

PETROGRAFIA E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS BACIAS POTIGUAR E DO ARARIPE

Igor Magalhães CLEMENTE¹, Antonio Carlos ARTUR², José de Araújo NOGUEIRA NETO³, Cibele Carolina MONTIBELLER¹

- (1) Pós-Graduação, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 - Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: igorclemente@yahoo.com.br; cibelem@outlook.com
- (2) Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: acartur@rc.unesp.br.
- (3) Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, UFC - Campus Universitário do Pici, Bloco 912, CEP 60455-760. Fortaleza, CE. Endereço eletrônico: nogueira@ufc.br

Introdução
Materiais e métodos
Análise petrográfica
 Calcários da Bacia de Potiguar
 Calcários da Bacia do Araripe
Propriedades físico-mecânicas
 Índices físicos
 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
Considerações finais
Agradecimentos
Referências bibliográficas

RESUMO - Os calcários do nordeste brasileiro Mont Charmot e Pedra Cariri, provenientes respectivamente da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar e da Formação Santana na Bacia do Araripe, estão sendo utilizados comercialmente como rochas ornamentais em diversos ambientes, com superfícies polidas ou rugosas, como revestimentos de fachadas, pisos, pias, bordas de piscina e outros. Pouco se sabe sobre suas características intrínsecas e tecnológicas. Assim, para conhecer as características petrográficas e o comportamento físico-mecânico destes materiais foram estudados três níveis do calcário da Bacia Potiguar e dois da Bacia do Araripe. Os resultados dos ensaios indicam que as características tecnológicas dos calcários estudados corroboram com o uso destes materiais como rocha ornamental e de revestimento, como obras de artes, revestimento de interiores, pisos, bancadas e mesas. Não é indicado o uso em ambientes úmidos e em exteriores sujeitos a solicitações mecânicas mais enérgicas, como por exemplo o uso como piso em ambiente de alta circulação de pessoas ou de máquinas, e em fachadas.

Palavras-chave: rocha ornamental, caracterização tecnológica, calcário, Bacias Potiguar e Araripe

ABSTRACT - Northeastern Brazil's limestones, known as Mont Charmot and Pedra Cariri, which belong respectively to Jandaíra Formation (Potiguar Basin) and Santana Formation (Araripe Basin), are commercially used as ornamental rocks and dimension stones, polished or rough, in several environments, such as facade claddings, floor tiles, sinks, swimming pool edges and others. Little is known about their intrinsic characteristics and technological behavior. Therefore, to learn about the petrographic features and the physical-mechanical behavior of these materials, studies were conducted in three limestone levels of the Potiguar Basin and two levels of the Araripe Basin. The tests results indicate that the technological characteristics of the studied limestones corroborate with using these materials as ornamental rocks and dimension stones, as works of art, indoor flooring, floor tiles, benches or desks, and tabletops. These stones are not suitable for moist and/or outdoor environments that are subjected to stronger mechanical stresses, such as use as flooring in high traffic environment of persons or machines, and facades.

Keywords: dimension stone, technological analysis, limestone, Potiguar and Araripe Basins.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o setor de rochas ornamentais cresceu sensivelmente no tocante à exportação de rochas processadas, envolvendo produtos acabados e semiacabados (Abirochas, 2014a, b). Isto também se refletiu no aumento da demanda interna de materiais pétreos voltados para revestimentos de pisos, paredes e fachadas, o que se reflete na maior exigência de tecnologias por parte do mercado para aplicação destes materiais (Chiodi Filho & Rodrigues, 2009).

As rochas carbonáticas (calcários) das

regiões da Bacia Potiguar e da Bacia do Araripe têm tomado grande vulto exploratório como rochas ornamentais, respectivamente com as designações comerciais de “Mont Charmot” e “Pedra Cariri”. O calcário “Mont Charmot” explorado na Formação Jandaíra da Bacia Potiguar registrou, em 2011, aumento nas exportações de 28,7% (IDEMA, 2013) e a “Pedra Cariri”, correspondendo ao calcário laminado do Membro Crato da Formação Santana, Bacia do Araripe, atingiu uma produção de 80 mil toneladas/ano, onde 75% é

destinado ao mercado local (Amaral Filho & Campos, 2006).

As áreas ora em estudo estão inseridas nos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Cabe ressaltar que nestas áreas ocorre o desenvolvimento de sistemas cársticos (cavernas, espeleotemas e relevos ruiformes) e que tais bacias ensejam importantes ocorrências de reservatórios de hidrocarbonetos, sítios paleontológicos, e minerais e rochas de aplicação industrial e da construção civil. Tais litotipos acima citados apresentam coloração creme clara, podendo ser observados micro-fósseis entre os cristais de calcita. Apresentam estrutura maciça, de granulação fina, sendo reconhecidos por vezes

níveis porosos e que são preenchidos pelo crescimento de geodos de calcita.

O presente artigo apresenta e compara resultados do comportamento físico-mecânico de cinco variedades de rochas ornamentais calcárias das Bacias Potiguar e Araripe. Os resultados obtidos são discutidos em função das características petrográficas exibidas pelos calcários analisados visando a compreensão e definição de propriedades petrográficas capazes de explicarem e/ou preverem o comportamento físico-mecânico destes materiais durante o uso em obras civis, de forma a se contribuir na orientação para uma correta especificação dos mesmos como rochas ornamentais e para revestimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

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), coletadas na pedreira da Mineração Apodi, município de Felipe Guerra - RN, 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), coletadas na Pedreira do Idemar, município de Nova Olinda - CE.

A Formação Jandaíra é conhecida como uma região de lajedos e as três amostras estudadas da Bacia Potiguar são provenientes de três níveis distintos da mesma frente de lavra (Figura 1A), 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 1B), separadas entre si por camadas argilosas com espessuras entre 2 a 5 cm (Figura 1C).

A Formação Santana da Bacia do Araripe é subdividida em três membros distintos por Beurlen (1971), respectivamente denominadas de Membro Crato (porção inferior), Membro Ipubi (porção intermediária) e Membro Romualdo (porção superior). Os calcários estudados são provenientes do Membro Crato, compostos por calcários laminados, conhecidos

comercialmente como Pedra Cariri, em níveis descontínuos e fossilíferos, de baixa dureza, cor creme exibindo finos bandamentos de tom marrom escuro. A Figura 2 mostra a frente de lavra da Pedreira do Idemar.

O nível A1, local de coleta das amostras A1, corresponde a uma subfácies com cerca de 9 m de espessura composta por calcários com laminações plano-paralelas e plano-onduladas (Figura 2B). 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 laminações deformadas em seu interior. Ocorrem fósseis de peixes, vegetais (folhas, flores, frutos, caules e outros) e mais raramente insetos. Associados aos fósseis ocorrem pseudomorfs 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 A2, com cerca de 1,5 m de espessura, corresponde à base da seção com laminação de caráter planar a plano-ondulado com presença de *microslumps* e às vezes cortada por falhas normais com rejeitos centimétricos (Figura 2C). Esta subfácies corresponde a microfácies Sm1 e Sm4 de Neumann (1999) e Silva et al. (2002).



Figura 1. Frente de lavra do calcário Mont Charmot. (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.

As atividades laboratoriais visando a caracterização tecnológica e de durabilidade das rochas envolveram análise petrográfica e determinação de propriedades físico-mecânicas. 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 15845 - anexo A (ABNT, 2010a) e as orientações contidas em Rodrigues et al. (1997) e Navarro (1998).

Para a classificação da porosidade foi seguida a proposta de Choquette & Pray (1970) que classifica de acordo com o tempo de formação e o modo de origem dos poros. O grau de empacotamento foi avaliado seguindo a proposta de Holz & Simões (2002), que classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz. As rochas foram classificadas segundo a nomenclatura de Folk (1959, 1962), que

correlaciona a proporção de constituintes ortoquímicos e aloquímicos.

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 de 3 pontos), à flexão pelo método de 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.

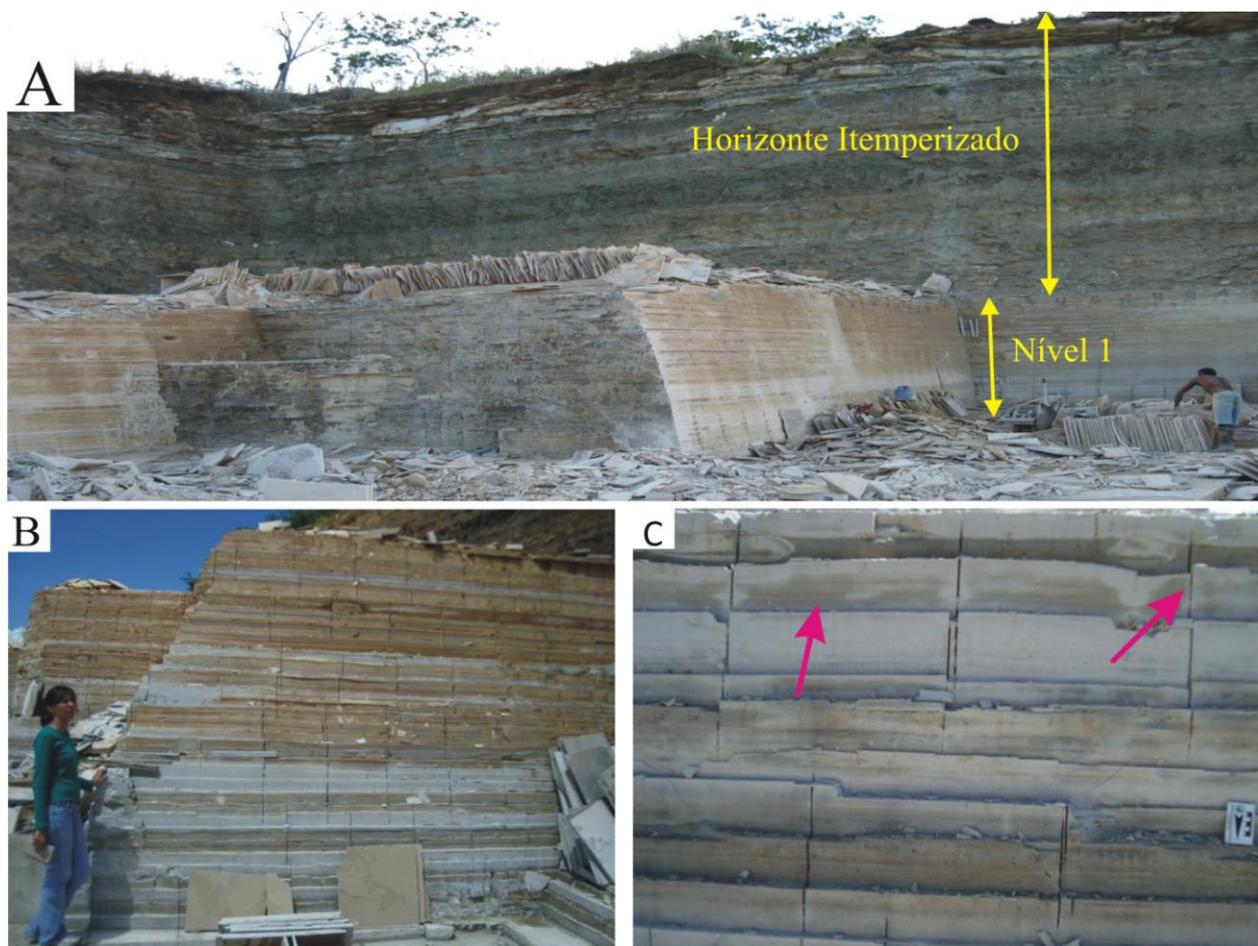


Figura 2. Frente de lavra da Pedra Cariri, Pedreira do Idemar. (A) Nível A1 e zona superior alterada por intemperismo; (B) Nível A1 laminação plano-paralela com alternância das cores; (C) Nível A2 com laminação de caráter planar a plano-ondulado com presença de *microslumps*.

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. O coeficiente de enfraquecimento hidráulico **R** (Kowalski, 1970, segundo 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 σ_{seco} e σ_{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 carregamento em 3 Pontos). Os resultados obtidos são correlacionados com os respectivos resultados das resistências ao

natural de forma a se obter o coeficiente de enfraquecimento **K** (NBR 12767, ABNT 1992c; NBR 15845, ABNT 2010c), através da relação entre os valores representados pela equação:

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

onde:

K = coeficiente de enfraquecimento da rocha

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

σ_{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 da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais antes da realização dos respectivos testes de resistência. As determinações da propagação

das ondas ultrassônicas foram efetuadas paralelamente ao sentido de aplicação da força dos ensaios conjugados, e realizados em

conformidade com a norma ASTM D 2845 (ASTM, 2008).

ANÁLISE PETROGRÁFICA

Os tipos petrográficos dos calcários estudados da Bacia Potiguar (Mont Charmot) são classificados como calcários calcíticos (Gomes, 2008) e os da Bacia do Araripe (Pedra Cariri) 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. A síntese das principais características petrográficas dos calcários estudados são apresentadas na Tabela 1.

Calcários da Bacia Potiguar

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. Apresentam coloração creme claro quando secos a creme quando úmidos. A textura, no geral, é lutítica maciça nos três níveis.

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 constituintes ortoquímicos em relação aos aloquímicos, a amostra P1 corresponde a um biopelasparito, a amostra P2 a um biomicrito e a amostra P3 a um micrito com bioclastos.

O nível P1 (Figuras 3A e 3D) apresenta concentrações de cristais de calcita com formas lenticulares/alongadas, por vezes venulares, 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. 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.

São encontrados na amostra P1 planos estilólítico (0,02 a 10 cm) preenchidos por recristalização de carbonato de cálcio (calcita) (Figura 3D) e fragmentos de equinoides.

Ainda segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) 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 & Simões (2002).

O nível P2 (Figuras 3B e 3E), biomicrito segundo a classificação de Folk (1959, 1962), 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 1cm e 15 cm. Os calcários deste nível não apresentam concentrações venulares de calcita como encontrado nos níveis P1 e P3.

A amostra P2 segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) apresenta porosidade muito baixa (5%), do tipo secundária/intragranular. O grau de empacotamento avaliado seguindo a proposta de Holz & Simões (2002), quanto à disposição física dos bioclastos na matriz, é classificado como denso. Possui abundante conteúdo de microfósseis, podendo chegar a 60%, representados por gastrópodes e foraminíferos, com distribuição em geral homogênea com formas esféricas a elipsoidais e com diâmetros entre 300 μm a 500 μm (Figura 3E). São encontrados aglomerados micríticos que constituem planos de descontinuidade, cuja textura e estruturação interna permitem considerá-los intraclastos, e fragmentos de

gastrópodo levemente recristalizado.

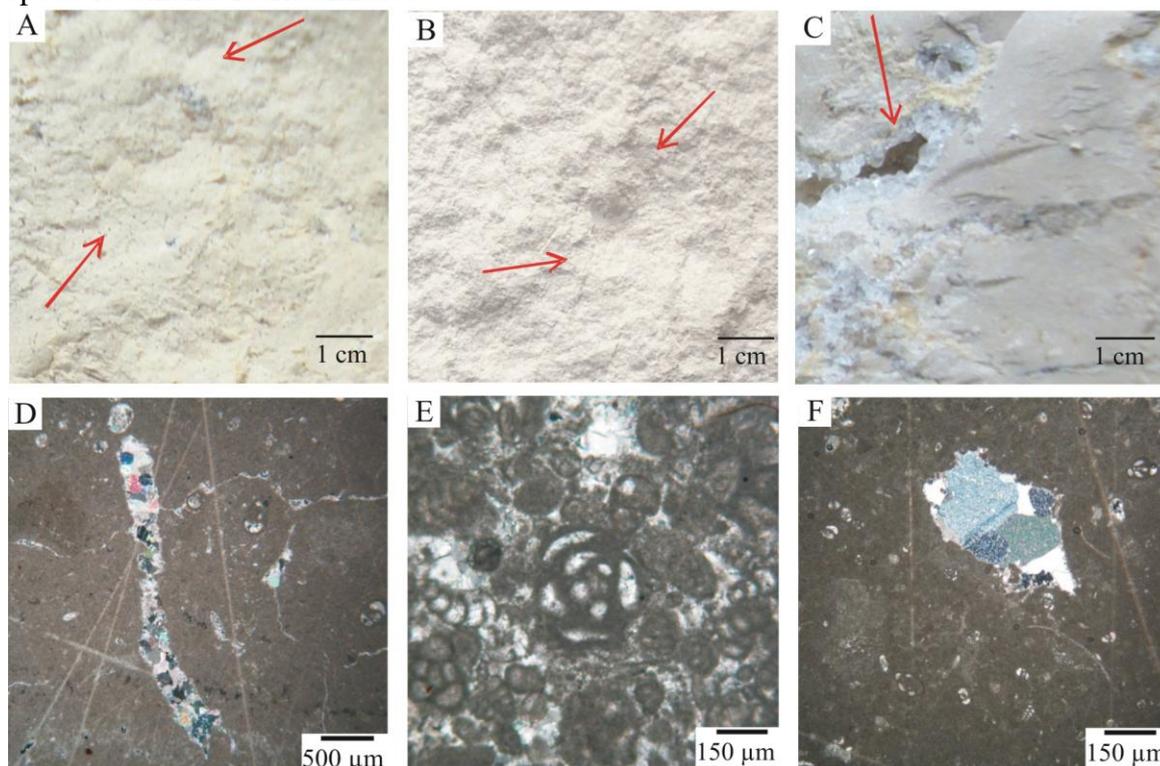


Figura 3. (A) nível P1 exibindo textura maciça com presença de concentração de cristais de calcita; (B) nível P2 com textura maciça com estilólitos; (C) nível P3 com textura maciça com geodos lenticulares e cristais de calcita; (D) nível P1 com matriz micrítica com planos estilólíticos preenchidos por recristalização de calcite; (E) nível P2 com gastrópode, foraminíferos e cimentação; (F) nível P3 com feições de dissolução preenchida por calcite espática.

As amostras dos calcários do nível P3 (Figuras 3C e 3F) 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 cm a 2 cm e extensões entre 0,5 cm a 6 cm), com granulação dos cristais de calcita entre 0,5 mm 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 3C). Apresenta ainda cerca de 10% de cristais de calcita com formas circulares irregulares com diâmetros entre 2 mm e 5 mm, não comunicáveis entre si. As concentrações de cristais de calcita apresentam distribuição homogênea, podendo ser venulares, irregularmente espaçadas, em meio a matriz micrítica.

A amostra P3 possui matriz com textura micrítica com recristalizações e conforme a classificação de Folk (1962) representa um micrito com bioclastos. Segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) apresenta porosidade muito baixa (<5%) do tipo

primária/intergranular. O grau de empacotamento é avaliado como frouxo seguindo a proposta de Holz & Simões (2002). São encontrados fragmentos de equinóides e foraminíferos distribuídos de forma homogênea, e com tamanho médio em torno de 70 μm.

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 calcite espática com proporção de cerca de 10% (Figura 3F).

Calcários da Bacia do Araripe

Foram estudados dois níveis de calcários na Bacia do Araripe (amostras A1 e A2). Com base na classificação proposta por Grabau (1960) correspondem a calcilutitos 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 4A) e a amostra A2 apresenta estrutura plano-paralela com ondulações. Além da laminação, pode apresentar estruturas internas de escorregamento (*slump*) e microfalhas (Figuras 4C e 4D).

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 4B e 4E). 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 medias 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.

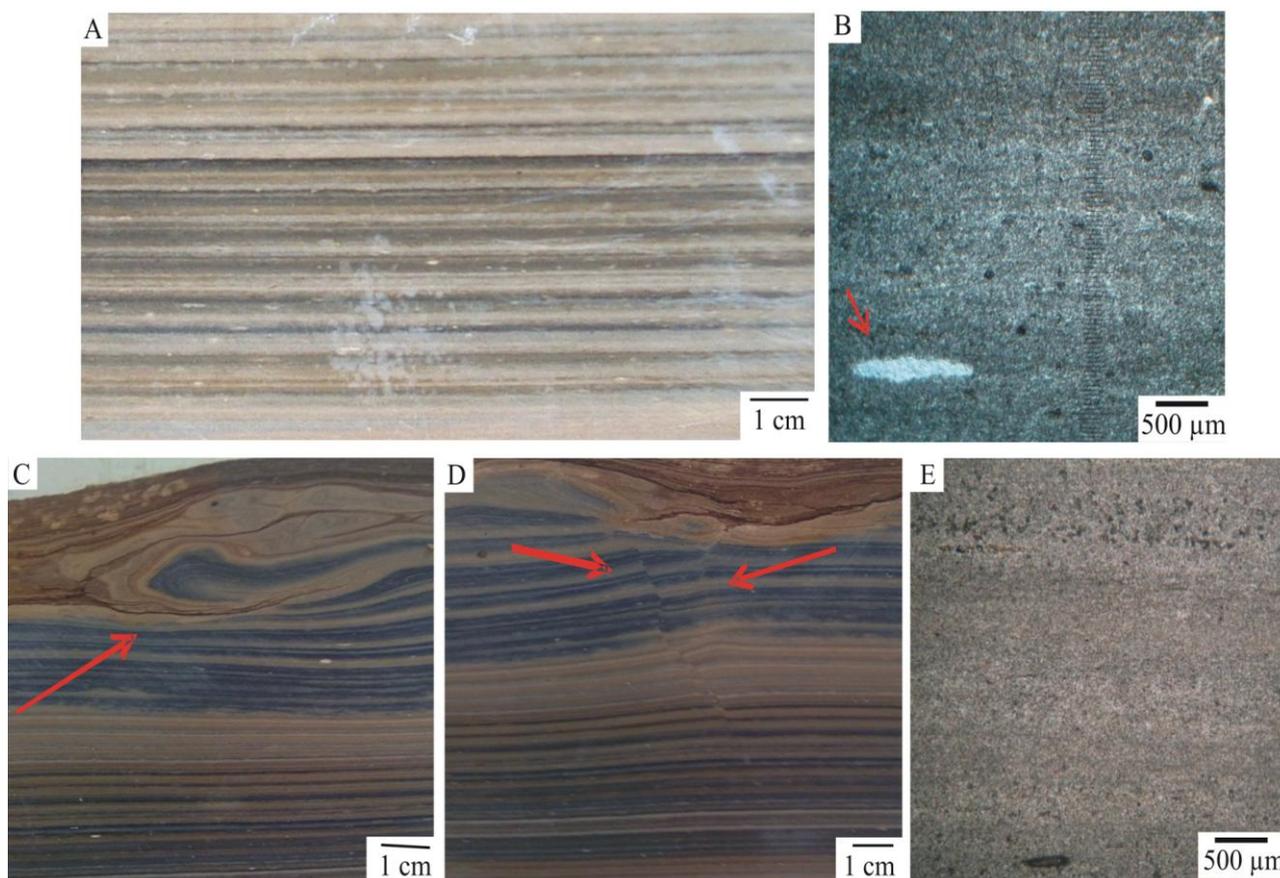


Figura 4. (A) amostra A1, laminação plano-paralela ondulada; (B) fotomicrografia da amostra A1, laminação plano-paralela e lentes alongadas preenchidas por calcita espática; (C) amostra A2 com estruturas internas de escorregamento *slump*; (D) amostra A2 com microfalhas normal com rejeito centimétrico; (E) fotomicrografia da amostra A2, laminação destacadas pelo acúmulo de minerais opacos.

Conforme a classificação de Folk (1959, 1962) a amostra A1 representa um micrito. Segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) apresenta porosidade muito baixa (< 5%) do tipo primária/intergranular. O grau de

empacotamento é avaliado como disperso seguindo a proposta de Holz & Simões (2002), a qual classifica quanto à disposição dos bioclastos na matriz.

Tabela 1. Síntese das características petrográficas dos calcários Mont Charmot (Bacia Potiguar) e Pedra Cariri (Bacia do Araripe).

		Bacia Potiguar			Bacia do Araripe		
		Mont Charmot / Amostras			Pedra Cariri / Amostras		
		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	micrítica	micrítica	micrítica, 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)	Calcilutito	Calcilutito	Calcilutito	Calcilutito laminados	Calcilutito laminados	
	Folk (1959, 1962)	Biopelaparito	Biomicrita	Micrito com bioclastos	Micrita com fósseis	Micrita	

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Índices físicos

Os índices físicos obtidos em conformidade com a norma ABNT NBR 15845 - anexo B (ABNT, 2010b) compreendem a densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Os valores médios para os índices físicos fornecidos pelos calcários (Tabela 2; Figura 5) revelam, que com exceção das densidades das amostras dos calcários Pedra Cariri da Bacia do Araripe, as quais se situam pouco abaixo dos 2.560 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 de acordo com os valores referência da norma ASTM C 568 (ASTM, 2010).

Comparativamente as amostras da Bacia do

Araripe apresentam as menores densidades e consequentemente valores de porosidade e de absorção de água relativamente elevados. 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 microlitos o que induz a planos de descontinuidades físicas responsáveis pela menor compacidade da rocha. No caso das amostras A2, do nível estratigráfico inferior, as menores densidades (média de 2.504 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 interstratos semiabertos com preenchimentos de óxidos e hidróxidos de ferro. A heterogeneidade estrutural das amostras devido à 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 certa perda de coesão entre os planos de microleitos e desenvolvimento de microfissuras abertas e preenchidas por óxidos/hidróxidos de ferro.

Tabela 2. Resultados médios dos índices físicos, com respectivos desvios padrão, para os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri e valores de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010).

	Bacia do Apodi (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C568)
	P1	P1	P3	A1	A2	Alta Densidade
Densidade Aparente (kg/m ³)	2.608 ± 7	2.618 ± 8	2.648 ± 11	2.536 ± 44	2.504 ± 148	≥ 2.560
δ	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	n.e.
Porosidade Aparente (%)	3,4 ± 0,2	2,8 ± 0,1	1,3 ± 0,4	3,0 ± 0,9	5,4 ± 4,3	n.e.
δ	0,1	0,1	0,3	0,3	0,8	n.e.
Absorção de Água (%)	1,3 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,2 ± 0,4	2,3 ± 2,0	≤ 3
δ	0,1	0,1	0,3	0,3	0,9	n.e..

nota: δ - coeficiente de variação; n.e. - não especificado.

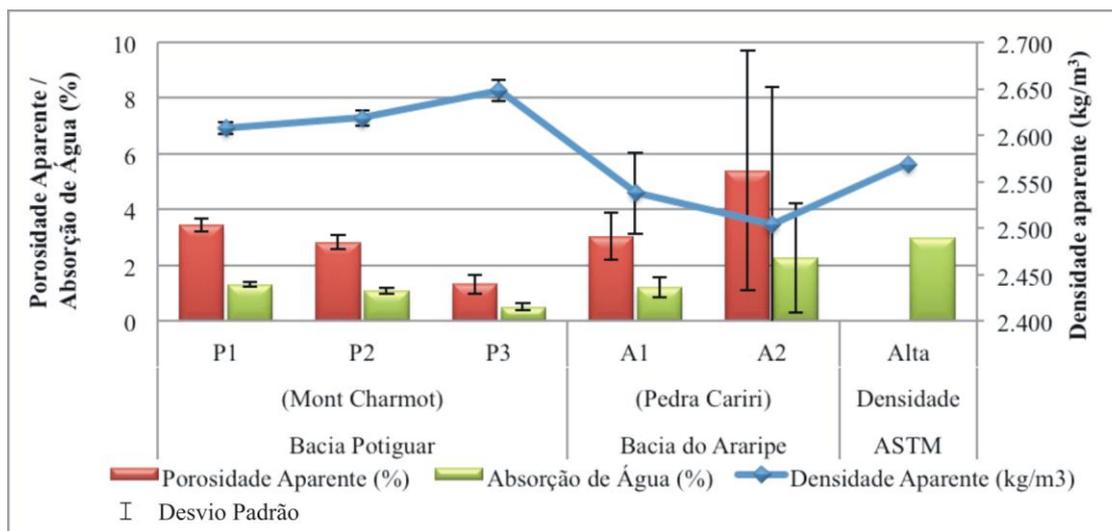


Figura 5. Representação gráfica dos resultados médios dos índices físicos.

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

Entre as amostras (P1, P2 e P3) da Bacia Potiguar (Tabela 2; Figura 5), o nível P1 apresenta a menor densidade 2.608 kg/m³, 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 kg/m³ 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 kg/m³, 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 a 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 devem-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 cm a 2 cm e extensões entre 0,5 a 6 cm, com granulação entre 0,5 mm e 2 mm) que às presentes nos calcários do nível P1, que exibem dimensões milimétricas a poucos centímetros (lentes com largura entre 0,5 mm a 3 mm e comprimento entre 1 cm a 4 cm, predominantemente equigranulares com granulação entre 0,5 cm e 2 cm). Entretanto, destaca-se que apesar das menores porosidade e absorção de água média apresentadas pelo calcário do nível P3, estes 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 à elevada heterogeneidade textural/estrutural do referido calcário devido à

existência de feições de dissolução preenchidas por cristais de calcita e esparsos geodos irregulares com até 2 cm de extensão.

As amostras de calcário do nível P2 apresentam 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.

Desgaste abrasivo Amsler

Os ensaios de abrasão *Amsler* foram realizados em superfícies perpendiculares e paralelas à estratificação (Tabela 3; Figura 6) e executados de acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR 12042 (ABNT, 1992a).

Os resultados dos desgastes abrasivos *Amsler* após o percurso total de 1.000 metros revelam que na média os calcários Mont Charmot da Bacia Potiguar, com valores de desgastes entre 2,03 mm e 2,58 mm, são mais resistentes que os calcários Pedra Cariri da Bacia do Araripe, os quais exibem desgastes entre 2,06 mm e 4,07 mm. A menor resistência abrasiva da Pedra Cariri estaria relacionada à estrutura finamente laminada desses calcários (entre 1 mm 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 3. Resultados médios dos desgastes abrasivos Amsler para os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri após ensaios simulando percurso de 500 m e 1.000 m nas direções perpendiculares e paralelas à estratificação.

		Bacia do Apodi (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		
		Direção	P1	P2	P3	A1	A2
Resistência ao desgaste Abrasivo Amsler (mm)	Ciclo 500 metros	⊥	1,33	1,05	1,07	1,99	1,89
		//	1,26	1,41	1,05	1,29	1,00
	Ciclo 1000 metros	⊥	2,58	2,14	2,10	4,07	3,53
		//	2,48	2,28	2,03	2,73	2,06

nota: ⊥ - aplicação do esforço perpendicular à estratificação; // - aplicação do esforço paralelo à estratificação.

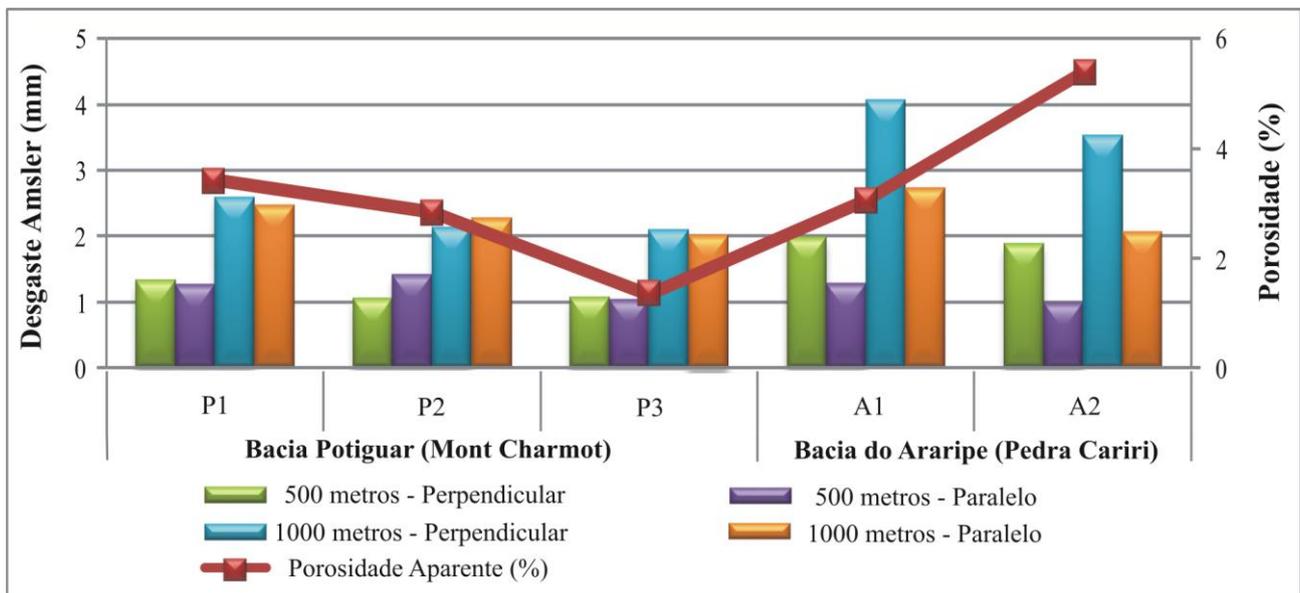


Figura 6. Correlação entre resultados do desgaste abrasivo Amsler (direções perpendiculares e paralelas à estratificação) e da porosidade aparente para as amostras estudadas.

Os resultados apresentados pelos calcários da Bacia Potiguar são bastante similares entre si, sendo que o do nível P1 se desgasta mais (2,58 mm para a superfície perpendicular à estratificação e 2,48 mm para a paralela à estratificação) e do nível P3 menos (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 mm 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), 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 cm 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 paralelas (Figura 6), 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, estaria relacionada ao cerrado sistema de superfícies planares da laminação que sob ação do atrito favorecem a liberação de micropartículas minerais com consequente aceleração no processo de desagregação da superfície da rocha.

Resistência à compressão uniaxial

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), a qual determina, no caso de rochas anisotrópicas, a utilização de três corpos de prova 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 foi realizada em estufa ventilada a 70 °C por 48 h, 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 devido à existência de fraturas, que levaram ao 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), em condições secas, com secagens dos corpos de prova em estufa ventilada a 70 °C por 48 h, e não a 110 °C conforme indicado pela referida norma.

Os valores médios das resistências à compressão uniaxial (Tabela 4; Figuras 7 e 8) fornecidos 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 7 e 8 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 reflete 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.

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.

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 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, microfósseis não orientados em escala milimétrica 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 4).

Tabela 4. Resultados médios da resistência à compressão uniaxial, com respectivos desvios padrão, para os calcários Mont Charriot e Pedra Cariri e valor de referência da ASTM C 568 (ASTM, 2010).

Condição	Direção	Bacia Potiguar (Mont Charriot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C568)	
			P1	P2	P3	A1	A2	Alta Densidade
Seca n = 3	⊥	σ_c (MPa)	111,31±10	138,57 ±11	98,57 ±9	78,72 ±8	125,89 ±11	≥55
		δ	0,09	0,08	0,07	0,11	0,08	
		Vp (m/s)	6080 ±103	6387 ±63	6659 ±248	4937 ±449	5679 ±206	
	//	σ_c (MPa)	100,37 ±10	119,28 ±10	106,75 ±10	131,97 ±11	178,72 ±13	
		δ	0,10	0,09	0,04	0,09	0,07	
		Vp (m/s)	6086 ±13	6260 ±271	6693 ±285	5770 ±150	6167 ±28	
Saturada n = 3	⊥	σ_c (MPa)	85,28 ±9	111,93 ±10	97,39 ±9	73,91 ±8	n.a.	
		δ	0,11	0,09	0,10	0,12	n.a.	
		Vp (m/s)	6090 ±201	6391 ±70	6684 ±141	5306 ±33	n.a.	
		R	0,77	0,81	0,99	0,94	n.a.	
	//	σ_c (MPa)	104,28 ±10	94,18 ±9	100,66 ±10	104,58 ±10	n.a.	
		δ	0,10	0,10	0,10	0,10	n.a.	
		Vp (m/s)	6188 ±103	6405 ±175	6674 ±101	5998 ±57	n.a.	
Congelamento e Degelo n = 5	⊥	σ_c (MPa)	103,05 ±10	108,94 ±10	89,13 ±9	44,63 ±6	103,93 ±10	
		δ	0,10	0,10	0,11	0,15	0,10	
		Vp (m/s)	5972 ±10	6327 ±55	6447 ±157	4959 ±575	5844 ±150	
		K	0,93	0,79	0,90	0,57	0,83	
	//	σ_c (MPa)	114,02 ±10	118,63 ±10	98,92 ±9	92,99 ±9	117,23 ±10	
		δ	0,09	0,08	0,10	0,10	0,09	
		Vp (m/s)	5933 ±60	6322 ±166	6390 ±202	5698 ±240	6117 ±57	
		K	1,14	0,99	0,93	0,70	0,66	

nota: ⊥ - aplicação do esforço perpendicular a estratificação; // - aplicação do esforço paralelo à estratificação; σ_c (MPa) - resistência à compressão uniaxial; δ - 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 utilizado; n.a. - não avaliado.

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 4; Figuras 7 e 8). Os resultados sob condições secas para a amostra A1 são de $131,97 \pm 11,5$ MPa para aplicação dos esforços no sentido paralelo à estratificação da rocha contra $78,72 \pm$

$8,8$ MPa para esforços normais à estratificação e no caso da amostra A2 de $178,72 \pm 13,3$ MPa para a aplicação dos esforços no sentido paralelo à estratificação da rocha contra $125,89 \pm 11,2$ 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%.

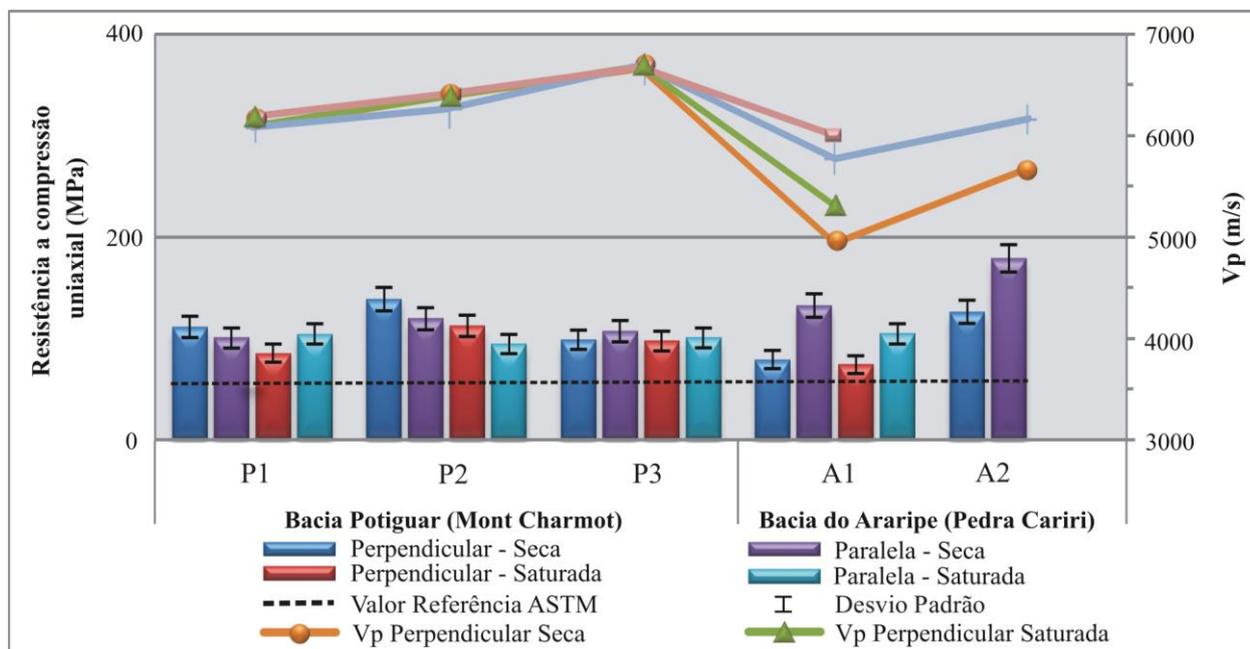


Figura 7. Correlação entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e saturadas em água. Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

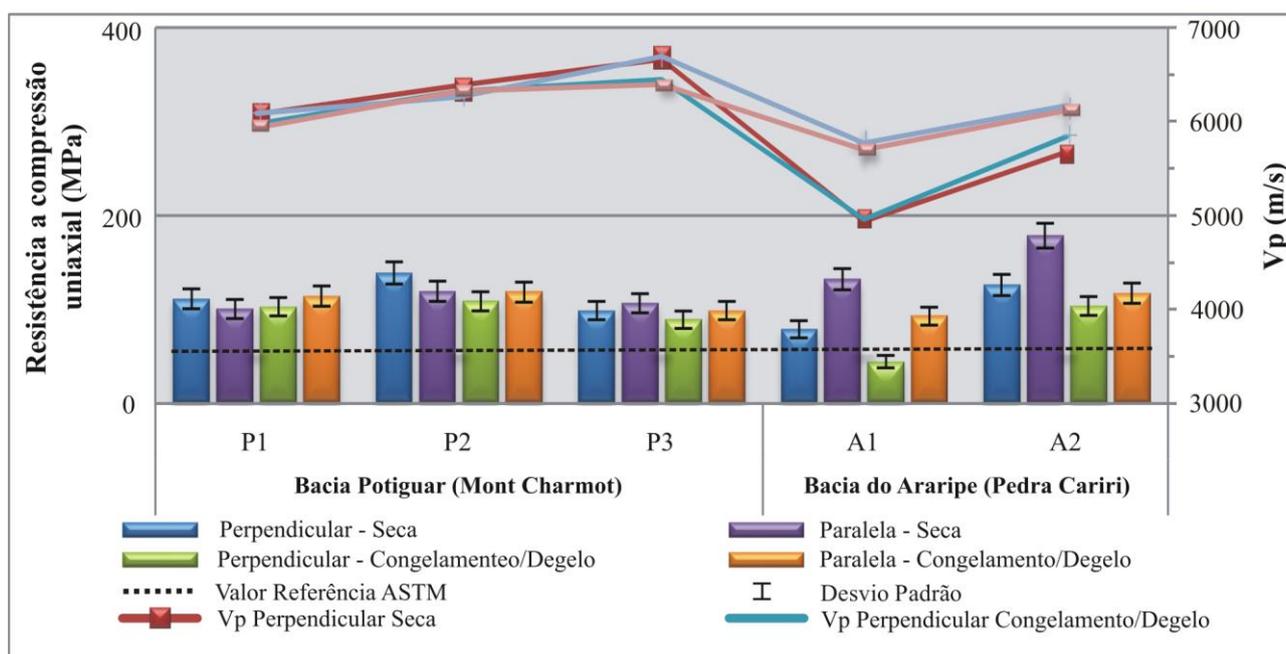


Figura 8. Correlações entre resultados da resistência à compressão uniaxial vs. Vp para os calcários das Bacias Potiguar e do Araripe, com o valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade, em condições secas e após 25 ciclos de congelamento e degelo. Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

Este comportamento apresentado pelos referidos calcários poderia resultar, conforme observado pela fotografia da Figura 9A, pelo efeito da separação (desplacamento) das finas laminações da estratificação ao invés da simples quebra da rocha, 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 de modo a suportar mais carga quando os esforços de compressão são aplicados no sentido paralelo aos planos de estratificação da rocha.

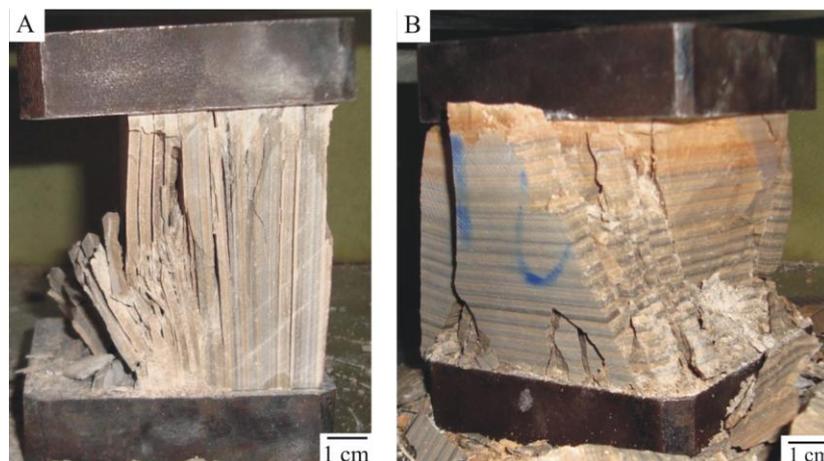


Figura 9. Comportamento de ruptura no ensaio de compressão uniaxial para calcários Pedra Cariri. A - esforços aplicados no sentido paralelo à estratificação; B - esforços aplicados no sentido normal à estratificação.

No geral destaca-se que os valores de resistência à compressão uniaxial fornecidos pelos calcários são maiores na condição seca do que saturada, 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 4; Figura 8). 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 foi maior para os 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 8), 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 4; Figuras 7 e 8) são elevadas, situadas entre 4.937 m/s e 6.693 m/s para corpos de prova em condições secas, sugerindo alto grau de coesão para estas rochas.

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.

Já os calcários da Bacia do Araripe apresentam velocidades das ondas ultrassônicas significativamente maiores no sentido paralelo à estratificação das rochas (Figuras 7 e 8). 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 m/s 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.

Resistência à flexão por carregamento em 3 pontos (Módulo de ruptura)

Os ensaios para a determinação da resistência ao módulo de ruptura foram executados com aplicação dos esforços 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 de acordo com a norma ABNT NBR 12763 (ABNT, 1992d), sendo que os procedimentos de secagem dos corpos de prova foram em estufa à 70 °C por 48 h, e não à 110 °C como recomendado pela referida norma, no intuito de evitar maior fadigamento das rochas.

Os valores médios de resistência à flexão em 3 pontos fornecidos pelos calcários (Tabela 5; Figura 10), 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 5. Valores médios da resistência à flexão por carregamento em 3 pontos (módulo de ruptura) para os calcários Mont Charmot e Pedra Cariri e valor de referência de resistência da ASTM C568 (ASTM, 2010) para calcários de alta densidade.

Condição		Bacia do Apodi (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)		ASTM (C586)
		P1	P2	P3	A1	A2	Alta Densidade
Seca n = 3	σ_c (MPa)	11,12 ±0,6	17,07 ±2,7	11,61 ±1,5	26,01 ±4,9	22,69 ±5,2	≥5,9
	δ	0,06	0,16	0,13	0,19	0,23	
	Vp (m/s)	5669 ±79	5495 ±400	6087 ±61	5600 ±76	5745 ±27	
Saturada n = 3	σ_c (MPa)	11,02 ±1,4	14,77 ±1,1	11,37 ±1,3	19,69 ±8,3	28,55 ±6,6	
	δ	0,13	0,07	0,12	0,42	0,23	
	Vp (m/s)	5573 ±123	5959 ±35	6059 ±59	5721 ±55	5693 ±116	
	R	0,99	0,87	0,98	0,76	1,26	
Congelamento e Degelo	σ_c (MPa)	8,64 ±1,7	14,53 ±3,3	11,31 ±1,7	16,99 ±1,4	18,20 ±4,8	
	δ	0,20	0,23	0,15	0,09	0,27	
	Vp (m/s)	5488 ±110	5587 ±318	5946 ±306	5391 ±250	5794 ±49	
	K	0,78	0,85	0,97	0,65	0,80	
	n	6	5	5	3	3	

nota: σ_f (MPa) - resistência à flexão; δ - coeficiente de variação; Vp - velocidade de propagação de onda ultrassônica; R - coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K - coeficiente de enfraquecimento após gelo e degelo; n - número de corpos de prova utilizado.

Os calcários da Bacia do Araripe mostram resistências consideravelmente superiores às apresentadas pelos calcários da Bacia Potiguar (Figura 10). 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) suporta 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 às 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 heterogênea e irregularmente espaçados na massa micrítica da rocha.

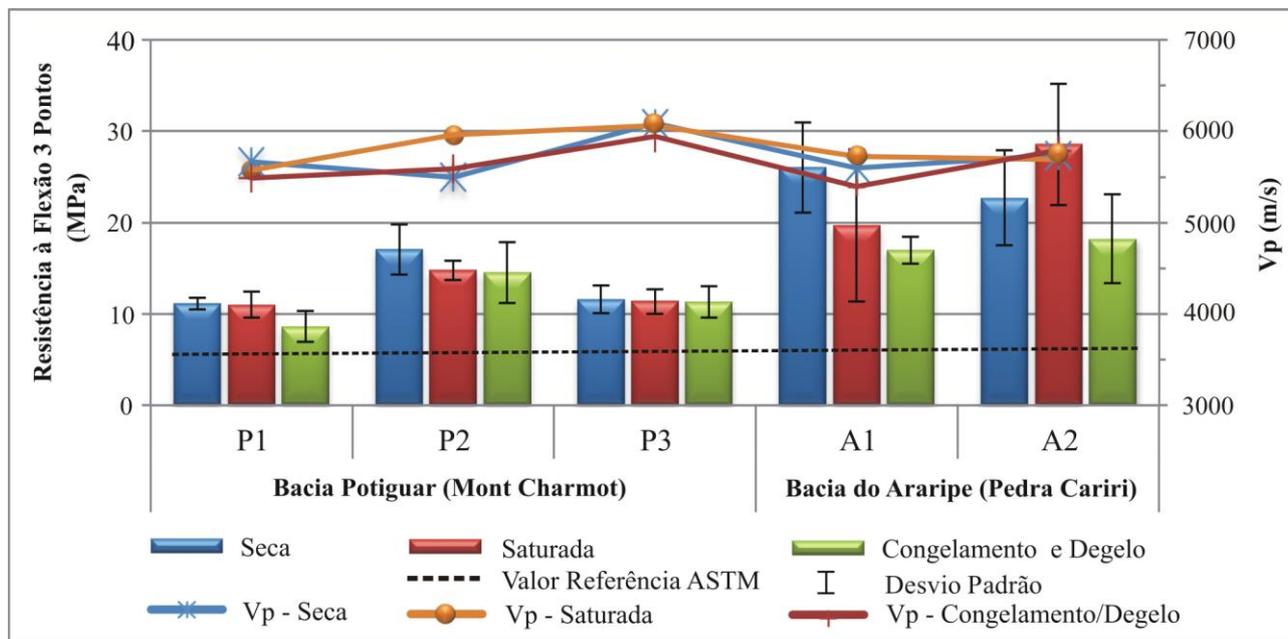


Figura 10. Correlação da resistência à flexão pelo método dos três pontos em condições seca, saturada em água e após ciclos de congelamento/degelo vs. Vp e valor de referência da ASTM C568 (ASTM, 2010). Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

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 5; Figura 10). Esta maior resistência estaria relacionada ao aspecto estrutural mais homogêneo deste calcário que, além de apresentar granulação fina, é praticamente desprovido de *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 (8,64 MPa) e coeficiente de variação relativamente elevado (cerca de 20%), contra uma resistência de 11,3 MPa para o A2 que

exibe 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 e estrutural dada pela maior granulação dentre os calcários estudados e presença de fraturas preenchidas por calcita e feições venulares igualmente calcíticas 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.

As amostras dos calcários do nível A1 apresentam resultados 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.

Com relação à propagação das ondas ultrassônicas, a norma ASTM C 568 (ASTM, 2010) não traz valores referenciais para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Contudo, os valores médios de propagação oferecidas por todos os calcários são elevados, entre 6.087 m/s e 5.391 m/s (Tabela 5; Figura 10), indicando alto grau de coesão e integridade para estas rochas.

Apesar da pequena diferença entre os valores médios de propagação das ondas ultrassônicas apresentadas pelos calcários em condições seca e saturado, 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.

Resistência à flexão por carregamento em 4 pontos

Os ensaios para a determinação da resistência à flexão por carregamento em 4 pontos foram executados com aplicação dos esforços apenas no sentido perpendicular à estratificação das rochas, a qual corresponde à superfície das placas utilizadas nos revestimentos. Os ensaios foram realizados em condições seca e saturada em água de acordo com as diretrizes da norma americana ASTM C880 (ASTM, 2008). Os procedimentos de secagem dos corpos de prova foram em estufa ventilada à 70 °C por 48 h, no intuito de evitar fadigamentos das amostras testadas.

Os resultados fornecidos pelos calcários (Tabela 6; Figura 11) mostram que as amostras da Pedra Cariri (Bacia do Araripe) quando submetidas a carga no sentido normal à laminação são, em geral, mais resistentes à flexão por carregamento em 4 pontos que as amostras dos calcários Mont Charmot (Bacia Potiguar). Este comportamento da Pedra Cariri, como também verificado para a resistência à flexão pelo método 3 pontos, 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, 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 de *vugs* e feições

venulares com cristais de calcita mais desenvolvidos, bastante comuns nos calcários dos níveis P1 e P3.

Tabela 6. Resultados médios da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos para os calcários Mont Charmot da Bacia Potiguar e Pedra Cariri da Bacia do Araripe.

Condição		Bacia Potiguar (Mont Charmot)			Bacia do Araripe (Pedra Cariri)	
		P1	P2	P3	A1	A2
Seca	σ_c (MPa)	9,43 \pm 0,44	14,21 \pm 0,64	8,28 \pm 1,77	13,10 \pm 0,99	20,52 \pm 0,49
	δ	0,05	0,05	0,21	0,02	0,02
	Vp (m/s)	5732	5870	5874	5665	5570
Saturada	σ_c (MPa)	9,30 \pm 0,39	11,87 \pm 0,20	8,41 \pm 1,15	14,40 \pm 0,56	17,88 \pm 1,56
	δ	0,04	0,02	0,14	0,04	0,09
	Vp (m/s)	5718	5825	6037	5592	5675
	R	0,00	0,84	1,02	1,10	0,87

nota: σ_c (MPa) - resistência à flexão; δ - coeficiente de variação; Vp - propagação de onda ultrassônica; R - coeficiente de enfraquecimento hidráulico.

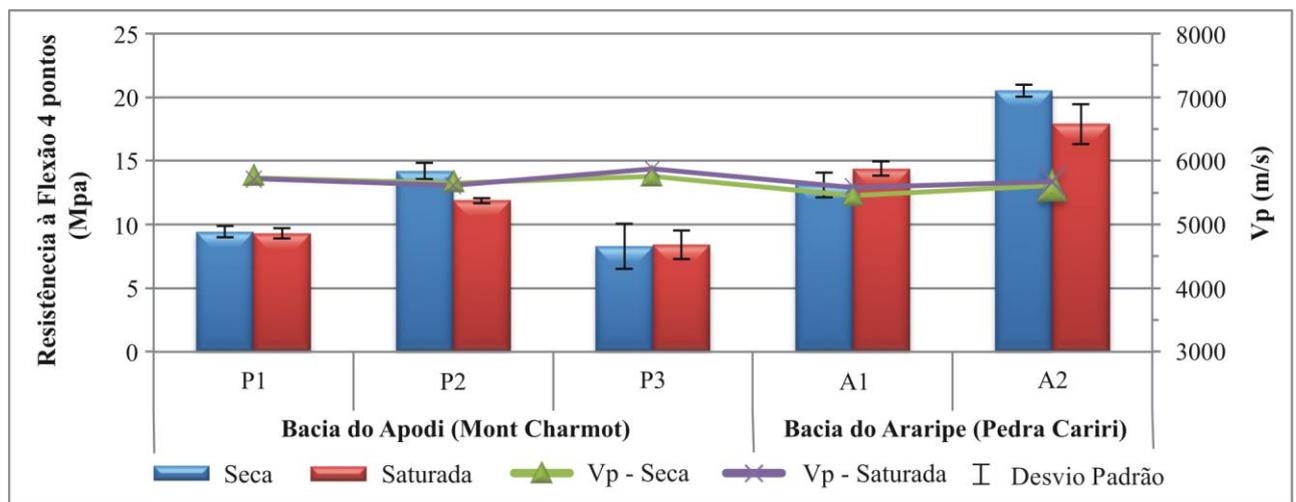


Figura 11. Correlação dos resultados da resistência à flexão por carregamento em 4 Pontos vs. Vp nas condições secas e saturadas para calcários das Bacias Potiguar e do Araripe. Vp - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

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 ensaios.

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 (Figura 11) 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 velocidade de propagação das ondas 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 seca e saturada em água, sendo que

os calcários P1, P2 e A1 apresentam velocidades pouco superiores em condição seca e somente nos casos dos calcários P3 e A2 as velocidades das ondas foram discretamente superiores na condição saturada, o que poderia indicar baixa absorção de água pelos corpos de prova utilizados na determinação da resistência à flexão 4 pontos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os calcários Mont Charmot (Bacia Potiguar) e Pedra Cariri (Bacia do Araripe) apresentam resultados das propriedades físicas e 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) apresentou em relação à Pedra Cariri (Bacia do Araripe) maiores densidades e conseqüentemente as menores porosidades e absorções de água, resultados estes diretamente ligados às características petrográficas dos calcários estudados. Esta relação também é observada no ensaio de desgaste abrasivo, onde a menor porosidade do calcário Mont Charmot influenciou no menor desgaste em relação à Pedra Cariri.

Nos ensaios de compressão uniaxial, flexão pelos métodos 3 e 4 pontos conclui-se que as resistências mecânicas apresentadas pelo conjunto dos calcários Mont Charmot, no geral inferiores aos do conjunto de calcários Pedra Cariri da Bacia do Araripe, refletem as maiores proporções de planos de fraturas e *vugs* preenchidos por cristais de calcita exibidos pelo primeiro conjunto. Já a maior resistência do nível P2, dentre os níveis dos calcários Mont

Charmot, reflete a aparente ausência de planos de descontinuidades planares.

Nos calcários Pedra Cariri não foi observada relação entre as estruturas de microfalhas e a redução da resistência, sendo observada maior resistência quando aplicada força no sentido paralelo às camadas da estratificação.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos-mecânicos qualificam os cinco níveis de calcários como detentores de boa qualidade para utilização como rochas ornamentais e para revestimento, cujos parâmetros tecnológicos fornecidos pelas referidas rochas são, no geral, superiores ou próximos aos valores limítrofes estabelecidos para equivalentes calcários de alta densidade conforme a norma ASTM C568 (ASTM, 2010). Contudo, destaca-se que correspondem a rochas não recomendáveis para utilização em pisos de ambientes de alto tráfego devido à baixa resistência à abrasão, bem como em ambientes costumeiramente úmidos (pias, banheiros) e em fachadas sujeitas a solicitações de atmosferas agressivas (Clemente et al., 2013). São apropriados para uso como obras de artes, revestimento de interiores, pisos em locais de baixa circulação, bancadas, mesas, dentre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro, através do processo n^o 142944/2009-2 (Bolsa de Formação de Pesquisador Doutorado), que tornou possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. **NBR 12042**. Rio de Janeiro, 3 p., 1992a, 3 p.
2. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento:

determinação da resistência à compressão uniaxial. **NBR 12767**. Rio de Janeiro, 1992b, 2 p.

3. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento: ensaio de congelamento e degelo conjugado à verificação da resistência à compressão. **NBR 12769**. Rio de Janeiro, 1992c, 2 p.

4. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento: determinação da resistência à flexão. **NBR 12763**. Rio de Janeiro, 1992d, 3 p.
5. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento (normativo): análise petrográfica. **NBR 15845 - anexo A**. Rio de Janeiro, 2010a, p. 3-5.
6. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para Revestimento (normativo): densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. **NBR 15845 - anexo B**. Rio de Janeiro, 2010b, p. 6-8.
7. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento (normativo): resistência ao congelamento e degelo. **NBR 15845 - anexo D**. Rio de Janeiro, 2010c, p. 13-15.
8. ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2013**. Informe 01/2014. Disponível em: www.abirrochas.com.br. Acesso em: 10/09/2014. 2014a.
9. ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **APEX E ABIROCHAS: uma parceria de sucesso**. Informe 02/2014. Disponível em: www.abirrochas.com.br. Acesso em: 10/09/2014. 2014b.
10. AMARAL FILHO, J. do & CAMPOS, K.C. Arranjo produtivo de pedras ornamentais nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri - CE. **Relatório técnico FINEP/REDESIST**: Fortaleza - Ceará, 56 p. 2006.
11. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. **D 2845**. West Conshohocken, 2008, 3 p.
12. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Flexural strength of natural building stone. **C 880**. West Conshohocken, 2009, 3 p.
13. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Limestone Dimension Stone. Standard **C568**. West Conshohocken, 2010.
14. BESSA, M. de F. **Rochas ornamentais do Nordeste do Ceará (Brasil). Propriedades tecnológicas, alteração e alterabilidade dos granitos Vermelho Filomena, Meruoca Clássico e Verde Ceará**. Lisboa, 2004. 274 p. Tese (Doutoramento) - Instituto Superior Técnico. Lisboa.
15. BEURLIN, K. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais Acad. Bras. Ciências**. Rio de Janeiro. v. 43(supl), p. 411-415, 1971.
16. CHIODI FILHO, C. & RODRIGUES, E. P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos: Projeto Bula. ABIRROCAS - Associação Brasileira de Rochas Ornamentais**, São Paulo. 119 p. 2009.
17. CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 54, p. 207-250, 1970.
18. FOLK, R. L. Practical petrographic classification of limestones. **American Association Petroleum Geology Bulletin**, v. 43, p.1-38, 1959.
19. FOLK, R.L. Spectral subdivision of limestone types. In: Ham, W. E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*. Tulsa, **American Association Petroleum Geologists Memoir**, v. 1, p. 62-84, 1962.
20. GOMES, I.P. **A importância das fraturas no desenvolvimento de feições cársticas em calcários da formação Jandaíra (cretáceo da Bacia Potiguar), Felipe Guerra - RN**. Fortaleza, 2008. 165 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará.
21. GRABAU, A. W. **Principles of Stratigraphy**. New York: Dover Publications, in two volumes. 1185 p. Reprinted from 1924 edition, 1960.
22. HOLZ, M. & SIMÕES, M.G. **Elementos fundamentais de tafonomia**. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS. 231 p., 2002.
23. IDEMA. INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE. **Anuário Estatístico do Rio Grande do Norte - Reservas minerais**, 2013. Disponível em: <http://www.idema.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=1357&ACT=null&PAGE=0&PARM=null&LBL=Socioecon%C3%B4micos>. Acesso em 25 de janeiro de 2016.
24. 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 ENGINEERING, 1, 1970, Paris. **Anais...** Paris: Int. Soc. Géologie of Eng, 1970, v. 1, p. 456-464.
25. CLEMENTE, I. M.; ARTUR, A. C.; NOGUEIRA NETO. Análise de imagens na avaliação do ataque químico em rochas carbonáticas das bacias Potiguar e do Araripe. **Estudos Geológicos**, v. 23, n. 2, p. 29-44, 2013.
26. 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.
27. NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: CONGRESSO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2., Punta del Este. **Actas...** Montevideu: Sociedad Uruguaya de Geologia; Facultad de Ciências, 1998, p. 103-107.
28. NEUMANN, V. H. M. L. **Estratigrafia, sedimentologia, geoquímica y diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Nordeste de Brasil)**. Barcelona, 1999. 244 p. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de Barcelona.
29. 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.
30. SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. Fácies carbonáticas laminadas da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe: litofácies, microfácies e microestruturas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6, E SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCICO DE AMÉRICA DEL SUR, 3, 2002, São Pedro-SP. **Boletim** - São Pedro: Realização UNESP - Rio Claro, 2002, p. 37-41.

Manuscrito recebido em: 11 de Fevereiro de 2014

Revisado e Aceito em: 15 de Maio de 2016