor que 8% das características originais. O hidróxido de potássio provocou um efeito de clareamento da cor, observado na alteração dos três canais de cor RGB em níveis similares (9%). O ácido clorídrico ocasionou o escurecimento da cor principalmente na Pedra Cariri, onde foi registrado variação no canal azul (B) superior a 40%. O ácido cítrico removeu completamente a cor original ficando a rocha completamente branca. E o hipoclorito de sódio foi o que menos afetou a rocha, alterando menos de 8% o espectro azul.

Recomenda-se não utilizar os calcários estudados em ambientes que sejam propícios a necessidade de limpeza constante com produtos agressivos como ácido muriático, sabão e detergentes. Devido a presença de óxido de manganês a Pedra Cariri está mais susceptível ao escurecimento quando em contato com ácido de baixa concentração, como por exemplo o ácido muriático, sendo maléfico também ao Mont Charmot pelo processo de corrosão que irá ocorrer.

Apesar da Pedra Cariri ter apresentado variações dos espectros RGB menores que 2% após aplicação do hipoclorito de sódio (cloro) recomenda-se atenção pois são constantemente utilizadas no entorno de piscinas, ao longo do tempo a falta de drenagem adequada pode resultar em constante acúmulo de água com cloro podendo provocar clareamento.

Muitos produtos de limpeza usados no dia-a-dia na manutenção de materiais cerâmicos e outros revestimentos podem danificar a cor das rochas. Por isso não se recomenda a utilização de: produtos de limpeza ácidos; amônia; produtos de limpeza alcalinos; vinagre; álcool; produtos para limpar vidros; tira manchas.

Todos os reagentes utilizados nos ensaios são substâncias de uso cotidiano encontradas nos produtos de limpeza ou na manutenção de pisos, fachadas e utensílios. As substâncias apresentaram sempre algum poder agressivo as rochas, o que reforça a importância da ampliação dos conhecimentos das características tecnológicas das rochas naturais e de seu comportamento diante das inúmeras possibilidades de alterabilidade que apresentam.

## 9 ESTUDO CROMÁTICO DOS CALCÁRIOS EXPOSTOS À AMBIENTE COM DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO<sub>2</sub>)

Esse estudo teve como objetivo analisar o comportamento dos padrões cromáticos após o envelhecimento acelerado em câmara com atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

Os ensaios de *alterabilidade química em câmaras com atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)* foram realizados no Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), em Lisboa, conforme descrito no capítulo 7, e foram aplicados nos corpos de prova utilizados a fim de acelerar, em laboratório, os processos de envelhecimento e intemperismo das rochas.

Como as observações visuais nem sempre são suficientes para permitir a distinção de pequenas variações cromáticas, as cores foram medidas através da técnica de análise cromática por espectrocolorímetro realizadas com base nas coordenadas colorimétricas do sistema colorimétrico da Commission International de Eclairage - CIE 1976 (L\*, a\*, b\*), frequentemente denominado de CIELAB, e após 0, 25, 50 e 100 ciclos de envelhecimento.

Para estes testes foi selecionado um dos calcários da Bacia Potiguar (correspondente a amostra P1) e outro da Bacia do Araripe (correspondente a amostra A1), respectivamente designados comercialmente por “Mont Charmot” e “Pedra Cariri”.

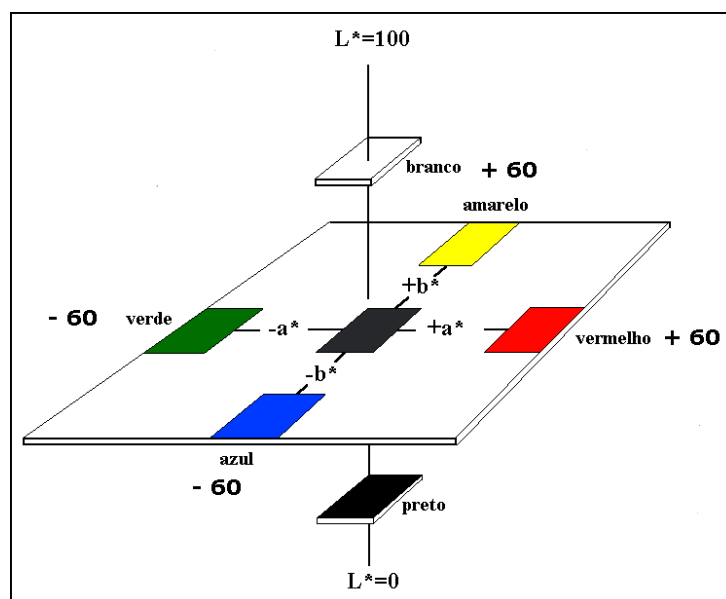
### 9.1 METODOLOGIA PARA ANÁLISE CROMÁTICA DOS CALCÁRIOS EM ESTUDO

#### 9.1.1 Princípio da Técnica de Colorimetria

Para a caracterização colorimétrica das superfícies das placas foi adotado o sistema de referência CIE (Commission Internationale d'Éclairage) 1931 no cálculo das coordenadas colorimétricas L\*a\*b\* do espaço cromático uniforme CIE 1976 (CIELAB). Com base nesses parâmetros, foram calculados a variação total de cor ( $\Delta E^*$ ), a variação da cor no eixo claro-escuro ( $\Delta L^*$ ); a variação do tom e croma, verde – vermelho ( $\Delta a^*$ ); e a variação do tom e croma azul – amarelo ( $\Delta b^*$ ).

Este sistema de cor é baseado em três dimensões: o tom que corresponde à tonalidade da cor (vermelha, azul e verde) e relaciona-se com a longitude da onda de luz; o croma, pureza ou saturação, que corresponde ao grau de intensidade da cor e a claridade ou luminosidade, que corresponde à cor e relaciona-se com a intensidade luminosa e a refletância da luz (ESBERT et al. 1997, IÑIGO et al. 1997) (Figura 9.1).

**Figura 9.1** – Coordenadas no sistema CIELAB  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .



**Fonte:** Bessa, 2004 apud Pinto, 1997, modificado.

Os elementos químicos que são mais efetivos na produção de cores em luz transmitida e refletida, quer estejam presentes como componentes integrais, quer como impurezas, são os metais de transição. Dentre esses metais destacam-se o titânio, o vanádio, o cromo, o manganês, o ferro, o níquel e o zinco (FIGUEIREDO, 1999; BESSA, 2004). Destes elementos, por ser o mais abundante na crosta terrestre, o ferro constitui o fator dominante da cor dos minerais (KLEIN; HURBUT, 1993).

As modificações de cores são também utilizadas na visualização de alterações sofridas pelos materiais ao longo do tempo, tanto em condições ambientais normais como agressivas.

### 9.1.2 Procedimentos do ensaio

O procedimento para a realização dos ensaios foi o indicado pelo próprio manual do aparelho espectrofotômetro da Minolta, modelo CM-508i, o qual é rotineiramente utilizado no Laboratório do Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST), de Lisboa, e descrito a seguir.

Para a realização desse ensaio foram utilizadas 4 placas quadradas de 10 cm de lado e 1,5 cm de espessura, para cada calcário estudado, e realizadas 12 medidas em cada placa.

A medição das características cromáticas foram realizadas utilizando o espectrofotômetro da Minolta, modelo CM-508i, que possui um sistema de iluminação difusa

e um ângulo de observação de 8° definido relativamente à normal da amostra com área de medida de 8 mm (Figura 9.2).

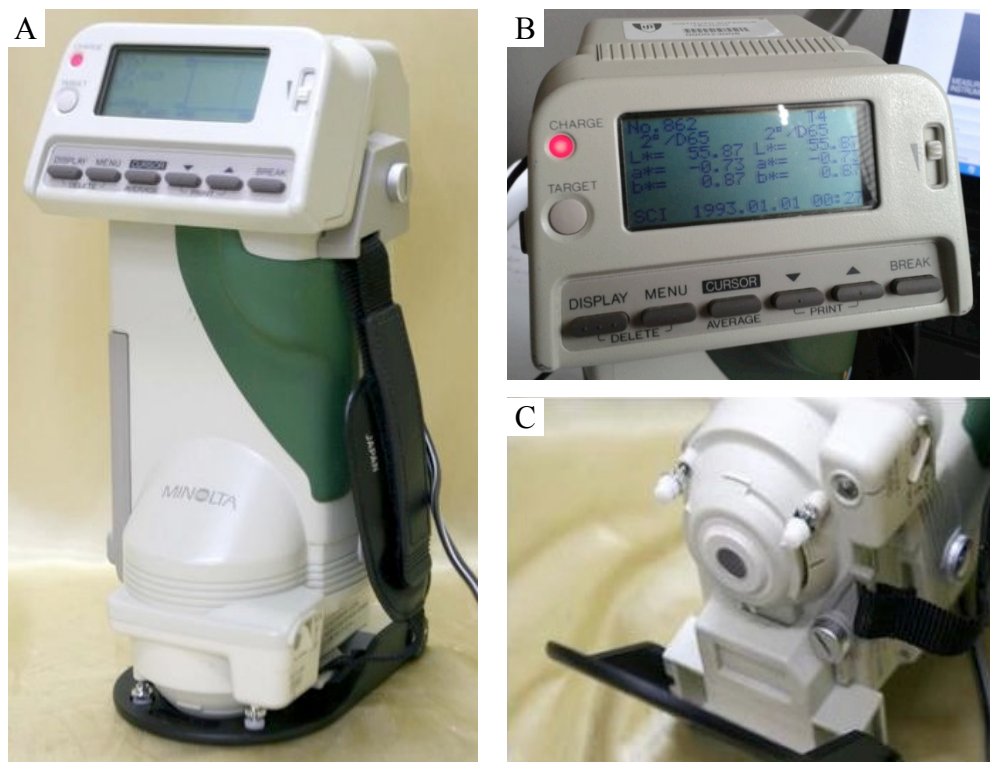
As medições foram feitas com a rocha sã (ciclo 0) e ao final do 25°, 50° e 100° ciclos de alteração na câmara climática ao dióxido de enxofre. Ao final de cada ciclo as placas foram retiradas da câmara, secas em estufa a 70°C por 24h, e medidas as características colorimétricas.

Os valores da características colorimétricas são expressa através da diferença total de cor ( $\Delta E^*$ ) no sistema CIELAB, valor definido com base na seguinte expressão:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (9.1)$$

onde,  $\Delta L^* = L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{inicial}}$ ;  
 $\Delta a^* = a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{inicial}}$ ;  
 $\Delta b^* = b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{inicial}}$ .

**Figura 9.2** – Aparelho espectrofotômetro, Minolta, modelo CM-508i, utilizado para realização das medidas de cor dos calcários naturais e após os ciclos de envelhecimento.



**Legenda:** (A) Espectrofotômetro Minolta, modelo CM-508i; (B) Visor com leituras das coordenadas colorimétricas  $L^*a^*b^*$ ; (C) Sistema de iluminação difusa e sensor ótico de medição com área de 8mm. Fonte: [http://blog.daum.net/world\\_one/21](http://blog.daum.net/world_one/21)

## 9.2 RESULTADOS

Neste trabalho, as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  iniciais correspondem aos valores obtidos pela leitura colorimétrica das amostras de rochas nos seus estados naturais (leitura inicial antes do ensaio na câmara de  $SO_2$ ) e as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  finais foram determinadas nas amostras das rochas após os 25, 50 e 100 ciclos na câmara de  $SO_2$ , conforme descrito no item anterior.

Os calcários Mont Charmot e Pedra do Cariri apresentam resultados similares, como se esperava pela análise qualitativa das cores das placas (Tabela 9.1). Segundo Iñigo et al. (1997), para que duas cores sejam iguais as suas coordenadas colorimétricas ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) devem também ser iguais. Isto é, neste espaço colorimétrico, cada cor é representada por um único ponto.

Os calcários estudados no ciclo 0 (rocha sã) apresentam pequena variedade das luminosidades/claridades ( $L^*$ ) que demonstra que a Pedra Cariri ( $\Delta L^* 67,91$ ) possui uma luminosidade mais escura que o Mont Charmot ( $\Delta L^* 77,70$ ) (Tabela 1). Com relação as variações entre os cromas verde-vermelho ( $a^*$ ) e azul-amarelo ( $b^*$ ) são mínimas. Segundo Boutin e Leroux (2000), somente as variações de cor total  $\Delta E^*$ , superiores a 3, são detectadas pela vista humana.

Os calcários submetidos à exposição ao  $SO_2$  sofreram um leve efeito de escurecimento ( $\Delta L^* < 0$ ), o Mont Charmot teve uma redução nos tons avermelhados ( $\Delta a^* < 0$ ) enquanto a Pedra Cariri teve uma redução nos tons de verde ( $\Delta a^* > 0$ ); ambas tiveram uma redução da tonalidade azul ( $\Delta b^*$ ).

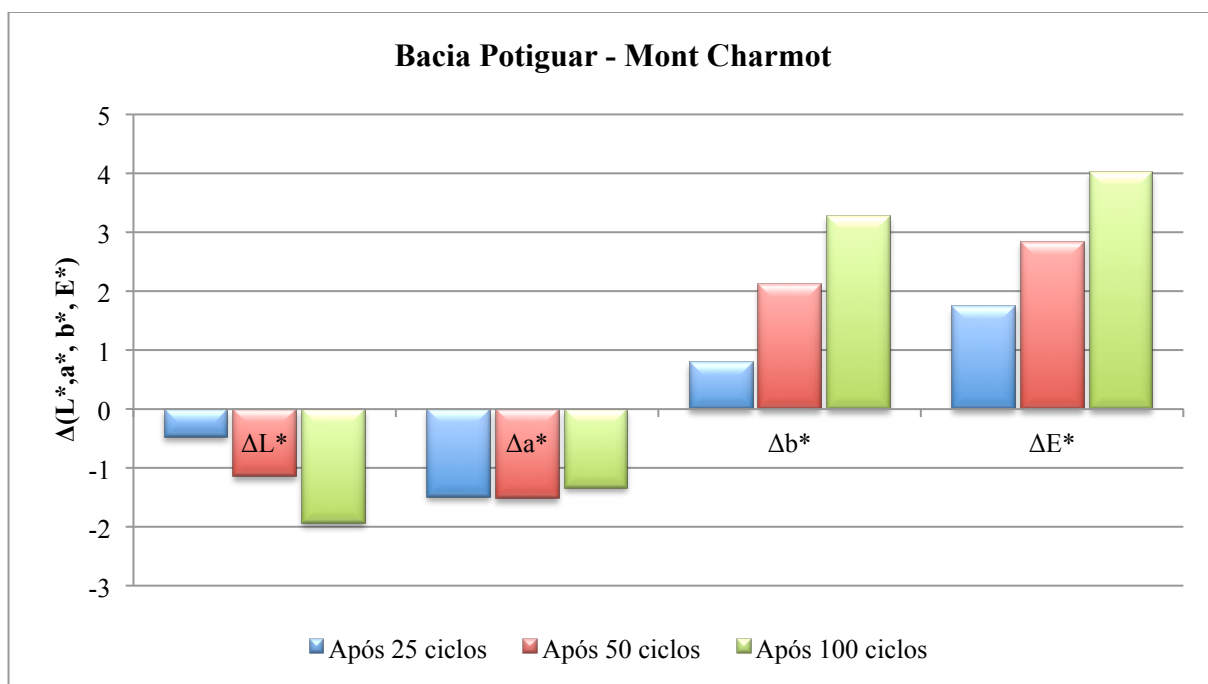
**Tabela 9.1** – Media dos parâmetros das características cromáticas no sistema CIELAB dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri.

Espaço Colorimétrico CIELAB								
Ciclos	Valores	Bacia do Araripe (Pedra Cariri)						
		L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
0	<b>Média</b>	<b>67,91</b>		<b>0,61</b>		<b>8,63</b>		
	Máx.	76,50		2,80		14,17		
	Mín.	56,74		-0,88		0,74		
	Desv. Pad.	4,97		0,92		3,19		
25	<b>Média</b>	<b>67,11</b>	<b>-0,80</b>	<b>0,65</b>	<b>0,05</b>	<b>9,23</b>	<b>0,61</b>	<b>1,00</b>
	Máx.	76,71		2,94		16,95		
	Mín.	55,87		-0,92		0,87		
	Desv. Pad.	5,82		0,98		3,02		
50	<b>Média</b>	<b>66,77</b>	<b>-1,14</b>	<b>0,62</b>	<b>0,02</b>	<b>9,96</b>	<b>1,34</b>	<b>1,76</b>
	Máx.	76,06		2,81		17,44		
	Mín.	50,42		-1,04		1,24		
	Desv. Pad.	6,57		0,99		2,92		
100	<b>Média</b>	<b>66,11</b>	<b>-1,80</b>	<b>0,68</b>	<b>0,07</b>	<b>10,74</b>	<b>2,11</b>	<b>2,78</b>
	Máx.	75,83		3,11		15,97		
	Mín.	49,37		-0,98		3,26		
	Desv. Pad.	7,28		0,98		2,79		
Bacia Potiguar (Mont Charmot)								
0	<b>Média</b>	<b>77,70</b>		<b>3,35</b>		<b>9,98</b>		
	Máx.	83,13		72,35		13,50		
	Mín.	71,84		0,84		3,12		
	Desv. Pad.	3,97		10,20		2,39		
25	<b>Média</b>	<b>77,24</b>	<b>-0,47</b>	<b>1,87</b>	<b>-1,48</b>	<b>10,79</b>	<b>0,80</b>	<b>1,75</b>
	Máx.	82,37		3,20		14,00		
	Mín.	71,92		0,62		6,00		
	Desv. Pad.	3,52		0,77		1,99		
50	<b>Média</b>	<b>76,57</b>	<b>-1,14</b>	<b>1,84</b>	<b>-1,51</b>	<b>12,11</b>	<b>2,13</b>	<b>2,85</b>
	Máx.	81,69		3,16		15,66		
	Mín.	71,58		0,79		8,10		
	Desv. Pad.	2,93		0,68		1,37		
100	<b>Média</b>	<b>75,78</b>	<b>-1,93</b>	<b>2,02</b>	<b>-1,33</b>	<b>13,26</b>	<b>3,28</b>	<b>4,03</b>
	Máx.	79,91		3,24		18,36		
	Mín.	70,32		1,12		10,50		
	Desv. Pad.	2,78		0,68		1,42		

A maior variedade de cor total ( $\Delta E^*$ ) ocorreu no Mont Charmot, mesmo assim considerada baixa (Figura 9.3).

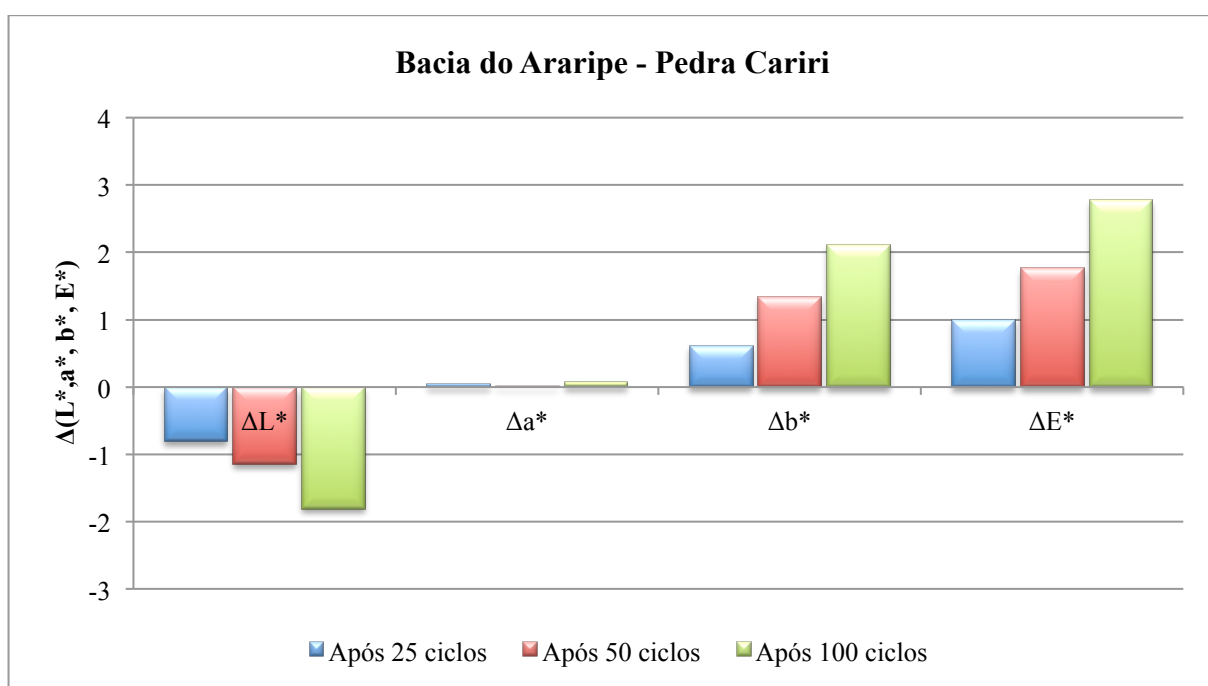


**Figura 9.3** – Variações no calcário Mont Charmot dos parâmetros cromáticos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  e cor total  $\Delta E^*$  após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática com atmosfera saturada em dióxido de enxofre ( $SO_2$ ).



O calcário Pedra Cariri, mostrou a menor alteração total de cor ( $\Delta E^*$ ), e praticamente não sofreu alteração no croma verde-vermelho ( $\Delta a^*$ ) (Figura 9.4).

**Figura 9.4** – Variações no calcário Pedra Cariri dos parâmetros cromáticos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  e cor total  $\Delta E^*$  após 25, 50 e 100 ciclos de alteração em câmara climática com atmosfera saturada em dióxido de enxofre ( $SO_2$ ).



### 9.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise quantitativa realizada, pode-se dizer que a variedade cromática exibida pelas rochas calcárias estudadas da Bacia Potiguar (Mont Charmot) e da Bacia do Araripe (Pedra Cariri) se caracterizam após envelhecimento acelerado por redução da luminosidade/claridade média.

Entre os calcários estudados após exposição dos 100 ciclos de alteração acelerada, o Mont Charmot apresentou a maior variação total de cor ( $\Delta E^*$  médio 4,03) e a Pedra Cariri a menor variação total de cor ( $\Delta E^*$  médio 2,78).

O ensaio de alteração acelerada mostra uma variação progressiva no processo de degradação da cor dos calcários, o que permite supor que quanto mais tempo o calcário for exposto a ambiente poluído mais ele irá alterar sua cor. Um dos efeitos mais perceptíveis deverá ser o escurecimento total da cor.

Pela evolução da alteração da cor, esses calcários não são recomendados para ambientes de exteriores, pois estarão mais susceptíveis a poluição atmosférica principalmente em grandes centros urbanos e zonas industrializadas. A aplicação de produtos impermeabilizantes poderá reduzir e, em alguns casos, conter a alteração.

## 10 CONCLUSÕES

As baterias de ensaios físico-mecânicos e de alterabilidade aplicados na presente pesquisa se mostraram eficientes para a qualificação tecnológica dos conjuntos de calcários ornamentais das Bacias Potiguar e do Araripe, localizadas nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Os calcários estudados são provenientes de cinco níveis estratigráficos diferenciados, sendo três da Bacia Potiguar, comercialmente designados como Mont Charmot, e dois da Bacia do Araripe, tradicionalmente conhecidos como Perda Cariri. As duas variedades são facilmente diferenciadas por marcantes diferenças em seus aspectos estruturais, mas entre os níveis estratigráficos da mesma bacia os conjuntos de calcários apresentam pequenas variações texturais e estruturais entre si. A laminação é a característica mais marcante entre as duas variedades, sendo que a Pedra Cariri apresenta uma forte laminação caracterizada por variação de cores entre as finas camadas e o Mont Charmot apresenta uma fraca anisotropia, e sua estratificação normalmente só é percebida quando analisado com amostras úmidas.

Tomando-se por base a classificação proposta por Grabau (1960), a qual leva em consideração o tamanho médio dos grãos, os calcários dos três níveis Mont Charmot (P1, P2 e P3) se enquadram na classe dos calcilutitos e os dois níveis do Pedra Cariri (A1 e A2) são classificadas como calcilutitos laminados.

Já segundo a classificação de Folk (1959, 1962), que correlaciona a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos, a amostra P1 corresponde a um biopelosparito, a amostra P2 a um biomicrito e a amostra P3 a um micrito com bioclastos. E os calcários Pedra Cariri (A1 e A2) correspondem a micritos.

Entre os níveis do calcário Mont Charmot foi identificada uma variação na quantidade de microfósseis, recristalizações de calcita e compactação. A absorção de água e a porosidade reduzem à medida que os níveis vão se aprofundando, suas densidades são inversamente proporcionais, mostrando que o peso dos sedimentos provocou uma maior compactação nos níveis inferiores. O nível 2 é o que apresenta maior quantidade de microfósseis, fato ligado a evento sazonal de deposição que preservou maior quantidade de matéria orgânica. O nível 1 apresenta maior quantidade de fraturas preenchidas por calcita recristalizada e pequenas concentrações de geodo de calcita, enquanto o nível 3 apresenta uma menor quantidade de fraturas e maior quantidade de recristalizações de calcita de geodos.

Entre os níveis de calcário da Pedra Cariri (A1 e A2) foi identificada alternância de bandas com lâminas milimétricas, marcadas pela coloração creme claro, amarelo, cinza claro

e marrom claro. O nível A2 apresenta leve ondulação nas suas camadas e por diversas vezes são identificadas estruturas de escorregamento e microfalhas.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e físicos-mecânicos qualificam os cinco níveis de calcários como detentores de boa qualidade, cujos parâmetros tecnológicos fornecidos pelos calcários os classificam como correspondentes a calcários de alta densidade, no geral, superiores ou próximos aos valores limítrofes estabelecidos pela ASTM C615 (ASTM, 2010) para utilização como rochas ornamentais e de revestimento. Contudo o calcário Pedra Cariri apresenta um desgaste abrasivo considerado alto e uma redução significativa de sua resistência após ser submetido aos ensaios saturado em água (até 20%) ou após 25 ciclos de congelamento e degelo (até 50%).

Os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri, embora apresentem diferenças entre si, reagem de forma muito semelhante aos agentes agressivos quando submetidos ao ensaio de resistência ao ataque químico e avaliados através de método de tratamento digital de imagens. As substâncias ácidas mostraram uma forte alteração nos padrões cromáticos dos calcários. Em maior ou menor intensidade todos os reagentes utilizados apresentaram algum grau de poder agressivo aos calcários, sendo muito importante uma adequada avaliação dos ambientes onde devem ser utilizados e dos produtos utilizados para limpeza.

O estudo das características porosas e de permeabilidade conjugados a ciclos de alteração com efeitos da variação de temperatura e umidade em atmosfera saturada em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), simulando atmosferas agressivas nos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri, revelaram que são susceptíveis aos processos de deterioração aos quais as rochas são expostas quando aplicadas em grandes centros urbanos ou áreas industrializadas.

Também foi estudada a ação de ambientes com dióxido de enxofre no padrão cromático dos calcários Mont Charmot e Pedra Cariri. Esses calcários mostraram uma redução nas características de luminosidade no sistema de cor CIELAB, sugerindo que quando expostos a ambientes com grande concentração de poluição poderão perder toda sua característica da cor original.

Com os resultados obtidos na pesquisa através da utilização dos diversos métodos de investigação físico-mecânica e de alterabilidade, conclui-se que os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri possuem características que os definem adequados para utilização como rocha ornamental e de revestimento, com restrições a alguns ambientes e aplicações.

Os calcários mostraram um fraco grau de deterioração em ambientes úmidos, poluídos, susceptíveis ao contato com produtos químicos, altas solicitações mecânicas e de desgastes e frágeis estruturas internas que favorecem o seu envelhecimento e influência de

soluções aquosas e gasosas.

O Mont Charmot apresentou maior resistência que o Pedra Cariri em ensaios mecânicos e de desgaste abrasivo, mesmo assim não é recomendado a utilização deles como pisos em ambientes de alto tráfego, como shopping center, aeroporto, terminais rodoviários, soleiras, escadas, etc. Não se recomenda a utilização desses calcários em ambientes externos, pois apresentam estruturas intrínsecas da rocha que favorecem a sua degradação.

Os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri apresentam boa resistência mecânica, sendo que o Mont Charmot responde as solicitações quando aplicado a força nas duas direções ortogonais entre si (paralela e perpendicular a estratificação) de forma semelhante. Já, a Pedra Cariri mostrou em geral maior resistência quando aplicado a força perpendicular à estratificação, resultado que define como sendo o melhor plano de corte das placas com as faces paralelas à estratificação, para melhor resposta aos esforços físicos requeridos.

Por fim, aconselha-se o uso desses calcários em ambientes de interiores sem umidade e de baixo tráfego, se usados como pisos. O Mont Charmot pode ainda ser utilizado em placas de revestimento de exteriores. Ambos ainda podem ser utilizados como tampo de mesas e objetos de decoração.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL FILHO; CAMPOS, 2006. Arranjo produtivo de pedras ornamentais nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri – CE. **Relatório técnico** FINEP/REDESIST: Fortaleza – Ceará, 2006

ANGELI, M. **Multiscale Study of Stone decay by salt crystallization in porous networks**. 2007. 230p. Tese (Ph.D.) - Département des Sciences de La Terre et Environment. Université de Cergy-Pontoise. Paris. 2007.

ARARIPE; FEIJÓ, 1994. In: \_\_\_\_\_ NOGUEIRA, F. C. C. **Método Ground Penetrating Radar (GPR) e Análise Estrutural Aplicados ao Estudo da Geometria Tridimensional de Estruturas Cenozóicas na Bacia Potiguar**. 2004. 79p.. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). DEGEO, UFC, Fortaleza, 2004.

ASSINE M. L. Análise Estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**. 22 (3) p 298 – 300, 1992.

ASSINE, M.L. Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, 24(4): 223-232, 1994.

ASSINE. M. L. Bacia do Araripe. **Revista Brasileira de Geociências**. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n.2, p. 371-379, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12042**: Materiais inorgânicos. Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12763**: Rochas Para Revestimento. Determinação da resistência à flexão. Rio de Janeiro, 1992c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12767**: Rochas para revestimento. Determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, 1992b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12769**: Rochas Para Revestimento. Ensaio de congelamento e degelo conjugado à verificação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1992c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13818**: Determinação da resistência ao ataque químico. Anexo – H. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845**: Rochas para revestimento – Métodos para ensaio. Anexo B - Determinação da Densidade Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água Aparente. Rio de Janeiro, 2010. 3p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. 2010. C568 - Standard Specification for Limestone Dimension Stone.

BECERRA, J. E. B. **Avaliação da Susceptibilidade aos Processos de Deterioração dos Calcários Ornamentais da Formação La Tampa Usados na Construção Civil de Medellín – Colômbia**. 2009. 225p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2009.

BEIRANVAND, B. Quantitative Characterization of Carbonate Pore Systems by Mercury-Injection Method and Image Analysis in a Homogeneous Reservoir. **Society of Petroleum Engineers**. SPE 81479, p.1-9, 2003.

BERTANI, R.T., COSTA, I.G., MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Gabaglia, G.P.R., Milani, E.J. (coords.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, PETROBRÁS, CENSUD, Rio de Janeiro, 291-310. 1990.

BESSA, M. de F. **Rochas Ornamentais do Nordeste de Ceará (Brasil)**. Propriedades Tecnológicas, Alteração e Alterabilidade dos Granitos Vermelho Filomena, Meruoca Clássico e Verde Ceará. 2004. 274p. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2004.

BESSA, M. F. ; TORQUATO, J. R. F.; FIGUEIREDO, C.; NOGUEIRA NETO, J. A. Estudo dos granitos cearenses "Vermelho Filomena, Meruoca Clássico e Verde Ceará" por análise digital de imagem em câmara com atmosfera saturada de SO<sub>2</sub>. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 16, p. 51-62, 2008.

BEURLLEN, K. Geologia da região de Mossoró. **Coleção Mossoroense**, sér. C, 18, 173 p. BRASIL (1974). 1967.

BEURLLEN, K.. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais Acad. Bras. Ciências**. Rio de Janeiro. 43(supl): 1971. 411-415.

BOUTIN, F.; LEROUX, L. Color and weight evolution of limestones protected by water repellents after a three-year ageing period in urban conditions. In: 9<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON DETERIORATION AND CONSERVATION OF STONE, 2000, Venice, **Elsevier**, vol. 2, 2000, p. 197-205.

BRAUN, O.P.G. Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da região nordeste do Brasil. **Boletim da DGM**, Rio de Janeiro, 236: 1-76,1966.



BRITO NEVES, B.B. A Bacia do Araripe no contexto geotectônico regional. In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, 1., 1990. **Anais...** Crato, Atas, DNPM/SBP/ SBG: 21-33.

CAMPOS, C.W.M. Estratigrafia das Bacias Paleozóica e Cretácea do Maranhão. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, 7(2):137-164, 1964.

CASSAB, R.C.T., **Paleontologia da Formação Jandaíra**, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na Paleobiologia dos Gastrópodos. Dissertação de Mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

CIELAB - Commission International de Eclairage (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15. **Colorimetry Bureau Central de la CIE**. Paris. 1976.

CORDOBA, V.C.; MENEZES, M.R.F.; LIMA FILHO, F.P. Fácies, sistemas deposicionais e diagênese da Formação Jandaíra, Neocretáceo, no extremo sudoeste da Bacia Potiguar, RN. In: Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 4, Rio Claro, 1996. **Anais...** Rio Claro, UNESP, p. 107-110.

DANTAS, E. P., JARDIM DE SÁ, E. F.; CASTRO, D. L. Análise de Lineamentos na Porção Central da Bacia Potiguar e sua Reativação Neotectônica. In: VII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1999. **Anais...** Lençóis-BA. Sessão 4, p. 86-89.

DIAS, F. C. **Uso do software Image J para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. 2008. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores – INPE, São José dos Campos, 2008.

DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Mineral Brasileiro 2010**.

DOUGHERTY, E.R., LOTUFO, R. A. **Hands-on morphological image processing**. Washington: SPIE Press, 2003. 290 p.

ESBERT, R. M., ORDAZ, J., ALONSO, F. J., MONTOLÓ, M. **Manual de Diagnosis y tratamiento de materiales pétreos e cerámicos**. Col. legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona. 1997. 140 p.

FIGUEIREDO, C. **Alteração, Alterabilidade e patrimônio cultural construído: o caso da Basílica da Estrela**. 1999. 321p. Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 1999.

FIGUEIREDO, C.; MAURÍCIO, A.; AIRES-BARROS, L. Grey tone function covariance applied to the analysis and quantification of rock decayed surfaces: a preliminary study. In: 8<sup>th</sup> PORTUGUESE CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, Recpad 1996, Guimarães, Portugal, 1996, p. 237-241.

FIGUEIREDO, C.; MAURÍCIO, A.; AIRES-BARROS, L. Morphological analysis and quantification of rock weathered surfaces: preliminary study. **Memória**, Porto, v.4. p. 183-188, 1995.

FOLK, R. L. **Practical petrographic classification of limestones**. American Association Petroleum Geology Bulletin, V. 43, p.1– 38, 1959.

FOLK, R.L. **Spectral subdivision of limestone types**. In: Ham, W. E. (Ed.), Classification of Carbonate Rocks. Tulsa, American Association Petroleum Geologists Memoir 1, 1962, p. 62–84.

FRAZÃO, E.B. Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia, de Engenharia e Ambiental, ABGE. São Paulo. 132p. 2002.

GAURI, K.L; BANDYOPADHYAY, J.K. Carbonate Stone. **Chemical Behavior, Durability and Conservation**. 1. ed. Wiley Interscience publication, 1999. 284p.

GOMES, I.P. **A importância das fraturas no desenvolvimento de feições cársticas em calcários da formação Jandaíra (cretáceo da Bacia Potiguar), Felipe Guerra – RN**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GRABAU, A. W. **Principles of Stratigraphy**. New York: Dover Publications , in two volumes, 1960. 1185 p. Reprinted from 1924 edition.

HEIMHOFER, U., ARIZTEGUI, D., LENNIGER, M., HESSELBO, S.P., MARTILL, D.M. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil). **Sedimentology**, Oxford, 57: 677-694, 2009.

HESSEL, M.H., TOMÉ, M.E.; MOURA, C.R. Ostracodes mesozóicos das bacias do interior do Nordeste brasileiro: o estado da arte. **Revista de Geologia**, Fortaleza, 19(2): 187-206, 2006.

HESSEL, H.H.; FREITAS, F.I. A polibacia do Araripe. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 23, 2009. **Anais...** Fortaleza, Resumos, SBG: 1p.

HOLZ, M.; SIMÕES, M.G. **Elementos Fundamentais de Tafonomia**. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS. 2002. 231 p.

IBRAM. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **RN tem maior reserva de calcário do Brasil**, 2011. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>>. Acesso em: 02 dez 2011.

IDEMA. INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE. **Perfil do Rio Grande do Norte**, 2013.

IÑIGO, A. C.; VICENTE-TAVERA, S.; RIVES, V.; VICENTE, M. A. Color changes in the surface of granitic materials by consolidated and/or water repellent treatments. *Color Research and Application*. 22- 2: p. 133-141. 1997.

KLEIN, C.; HURLBUT Jr. C. **Manual of mineralogy**. (after James D. Dana), 21.ed. John Wiley & Sons, Inc. N.Y., 1993. 681p.

KOWALSKI. W.C. The independence between strengt, softening, swelling and shrinkage of cretaceous marls and “Opokas” and their lithology. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF GEOLOGY OF ENGENEERING, 1, 1970, Paris. **Anais...** Paris: Int. Soc. Géologie of Eng, 1970, 1: 456-464.

MANGANELLI DEL FÀ, C. La porosità nei materiali lapidei naturali e artificiali. **Supplemento al No 10 di Fist Geoitalia**. Modena. 35p, 2002.

MARTILL, D.M., BECHLY, G.; LOVERIDGE, R. The Crato fossils beds of Brazil: Window into an ancient world. New York, Cambridge University: 657p, 2007.

MATA, V. G.; LOPES, J. C. B.; DIAS, M. M. Porous Media Characterisation Using Mercury Porosimetry Simulation. Parte 1. Description of the Simulator and Its Sensitivity to Model Parameters. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Vol.40, p. 3511-3522, 2001a.

MATA, V. G.; LOPES, J. C. B.; DIAS, M. M. Porous Media Characterisation Using Mercury Porosimetry Simulation. Parte 2. An Iterative Method for the Determination of the Real Pore Size Distribution and the Mean Coordination Number. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Vol.40, p. 4836-4843, 2001b.

MATOS, R.M.D., The northeast brazilian rift system. **Tectonics**, 11(4): 766-791, 1992.

MESQUITA, M. P. S. **Composição, estruturas, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**. Rio Claro, 2002. 171p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

MOREIRA, J. K. R. **Análise quanti-qualitativa dos macrofósseis da Formação Crato (Grupo Santana) – Bacia Sedimentar do Araripe**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

NAVARRO, F.C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: ACTAS II CONGRESSO. URUGUAIO DE GEOLOGIA, Uruguai. 1998. p. 103-107.

NEUMANN, V. H. M. L. **Estratigrafia, sedimentologia, geoquímica y diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona. Barcelona. 1999. 244p.

NEUMANN, V.H.M.L. **Sistemas lacustres aptiense-albienses de la Cuenca de Araripe, NE, Brasil**. 1999. 250p. Tese de Doutorado. Universidad de Barcelona, Barcelona, 1999.

OLIVEIRA, A. **Mármore vendido à China e Itália**, 2010. Disponível em: <<http://apodibaixodopano.blogspot.com.br>>. Acesso em 12 nov 2013

PETRI, S. Paleoclimas da era mesozóica no Brasil: evidências paleontológicas e sedimentológicas. **Geociências**, São Paulo, 3(6): 22-38, 1998.

PINTO, A. P. F. **Conservação de pedras graníticas**. Estudo da ação de hidrófugos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Informação Técnica. Geotécnica. ITG 22, 1997. 193 p.

PONTE, F.C. Arcabouço estrutural da Bacia do Araripe. Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 4, São Pedro, **Boletim**, UNESP: 169-177, 1996.

PONTE, F.C.; APPI, C.J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990. Natal, **Anais**, SBG: p. 211-226.

prEN BBB. **Methods of test for natural stone, part XI: Acceleration decay test by temperature, humidity, and sulfur dioxide**. CEN. 1995.

REIS, R. C.; SOUSA, W. T. de. Métodos de lavra de rochas ornamentais. REM - **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, 2003. Disp.: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v56n3/v56n3a11.pdf>.

RODENACKER, K.; BENGTTSSON. E. A feature set for cytometry on digitized microscopic images. **Analytical cellular pathology: the journal of the European Society for Analytical Cellular Pathology**, 25 (1), p. 1-36, 2003.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J. M. V.; CHIODI FILHO, C. Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. **Rev. Rochas & Equipamentos**, v. 47, p. 78-86. Lisboa-Portugal, 1997.

SAMPAIO, A.V., SCHALLER H. Introdução a Estratigrafia da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, **Boletim Técnico PETROBRÁS**, 11(1): 19-44, 1968.

SANTOS M.E.C.M.; CARVALHO M.S.S. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís- reconstruções paleobiológicas. 1a ed., Rio de Janeiro, CPRM Serviço, 2009.

SCHOLLE, P. A.; ULMER-SCHOLLE, D. S. **A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis.** Tulsa, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists. 2003. 459 p.

SEDEC. SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Empresa investirá R\$ 20 milhões no município de Apodi.** 2012. Disponível em: <<http://www.sedec.rn.gov.br>>. Acesso em: 12 nov 2013.

SILVA, A. L. **Estratigrafia física e deformação do sistema lacustre carbonático (Aptiano-Albiano) da Bacia do Araripe em afloramentos selecionados.** 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2003.

SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. Fácies carbonáticas laminadas da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe: litofácies, microfácies e microestruturas. In: BOL. 6º SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL E 3º SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCEO DE AMÉRICA DEL SUR. 2002. São Pedro-SP. UNESP, Rio Claro. 2002, p. 37-41.

SILVA, M.A.M. Evaporitos do Cretáceo da Bacia do Araripe: ambientes de deposição e história diagenética. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, 2(1): 53-63, 1988.

SOUZA, S.M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33, 1982. Salvador, **Anais**, 5: p. 2392-2406.

STEIGER, M. Salts and Crusts. Air Pollution Reviews V.2, Chapter 5. **Imperial College Press**, London. p. 133-181, 2003.

TIBANA, P., TERRA G.J.S. Sequências carbonáticas do Cretáceo da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, **Boletim Técnico PETROBRÁS**, 24(3): 174-183, 1981.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; OLIVEIRA, R. R. de. **Projeto arranjo produtivo local de base mineral do calcário Cariri – Ceará.** [s.n.t]

VIDAL, F. W. H.; SALES, F. A. C. B.; ROBERTO, F. A. C. Rochas ornamentais e de revestimentos. In: \_\_\_\_\_ VIDAL, F. W. H.; SALES, F. A. C. B.; ROBERTO, F. A. C.; SOUSA, J. F.; MATTOS, I. C. **Rochas e minerais industriais do estado do Ceará.** Fortaleza, 2005. P. 25-47.

VIDAL, F.W.H; PADILHA, M.W.M. A indústria extrativa da pedra Cariri no Estado do Ceará: problemas x soluções. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 4., 2003, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CETEM/ MCT, 2003. p.199-210.

WEBB, P.; ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. Micromeritics Instrument Corp. 1. ed. Norcross. 1997. 301 p.

**APÊNDICE**

A - ÍNDICES FÍSICOS .....	131
B - RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO .....	135
C - COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	141
D - RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MÉTODO DOS 3 PONTOS) .....	147
E - RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MÉTODO DOS 4 PONTOS).....	153
F - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS EXPOSTAS À AMBIENTE COM DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO <sub>2</sub> ).....	159



**APÊNDICE – A****ÍNDICES FÍSICOS**

**Ensaio para Determinação de Índices Físicos - Norma - NBR - 15.845/2010 - Anexo B**

Amostra: P1 - Mont data: 30/05/11  
Charmot 02/06/11

Corpo de Prova	Massa (g)			Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Abs. d'água (% d'água)
	M sub	M sat	M sec			
1	244,22	393,83	387,90	2592,74	3,96	1,53
2	296,82	476,84	471,21	2617,54	3,13	1,19
3	311,53	501,20	494,96	2609,59	3,29	1,26
4	298,68	480,62	474,27	2606,74	3,49	1,34
5	292,81	470,78	465,15	2613,64	3,16	1,21
6	310,01	499,19	492,49	2603,29	3,54	1,36
7	270,38	435,25	429,41	2604,54	3,54	1,36
8	261,80	421,13	415,71	2609,11	3,40	1,30
9	275,88	443,60	437,79	2610,24	3,46	1,33
10	270,74	435,38	429,88	2611,03	3,34	1,28
<b>Média:</b>	<b>283,287</b>	<b>455,782</b>	<b>449,877</b>	<b>2.608</b>	<b>3,4</b>	<b>1,3</b>
Desvio Padrão:				7	0,2	0,1
δ - coeficiente de variação				0,00	0,1	0,1
Máximo				2.618	4,0	1,5
Mínimo				2.593	3,1	1,2

**Ensaio para Determinação de Índices Físicos - Norma - NBR - 15.845/2010 - Anexo B**

Amostra: P2 - Mont data: 30/05/11  
Charmot 02/06/11

Corpo de Prova	Massa (g)			Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Abs. d'água (% d'água)
	M sub	M sat	M sec			
1	285,06	457,63	453,19	2626,12	2,57	0,98
2	286,97	461,11	456,16	2619,50	2,84	1,09
3	285,20	457,82	453,40	2626,58	2,56	0,97
4	286,94	461,02	456,17	2620,46	2,79	1,06
5	267,08	430,80	425,23	2597,30	3,40	1,31
6	285,55	458,96	454,03	2618,25	2,84	1,09
7	288,01	463,08	457,98	2615,98	2,91	1,11
8	286,77	461,10	455,93	2615,33	2,97	1,13
9	276,38	443,74	439,32	2625,00	2,64	1,01
10	284,15	456,53	451,68	2620,26	2,81	1,07
<b>Valores Médios:</b>	<b>283,211</b>	<b>455,179</b>	<b>450,309</b>	<b>2.618</b>	<b>2,8</b>	<b>1,1</b>
Desvio Padrão:				8	0,2	0,1
δ - coeficiente de variação				0,00	0,1	0,1
Máximo				2.627	3,4	1,3
Mínimo				2.597	2,6	1,0

**Fórmulas utilizadas:**

Densidade Aparente Pa = Msec/(Msat-Msub) x 1000 (kg/m3)

Porosidade Aparente Na = (Msat-Msec)/(Msat-Msub) x 100 (%)

Absorção de água aa = (Msat - Msec) / Msec x 100 (% d'água)

**Ensaio para Determinação de Índices Físicos - Norma - NBR - 15.845/2010 - Anexo B**

Amostra: P3 - Mont Charmot data: 30/05/11  
02/06/11

Corpo de Prova	Massa (g)			Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Abs. d'água (% d'água)
	M sub	M sat	M sec			
1	232,95	374,04	371,61	2633,85	1,72	0,65
2	229,84	369,20	366,70	2631,31	1,79	0,68
3	248,89	398,22	396,72	2656,67	1,00	0,38
4	246,38	394,52	392,79	2651,48	1,17	0,44
5	241,23	387,34	384,53	2631,78	1,92	0,73
6	241,32	386,57	384,71	2648,61	1,28	0,48
7	242,09	387,26	385,72	2657,02	1,06	0,40
8	247,25	395,44	393,92	2658,21	1,03	0,39
9	244,45	390,93	389,44	2658,66	1,02	0,38
10	246,79	395,03	393,18	2652,32	1,25	0,47
<b>Valores Médios:</b>	<b>242,119</b>	<b>387,855</b>	<b>385,932</b>	<b>2.648</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>
Desvio Padrão:				11	0,4	0,1
δ - coeficiente de variação				0,00	0,3	0,3
Máximo				2.659	1,9	0,7
Mínimo				2.631	1,0	0,4

**Ensaio para Determinação de Índices Físicos - Norma - NBR - 15.845/2010 - Anexo B**

Amostra: A1 - Pedra Cariri data: 30/05/11  
02/06/11

Corpo de Prova	Massa (g)			Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Abs. d'água (% d'água)
	M sub	M sat	M sec			
1	298,44	485,04	478,82	2566,02	3,33	1,30
2	291,12	475,18	470,62	2556,88	2,48	0,97
3	286,86	476,74	468,87	2469,30	4,14	1,68
4	300,74	491,89	487,39	2549,78	2,35	0,92
5	298,32	495,00	486,93	2475,75	4,10	1,66
6	295,76	489,85	482,06	2483,69	4,01	1,62
7	288,70	469,34	463,23	2564,38	3,38	1,32
8	291,18	472,92	469,46	2583,14	1,90	0,74
9	293,78	479,02	474,88	2563,59	2,23	0,87
10	274,58	446,97	442,70	2568,01	2,48	0,96
<b>Valores Médios:</b>	<b>291,948</b>	<b>478,195</b>	<b>472,496</b>	<b>2.538</b>	<b>3,0</b>	<b>1,2</b>
Desvio Padrão:				44	0,9	0,4
δ - coeficiente de variação				0,02	0,3	0,3
Máximo				2.583	4,1	1,7
Mínimo				2.469	1,9	0,7

**Fórmulas utilizadas:**

Densidade Aparente Pa = Msec/(Msat-Msub) x 1000 (kg/m3)

Porosidade Aparente Na = (Msat-Msec)/(Msat-Msub) x 100 (%)

Absorção de água aa = (Msat - Msec) / Msec x 100 (% d'água)

**Ensaio para Determinação de Índices Físicos - Norma - NBR - 15.845/2010 - Anexo B**

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 30/05/11  
02/06/11

Corpo de Prova	Massa (g)			Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Abs. d'água (% d'água)
	M sub	M sat	M sec			
1	291,25	470,02	465,40	2603,35	2,58	0,99
2	290,86	469,75	465,00	2599,36	2,66	1,02
3	236,78	403,38	385,58	2314,41	10,68	4,62
4	209,38	360,31	340,37	2255,15	13,21	5,86
5	299,25	484,59	479,15	2585,25	2,94	1,14
6	301,75	487,84	482,64	2593,58	2,79	1,08
7	293,41	473,65	468,79	2600,92	2,70	1,04
8	302,31	489,55	484,29	2586,47	2,81	1,09
9	289,05	467,01	462,08	2596,54	2,77	1,07
10	237,47	405,60	387,54	2305,00	10,74	4,66
<b>Valores Médios:</b>	<b>275,151</b>	<b>451,17</b>	<b>442,084</b>	<b>2.504</b>	<b>5,4</b>	<b>2,3</b>
	Desvio Padrão:			148	4,3	2,0
	δ - coeficiente de variação			0,06	0,8	0,9
	Máximo			2.603	13,2	5,9
	Mínimo			2.255	2,6	1,0

**Fórmulas utilizadas:**

Densidade Aparente Pa =  $M_{sec}/(M_{sat}-M_{sub}) \times 1000$  (kg/m<sup>3</sup>)

Porosidade Aparente Na =  $(M_{sat}-M_{sec})/(M_{sat}-M_{sub}) \times 100$  (%)

Absorção de água aa =  $(M_{sat} - M_{sec}) / M_{sec} \times 100$  (% d'água)

**APÊNDICE – B****RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO**

**Ensaio de Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler) - Norma-NBR 12.042**

Amostra: P1 - Mont Charmot  
Perpendicular

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500 metros (Li - L500m) (mm)	Desgaste 1000 metros (Li - L1000m) (mm)	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)						
1	1	9,34	8,05	6,74	1,29	2,60	1,42	2,81
	2	9,43	7,94	6,41	1,49	3,02		
	3	9,39	7,85	6,45	1,54	2,94		
	4	9,28	7,93	6,60	1,35	2,68		
2	1	9,42	8,29	7,12	1,13	2,30	1,24	2,35
	2	9,42	8,08	7,04	1,34	2,38		
	3	9,43	8,15	7,03	1,28	2,40		
	4	9,41	8,22	7,08	1,19	2,33		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,33</b>	<b>2,58</b>
Desvio padrão							0,13	0,32

Amostra: P1 - Mont Charmot  
Paralela

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500 metros (Li - L500m) (mm)	Desgaste 1000 metros (Li - L1000m) (mm)	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)						
1	1	9,52	8,10	7,00	1,42	2,52	1,23	2,53
	2	9,40	8,15	6,82	1,25	2,58		
	3	9,26	8,22	6,68	1,04	2,58		
	4	9,44	8,24	7,00	1,20	2,44		
2	1	9,31	8,07	6,86	1,24	2,45	1,30	2,43
	2	9,25	7,88	6,74	1,37	2,51		
	3	9,24	7,86	6,84	1,38	2,40		
	4	9,25	8,06	6,90	1,19	2,35		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,26</b>	<b>2,48</b>
Desvio padrão							0,05	0,07

**Ensaio de Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler) - Norma-NBR 12.042**

Amostra: P2 - Mont Charmot  
Perpendicular

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m (Li - L500m) (mm)	Desgaste 1000m (Li - L1000m) (mm)	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)						
1	1	9,21	8,26	7,27	0,95	1,94	1,01	2,09
	2	9,27	8,36	7,07	0,91	2,20		
	3	9,36	8,28	7,12	1,08	2,24		
	4	9,30	8,19	7,31	1,11	1,99		
2	1	9,00	8,03	6,81	0,97	2,19	1,10	2,18
	2	9,34	8,08	7,03	1,26	2,31		
	3	9,32	8,12	7,13	1,20	2,19		
	4	9,14	8,19	7,11	0,95	2,03		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,05</b>	<b>2,14</b>
Desvio padrão							0,06	0,06

Amostra: P2 - Mont Charmot  
Paralela

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m (Li - L500m) (mm)	Desgaste 1000m (Li - L1000m) (mm)	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)						
1	1	9,53	8,46	7,39	1,07	2,14	1,24	2,26
	2	9,39	8,15	7,18	1,24	2,21		
	3	9,27	8,22	6,97	1,05	2,30		
	4	9,85	8,24	7,45	1,61	2,40		
2	1	9,48	8,07	7,20	1,41	2,28	1,58	2,30
	2	9,68	7,88	7,35	1,80	2,33		
	3	9,49	7,86	7,16	1,63	2,33		
	4	9,55	8,06	7,31	1,49	2,24		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,41</b>	<b>2,28</b>
Desvio padrão							0,24	0,02



**Ensaio de Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler) - Norma-NBR 12.042**

Amostra: P3 - Mont Charmot  
Perpendicular

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	9,42	8,31	7,23	1,11	2,19	1,01	2,08
	2	9,89	8,83	7,69	1,06	2,20		
	3	9,65	8,77	7,63	0,88	2,02		
	4	9,92	8,95	8,01	0,97	1,91		
2	1	9,20	8,01	7,11	1,19	2,09	1,13	2,12
	2	9,38	8,26	7,08	1,12	2,30		
	3	9,33	8,30	7,22	1,03	2,11		
	4	9,20	8,01	7,23	1,19	1,97		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,07</b>	<b>2,10</b>
Desvio padrão							0,09	0,03

Amostra: P3 - Mont Charmot  
Paralela

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	9,86	8,83	7,87	1,03	1,99	1,02	2,06
	2	9,81	8,83	7,86	0,98	1,95		
	3	9,89	8,91	7,63	0,98	2,26		
	4	9,91	8,82	7,87	1,09	2,04		
2	1	9,61	8,19	7,32	1,42	2,29	1,07	1,99
	2	9,79	8,54	7,44	1,25	2,35		
	3	9,33	8,33	7,49	1,00	1,84		
	4	8,95	8,34	7,47	0,61	1,48		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,05</b>	<b>2,03</b>
Desvio padrão							0,04	0,05

**Ensaio de Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler) - Norma-NBR 12.042**

Amostra: A1 - Pedra Cariri  
Perpendicular

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	9,75	7,95	5,91	1,80	3,84	1,84	3,87
	2	9,82	8,16	6,00	1,66	3,82		
	3	9,83	7,90	5,95	1,93	3,88		
	4	9,88	7,90	5,95	1,98	3,93		
2	1	9,94	7,77	5,70	2,17	4,24	2,14	4,28
	2	9,84	7,88	5,80	1,96	4,04		
	3	9,97	7,87	5,69	2,10	4,28		
	4	10,15	7,81	5,60	2,34	4,55		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,99</b>	<b>4,07</b>
Desvio padrão							0,21	0,29

Amostra: A1 - Pedra Cariri  
Paralela

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	10,05	8,98	7,40	1,07	2,65	1,13	2,64
	2	10,10	8,93	7,48	1,17	2,62		
	3	10,06	8,96	7,41	1,10	2,65		
	4	10,03	8,84	7,40	1,19	2,63		
2	1	9,97	8,48	7,27	1,49	2,70	1,45	2,83
	2	10,07	8,61	7,22	1,46	2,85		
	3	10,00	8,59	7,05	1,41	2,95		
	4	9,99	8,55	7,19	1,44	2,80		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,29</b>	<b>2,73</b>
Desvio padrão							0,22	0,13

**Ensaio de Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler) - Norma-NBR 12.042**

Amostra: A2 - Pedra Cariri  
Perpendicular

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	13,23	11,04	9,27	2,19	3,96	1,90	3,61
	2	13,55	11,17	9,57	2,38	3,98		
	3	13,01	11,19	9,55	1,82	3,46		
	4	12,45	11,26	9,40	1,19	3,05		
2	1	12,48	10,51	9,08	1,97	3,40	1,88	3,44
	2	11,94	10,74	9,07	1,20	2,87		
	3	12,28	10,64	9,06	1,64	3,22		
	4	13,20	10,50	8,93	2,70	4,27		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,89</b>	<b>3,53</b>
Desvio padrão							0,01	0,12

Amostra: A2 - Pedra Cariri  
Paralela

data: 01/07/11

Corpo de Prova	Leit. Iniciais		Leit. 500m	Leit. 1000m	Desgaste 500m	Desgaste 1000m	Média (500m)	Média (1000m)
	canto	(mm)	(mm)	(mm)	(Li - L500m) (mm)	(Li - L1000m) (mm)		
1	1	9,41	8,44	7,31	0,97	2,10	0,97	2,11
	2	9,71	8,67	7,45	1,04	2,26		
	3	9,70	8,74	7,58	0,96	2,12		
	4	9,48	8,57	7,51	0,91	1,97		
2	1	10,01	9,05	7,92	0,96	2,09	1,03	2,01
	2	10,00	8,95	7,99	1,05	2,01		
	3	9,92	8,81	7,98	1,11	1,94		
	4	9,88	8,90	7,88	0,98	2,00		
<b>Média entre os corpos de prova</b>							<b>1,00</b>	<b>2,06</b>
Desvio padrão							0,04	0,07

## APÊNDICE – C

### COMPRESSÃO UNIAXIAL

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P1 - Mont Charmot

data: 22/06/11

P1 **Condição Seca a 70°C** Paralelo ||

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	1	71,93	70,95	71,13	71,03	71,14	71,06	71,70	71,59	71,44	71,61	71,59	438,1	86,12
	2	68,83	68,70	68,63	68,45	68,57	68,59	70,12	69,80	69,57	69,88	69,84	460,40	96,11
	3	70,43	72,07	72,33	73,79	73,60	72,95	70,11	70,02	70,11	70,17	70,10	607,9	118,86
	<b>Média:</b>						<b>70,9</b>					<b>70,5</b>	<b>502,1</b>	<b>100,37</b>
	Desvio Padrão:						2,19					0,94	92,24	10,02
	Coeficiente de variação:						0,03					0,01	0,18	0,10

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	11,8	71,93	6096
2	11,3	68,83	6091
3	11,6	70,43	6072
<b>Média:</b>			<b>6086</b>
Desvio Padrão:			13
Coeficiente de variação:			0,00

P1 **Condição Saturada em água** Paralelo ||

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	4	72,66	72,87	71,56	71,16	72,31	71,98	72,42	72,26	72,46	72,61	72,44	549,55	105,41
	5	72,82	72,65	72,25	71,97	72,55	72,36	71,82	71,09	71,51	71,98	71,60	533,25	102,93
	6	70,47	70,02	70,38	71,92	71,42	70,94	70,92	70,88	71,01	71,28	71,02	526,45	104,50
	<b>Média:</b>						<b>71,8</b>					<b>71,7</b>	<b>536,4</b>	<b>104,28</b>
	Desvio Padrão:						0,74					0,71	11,87	10,21
	Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,02	0,10
	*(R):													1,04

4	11,7	72,66	6210
5	11,6	72,82	6278
6	11,6	70,47	6075
<b>Média:</b>			<b>6188</b>
Desvio Padrão:			103
Coeficiente de variação:			0,02

P1 **Condição Seca a 70°C** Perpendicular =

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	7	72,39	72,01	73,05	73,56	72,66	72,82	73,15	72,91	72,93	73,42	73,10	727,35	136,63
	8	68,65	71,00	70,52	69,52	69,78	70,21	70,05	70,24	70,10	69,95	70,09	499,35	101,49
	9	70,48	71,45	71,86	71,78	71,56	71,66	70,69	70,69	70,04	70,34	70,44	483,7	95,81
	<b>Média:</b>						<b>71,6</b>					<b>71,2</b>	<b>570,1</b>	<b>111,31</b>
	Desvio Padrão:						1,31					1,65	136,39	10,55
	Coeficiente de variação:						0,02					0,02	0,24	0,09

7	11,5	72,39	6295
8	11,4	68,65	6022
9	11,9	70,48	5923
<b>Média:</b>			<b>6080</b>
Desvio Padrão:			193
Coeficiente de variação:			0,03

P1 **Condição Saturada em água** Perpendicular =

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	10	68,86	69,32	69,17	70,45	70,30	69,81	69,97	70,01	70,06	70,02	70,02	401,95	82,24
	11	72,70	69,39	69,13	69,61	69,67	69,45	70,71	71,91	71,93	70,84	71,35	423,70	85,51
	12	69,13	71,78	71,74	71,87	71,71	71,78	70,22	70,71	70,91	70,45	70,57	446,30	88,11
	<b>Média:</b>						<b>70,3</b>					<b>70,6</b>	<b>424,0</b>	<b>85,28</b>
	Desvio Padrão:						1,25					0,67	22,18	9,23
	Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,05	0,11
	*(R):													0,77

10	11,5	68,86	5988
11	11,5	72,70	6322
12	11,6	69,13	5959
<b>Média:</b>			<b>6090</b>
Desvio Padrão:			201
Coeficiente de variação:			0,03

**Congelamento e Degelo**

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P1 - Mont Charmot

data: 16/09/11

P1 Paralelo || **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	1 GD	72,14	69,37	69,93	71,01	70,54	70,21	70,39	70,33	70,58	70,77	70,52	570,20	115,16
	2 GD	69,65	72,57	72,69	73,15	72,98	72,85	72,57	72,56	73,54	73,33	73,00	526,45	99,00
	3 GD	72,46	69,52	69,36	70,81	70,70	70,10	70,01	69,97	70,72	70,53	70,31	526,75	106,88
	4 GD	70,45	70,29	70,55	72,12	71,76	71,18	70,94	70,87	71,18	71,21	71,05	563,10	111,34
	5 GD	70,12	73,14	73,17	72,96	73,12	73,10	70,73	71,08	72,07	71,71	71,40	718,85	137,74
	<b>Média:</b>						<b>71,5</b>					<b>71,3</b>	<b>581,1</b>	<b>114,02</b>
	Desvio Padrão:						1,42					1,50	79,62	10,68
	Coeficiente de variação:						0,02					0,02	0,14	0,09
	**(K)													1,14

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1 GD	12,1	72,14	5962
2 GD	11,8	69,65	5903
3 GD	12,1	72,46	5988
4 GD	11,8	70,45	5970
5 GD	12,0	70,12	5843
<b>Média:</b>			<b>5933</b>
Desvio Padrão:			60
Coeficiente de variação:			0,01

P1 Perpendicular = **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				média	kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	6 GD	73,82	69,96	70,28	70,29	69,93	70,12	70,10	70,08	70,03	70,50	70,18	540,35	109,82
	7 GD	72,91	70,75	70,24	70,53	70,82	70,59	70,83	71,15	71,04	71,03	71,01	613,7	122,43
	8 GD	70,87	70,56	70,50	70,36	70,47	70,47	72,37	72,37	72,22	72,58	72,39	442,35	86,72
	9 GD	72,40	72,39	72,87	73,33	72,56	72,79	72,12	72,21	72,56	72,65	72,39	615,85	116,89
	10 GD	69,32	69,58	70,10	69,78	69,20	69,67	70,52	70,13	68,77	69,11	69,63	385,2	79,41
	<b>Média:</b>						<b>70,7</b>					<b>71,1</b>	<b>519,5</b>	<b>103,05</b>
	Desvio Padrão:						1,21					1,26	103,16	10,15
	Coeficiente de variação:						0,02					0,02	0,20	0,10
	**(K)													0,93

6 GD	12,6	73,82	5859
7 GD	12,3	72,91	5928
8 GD	12,0	70,87	5906
9 GD	11,5	72,40	6296
10 GD	11,8	69,32	5875
<b>Média:</b>			<b>5972</b>
Desvio Padrão:			183
Coeficiente de variação:			0,03

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P2 - Mont Charriot

data: 28/06/11

**P2 Condição Seca a 70°C Paralelo |||**

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força kN	Tensão MPa
	num	h	b				média	d				média		
			1	2	3	4		1	2	3	4			
1	74,49	71,04	70,97	71,46	71,14	71,15	71,15	71,43	71,50	71,28	71,34	501,2	98,73	
2	74,35	71,50	71,74	71,03	70,95	71,31	71,50	71,51	71,35	71,67	71,51	580,05	113,76	
3	71,17	71,75	71,47	70,83	70,79	71,21	70,73	71,05	71,70	71,58	71,27	737,7	145,36	
<b>Média:</b>						<b>71,2</b>					<b>71,4</b>	<b>606,3</b>	<b>119,28</b>	
Desvio Padrão:						0,08					0,12	120,41	10,92	
Coeficiente de variação:						0,00					0,00	0,20	0,09	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	11,6	74,49	6422
2	12,5	74,35	5948
3	11,1	71,17	6412
<b>Média:</b>			<b>6260</b>
Desvio Padrão:			271
Coeficiente de variação:			0,04

**P2 Condição Saturada em água Paralelo |||**

05/07/11

4	71,08	70,04	69,57	70,80	70,91	70,33	71,81	72,74	72,66	71,92	72,28	493,50	97,08
5	72,70	69,39	69,13	69,61	69,67	69,45	70,71	71,91	71,93	70,84	71,35	480,30	96,93
6	71,34	71,01	71,35	72,08	71,80	71,56	71,48	71,33	70,88	71,15	71,21	451,20	88,54
<b>Média:</b>						<b>70,4</b>					<b>71,6</b>	<b>475,0</b>	<b>94,18</b>
Desvio Padrão:						1,06					0,58	21,64	9,70
Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,05	0,10
*(R):													0,79

4	10,9	71,08	6521
5	11,2	72,70	6491
6	11,5	71,34	6203
<b>Média:</b>			<b>6405</b>
Desvio Padrão:			175
Coeficiente de variação:			0,03

**P2 Condição Seca a 70°C Perpendicular =**

28/06/11

7	71,33	71,13	71,21	70,34	71,13	70,95	70,39	70,15	71,71	71,61	70,97	670,25	133,11
8	71,27	71,72	71,76	71,80	71,69	71,74	71,80	71,60	70,85	70,67	71,23	661,15	129,38
9	71,98	72,10	72,52	72,35	71,98	72,24	73,31	73,36	72,89	73,01	73,14	809,6	153,22
<b>Média:</b>						<b>71,6</b>					<b>71,8</b>	<b>713,7</b>	<b>138,57</b>
Desvio Padrão:						0,65					1,19	83,18	11,77
Coeficiente de variação:						0,01					0,02	0,12	0,08

7	11,1	71,33	6426
8	11,1	71,27	6421
9	11,4	71,98	6314
<b>Média:</b>			<b>6387</b>
Desvio Padrão:			63
Coeficiente de variação:			0,01

**P2 Condição Saturada em água Perpendicular =**

05/07/11

10	72,58	71,11	70,75	71,38	71,52	71,19	70,87	70,46	70,29	70,67	70,57	497,15	98,95
11	72,57	71,98	71,91	71,87	71,86	71,91	69,91	70,21	70,73	70,30	70,29	530,60	104,99
12	71,49	72,14	71,83	71,33	71,22	71,63	69,91	70,01	70,15	70,07	70,04	661,40	131,84
<b>Média:</b>						<b>71,6</b>					<b>70,3</b>	<b>563,1</b>	<b>111,93</b>
Desvio Padrão:						0,36					0,27	86,80	10,58
Coeficiente de variação:						0,01					0,00	0,15	0,09
*(R):													0,81

10	11,5	72,58	6311
11	11,3	72,57	6422
12	11,1	71,49	6441
<b>Média:</b>			<b>6391</b>
Desvio Padrão:			70
Coeficiente de variação:			0,01

**Congelamento e Degelo**

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P2 - Mont Charriot

data: 15/09/11

**P2 Paralelo ||| Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força kN	Tensão MPa
	num	h	b				média	d				média		
			1	2	3	4		1	2	3	4			
1 GD	71,71	72,05	72,71	72,32	71,36	72,11	70,67	69,77	70,16	71,35	70,49	577,80	113,68	
2 GD	70,88	70,35	71,21	71,93	71,35	71,21	69,16	69,14	69,54	69,52	69,34	654,05	132,46	
3 GD	72,34	71,20	71,30	72,35	71,79	71,66	73,58	73,43	73,61	73,56	73,55	545,85	103,57	
4 GD	70,63	71,90	70,88	69,94	70,52	70,81	71,84	71,82	72,33	72,61	72,15	600,20	117,48	
5 GD	71,36	70,53	70,43	70,19	70,37	70,38	70,15	69,95	70,47	70,57	70,29	623,20	125,98	
<b>Média:</b>						<b>71,2</b>					<b>71,1</b>	<b>600,2</b>	<b>118,63</b>	
Desvio Padrão:						0,68					2,17	41,49	10,89	
Coeficiente de variação:						0,01					0,03	0,07	0,09	
**(K)													0,99	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1 GD	11,2	71,71	6403
2 GD	11,1	70,88	6386
3 GD	12,0	72,34	6028
4 GD	11,1	70,63	6363
5 GD	11,1	71,36	6429
<b>Média:</b>			<b>6322</b>
Desvio Padrão:			166
Coeficiente de variação:			0,03

**P2 Perpendicular: Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

6 GD	71,57	73,23	72,22	71,53	71,83	72,20	71,71	71,37	71,88	72,27	71,81	559,95	108,00
7 GD	71,97	70,82	72,21	71,93	71,27	71,56	71,25	71,11	71,19	71,16	71,18	630,8	123,85
8 GD	72,01	68,58	69,96	69,85	69,09	69,37	70,70	71,34	70,74	70,26	70,76	552,05	112,47
9 GD	70,64	70,51	70,01	69,84	69,39	69,94	71,08	71,15	71,72	71,66	71,40	595,05	119,16
10 GD	71,26	73,01	72,10	72,69	72,99	72,70	71,36	71,58	71,27	71,04	71,31	421,2	81,25
<b>Média:</b>						<b>71,2</b>					<b>71,3</b>	<b>551,8</b>	<b>108,94</b>
Desvio Padrão:						1,44					0,38	79,43	10,44
Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,14	0,10
**(K)													0,79

6 GD	11,2	71,57	6390
7 GD	11,3	71,97	6369
8 GD	11,4	72,01	6317
9 GD	11,3	70,64	6251
10 GD	11,3	71,26	6306
<b>Média:</b>			<b>6327</b>
Desvio Padrão:			55
Coeficiente de variação:			0,01

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\*\*(K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P3 - Mont Charriot

data: 28/06/11

P3 **Condição Seca a 70°C** Paralelo ||| 28/06/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)										Força	Tensão				
	num	h	b				média	d					média	kN	MPa	
			1	2	3	4		1	2	3						4
1	70,11	69,49	70,48	71,08	69,89	70,24	70,51	70,46	70,74	71,08	70,70	532,7	107,27			
2	70,93	70,77	71,58	71,40	70,90	71,16	70,35	70,34	70,57	70,90	70,54	561,10	111,78			
3	74,40	69,62	70,08	70,74	70,10	70,14	70,90	71,10	71,65	71,29	71,24	505,7	101,21			
<b>Média:</b>						<b>70,5</b>					<b>70,8</b>	<b>533,2</b>	<b>106,75</b>			
Desvio Padrão:						0,57					0,36	27,73	10,33			
Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,05	0,10			

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	10,8	70,11	6492
2	10,8	70,93	6568
3	10,6	74,40	7019
<b>Média:</b>			<b>6693</b>
Desvio Padrão:			285
Coeficiente de variação:			0,04

P3 **Condição Saturada em água** Paralelo ||| 05/07/11

CP	num	h	b				média	d				Força	Tensão
			1	2	3	4		1	2	3	4		
			4	71,05	71,16	71,11		71,42	71,64	71,33	70,77		
5	71,86	73,29	72,48	72,06	73,26	72,77	70,29	70,91	71,18	71,03	70,85	512,20	99,34
6	69,96	70,19	69,30	70,08	70,18	69,94	70,16	68,57	68,36	70,11	69,30	457,35	94,36
<b>Média:</b>						<b>71,3</b>					<b>70,4</b>	<b>506,2</b>	<b>100,66</b>
Desvio Padrão:						1,42					0,97	46,19	10,03
Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,09	0,10
*(R):													0,94

4	10,8	71,05	6579
5	10,6	71,86	6779
6	10,5	69,96	6663
<b>Média:</b>			<b>6674</b>
Desvio Padrão:			101
Coeficiente de variação:			0,02

P3 **Condição Seca a 70°C** Perpendicular = 28/06/11

CP	num	h	b				média	d				Força	Tensão
			1	2	3	4		1	2	3	4		
			7	70,65	69,38	69,91		69,93	69,36	69,65	71,39		
8	70,76	71,26	71,25	71,55	71,41	71,37	70,10	70,30	70,83	70,56	70,45	447,75	89,06
9	74,28	69,65	69,52	70,31	69,77	69,81	70,67	70,90	71,37	71,18	70,92	495,6	100,09
<b>Média:</b>						<b>70,3</b>					<b>70,9</b>	<b>491,2</b>	<b>98,57</b>
Desvio Padrão:						0,95					0,51	41,49	9,93
Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,08	0,10

7	10,9	70,65	6482
8	10,8	70,76	6552
9	10,7	74,28	6942
<b>Média:</b>			<b>6659</b>
Desvio Padrão:			248
Coeficiente de variação:			0,04

P3 **Condição Saturada em água** Perpendicular = 05/07/11

CP	num	h	b				média	d				Força	Tensão
			1	2	3	4		1	2	3	4		
			10	71,70	70,42	70,55		70,30	70,30	70,39	70,49		
11	73,91	72,92	71,76	73,03	74,01	72,93	71,28	71,53	71,28	71,32	71,35	510,00	98,01
12	70,95	71,57	71,85	71,23	70,96	71,40	70,71	70,81	70,11	70,30	70,48	484,80	96,33
<b>Média:</b>						<b>71,6</b>					<b>70,8</b>	<b>493,8</b>	<b>97,39</b>
Desvio Padrão:						1,28					0,46	14,05	9,87
Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,03	0,10
*(R):													0,77

10	10,9	71,70	6578
11	10,8	73,91	6844
12	10,7	70,95	6631
<b>Média:</b>			<b>6684</b>
Desvio Padrão:			141
Coeficiente de variação:			0,02

**Congelamento e Degelo**

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: P3 - Mont Charriot

data: 22/06/11

P3 Paralelo ||| **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				Força	Tensão
			1	2	3	4		1	2	3	4		
			1 GD	71,20	70,60	70,36		71,42	71,86	71,06	70,35		
2 GD	69,96	70,26	70,01	70,03	70,43	70,18	71,62	70,95	71,33	71,42	71,33	598,75	119,60
3 GD	70,52	69,43	68,78	69,37	69,83	69,35	71,24	71,20	71,39	71,46	71,32	367,60	74,32
4 GD	70,18	71,13	71,61	72,39	72,08	71,80	70,77	70,27	70,13	70,35	70,38	472,80	93,56
5 GD	71,82	69,82	70,15	70,44	70,52	70,23	70,18	70,28	72,08	72,00	71,14	567,70	113,63
<b>Média:</b>						<b>70,5</b>					<b>70,8</b>	<b>494,2</b>	<b>98,92</b>
Desvio Padrão:						0,93					0,85	91,83	9,95
Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,19	0,10
**(K)													0,93

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1 GD	11,8	71,20	6034
2 GD	10,8	69,96	6478
3 GD	10,8	70,52	6530
4 GD	10,9	70,18	6439
5 GD	11,1	71,82	6470
<b>Média:</b>			<b>6390</b>
Desvio Padrão:			202
Coeficiente de variação:			0,03

P3 Perpendicular : **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				Força	Tensão
			1	2	3	4		1	2	3	4		
			6 GD	70,29	70,29	70,29		70,29	70,29	70,29	71,55		
7 GD	72,20	70,47	70,80	71,35	70,94	70,89	70,35	70,53	72,09	71,96	71,23	579,0	114,66
8 GD	71,07	69,24	69,38	69,40	69,34	69,34	70,66	70,80	71,34	71,21	71,00	329,25	66,88
9 GD	70,41	69,27	69,23	69,28	69,15	69,23	70,77	71,26	71,42	71,06	71,13	358,85	72,87
10 GD	74,40	69,62	70,08	70,74	70,10	70,14	70,90	71,10	71,65	71,29	71,24	505,7	101,21
<b>Média:</b>						<b>70,0</b>					<b>71,3</b>	<b>446,0</b>	<b>89,17</b>
Desvio Padrão:						0,69					0,43	103,20	9,44
Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,23	0,11
**(K)													0,90

6 GD	11,1	70,29	6332
7 GD	11,1	72,20	6505
8 GD	11,4	71,07	6234
9 GD	10,7	70,41	6580
10 GD	11,3	74,40	6584
<b>Média:</b>			<b>6447</b>
Desvio Padrão:			157
Coeficiente de variação:			0,02

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\*\*(K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: A1 - Pedra Cariri

data: 22/06/11

A1 **Condição Seca a 70°C** Paralelo ||| 22/06/11

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	1	71,98	65,47	68,70	65,45	64,81	66,11	72,20	77,69	71,63	71,33	73,21	657,5	135,84
	2	71,76	69,37	71,62	71,48	72,96	71,36	70,67	70,77	70,36	71,16	70,74	603,90	119,64
	3	71,39	64,58	66,51	65,02	66,11	65,56	72,19	72,91	72,49	72,40	72,50	667,4	140,43
	<b>Média:</b>						<b>67,7</b>					<b>72,2</b>	<b>642,9</b>	<b>131,97</b>
	Desvio Padrão:						3,20					1,27	34,15	11,49
	Coeficiente de variação:						0,05					0,02	0,05	0,09

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	12,4	71,98	5805
2	12,8	71,76	5606
3	12,1	71,39	5900
<b>Média:</b>			<b>5770</b>
Desvio Padrão:			150
Coeficiente de variação:			0,03

A1 **Condição Saturada em água** Paralelo ||| 22/06/11

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	4	73,22	67,21	68,14	69,45	64,29	67,27	72,87	73,50	73,61	72,61	73,15	514,70	104,60
	5	71,86	72,06	73,29	73,26	72,48	72,77	71,03	71,18	70,91	70,29	70,85	510,30	98,97
	6	72,02	64,37	66,26	64,38	64,26	64,82	71,03	70,35	70,22	70,88	70,62	504,25	110,16
	<b>Média:</b>						<b>68,3</b>					<b>71,5</b>	<b>509,8</b>	<b>104,58</b>
	Desvio Padrão:						4,07					1,40	5,25	10,23
	Coeficiente de variação:						0,06					0,02	0,01	0,10
	*(R):													0,79

4	12,2	73,22	6002
5	12,1	71,86	5939
6	11,9	72,02	6052
<b>Média:</b>			<b>5998</b>
Desvio Padrão:			57
Coeficiente de variação:			0,01

A1 **Condição Seca a 70°C** Perpendicular = 22/06/11

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	7	72,03	72,21	71,73	71,82	71,40	71,79	72,04	72,55	72,01	72,19	72,20	289,25	55,81
	8	70,52	71,98	72,03	72,55	72,14	72,18	72,79	72,68	72,79	72,55	72,70	374,95	71,46
	9	69,27	72,36	72,60	73,32	73,09	72,84	71,89	71,99	71,67	72,04	71,90	570,4	108,90
	<b>Média:</b>						<b>72,3</b>					<b>72,3</b>	<b>411,5</b>	<b>78,72</b>
	Desvio Padrão:						0,53					0,41	144,07	8,87
	Coeficiente de variação:						0,01					0,01	0,35	0,11

7	16,2	72,03	4446
8	14,0	70,52	5037
9	13,0	69,27	5328
<b>Média:</b>			<b>4937</b>
Desvio Padrão:			449
Coeficiente de variação:			0,09

A1 **Condição Saturada em água** Perpendicular = 22/06/11

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	10	69,66	72,90	73,04	73,15	73,29	73,10	71,48	71,38	72,47	72,19	71,88	489,60	93,18
	11	71,00	70,82	70,44	69,13	69,27	69,92	72,50	73,21	73,35	72,48	72,89	365,90	71,80
	12	72,65	71,45	71,11	71,68	72,43	71,67	73,32	71,51	71,97	72,44	72,31	294,10	56,75
	<b>Média:</b>						<b>71,6</b>					<b>72,4</b>	<b>383,2</b>	<b>73,91</b>
	Desvio Padrão:						1,59					0,50	98,89	8,60
	Coeficiente de variação:						0,02					0,01	0,26	0,12
	*(R):													0,77

10	13,2	69,66	5277
11	13,4	71,00	5299
12	13,6	72,65	5342
<b>Média:</b>			<b>5306</b>
Desvio Padrão:			33
Coeficiente de variação:			0,01

**Congelamento e Degelo**

**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: A1 - Pedra Cariri

data: 22/06/11

A1 Paralelo ||| **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	1 GD	72,94	69,33	69,64	69,89	69,82	69,67	72,50	71,63	72,58	73,24	72,49	459,45	90,98
	2 GD	71,38	65,95	66,11	66,22	65,32	65,90	71,81	72,01	71,77	71,81	71,85	637,80	134,70
	3 GD	73,42	69,10	69,25	69,75	69,35	69,36	71,82	72,36	72,15	71,51	71,96	428,85	85,92
	4 GD	71,76	72,20	73,51	72,55	73,22	72,87	71,76	71,50	71,97	72,01	71,81	380,80	72,77
	5 GD	71,82	67,14	66,86	66,75	66,56	66,83	73,94	71,96	72,50	74,44	73,21	394,15	80,56
	<b>Média:</b>						<b>68,9</b>					<b>72,1</b>	<b>460,2</b>	<b>92,99</b>
	Desvio Padrão:						2,73					0,34	103,91	9,64
	Coeficiente de variação:						0,04					0,00	0,23	0,10
	**(K)													8,09

**Propagação de Onda Ultrassônica**

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1 GD	12,5	72,94	5835
2 GD	12,2	71,38	5851
3 GD	12,8	73,42	5736
4 GD	13,6	71,76	5276
5 GD	12,4	71,82	5792
<b>Média:</b>			<b>5698</b>
Desvio Padrão:			240
Coeficiente de variação:			0,04

A1 Perpendicular : **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	b				média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			1	2	3	4		1	2	3	4			
	6 GD	72,65	71,40	71,52	71,45	71,24	71,40	72,47	71,80	72,81	73,09	72,54	289,70	55,93
	7 GD	71,50	72,12	72,27	71,96	72,03	72,10	72,92	72,99	72,90	72,92	72,93	216,4	41,15
	8 GD	73,85	72,73	73,15	72,90	72,66	72,86	71,59	72,11	72,68	72,62	72,25	255,05	48,45
	9 GD	72,03	72,17	71,90	72,83	72,46	72,34	72,30	72,37	71,87	71,79	72,08	241,80	46,37
	10 GD	71,78	72,29	72,25	72,57	72,77	72,47	72,10	72,51	72,29	72,24	72,29	163,7	31,24
	<b>Média:</b>						<b>72,2</b>					<b>72,4</b>	<b>233,3</b>	<b>44,63</b>
	Desvio Padrão:						0,54					0,33	47,08	6,68
	Coeficiente de variação:						0,01					0,00	0,20	0,15
	**(K)													0,57

6 GD	18,4	72,65	3948
7 GD	13,7	71,50	5219
8 GD	13,9	73,85	5313
9 GD	14,3	72,03	5037
10 GD	13,6	71,78	5278
<b>Média:</b>			<b>4959</b>
Desvio Padrão:			575
Coeficiente de variação:			0,12

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\*\*(K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo



**Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 22/06/11

A2 **Condição Seca a 70°C** Paralelo ||| 22/06/11

CP	num	h	dimensões dos corpos-de-prova (mm)					média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			b				1		2	3	4				
			1	2	3	4									
	1	71,82	70,83	72,84	72,35	70,49	71,63	72,11	73,57	73,36	72,28	72,83	860,0	164,85	
	2	73,02	74,05	73,60	73,71	73,80	73,79	72,25	74,36	73,62	72,79	73,26	991,35	183,40	
	3	72,83	73,01	71,84	72,04	72,63	72,38	72,30	71,75	70,58	70,63	71,32	969,9	187,90	
<b>Média:</b>							<b>72,6</b>					<b>72,5</b>	<b>940,4</b>	<b>178,72</b>	
Desvio Padrão:							1,10					1,02	70,49	13,37	
Coeficiente de variação:							0,02					0,01	0,07	0,07	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	11,6	71,82	6191
2	11,9	73,02	6136
3	11,8	72,83	6172
<b>Média:</b>			<b>6167</b>
Desvio Padrão:			28
Coeficiente de variação:			0,00

A2 **Condição Seca a 70°C** Perpendicular = 22/06/11

CP	num	h	dimensões dos corpos-de-prova (mm)					média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			b				1		2	3	4				
			1	2	3	4									
	4	71,91	72,56	72,64	72,16	72,68	72,51	73,50	73,19	72,80	73,85	73,34	748,15	140,70	
	5	71,88	72,50	74,07	73,79	73,11	73,37	74,50	74,41	73,53	73,85	74,07	655,50	120,62	
	6	72,41	72,44	72,17	72,26	72,28	72,29	72,15	71,69	72,09	72,56	72,12	606,7	116,36	
<b>Média:</b>							<b>72,7</b>					<b>73,2</b>	<b>670,1</b>	<b>125,89</b>	
Desvio Padrão:							0,57					0,98	71,87	11,22	
Coeficiente de variação:							0,01					0,01	0,11	0,09	

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4	13,2	71,91	5448
5	12,3	71,88	5844
6	12,6	72,41	5747
<b>Média:</b>			<b>5679</b>
Desvio Padrão:			206
Coeficiente de variação:			0,04

**Congelamento e Degelo****Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial - Norma - NBR - 12.767/1992**

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 15/09/11

A2 Paralelo ||| **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	dimensões dos corpos-de-prova (mm)					média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			b				1		2	3	4				
			1	2	3	4									
	1 GD	70,31	70,49	71,50	71,79	70,86	71,16	70,40	70,70	72,20	71,01	71,08	557,25	110,17	
	2 GD	72,15	70,07	69,88	70,11	70,11	70,04	73,87	72,06	72,43	74,35	73,18	516,20	100,71	
	3 GD	72,26	71,60	72,35	71,66	71,66	71,82	70,54	71,41	73,86	72,55	72,09	728,95	140,80	
<b>Média:</b>							<b>71,0</b>					<b>72,1</b>	<b>600,8</b>	<b>117,23</b>	
Desvio Padrão:							0,90					1,05	112,86	10,83	
Coeficiente de variação:							0,01					0,01	0,19	0,09	
<b>** (K)</b>														0,66	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1 GD	11,6	70,31	6061
2 GD	11,8	72,15	6114
3 GD	11,7	72,26	6176
<b>Média:</b>			<b>6117</b>
Desvio Padrão:			57
Coeficiente de variação:			0,01

A2 Perpendicular : **Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo**

CP	num	h	dimensões dos corpos-de-prova (mm)					média	d				média	Força kN	Tensão MPa
			b				1		2	3	4				
			1	2	3	4									
	4 GD	73,18	72,53	72,17	72,36	72,36	72,36	72,25	72,25	71,62	71,51	71,91	440,60	84,68	
	5 GD	73,14	70,07	69,67	70,84	70,84	70,36	72,07	71,93	72,33	72,23	72,14	450,3	88,72	
	6 GD	72,12	71,24	71,09	71,24	71,24	71,20	74,80	74,31	73,58	73,80	74,12	730,40	138,39	
<b>Média:</b>							<b>71,3</b>					<b>72,7</b>	<b>540,4</b>	<b>103,93</b>	
Desvio Padrão:							1,00					1,22	164,59	10,19	
Coeficiente de variação:							0,01					0,02	0,30	0,10	
<b>** (K)</b>														0,89	

CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4 GD	12,8	73,18	5717
5 GD	12,6	73,14	5805
6 GD	12,0	72,12	6010
<b>Média:</b>			<b>5844</b>
Desvio Padrão:			150
Coeficiente de variação:			0,03

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\*(K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo

**APÊNDICE – D**

RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MÉTODO DOS 3 PONTOS)

**Determinação da Resistência à Flexão (Método dos 3 pontos) - NORMA NBR - 12763/1992**

Amostra: P1 - Mont Charmot

data: 22/08/11

Condição Seca a 70°C

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa		
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	tempo (ms)	dist. (mm)			veloc. (m/s)	
	1	2	3	4	1	2	3	4								CP
1	50,23	50,93	49,52	50,18	50,22	103,00	102,96	102,43	102,33	102,68	180	9958	10,38	35,5	198,33	5587
2	49,19	49,17	48,91	49,12	49,10	101,81	102,40	101,85	101,23	101,82	180	10564	11,62	34,7	199,34	5745
3	48,85	49,71	48,26	48,66	48,87	101,14	102,84	100,08	101,71	101,44	180	10182	11,35	35,1	199,17	5674
					<b>Média:</b>	<b>49,39</b>				<b>101,98</b>		<b>10235</b>	<b>11,12</b>		<b>Média:</b>	<b>5669</b>
					Desvio Padrão:	0,72				0,63		306	0,65		Desvio Padrão:	79,11
					Coefficiente de variação:	0,01				0,01		0,03	0,06		Coefficiente de variação:	0,02

Amostra: P1 - Mont Charmot

data: 22/08/11

Condição Saturada em água

4	50,44	50,84	50,47	50,88	50,66	97,82	97,33	98,55	97,95	97,91	180	10936	11,75	34,4	196,42	5710
5	49,98	50,16	49,16	50,51	49,95	101,61	100,98	101,82	101,68	101,52	180	11182	11,92	35,9	196,41	5471
6	50,28	50,29	51,04	50,64	50,56	98,93	99,14	99,85	100,26	99,55	180	8842	9,38	35,4	196,00	5537
					<b>Média:</b>	<b>50,39</b>				<b>99,66</b>		<b>10320</b>	<b>11,02</b>		<b>Média:</b>	<b>5573</b>
					Desvio Padrão:	0,38				1,81		1286	1,42		Desvio Padrão:	123
					Coefficiente de variação:	0,01				0,02		0,12	0,13		Coefficiente de variação:	0,02
					*(R):											

Amostra: P1 - Mont Charmot

data: 22/08/11

Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo

1 GD	50,19	50,53	50,42	50,50	50,41	101,63	101,25	102,89	102,37	102,04	180	8112	8,45	35,7	196,06	5492
2 GD	50,67	50,13	49,99	49,71	50,13	101,50	100,78	100,35	100,14	100,69	180	10748	11,47	36,0	195,85	5440
3 GD	50,56	50,64	50,55	50,75	50,63	98,33	98,27	99,05	98,90	98,64	180	7294	7,79	35,9	195,23	5438
4 GD	51,00	50,36	50,65	50,75	50,69	97,59	97,68	98,23	98,28	97,95	180	7734	8,30	36,6	195,20	5333
5 GD	50,44	50,65	50,71	50,31	50,53	100,45	100,65	100,64	100,94	100,67	180	6072	6,38	35,4	199,38	5632
6 GD	49,96	50,62	49,82	50,93	50,33	100,88	100,16	100,58	100,22	100,46	180	8930	9,47	35,1	196,36	5594
					<b>Média:</b>	<b>50,45</b>				<b>100,07</b>		<b>8148</b>	<b>8,64</b>		<b>Média:</b>	<b>5488</b>
					Desvio Padrão:	0,25				1,51		1586	1,71		Desvio Padrão:	110
					Coefficiente de variação:	0,00				0,02		0,19	0,20		Coefficiente de variação:	0,02
					**(K):											

\*(R) - Coeficiente de enfracimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfracimento após 25 ciclos de congelamento/degelado

**Determinação da Resistência à Flexão (Método dos 3 pontos) - NORMA NBR - 12763/1992**

Amostra: P2 - Mont Charmot

Condição Seca a 70°C

data: 22/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa				
	espessura (d)				largura (b)				dist. entre cutelos (L) (mm)	Propagação de Onda Ultrassônica								
	1	2	3	4	1	2	3	4		tempo (µS)	dist. (mm)	veloc. (m/s)						
1	50,19	49,69	50,37	49,76	50,00	98,70	99,64	98,19	99,18	98,93	180	12730	13,90					
2	47,57	48,47	47,36	48,10	47,88	100,99	101,33	100,51	101,84	101,17	180	16232	18,90					
3	47,61	48,18	49,56	49,38	48,68	97,13	99,18	96,35	98,51	97,79	180	15808	18,42					
	<b>Média: 48,85</b>									<b>99,30</b>		<b>14923</b>	<b>17,07</b>				<b>Média: 5495</b>	
	Desvio Padrão: 1,07									1,72		1911	2,76				Desvio Padrão: 400	
	Coeficiente de variação: 0,02									0,02		0,13	0,16				Coeficiente de variação: 0,02	

Amostra: P2 - Mont Charmot

Condição Saturada em água

data: 22/08/11

4	50,58	51,03	50,85	50,96	50,86	101,84	102,12	101,14	102,06	101,79	180	13188	13,53					
5	50,56	50,54	50,99	50,15	50,56	104,43	104,33	104,78	104,12	104,42	180	15064	15,24					
6	50,76	50,30	50,59	50,32	50,49	101,38	100,53	100,82	100,35	100,77	180	14794	15,55					
	<b>Média: 50,64</b>									<b>102,33</b>		<b>14349</b>	<b>14,77</b>				<b>Média: 5959</b>	
	Desvio Padrão: 0,19									1,88		1014	1,09				Desvio Padrão: 35	
	Coeficiente de variação: 0,00									0,02		0,07	0,07				Coeficiente de variação: 0,01	
	*(R):																	

Amostra: P2 - Mont Charmot

Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo

data: 11/10/11

1 GD	49,98	50,23	50,43	50,75	50,35	99,59	100,55	100,12	101,33	100,40	180	8274	8,78					
2 GD	50,26	50,61	50,47	50,99	50,58	99,46	97,37	97,90	100,03	98,69	180	16140	17,26					
3 GD	49,03	49,97	49,26	50,04	49,58	104,82	104,37	104,63	104,11	104,48	180	15246	16,03					
4 GD	39,53	49,92	49,79	49,67	47,23	104,06	104,62	104,99	104,48	104,54	180	13554	15,70					
5 GD	50,92	51,17	50,76	50,30	50,79	100,61	98,72	100,35	98,25	99,48	180	14128	14,87					
	<b>Média: 49,70</b>									<b>101,52</b>		<b>13468</b>	<b>14,53</b>				<b>Média: 5587</b>	
	Desvio Padrão: 0,53									2,80		3071	3,33				Desvio Padrão: 318	
	Coeficiente de variação: 0,01									0,03		0,23	0,23				Coeficiente de variação: 0,06	
	**(K):																	

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelos

**Determinação da Resistência à Flexão (Método dos 3 pontos) - NORMA NBR - 12763/1992**

Amostra: P3 - Mont Charmot

Condição Seca a 70°C

data: 22/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa		
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	Propagação de Onda Ultrassônica					
	1	2	3	4	1	2	3	4			tempo (µS)	dist. (mm)			veloc. (m/s)	
1	50,92	51,55	50,96	51,51	51,24	103,60	103,31	103,92	103,38	103,55	180	12940	12,85	33,6	202,17	6017
2	49,18	49,76	49,10	49,51	49,39	103,03	103,58	102,22	103,21	103,01	180	9220	9,91	32,8	201,05	6130
3	50,77	50,96	50,03	49,68	50,36	103,46	103,22	103,87	102,98	103,38	180	11728	12,08	32,4	198,11	6115
					<b>Média: 50,33</b>					<b>103,32</b>		<b>11296</b>	<b>11,61</b>		<b>Média: 6087</b>	
					Desvio Padrão: 0,92					0,28		1897	1,53		Desvio Padrão: 61	
					Coefficiente de variação: 0,02					0,00		0,17	0,13		Coefficiente de variação: 0,02	

Amostra: P3 - Mont Charmot

Condição Saturada em água

data: 22/08/11

4	50,47	49,72	49,91	49,74	49,96	99,77	98,76	96,42	97,47	98,11	180	9038	9,97	33,1	198,35	5992
5	50,30	51,38	50,66	50,88	50,81	101,93	101,75	102,01	101,95	101,91	180	12350	12,68	32,7	199,65	6106
6	49,94	49,52	49,52	49,88	49,72	104,26	104,13	104,37	104,62	104,35	180	10950	11,46	33,1	201,18	6078
					<b>Média: 50,16</b>					<b>101,45</b>		<b>10779</b>	<b>11,37</b>		<b>Média: 6059</b>	
					Desvio Padrão: 0,57					3,14		1663	1,36		Desvio Padrão: 59	
					Coefficiente de variação: 0,01					0,03		0,15	0,12		Coefficiente de variação: 0,01	
					*(R):											

Amostra: P3 - Mont Charmot

Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo

data: 11/10/11

1 GD	50,39	50,20	51,03	50,89	50,63	102,14	101,71	102,51	102,29	102,16	180	11038	11,38	32,4	199,62	6161
2 GD	50,46	20,23	50,85	50,36	42,98	100,48	101,24	100,47	100,80	100,75	180	9182	13,32	36,0	200,60	5572
3 GD	50,53	49,41	50,15	49,62	49,93	99,65	100,30	102,10	102,48	101,13	180	8586	9,20	32,5	198,33	6102
4 GD	48,07	48,88	45,06	46,13	47,04	102,08	102,71	101,64	102,20	102,16	180	10552	12,61	35,0	198,07	5659
5 GD	49,55	50,40	49,93	50,86	50,19	102,76	102,49	103,26	103,00	102,88	180	9656	10,06	31,8	198,21	6233
					<b>Média: 48,15</b>					<b>101,82</b>		<b>9803</b>	<b>11,31</b>		<b>Média: 5946</b>	
					Desvio Padrão: 4,23					0,86		997	1,72		Desvio Padrão: 306	
					Coefficiente de variação: 0,09					0,01		0,10	0,15		Coefficiente de variação: 0,05	
					** (K):											

\*(R) - Coeficiente de enfracimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfracimento após 25 ciclos de congelamento/degelos

**Determinação da Resistência à Flexão (Método dos 3 pontos) - NORMA NBR - 12763/1992**

Amostra: A1 - Pedra Cariri

data: 19/08/11

Condição Seca a 70°C

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa		
	espessura (d)				largura (b)				média b	dist. entre cutelos (L) (mm)	Propagação de Onda Ultrassônica					
	1	2	3	4	1	2	3	4			tempo (µs)	dist. (mm)			veloc. (m/s)	
1	50,33	50,40	48,35	50,99	50,02	102,10	102,34	102,67	102,03	102,29	180	26110	27,55	35,6	201,62	5663
2	51,08	50,19	50,76	50,40	50,61	102,88	103,69	101,76	102,56	102,72	180	19984	20,51	35,5	199,54	5621
3	48,46	49,41	48,04	49,78	48,92	102,20	101,78	102,10	102,35	102,11	180	27138	29,98	36,7	202,42	5516
										<b>102,37</b>		<b>24411</b>	<b>26,01</b>		<b>Média:</b>	<b>5600</b>
										0,32		3868	4,92		Desvio Padrão:	76
										0,00		0,16	0,19		Coefficiente de variação:	0,02

Amostra: A1 - Pedra Cariri

data: 22/08/11

Condição Saturada em água

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa			
	espessura (d)				largura (b)				média b	dist. entre cutelos (L) (mm)	Propagação de Onda Ultrassônica						
	1	2	3	4	1	2	3	4			tempo (µs)	dist. (mm)			veloc. (m/s)		
4	50,03	49,80	50,77	51,00	50,40	102,03	100,47	101,43	101,35	101,32	180	15744	16,52	35,7	202,19	5664	
5	49,69	49,67	49,62	49,79	49,69	101,53	101,80	102,62	102,41	102,09	180	12522	13,41	34,8	200,92	5774	
6	49,75	50,08	50,05	50,26	50,04	101,24	10,67	101,58	101,04	78,63	180	21238	29,13	35,1	201,01	5727	
										<b>94,01</b>		<b>16501</b>	<b>19,69</b>		<b>Média:</b>	<b>5721</b>	
										13,33		4407	8,32		Desvio Padrão:	55	
										0,14		0,27	0,42		Coefficiente de variação:	0,01	

Amostra: A1 - Pedra Cariri

data: 11/10/11

Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa			
	espessura (d)				largura (b)				média b	dist. entre cutelos (L) (mm)	Propagação de Onda Ultrassônica						
	1	2	3	4	1	2	3	4			tempo (µs)	dist. (mm)			veloc. (m/s)		
1 GD	51,05	50,93	50,83	50,65	50,87	104,22	101,57	104,63	102,42	103,21	180	15348	15,52	36,6	200,83	5487	
2 GD	48,92	48,67	50,30	50,64	49,63	101,79	102,15	101,81	102,19	101,99	180	15790	16,97	39,5	201,73	5107	
3 GD	50,61	51,65	50,35	50,28	50,72	101,75	101,93	102,04	101,94	101,92	180	17960	18,49	36,0	200,83	5579	
										<b>102,37</b>		<b>16366</b>	<b>16,99</b>		<b>Média:</b>	<b>5391</b>	
										0,73		1398	1,49		Desvio Padrão:	250	
										0,01		0,09	0,09		Coefficiente de variação:	0,05	

\*(R) - Coeficiente de enfraquecimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelos

**Determinação da Resistência à Flexão (Método dos 3 pontos) - NORMA NBR - 12763/1992**

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 19/08/11

Condição Seca a 70°C

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa		
	espessura (d)				largura (b)				dist. entre cutelos (L) (mm)	médias	veloc. (m/s)					
	1	2	3	4	1	2	3	4				1			2	3
1	50,99	50,10	50,75	50,44	50,57	100,80	97,77	100,61	98,28	99,37	180	25952	27,57	34,8	200,61	5765
2	50,28	50,67	50,28	51,20	50,61	102,26	101,17	103,15	102,09	102,17	180	22564	23,28	35,2	201,15	5714
3	50,64	50,43	50,76	50,87	50,68	98,97	99,45	99,26	99,58	99,32	180	16252	17,21	34,6	199,18	5757
	<b>Média: 50,62</b>												<b>21589</b>	<b>22,69</b>	<b>Média: 5745</b>	
	Desvio Padrão: 0,05												4923	5,21	Desvio Padrão: 27	
	Coeficiente de variação: 0,00												0,23	0,23	Coeficiente de variação: 0,02	

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 22/08/11

Condição Saturada em água

4	49,64	50,70	50,84	50,51	50,42	105,61	106,01	103,61	104,15	104,85	180	23876	24,18	35,6	199,43	5602
5	51,60	49,88	50,55	49,21	50,31	99,27	99,73	99,53	100,10	99,66	180	23622	25,28	34,9	197,29	5653
6	50,65	50,61	50,61	50,51	50,60	100,72	101,17	100,52	100,97	100,85	180	34582	36,17	34,2	199,19	5824
	<b>Média: 50,44</b>												<b>27360</b>	<b>28,55</b>	<b>Média: 5693</b>	
	Desvio Padrão: 0,14												6256	6,63	Desvio Padrão: 116	
	Coeficiente de variação: 0,00												0,23	0,23	Coeficiente de variação: 0,02	
	*(R):															

Amostra: A2 - Pedra Cariri

data: 11/10/11

Condição Seca a 70°C após Congelamento e Degelo

1 GD	49,29	50,09	50,75	50,22	50,09	102,44	102,03	102,21	101,71	102,10	180	19306	20,35	34,7	199,15	5739
2 GD	50,52	50,52	50,90	51,14	50,77	101,04	99,69	100,84	99,58	100,29	180	12096	12,63	34,4	199,91	5811
3 GD	50,23	50,29	50,30	48,87	49,92	101,56	101,95	101,43	101,78	101,68	180	20296	21,62	34,3	200,05	5832
	<b>Média: 50,26</b>												<b>17233</b>	<b>18,20</b>	<b>Média: 5794</b>	
	Desvio Padrão: 0,45												4476	4,86	Desvio Padrão: 49	
	Coeficiente de variação: 0,01												0,26	0,27	Coeficiente de variação: 0,01	
	**(K):															

\*(R) - Coeficiente de enfracimento hidráulico

\*\* (K) - Coeficiente de enfracimento após 25 ciclos de congelamento/degelos

**APÊNDICE – E****RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MÉTODO DOS 4 PONTOS)**



**Ensaio de Resistência à Flexão na Tração (Método dos 4 pontos) - NORMA ASTM C880/1998**

Amostra: PI - Mont Charmot  
Condição Seca a 70°C

data: 31/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
1	29,11	31,27	32,15	29,29	30,46	100,05	100,17	100,05	100,00	100,07	360	3376	9,82	
2	29,74	29,21	29,65	29,47	29,52	99,20	98,77	98,69	98,98	98,91	360	3036	9,51	
3	28,15	28,05	27,94	29,22	28,34	101,03	100,56	100,57	101,14	100,83	360	2686	8,96	
<b>Média: 29,44</b>										<b>99,93</b>	<b>3033</b>	<b>9,43</b>		
Desvio Padrão: 1,06										0,96	345	0,44		
Coeficiente de variação: 0,04										0,01	0,11	0,05		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	67,1	386,00	5753
2	68,3	390,00	5710
3	68,2	391,00	10236
<b>Média:</b>			<b>5732</b>
<b>Desvio Padrão:</b>			<b>2600,61</b>
<b>Coeficiente de variação:</b>			<b>0,02</b>

**Condição Saturada em água**

data: 01/09/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
4	29,38	30,11	29,00	29,40	29,47	101,21	100,45	100,58	101,28	100,88	360	3024	9,32	
5	29,95	30,61	29,70	29,67	29,98	99,20	98,78	98,73	99,39	99,03	360	2934	8,90	
6	29,75	30,64	29,70	29,69	29,95	100,51	100,40	100,15	100,12	100,30	360	3224	9,68	
<b>Média: 29,80</b>										<b>100,07</b>	<b>3061</b>	<b>9,30</b>		
Desvio Padrão: 0,28										0,95	148	0,39		
Coeficiente de variação: 0,01										0,01	0,05	0,04		
<b>*(R):</b>												0,99		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (ms)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4	67,7	389,00	10318
5	68,4	388,00	5673
6	68,0	390,00	5735
<b>Média:</b>			<b>5718</b>
<b>Desvio Padrão:</b>			<b>2664,31</b>
<b>Coeficiente de variação:</b>			<b>0,37</b>

\* (R) - Coeficiente de enfrachecimento hidráulico

**Ensaio de Resistência à Flexão na Tração (Método dos 4 pontos) - NORMA ASTM C880/1998**

Amostra: P2 - Mont Charriot  
Condição Seca a 70°C

data: 31/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
1	31,70	31,21	32,26	31,31	31,62	104,50	103,62	103,38	104,29	103,95	360	5186	13,47	
2	28,61	29,07	25,91	28,86	28,11	103,52	104,43	104,87	103,53	104,09	360	4416	14,49	
3	30,52	30,24	30,32	30,86	30,49	103,26	104,28	104,52	103,45	103,88	360	5242	14,66	
	<b>Média:</b>				<b>30,07</b>					<b>103,97</b>		<b>4948</b>	<b>14,21</b>	
	Desvio Padrão:				1,79					0,11		462	0,64	
	Coeficiente de variação:				0,06					0,00		0,09	0,05	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	60,6	356,00	5875
2	60,8	355,00	5839
3	60,7	358,00	5898
	<b>Média:</b>		<b>5870</b>
	Desvio Padrão:		29,74
	Coeficiente de variação:		0,02

**Condição Saturada em água**

data: 01/09/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
4	32,33	33,48	32,99	32,66	32,87	104,28	103,02	103,11	104,50	103,73	360	5000	12,05	
5	31,94	31,99	32,24	32,49	32,17	102,63	102,79	103,63	103,44	103,12	360	4604	11,65	
6	32,07	32,24	31,68	31,80	31,95	103,64	103,69	104,45	104,61	104,10	360	4690	11,92	
	<b>Média:</b>				<b>32,33</b>					<b>103,65</b>		<b>4765</b>	<b>11,87</b>	
	Desvio Padrão:				0,48					0,49		208	0,20	
	Coeficiente de variação:				0,01					0,00		0,04	0,02	
	*(R):												0,84	

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4	60,3	357,00	5920
5	62,8	361,00	5748
6	62,7	364,00	5805
	<b>Média:</b>		<b>5825</b>
	Desvio Padrão:		87,61
	Coeficiente de variação:		0,02

\*(R) - Coeficiente de enfrachecimento hidráulico

**Ensaio de Resistência à Flexão na Tração (Método dos 4 pontos) - NORMA ASTM C880/1998**

Amostra: P3 - Mont Charriot  
Condição Seca a 70°C

data: 31/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
1	30,66	30,13	29,97	30,29	30,26	101,94	101,38	101,82	101,25	101,60	360	3032	8,80	
2	30,48	30,56	30,02	30,08	30,29	102,15	101,07	101,02	101,72	101,49	360	3336	9,68	
3	31,21	32,68	32,29	31,05	31,81	105,69	102,79	104,03	107,10	104,90	360	2500	6,36	
<b>Média:</b>					<b>30,79</b>					<b>102,66</b>	<b>2956</b>	<b>8,28</b>		
Desvio Padrão:					0,89					1,94	423	1,72		
Coeficiente de variação:					0,03					0,02	0,14	0,21		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	65,2	379,00	5813
2	64,6	379,00	5867
3	64,3	382,00	5941
<b>Média:</b>			<b>5874</b>
Desvio Padrão:			64,27
Coeficiente de variação:			0,02

**Condição Saturada em água**

data: 01/09/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L) (mm)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
4	32,32	30,04	30,01	32,63	31,25	106,32	109,28	110,22	107,76	108,40	360	3614	9,22	
5	31,26	31,02	31,45	31,32	31,26	108,62	105,82	104,49	107,05	106,50	361	2920	7,60	
6														
<b>Média:</b>					<b>31,26</b>					<b>107,45</b>	<b>3267</b>	<b>8,41</b>		
Desvio Padrão:					0,01					1,34	491	1,15		
Coeficiente de variação:					0,00					0,01	0,15	0,14		
*(R):												1,02		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4	63,9	381,00	5962
5	62,5	382,00	6112
6			
<b>Média:</b>			<b>6037</b>
Desvio Padrão:			105,75
Coeficiente de variação:			0,02

\*(R) - Coeficiente de enfrachecimento hidráulico

**Ensaio de Resistência à Flexão na Tração (Método dos 4 pontos) - NORMA ASTM C880/1998**

Amostra: A1 - Monti Charmot  
**Condição Seca a 70°C**

data: 31/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa	
	espessura (d)				largura (b)				média b	dist. entre cutelos (L) (mm)	tempo ( $\mu$ S)	dist. (mm)			veloc. (m/s)
	1	2	3	4	1	2	3	4							
1	32,45	30,08	30,78	31,80	31,28	100,83	104,00	104,23	100,40	102,37	360	5276	14,23		
2	35,89	33,88	30,72	33,76	33,56	100,71	103,92	104,54	100,75	102,48	360	5286	12,36		
3	33,26	34,11	32,41	32,03	32,95	102,11	101,36	101,37	101,90	101,69	360	5202	12,72		
					<b>Média: 32,60</b>					<b>102,18</b>		<b>5255</b>	<b>13,10</b>		
					Desvio Padrão: 1,18					0,43		46	0,99		
					Coefficiente de variação: 0,04					0,00		0,01	0,08		

Propagação de Onda Ultrassônica				
CP	tempo ( $\mu$ S)	dist. (mm)	veloc. (m/s)	
1	71,5	370,00	5175	
2	63,9	372,00	5822	
3	61,0	366,00	6000	
		<b>Média:</b>	<b>5665</b>	
		<b>Desvio Padrão:</b>	<b>434,18</b>	
		<b>Coefficiente de variação:</b>	<b>0,02</b>	

**Condição Saturada em água**

data: 01/09/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força N	Tensão MPa	
	espessura (d)				largura (b)				média b	dist. entre cutelos (L) (mm)	tempo ( $\mu$ S)	dist. (mm)			veloc. (m/s)
	1	2	3	4	1	2	3	4							
4	31,20	31,57	30,75	30,91	31,11	101,94	101,22	101,41	101,39	101,49	360	5300	14,57		
5	31,12	31,97	32,98	30,88	31,74	101,02	101,55	101,65	101,15	101,34	361	5190	13,77		
6	30,56	30,16	31,89	31,06	30,92	101,37	101,96	101,50	101,57	101,60	360	5342	14,85		
					<b>Média: 31,25</b>					<b>101,48</b>		<b>5277</b>	<b>14,40</b>		
					Desvio Padrão: 0,43					0,13		78	0,56		
					Coefficiente de variação: 0,01					0,00		0,01	0,04		
					* (R):								1,10		

Propagação de Onda Ultrassônica				
CP	tempo ( $\mu$ S)	dist. (mm)	veloc. (m/s)	
4	67,3	366,00	5438	
5	65,5	361,00	5511	
6	61,8	360,00	5825	
		<b>Média:</b>	<b>5592</b>	
		<b>Desvio Padrão:</b>	<b>205,55</b>	
		<b>Coefficiente de variação:</b>	<b>0,04</b>	

\* (R) - Coeficiente de enfrachecimento hidráulico

**Ensaio de Resistência à Flexão na Tração (Método dos 4 pontos) - NORMA ASTM C880/1998**

Amostra: A2 - Monti Charmot  
 Condição Seca a 70°C

data: 31/08/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
1	26,72	26,51	25,95	25,66	26,21	100,38	102,18	102,38	101,08	101,51	360	5132	19,87	
2	26,15	25,96	25,58	25,76	25,86	100,79	102,55	102,77	100,99	101,78	360	5198	20,62	
3	28,76	23,10	21,58	27,65	25,27	102,56	101,04	100,45	103,32	101,84	360	5074	21,06	
<b>Média:</b>											<b>5135</b>	<b>20,52</b>		
Desvio Padrão:											62	0,60		
Coeficiente de variação:											0,01	0,03		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
1	74,5	396,00	5315
2	69,2	397,00	5737
3	69,8	395,00	5659
<b>Média:</b>			<b>5570</b>
Desvio Padrão:			224,29
Coeficiente de variação:			0,02

**Condição Saturada em água**

data: 01/09/11

CP	dimensões dos corpos-de-prova (mm)												Força	Tensão
	espessura (d)				largura (b)				média	dist. entre cutelos (L)	N	MPa		
	1	2	3	4	1	2	3	4						
4	25,76	26,54	26,36	25,28	25,99	97,28	94,65	93,73	96,56	95,56	360	1270	5,31	
5	27,30	26,81	26,88	27,87	27,22	95,44	97,62	97,41	94,93	96,35	360	5018	18,99	
6	32,08	26,37	25,87	30,76	28,77	98,09	95,81	95,83	99,28	97,25	360	5002	16,78	
<b>Média:</b>											<b>3763</b>	<b>17,88</b>		
Desvio Padrão:											2159	1,56		
Coeficiente de variação:											0,57	0,09		
<b>*(R):</b>												0,87		

Propagação de Onda Ultrassônica			
CP	tempo (µs)	dist. (mm)	veloc. (m/s)
4	79,5	395,00	4969
5	69,7	395,00	5667
6	69,5	395,00	5683
<b>Média:</b>			<b>5675</b>
Desvio Padrão:			11,53
Coeficiente de variação:			0,00

\* (R) - Coeficiente de enfracimento hidráulico

**APÊNDICE – F**

PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS EXPOSTAS  
À AMBIENTE COM DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO<sub>2</sub>)

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

## Amostra: Pedra Cariri - Placa 1

Ciclos: 0

Data: 04/12/12      Peso (g): 464,86

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	68,69	1,02	12,19
A2	69,57	1,07	11,04
A3	73,10	0,57	10,33
B1	69,68	0,60	9,94
B2	70,75	0,71	10,11
B3	69,45	1,22	13,98
C1	69,37	1,63	14,17
C2	67,06	1,07	12,45
C3	70,32	0,31	9,79
D1	72,66	0,25	9,42
D2	70,77	0,62	10,39
D3	71,89	0,34	9,84
Média	70,27583333	0,78	11,1375

Ciclos: 25

Data: 22/03/13      Peso (g): 464,96

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	69,14	1,20	12,42
A2	70,80	0,68	10,64
A3	71,81	0,76	10,19
B1	69,92	0,69	10,65
B2	70,98	0,71	10,34
B3	69,94	1,26	13,43
C1	67,25	2,60	16,95
C2	68,89	0,95	14,27
C3	70,96	0,47	10,51
D1	72,75	0,32	10,30
D2	71,29	0,62	10,64
D3	72,61	0,39	10,58
Média	70,53	0,89	11,74

Ciclos: 50

Data: 07/05/13      Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	69,06	1,29	13,19
A2	71,11	0,59	11,04
A3	72,75	0,66	10,67
B1	69,85	0,79	11,57
B2	70,66	0,79	11,20
B3	69,81	1,30	14,22
C1	67,72	2,57	17,44
C2	68,72	0,95	14,25
C3	71,05	0,52	11,34
D1	73,57	0,29	10,73
D2	71,75	0,60	11,22
D3	72,51	0,43	11,37
Média	70,71	0,90	12,35

Ciclos: 100

Data: 15/07/13      Peso (g): 465,24

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	70,71	1,34	15,16
A2	71,23	0,81	12,98
A3	70,81	1,69	15,13
B1	73,75	0,43	11,83
B2	72,40	0,83	13,00
B3	71,60	0,91	12,76
C1	68,48	1,44	14,46
C2	71,79	0,71	12,16
C3	74,32	0,70	12,35
D1	70,64	1,45	15,97
D2	71,24	0,50	12,24
D3	72,59	0,51	12,37
Média	71,63	0,94	13,37

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Pedra Cariri - Placa 2

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 400,50

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	74,87	0,60	10,08
A2	76,50	0,03	8,86
A3	75,38	0,14	9,21
B1	75,01	0,26	10,17
B2	75,73	0,05	9,49
B3	75,32	0,03	9,36
C1	73,35	0,44	10,13
C2	72,94	0,27	9,37
C3	70,96	0,43	9,33
D1	71,10	0,48	10,35
D2	72,76	0,46	10,32
D3	71,47	0,41	10,19
Média	73,78	0,30	9,74

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 400,67

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	74,70	0,68	10,21
A2	76,71	-0,13	8,99
A3	75,50	0,04	9,70
B1	73,51	0,47	10,51
B2	74,53	-0,06	9,26
B3	75,46	-0,11	9,56
C1	73,65	0,30	10,09
C2	73,12	0,18	9,71
C3	71,56	0,41	9,56
D1	72,01	0,43	10,76
D2	72,88	0,43	10,94
D3	71,04	0,31	10,21
Média	73,72	0,25	9,96

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	74,33	0,55	10,89
A2	76,06	-0,10	9,86
A3	74,15	0,08	10,75
B1	73,38	0,30	10,84
B2	75,92	-0,14	10,01
B3	75,63	-0,17	10,35
C1	74,10	0,25	10,62
C2	73,47	0,07	10,09
C3	73,13	0,23	10,23
D1	72,63	0,29	11,13
D2	73,72	0,28	11,07
D3	72,17	0,18	10,54
Média	74,06	0,15	10,53

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 400,72

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	74,90	0,39	11,74
A2	74,90	0,22	11,34
A3	73,83	0,23	10,93
B1	72,28	0,40	11,85
B2	76,1	-0,07	11,42
B3	75,83	-0,08	10,63
C1	73,17	0,14	10,45
C2	73,44	0,36	11,49
C3	75,31	0,16	12,38
D1	74,97	0,07	12,13
D2	70,89	0,43	10,86
D3	70,74	0,30	11,00
Média	73,66	0,21	11,35



## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Pedra Cariri - Placa 3

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 323,37

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	65,50	1,41	9,39
A2	65,16	2,47	11,45
A3	60,34	2,72	10,62
B1	68,36	1,84	8,71
B2	64,00	1,98	10,90
B3	65,47	2,80	12,38
C1	56,74	-0,77	0,74
C2	65,27	0,12	6,06
C3	66,55	1,77	9,74
D1	66,24	1,73	10,39
D2	63,37	1,81	10,22
D3	60,17	0,66	6,90
Média	<b>63,93</b>	<b>1,55</b>	<b>8,96</b>

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 323,53

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	65,64	1,83	9,97
A2	64,64	2,50	11,41
A3	60,09	2,78	10,59
B1	67,68	1,87	8,57
B2	63,77	2,04	10,63
B3	65,15	2,94	12,48
C1	55,87	-0,73	0,87
C2	64,23	-0,08	5,44
C3	66,37	1,86	9,72
D1	66,58	1,72	10,37
D2	63,94	2,01	10,74
D3	59,48	0,70	7,28
Média	<b>63,62</b>	<b>1,62</b>	<b>9,01</b>

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	65,13	2,06	10,80
A2	64,26	2,34	11,62
A3	59,48	2,80	11,50
B1	67,33	1,73	9,75
B2	64,05	1,95	10,98
B3	64,58	2,81	12,23
C1	50,42	-1,04	1,24
C2	65,46	0,23	7,26
C3	65,91	1,73	10,10
D1	66,47	1,76	12,10
D2	63,19	1,85	10,87
D3	57,38	0,67	8,15
Média	<b>62,81</b>	<b>1,57</b>	<b>9,72</b>

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 323,72

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	64,76	1,76	10,45
A2	66,92	1,85	10,19
A3	49,37	-0,47	3,73
B1	65,62	1,83	11,04
B2	63,75	2,58	12,25
B3	63,07	1,95	10,66
C1	63,05	-0,27	5,72
C2	64,40	2,14	11,87
C3	58,20	3,11	11,97
D1	64,71	2,82	12,93
D2	65,70	1,78	10,32
D3	56,20	1,08	9,96
Média	<b>62,15</b>	<b>1,68</b>	<b>10,09</b>

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Pedra Cariri - Placa 4

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 637,33

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	65,78	0,00	5,20
A2	60,77	0,43	7,29
A3	66,05	1,45	9,09
B1	65,49	-0,47	5,07
B2	64,97	-0,45	4,56
B3	66,18	0,30	7,15
C1	58,83	-0,65	2,38
C2	65,49	-0,70	3,04
C3	65,89	-0,41	4,39
D1	62,75	-0,48	3,49
D2	61,55	-0,63	3,02
D3	60,02	-0,88	1,32
Média	63,65	-0,21	4,67

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 323,53

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	60,54	0,07	7,59
A2	58,76	0,46	8,47
A3	64,36	1,54	10,66
B1	60,71	-0,23	8,15
B2	59,49	-0,15	7,72
B3	64,02	-0,05	7,15
C1	56,20	-0,65	3,61
C2	58,97	-0,59	5,48
C3	64,83	-0,14	5,73
D1	61,19	-0,66	4,00
D2	59,10	-0,48	4,58
D3	58,67	-0,92	1,46
Média	60,57	-0,15	6,22

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	60,20	0,04	8,41
A2	57,86	0,54	9,72
A3	63,25	1,81	12,18
B1	60,24	-0,17	9,04
B2	59,45	-0,08	8,87
B3	63,07	0,32	9,62
C1	56,28	-0,66	4,48
C2	57,03	-0,63	6,51
C3	62,74	-0,32	6,40
D1	59,80	-0,79	4,48
D2	57,22	-0,80	4,86
D3	56,68	-0,96	2,43
Média	59,49	-0,14	7,25

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 637,57

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	58,22	0,37	9,92
A2	58,68	-0,11	9,50
A3	54,90	-0,74	4,49
B1	57,74	-0,55	6,52
B2	57,21	0,20	9,99
B3	57,26	-0,45	8,26
C1	56,36	-0,59	7,06
C2	54,38	-0,33	7,51
C3	60,73	1,99	13,86
D1	60,45	0,11	9,41
D2	60,25	-0,38	7,79
D3	55,25	-0,98	3,26
Média	57,62	-0,12	8,13

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Mont Charmot - Placa 1

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 813,63

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	73,27	2,96	12,99
A2	73,37	3,15	12,21
A3	73,72	2,92	11,15
B1	71,84	3,36	13,50
B2	72,92	3,22	12,35
B3	74,97	2,67	10,96
C1	72,51	3,00	13,35
C2	74,13	2,48	11,27
C3	74,17	2,80	11,26
D1	72,35	72,35	3,12
D2	73,65	3,03	11,35
D3	73,51	2,96	11,41
Média	73,37	8,74	11,24

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 813,98

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	73,14	2,89	12,87
A2	73,55	2,96	12,07
A3	73,40	2,83	11,75
B1	71,92	3,20	13,46
B2	73,08	3,02	11,68
B3	74,49	2,77	11,18
C1	72,47	2,91	13,30
C2	74,42	2,32	11,12
C3	74,25	2,71	11,09
D1	72,65	2,94	12,43
D2	73,42	2,95	11,33
D3	73,45	2,87	11,37
Média	73,35	2,86	11,97

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	72,98	2,75	12,98
A2	73,52	2,86	12,07
A3	73,58	2,69	11,73
B1	71,58	3,16	13,81
B2	73,17	2,99	12,41
B3	74,19	2,70	11,63
C1	72,62	2,76	13,30
C2	74,34	2,21	11,64
C3	73,82	2,72	11,64
D1	72,55	2,76	12,60
D2	73,89	2,73	11,72
D3	73,23	2,70	12,03
Média	73,29	2,75	12,30

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 813,80

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	72,70	2,93	12,98
A2	71,35	3,24	13,68
A3	72,27	2,86	13,44
B1	72,00	2,95	13,38
B2	73,27	2,96	12,32
B3	72,79	3,15	12,40
C1	73,98	2,39	12,00
C2	72,20	3,08	13,37
C3	73,30	2,81	11,79
D1	73,96	2,78	11,89
D2	73,30	2,81	12,30
D3	72,12	3,04	13,38
Média	72,77	2,92	12,74

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Mont Charmot - Placa 2

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 704,23

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	73,13	2,37	12,51
A2	74,76	2,17	12,14
A3	73,21	2,70	12,73
B1	74,99	2,22	12,43
B2	74,72	2,30	12,04
B3	74,34	2,32	12,39
C1	74,93	2,25	12,33
C2	74,85	2,22	12,21
C3	74,21	2,41	12,44
D1	74,22	2,32	12,72
D2	74,28	2,31	12,57
D3	74,28	2,31	12,57
Média	74,33	2,33	12,42

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 704,57

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	72,68	2,46	12,57
A2	74,51	2,22	12,55
A3	73,43	2,38	12,27
B1	74,89	2,27	12,50
B2	74,66	2,28	12,02
B3	74,61	2,23	12,13
C1	75,12	2,17	12,12
C2	75,00	2,22	12,32
C3	74,30	2,35	12,38
D1	74,25	2,29	12,59
D2	74,69	2,20	12,24
D3	74,94	2,19	12,67
Média	74,42	2,27	12,36

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	73,29	2,15	12,38
A2	74,24	2,04	12,67
A3	73,83	2,14	12,56
B1	74,47	2,20	12,85
B2	74,47	2,15	12,71
B3	74,03	2,19	12,90
C1	74,93	2,12	12,37
C2	74,63	2,11	12,93
C3	74,06	2,27	12,75
D1	74,23	2,19	12,63
D2	74,90	2,10	12,61
D3	74,88	2,03	12,70
Média	74,33	2,14	12,67

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 703,97

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	72,40	2,57	12,84
A2	74,57	2,34	13,08
A3	74,25	2,33	13,04
B1	73,73	2,37	13,10
B2	73,94	2,22	12,87
B3	74,19	2,41	12,85
C1	74,73	2,23	12,72
C2	74,54	2,26	12,77
C3	72,32	2,54	13,08
D1	70,32	2,31	12,50
D2	74,31	2,38	12,50
D3	74,66	2,19	13,15
Média	73,66	2,35	12,88

## PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Mont Charmot - Placa 3

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 450,04

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	82,03	1,03	7,48
A2	81,95	1,04	7,73
A3	81,56	0,95	7,38
B1	81,26	1,45	8,85
B2	81,28	1,05	8,55
B3	81,34	1,10	8,15
C1	82,20	1,10	7,34
C2	80,91	1,22	8,12
C3	81,36	1,11	8,69
D1	83,13	0,86	6,43
D2	82,28	1,02	7,21
D3	81,85	0,84	8,00
Média	<b>81,76</b>	<b>1,06</b>	<b>7,83</b>

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 450,37

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	78,81	1,08	12,00
A2	80,28	1,04	10,46
A3	80,79	0,93	7,92
B1	79,59	1,69	11,76
B2	78,50	1,06	14,00
B3	81,37	1,05	7,96
C1	79,19	1,17	12,39
C2	78,99	1,23	11,05
C3	80,17	1,22	9,74
D1	81,19	0,92	6,00
D2	80,04	1,14	10,53
D3	82,37	0,62	7,62
Média	<b>80,11</b>	<b>1,10</b>	<b>10,12</b>

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	78,73	1,06	12,00
A2	79,45	1,00	11,33
A3	80,44	0,97	8,56
B1	78,94	1,83	13,21
B2	78,57	0,96	14,28
B3	81,31	1,01	8,10
C1	79,46	1,13	12,31
C2	78,67	1,20	12,01
C3	80,06	1,27	9,86
D1	79,97	1,05	10,34
D2	79,56	1,11	11,91
D3	81,69	0,79	8,85
Média	<b>79,74</b>	<b>1,12</b>	<b>11,06</b>

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 450,13

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	77,38	1,25	15,16
A2	76,45	2,12	18,36
A3	77,98	1,29	15,12
B1	78,16	1,31	13,64
B2	77,68	1,23	15,29
B3	77,63	1,21	15,97
C1	77,07	1,31	16,20
C2	78,10	1,31	14,93
C3	78,11	1,22	12,63
D1	79,01	1,34	12,40
D2	78,09	1,59	13,93
D3	79,70	1,12	12,06
Média	<b>77,95</b>	<b>1,36</b>	<b>14,64</b>

### PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Amostra: Mont Charmot - Placa 4

Ciclos: 0

Data: 04/12/12 Peso (g): 409,75

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	79,86	1,21	9,50
A2	81,07	1,15	8,67
A3	80,86	1,56	9,77
B1	80,82	1,09	8,25
B2	81,73	1,19	7,56
B3	81,00	1,41	9,54
C1	81,68	1,24	8,76
C2	81,71	1,08	7,88
C3	81,76	1,26	7,85
D1	81,44	1,51	8,24
D2	82,11	1,25	7,89
D3	82,27	1,26	7,33
Média	<b>81,36</b>	<b>1,27</b>	<b>8,44</b>

Ciclos: 25

Data: 22/03/13 Peso (g): 410,13

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	79,85	1,00	9,89
A2	80,26	1,19	10,32
A3	80,48	1,50	10,22
B1	80,71	0,94	8,45
B2	81,17	2,10	8,18
B3	80,70	1,24	9,54
C1	81,63	1,11	8,52
C2	81,44	0,93	7,72
C3	81,32	1,10	7,82
D1	81,46	1,35	8,03
D2	81,56	1,23	8,37
D3	82,18	1,13	7,25
Média	<b>81,06</b>	<b>1,24</b>	<b>8,69</b>

Ciclos: 50

Data: 07/05/13 Peso (g):

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	78,18	1,20	12,83
A2	79,14	1,24	12,42
A3	77,89	1,85	15,66
B1	78,39	1,12	11,29
B2	78,74	1,32	13,00
B3	78,13	1,54	12,58
C1	79,99	1,21	10,88
C2	78,59	1,16	12,95
C3	78,77	1,32	11,96
D1	80,46	1,37	10,20
D2	78,88	1,61	13,64
D3	79,70	1,37	11,60
Média	<b>78,91</b>	<b>1,36</b>	<b>12,42</b>

Ciclos: 100

Data: 15/07/13 Peso (g): 409,67

Campo de Leitura	L	a*	b*
A1	77,78	1,28	13,24
A2	78,21	1,24	11,70
A3	79,78	1,44	11,02
B1	79,91	1,52	10,50
B2	78,83	1,34	12,54
B3	78,49	1,42	12,78
C1	78,40	1,30	13,32
C2	78,87	1,68	13,36
C3	77,97	1,84	15,78
D1	78,25	1,64	14,34
D2	78,96	1,42	12,51
D3	79,38	1,47	12,26
Média	<b>78,74</b>	<b>1,47</b>	<b>12,78</b>

### MÉDIA DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Mont Charmot

Ciclos	L	a*	b*
0	77,70	3,35	9,98
25	77,24	1,87	10,79
50	76,57	1,84	12,11
100	75,78	2,02	13,26

Pedra Cariri

Ciclos	L	a*	b*
0	67,91	0,61	8,63
25	67,11	0,65	9,23
50	66,77	0,62	9,96
100	66,11	0,68	10,74