



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

JONI GASPAR MARQUES

**CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA, FÍSICO-
MECÂNICA E DE ALTERABILIDADE DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS
BACIAS LUSITANIANA (PORTUGAL) E POTIGUAR (RN – BRASIL)**

FORTALEZA

2018

JONI GASPAR MARQUES

CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA, FÍSICO-
MECÂNICA E DE ALTERABILIDADE DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS BACIAS
LUSITANIANA (PORTUGAL) E POTIGUAR (RN – BRASIL)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Irani Clezar Mattos
Coorientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M1c Marques, Joni.
Caracterização e comparação macro e microscópica, físico-mecânica e de alterabilidade de calcários ornamentais das bacias Lusitaniana (Portugal) e Potiguar (RN – Brasil) / Joni Marques. – 2018.
219 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2018.
Orientação: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos.
Coorientação: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.
1. Crema Paraná. 2. Filstone Blue. 3. Filstone Beije MF. 4. Rocha Ornamental. 5. Caracterização Tecnológica e Alterabilidade. I. Título.

CDD 551

JONI GASPAR MARQUES

CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA, FÍSICO-
MECÂNICA E DE ALTERABILIDADE DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS DAS BACIAS
LUSITANIANA (PORTUGAL) E POTIGUAR (RN – BRASIL)

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Geologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Doutor em Geologia.
Área de concentração: Geodinâmica e
Recursos Minerais.

Aprovado em: 21 / 12 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Irani Clezar Mattos (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Joaquim António dos Reis Silva Simão
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL)

Dr. Leonardo Luiz Lyrio da Silveira
Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM-NRES)

Dedico à minha família e a todos os profissionais e amigos que contribuíram.

Em especial: aos meus pais, João Marques e M^a Fernanda Marques.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) por permitirem todas as condições para a realização da presente investigação.

À orientadora professora Dr^a. Irani Clezar Mattos e ao coorientador professor Dr. José de Araújo Nogueira Neto por todo o acompanhamento durante o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas atribuídas ao abrigo dos Programas Demanda Social e Pesquisador Visitante Exterior.

Às empresas Filstone Natural, Granos Granitos S/A e Mineração Apodi pela cedência dos calcários e por todo o suporte ao longo da pesquisa.

Ao Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM - NRES), incluindo todos os seus funcionários desde os diretores aos estagiários, pela permissão do estudo físico-mecânico deste trabalho, suporte, simpatia e amizade ao longo da jornada com esta instituição.

Ao laboratório de análises LAREQUIMTE do Departamento de Química e em especial ao Departamento Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) pelo grande contributo do estudo de alterabilidade, suporte, companheirismo e amizade durante o período como Pesquisador Visitante Exterior.

Ao Centro de Recursos Naturais e Ambiente do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (CERENA-IST-UL), através do Programa de Pesquisador Visitante Exterior, pelas discussões e contribuições da pesquisa aqui apresentada.

Ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES) e ao Laboratório de Instrumentação Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pela recepção e colaboração na pesquisa do meio poroso dos calcários e pelas amizades.

À Central Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC) pela realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e à Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) pela realização do ensaio de Coeficiente de dilatação térmica.

Ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (UA) por ser a base de todo o meu percurso académico, pelo auxílio na confecção das lâminas delgadas para o estudo petrográfico e por todo o suporte, contribuições e amizade que vêm a demonstrar constantemente.

Aos professores Dr. Daniel Rodrigues Do Nascimento Junior, César Ulisses Vieira Veríssimo, Francisco Nepomuceno Filho, Joaquim António dos Reis Silva Simão e ao Dr.

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira pela participação e contribuições durante as bancas examinadoras da qualificação e da defesa da tese de doutorado.

Um grande obrigado a toda a minha FAMÍLIA, em especial aos meus pais, por me permitirem esta oportunidade e por toda a força, compreensão, carinho e apoio que me foram dando. Sem vocês não teria conseguido chegar onde cheguei.

Agradecer também à família Bombeiros Voluntários de Fátima pela compreensão, ensinamentos, apoio e amizades.

Não poderia deixar de dar uma palavra de apreço a todos os meus amigos, desde os amigos de infância aos amigos que fui fazendo ao longo da vida, quer durante a caminhada geológica quer durante os momentos de descontração, tanto em Portugal como no Brasil, pelo apoio, discussões, compreensão, ajuda, partilha e AMIZADE.

Não menosprezando nem mencionando ninguém, as pessoas que de fato contribuíram, de uma forma ou de outra, para a pessoa que sou hoje e para chegar onde cheguei sabem quem são.

A todos vocês, um **MUITO OBRIGADO!!!**

“Lutar pelos sonhos, perseverança nos objetivos, empenho no trabalho, conquistar o triunfo, transmitir uma lição de vida.”

(Joni G. Marques)

RESUMO

Brasil e Portugal se encontram entre os dez maiores produtores mundiais de rocha ornamental. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue pertencem ao Membro Pé da Pedreira da Bacia Lusitaniana (Portugal), enquanto que o Crema Paraná pertence à Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte). Esta pesquisa objetiva uma caracterização e comparação das características macro e microscópicas, físico-mecânicas, atrito superficial, meio poroso e alterabilidade das três rochas carbonáticas supracitadas com vista a avaliar a sua melhor aplicação. Para o efeito foram realizados os seguintes ensaios: determinação de índices físicos, resistência à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura, à flexão em quatro pontos e ao congelamento e degelo, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, impacto de corpo duro e coeficiente de dilatação térmica, ao abrigo das normas da ABNT, ASTM e de métodos experimentais do autor; desgaste de amsler, microdureza *knoop*, escorregamento e rugosidade, ao abrigo das normas da ABNT, CEN e de métodos experimentais do autor; porosidade e permeabilidade a gás, porosidade por intrusão de mercúrio, tomografia computadorizada, velocidade de ondas ultrassônicas e microscopia eletrônica de varredura, seguindo as próprias metodologias laboratoriais e a norma ISO; resistência ao ataque químico, resistência ao manchamento, extrator de Soxhlet, nevoeiro salino e cristalização de sais, seguindo as normas da ABNT, da CEN e métodos experimentais do autor. Realizaram-se análises macro e microscópicas de três calcários para se comparar com os resultados dos ensaios, em especial: composição, quantidade e tamanho de grãos, compactação e porosidade. Estas análises estão concordantes com os ensaios realizados e os resultados destes ensaios, em geral, satisfazem os valores esperados. Conclui-se que o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento estrutural e de revestimento (interiores e/ou exteriores), enquanto que os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue deverão ser impermeabilizados e/ou resinados, principalmente em lugares úmidos e com formação de gelo. Os três calcários poderão ser aplicados como revestimento em pavimentos que estejam sujeitos à queda de objetos, sendo que as placas do Crema Paraná deverão ter uma espessura superior a convencional (3 cm), e sujeitos a muito tráfego, evitando lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas. As três variedades carbonáticas podem ser aplicadas em ambientes com grandes amplitudes térmicas, mas os calcários Filstone só devem ser aplicados em ambientes secos e/ou interiores e sem a formação de gelo, especialmente o Filstone Blue. Em geral, o Crema Paraná é o calcário menos poroso e menos susceptível a ser deformado, contrariamente ao Filstone Beije MF. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue têm as

maiores alterações de cor e brilho por serem os mais porosos e de maiores granulações. A aplicação do calcário Filstone Blue deve ser evitada em ambientes salinos ou com ácidos fortes (HCl, HNO₃ e sulfato de sódio), assim como a do calcário Filstone Beije MF em ambientes úmidos ou com o ácido forte H₂SO₄. Deverá recorrer-se à impermeabilização para evitar reações causadoras de mudança de cor, perda de brilho e de massa, gerando patologias e perda da função estética.

Palavras-chave: Crema Paraná. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Rocha Ornamental. Caracterização Tecnológica e Alterabilidade.

ABSTRACT

Brazil and Portugal are among the ten largest producers of ornamental rock in the world. Filstone Beije limestones MF and Filstone Blue belong to the Member of Pedreira da Pedreira of the Lusitaniana Basin (Portugal), while the Paraná Crema belongs to the Jandaíra Formation of the Potiguar Basin (Rio Grande do Norte). This research aims at characterizing and comparing the macro and microscopic characteristics, physico-mechanical, surface friction, porous medium and alterability of the three above-mentioned carbonate rocks in order to evaluate its better application. For this purpose, the following tests were performed: determination of physical indices, resistance to uniaxial compression, modulus of rupture, flexion at four points and freezing and thawing, ultrasonic wave propagation velocity, hard body impact and coefficient of expansion under the ABNT, ASTM and experimental methods of the author; wear of amsler, knoop microhardness, slip and roughness, under ABNT, CEN and experimental methods of the author; porosity and gas permeability, porosity by mercury intrusion, computed tomography, ultrasonic wave velocity and scanning electron microscopy, following the own laboratory methodologies and the ISO standard; chemical resistance, staining resistance, Soxhlet extractor, salt fog and salt crystallization, following the ABNT, CEN norms and experimental methods of the author. Macro and microscopic analyzes of three limestones were carried out to compare with the results of the tests, in particular: composition, quantity and grain size, compaction and porosity. These analyzes are in agreement with the tests performed and the results of these tests, in general, satisfy the expected values. It is concluded that Paraná Cream can be applied as a structural and coating element (interior and / or exterior), while Filstone Beije MF and Filstone Blue limescale should be waterproofed and / or resins, mainly in wet and ice. The three limestones can be applied as a coating to floors that are subject to falling objects, and the plates of the Parana Cream should have a thickness greater than conventional (3 cm), and subject to heavy traffic, avoiding humid places and with high rates rainfall. The three carbonate varieties can be applied in environments with large thermal amplitudes, but Filstone limestones should only be applied in dry and / or indoor environments and without the formation of ice, especially Filstone Blue. In general, the Parana Cream is the less porous limestone and less likely to be deformed, contrary to Filstone Beije MF. Filstone Beije MF and Filstone Blue limestones have the greatest changes in color and brightness because they are the most porous and of the largest granulations. Application of Filstone Blue limestone should be avoided in saline environments or with strong acids (HCl, HNO₃ and sodium sulfate), as well as Filstone Beije

MF limestone in humid environments or with strong acid H₂SO₄. Waterproofing should be used to avoid reactions causing color change, loss of brightness and mass, generating pathologies and loss of aesthetic function.

Keywords: Paraná Cream. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Dimension Stone. Technological and Alterability Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das saídas de mármore e calcário ornamental desde 2002 até 2017 (DGEG, 2018).....	27
Figura 2 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg <i>et al.</i> (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).....	32
Figura 3 – Coluna estratigráfica do MCE (CARVALHO, 2013).....	33
Figura 4 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS <i>et al.</i> , 1990), com a localização da área (martelos)	36
Figura 5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (ARARIPE; FEIJÓ, 1994 in GOMES, 2008).....	37
Figura 6 – Mapa litoestratigráfico do MCE com a localização dos núcleos extrativos dos calcários ornamentais, retirado de Carvalho <i>et al.</i> (2012).....	40
Figura 7 – (A) Frente de lavra ativa; (B) Frente de lavra com o limite entre os dois níveis; (C) Veio de material orgânico em zona de fraqueza do material Filstone Blue (FONTE: autor).....	42
Figura 8 – Placas de 30 x 30 cm das variedades carbonáticas exploradas na pedreira Filstone Natural (FONTE: Website da Filstone Natural).....	42
Figura 9 – (A) Frente de lavra ativa; (B) Frente de lavra com os limites entre os níveis P1, P2 e P3; (C) Camada de argila com 4 cm de espessura entre os níveis P2 e P3 (FONTE: autor).....	44
Figura 10 – Variedades carbonáticas exploradas na pedreira Mineração Apodi (FONTE: autor)	44
Figura 11 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg <i>et al.</i> (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).....	52
Figura 12 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS <i>et al.</i> , 1990), com a localização da área (martelos)	54
Figura 13 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico	57
Figura 14 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis	

	cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).....	58
Figura 15 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda.....		59
Figura 16 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (<i>grapestone</i>) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados)		61
Figura 17 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.....		62
Figura 18 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente		63
Figura 19 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de		

extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg <i>et al.</i> (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).....	91
Figura 20 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS <i>et al.</i> , 1990), com a localização da área (martelos)	92
Figura 21 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico	95
Figura 22 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo- convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento syntaxial (nicóis cruzados)	96
Figura 23 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda	97
Figura 24 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (<i>grapestone</i>) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento syntaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados)	99
Figura 25 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural	

	não serrada.....	100
Figura 26 –	Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente	101
Figura 27 –	Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg <i>et al.</i> (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).....	118
Figura 28 –	Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS <i>et al.</i> , 1990), com a localização da área (martelos)	120
Figura 29 –	Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico	123
Figura 30 –	Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).....	124
Figura 31 –	Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda.....	126
Figura 32 –	Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis	

	cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (<i>grapestone</i>) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados)	128
Figura 33 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.....		129
Figura 34 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente		130
Figura 35 – Imagens 3D dos plugues em que foram detectadas porosidades por tomografia computadorizada.....		139
Figura 36 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de amostras do Crema Paraná (AP) e do Filstone Blue (AF), mostrando alguns aspetos particulares e dando ênfase ao diâmetro de poro		143
Figura 37 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de amostras do Filstone Beije MF (BF), mostrando alguns aspetos particulares e dando ênfase ao diâmetro de poro.....		144
Figura 38 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg <i>et al.</i> (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).....		153
Figura 39 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS <i>et al.</i> , 1990), com a localização da área (martelos)		155
Figura 40 – Padrão de cor CIELAB (à esquerda o plano a, b e à direita a esfera de cor)..		157
Figura 41 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico		161
Figura 42 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de		

- equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados) 162
- Figura 43 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda 163
- Figura 44 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (*grapestone*) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados) 165
- Figura 45 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada..... 166
- Figura 46 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente 167
- Figura 47 – Imagens do calcário Crema Paraná antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B)

Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5% 172

Figura 48 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B) Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5% 173

Figura 49 – Imagens do calcário Filstone Blue antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B) Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5% 174

Figura 50 – Imagens do calcário Crema Paraná antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água..... 179

Figura 51 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água..... 180

Figura 52 – Imagens do calcário Filstone Blue antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho

tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água.....	181
Figura 53 – Imagens do calcário Filstone Blue (A), Crema Paraná (B) e Filstone Beije MF (C) antes do ensaio com extrator de Soxhlet (0) e após os ciclos 1, 2, 3 e 4 aos reagentes H ₂ O e HCl	185
Figura 54 – Imagens do calcário Filstone Blue (A), Crema Paraná (B) e Filstone Beije MF (C) antes do ensaio com extrator de Soxhlet (0) e após os ciclos 1, 2, 3 e 4 aos reagentes HNO ₃ e H ₂ SO ₄	186
Figura 55 – Imagens do calcário Filstone Blue (B), Filstone Beije MF (A) e Crema Paraná (C) antes e após o ensaio de nevoeiro salino.....	191
Figura 56 – Imagens do calcário Crema Paraná antes (A) e após (B) o ensaio	193
Figura 57 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes (A), após o primeiro ciclo (B) e após o segundo ciclo (C)	194
Figura 58 – Imagens do calcário Filstone Blue antes (A) e após (B) o ensaio	195

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Representação gráfica dos resultados médios dos índices físicos.....	67
Gráfico 2	– Correlações entre os valores médios da resistência à compressão uniaxial nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade	71
Gráfico 3	– Correlações entre os valores médios da resistência ao módulo de ruptura nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade	74
Gráfico 4	– Correlações entre os valores médios da resistência à flexão em 4 pontos nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade	77
Gráfico 5	– Representação gráfica da relação entre os valores médios da resistência ao impacto de corpo duro com a quantidade de cimento.....	79
Gráfico 6	– Representação gráfica da relação entre os valores médios do coeficiente de dilatação térmica com a porosidade aparente.....	81
Gráfico 7	– Representação gráfica da relação entre os valores médios do desgaste por abrasão Amsler com a porosidade aparente	105
Gráfico 8	– Representação gráfica da relação entre os valores médios da microdureza <i>Knoop</i> acumulada com a resistência ao desgaste por abrasão Amsler.....	107
Gráfico 9	– Representação gráfica da relação entre os valores médios da resistência ao escorregamento com a rugosidade da superfície.....	109
Gráfico 10	– Intrusão incremental versus diâmetro do poro (A, C e E) e da intrusão incremental versus a pressão (B, D e F) para os plugues do Crema Paraná (AP1 – A e B; AP2 – C e D) e do Filstone Beije MF (BF1 – E e F), pelo método de intrusão por mercúrio.....	135
Gráfico 11	– Intrusão incremental versus diâmetro do poro (A, C e E) e da intrusão	

incremental versus a pressão (B, D e F) para os plugues do Filstone Beije MF (BF2 – A e B) e do Filstone Blue (AF1 – C e D; AF2 – E e F), pelo método de intrusão por mercúrio	136
Gráfico 12 – Representação gráfica da relação entre os valores médios das porosidades com a permeabilidade	140
Gráfico 13 – Representação gráfica da relação entre os valores da velocidade de ondas ultrassônicas e os módulos calculados para os três calcários	142
Gráfico 14 – Representação gráfica da porcentagem de massa perdida acumulada de cada calcário entre os ciclos para cada um dos quatro reagentes utilizados no ensaio com extrator de Soxhlet.....	184
Gráfico 15 – Representação gráfica da quantidade acumulada de elementos químicos presentes entre os ciclos para os reagentes H ₂ O e HCl, nos três calcários ..	188
Gráfico 16 – Representação gráfica da quantidade acumulada de elementos químicos presentes entre os ciclos para os reagentes HNO ₃ e H ₂ SO ₄ , nos três calcários	189
Gráfico 17 – Representação gráfica do peso inicial e final dos três calcários	195

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.....	64
Tabela 2	– Valores médios dos índices físicos para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010)	66
Tabela 3	– Valores médios da resistência à compressão uniaxial para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010).....	69
Tabela 4	– Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os três calcários em estudo.....	71
Tabela 5	– Valores médios da resistência ao módulo de ruptura para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010).....	72
Tabela 6	– Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência ao módulo de ruptura os três calcários em estudo	74
Tabela 7	– Valores médios da resistência à flexão em 4 pontos para os três calcários	75
Tabela 8	– Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à flexão em 4 pontos dos três calcários em estudo	76
Tabela 9	– Valores médios da resistência ao impacto de corpo duro seguindo a norma ABNT e seguindo um método experimental do autor para os três calcários em estudo.....	78
Tabela 10	– Valores médios do coeficiente de dilatação térmica dos três calcários	80
Tabela 11	– Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.....	102
Tabela 12	– Valores médios do desgaste por abrasão Amsler dos três calcários	104
Tabela 13	– Valores médios da microdureza Knoop e valores acumulados dos três calcários.....	106
Tabela 14	– Valores médios da resistência ao escorregamento e da rugosidade superficial dos três calcários em estudo	18
Tabela 15	– Categorias de resistência ao escorregamento. Fonte: UKSRG (2000) & DIN EN ISO 4288 (1996)	109
Tabela 16	– Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.....	131
Tabela 17	– Valores médios da massa, volume de grãos, volume de poros, densidade de grãos, porosidade e da permeabilidade a gás dos três calcários em estudo ...	133

Tabela 18 – Valores médios do volume de intrusão, área total de poros, diâmetro de poro e da porosidade por intrusão de mercúrio dos três calcários em estudo	134
Tabela 19 – Valores médios da porosidade por tomografia computadorizada para plugues com diâmetros de 2,54 cm e de 0,6 cm dos três calcários em estudo	137
Tabela 20 – Valores médios das propriedades elásticas dos três calcários em estudo.....	141
Tabela 21 – Classificação dos poros segundo a IUPAC (GREGG & SING, 1982, adaptado)	144
Tabela 22 – Critérios para classificação da intensidade da variação total de cor (ΔE) e para determinação da resistência ao ataque.....	158
Tabela 23 – Classificação dos efeitos das variações das cores nos eixos L, a e b	158
Tabela 24 – Intervalos de ΔE para a percepção humana, seguindo a norma DIN EN ISO 11664-4 (2012). Extraído de Silva, 2016.....	159
Tabela 25 – Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.....	168
Tabela 26 – Valores da resistência ao ataque químico dos três calcários em estudo	171
Tabela 27 – Valores da resistência ao manchamento dos três calcários em estudo	177
Tabela 28 – Valores do brilho dos três calcários, para a resistência ao manchamento	178
Tabela 29 – Valores da porcentagem de massa perdida acumulada dos três calcários no ensaio com extrator de Soxhlet	183
Tabela 30 – Valores acumulados das análises químicas por absorção atômica dos três calcários, para o ensaio com extrator de Soxhlet, com valores resultantes de diluição a cinza	187
Tabela 31 – Valores da massa inicial e final dos três calcários em estudo	190
Tabela 32 – Valores da massa inicial e final dos três calcários em estudo	192
Tabela 33 – Síntese das principais aplicações para os três calcários em estudo.....	210

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
Ex	Exemplo
MPa	Megapascal
Máx	Máximo
Mín	Mínimo
VS	Versus
Min	Minutos
n.e.	Não Especificado
<i>Et al.</i>	E outros
CEP	Código de Endereçamento Postal
PIB	Produto Interno Bruto
EUA	Estados Unidos da América
RN	Rio Grande do Norte
CE	Ceará
UK	Reino Unido
MF	Médio Fino
GO	Goiás
ES	Espirito Santo
BR	Rodovia Federal
MOI	Margem Ocidental Ibérica
BL	Bacia Lusitaniana
MCE	Maciço Calcário Estremenho
BP	Bacia Potiguar
PNSAC	Parque Natural da Serra de Aire e Candeeiros
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais

BS	Normalização Britânica
EN	Normalização Europeia
ISO	Organização Internacional de Normalização
DIN	Instituto de Normalização Alemão
CEN	Comité Europeu de Normalização
CIELAB	Comissão Internacional de Iluminação
ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior
PROASNE	Projeto Água Subterrânea do Nordeste do Brasil
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
UKSRG	Grupo de Resistência ao Escorregamento do Reino Unido
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
PMI	Materiais porosos incorporados
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFG	Universidade Federal de Goiás
CETEM-NRES	Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional-Espírito Santo
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UA	Universidade de Aveiro
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
IST-UL	Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa
CERENA	Centro de Recursos Naturais e Ambiente
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
V _p	Velocidades de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais
MIP	Porosidade por Intrusão de Mercúrio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
RGB	Vermelho, Verde e Azul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Considerações Iniciais	26
1.2	Objetivos	28
2	ESTADO DA ARTE	30
2.1	Enquadramento Geográfico e Geológico	30
2.1.1	<i>Bacia Lusitaniana (BL)</i>	31
2.1.2	<i>Bacia Potiguar (BP)</i>	36
2.2	Núcleos de Extração	39
2.2.1	<i>Membro Pé da Pedreira</i>	39
2.2.2	<i>Formação Jandaíra</i>	43
2.3	Materiais e Métodos	45
3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)	48
3.1	Introdução	50
3.2	Contexto Geográfico e Geológico	51
3.3	Materiais e Métodos	54
3.4	Resultados e Discussão	56
3.4.1	<i>Aspetos Macro e Microscópicos</i>	56
3.4.2	<i>Aspetos Físico-Mecânicos</i>	65
3.5	Conclusões	82
4	AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO SUPERFICIAL DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)	87
4.1	Introdução	89
4.2	Contexto Geográfico e Geológico	90
4.3	Materiais e Métodos	93
4.4	Resultados e Discussão	94
4.4.1	<i>Aspetos Macro e Microscópicos</i>	94
4.4.2	<i>Aspetos de Atrito Superficial</i>	103
4.5	Conclusões	110
5	AVALIAÇÃO DO MEIO POROSO DOS CALCÁRIOS: CREMA	

	PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)	115
5.1	Introdução	117
5.2	Contexto Geográfico e Geológico	117
5.3	Materiais e Métodos	121
5.4	Resultados e Discussão	123
5.4.1	<i>Aspetos Macro e Microscópicos</i>	123
5.4.2	<i>Aspetos do Meio Poroso</i>	131
5.5	Conclusões	145
6	CARACTERIZAÇÃO DA ALTERABILIDADE DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)	149
6.1	Introdução	152
6.2	Contexto Geográfico e Geológico	152
6.3	Materiais e Métodos	156
6.4	Resultados e Discussão	160
6.4.1	<i>Aspetos Macro e Microscópicos</i>	160
6.4.2	<i>Aspetos de Alterabilidade</i>	169
6.5	Conclusões	196
7	PERSPECTIVAS FUTURAS DO TRABALHO	201
8	CONCLUSÕES	204
	REFERÊNCIAS	211

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A “pedra” é utilizada pelo Homem desde o período pré-histórico Neolítico, cerca de 10.000 anos a.C., tanto na construção como na ornamentação. Ao longo de toda a história o seu uso tem vindo a ser desenvolvido tecnologicamente pelas sociedades emergentes. Vários são os exemplos: Gregos e Romanos na construção de arcos e cúpulas; Egípcios na edificação de pirâmides; Idade Média com a construção de palácios e catedrais; com a revolução industrial, inciou-se o melhoramento das técnicas/tecnologias existentes, o que permitiu mecanizar os processos extrativos e de beneficiamento, facilitando a sua exploração e aumentando o seu rendimento.

O termo rocha ornamental tem sido associado à pedra com funções decorativas, tendo perdido as funções estruturais para outros materiais como tijolo, concreto e cimento. Por isso, têm surgido termos análogos tais como Pedras Dimensionais e Pedras Naturais. O primeiro termo provém de *dimension stones*, termo inicial atribuído por Bowles & Coons (1933) e por Bowles (1939), distinguindo as rochas utilizadas como materiais de construção e agregados. O segundo termo surgiu de uma associação mais recente com países de origem latina, com o intuito de destacar o fato de se tratar de um “produto natural” com valor estético, sendo mais utilizado atualmente no setor empresarial (CARVALHO, 2013).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define rocha ornamental como material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária. Já o termo rocha para revestimento é definido como rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimentos de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas (ABNT NBR 15012:2013).

A distinção comercial de rochas ornamentais é feita entre mármore e calcários, granitos e outras: xistos, quartzitos, arenitos e conglomerados (CARVALHO *et al.*, 2011).

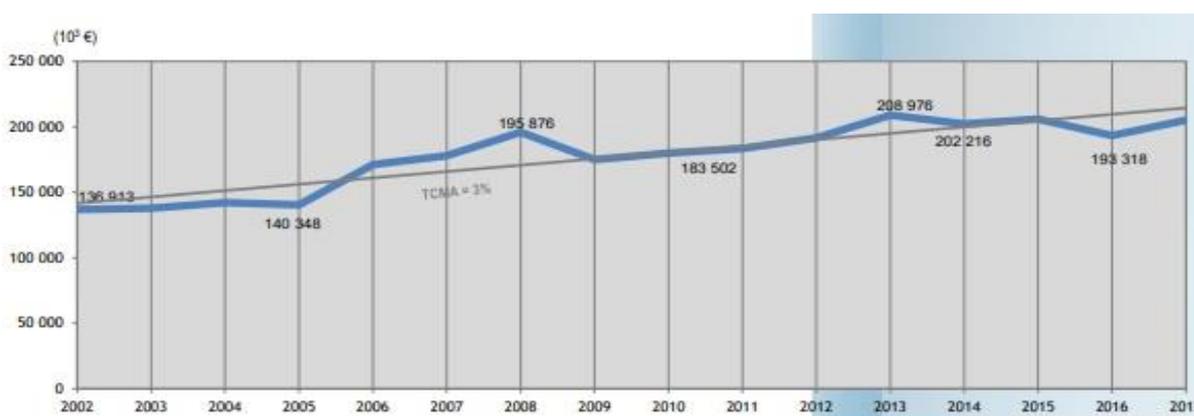
Brasil e Portugal, juntamente com países como Itália, Turquia, China, Índia, Espanha, França e Grécia são os principais produtores de rocha ornamental. Estes países são dotados de rochas ornamentais de excelentes qualidades naturais que são aplicadas em vários edifícios e obras arquitetônicas por todo o mundo. Segundo Montani (2015), a extração internacional de rochas nos últimos 20 anos quase quadruplicou e mostra um crescimento de 14% por ano com uma tendência duradoura.

No Brasil tem havido uma procura crescente de rochas ornamentais

(nomeadamente de granitos), tanto a nível interno como externo, nas últimas décadas. Para além da atividade extrativa, também se expandiu a capacidade de produção do setor de beneficiamento, com a instalação de novos teares e o país começou a penetrar de forma cada vez mais agressiva no competitivo mercado de produtos processados. Segundo a ABIROCHAS (2018), em 2017 o Brasil era o quarto maior produtor de rocha ornamental do mundo (9,240 milhões de toneladas, sendo 6,0 milhões para o mercado interno). Exportou 2,36 milhões de rochas ornamentais (71,6 mil para mármore e similares) para 117 países em 2017, sendo EUA, China e Itália os principais e estando os estados do Rio Grande do Norte e do Ceará na quinta e terceira posições, respectivamente, como maiores exportadores do Brasil (ABIROCHAS, 2018).

A subida de Portugal ao 7º país na lista mundial dos principais produtores de rocha ornamental tem contribuído para o crescimento do PIB português (CARVALHO, 2012). Para o setor da rocha ornamental, em Portugal existem cerca de 2000 empresas repartidas pela extração, transformação e produção de máquinas e equipamentos; 18000 postos de trabalho; 60% da produção se destina à exportação e contribui com 1,5% do total das exportações nacionais, sendo o mármore extraído no Alentejo, o material mais importante para este setor (CARVALHO, 2012). Em Portugal (DGEG, 2018), a produção de rochas ornamentais em 2016 foi de 2,8 milhões de toneladas (cerca de 834 mil toneladas de calcários e mármore, das quais 714 mil toneladas foram exportadas), correspondendo a um valor de 167 milhões de Euros (cerca de 93 mil Euros para calcários e mármore). Segundo a DGEG (2018), a exportação de calcário e mármore tem uma tendência de crescimento de 3%, perfazendo o valor de 205 milhões de Euros em 2017, tendo como principais países de exportação, por ordem crescente: China, França, Arábia Saudita, E.U.A., Reino Unido e Espanha (Figura 1).

Figura 1 – Evolução das saídas de mármore e calcário ornamental desde 2002 até 2017 (DGEG, 2018).



O grau de aceitação de uma dada rocha ornamental depende da arte de trabalhar a pedra, natureza geológica, características físico-mecânicas, aparência estética, composição química e mineralógica, fatores tecnológicos e económicos (CHATTERJEE, 2009). A procura de rochas ornamentais é influenciada por aspetos ligados à sua aplicação e tradição, onde se valoriza a não repetição das cores, formas ou dimensões. Segundo Carvalho *et al.* (2008) e Carvalho (2011), a seleção de maciços rochosos para a produção de blocos para o setor de rochas ornamentais depende, essencialmente, do dimensionamento (tamanho e disposição espacial da massa rochosa), da homogeneidade litológica, da fraturação, da raridade, da cor e das tendências da moda.

Com o exponencial crescimento demográfico e a sofisticação do design arquitetónico surge a necessidade de aumentar e melhorar as técnicas e equipamentos de produção e extração de rochas ornamentais, se traduzindo num aumento da produtividade e da competitividade e na diminuição de custos inerentes.

No entanto, a inadequada aplicação e manutenção de rochas ornamentais, as variações ambientais, a ação antrópica e a falta de conhecimento das características das rochas podem levar a adversidades que alteram as suas propriedades, tornando-se crucial efetuar estudos técnicos para prevenção e manutenção da sua estética decorativa.

Assim, o presente estudo teve por objetivo a caracterização macro e microscópica, físico-mecânica e de alterabilidade de três calcários utilizados no mercado de rochas ornamentais (dois de Portugal e um do Brasil); comparar e correlacionar os resultados entre si e avaliar se satisfazem os vários requisitos necessários para a sua aplicação no setor e quais as suas melhores opções de aplicação como rocha ornamental.

1.2 Objetivos

Como a comercialização destes recursos naturais deve ter uma análise criteriosa das suas propriedades tecnológicas e de alterabilidade, o objetivo principal desta investigação é indicar as melhores opções de aplicação como rocha ornamental, de dois calcários da região de Fátima (Portugal) e um da região de Felipe Guerra (RN – Brasil). Assim, se estipularam os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar aspetos macro e microscópicos que ajudem a indicar a melhor aplicação para cada litotipo;
2. Caracterizar físico-mecanicamente as amostras coletadas e comparar com os dados macro e microscópicos;
3. Analisar o atrito superficial dos calcários em estudo e comparar com os dados

macro e microscópicos;

4. Efetuar análises do meio poroso e comparar com os dados macro e microscópicos dos calcários;

5. Analisar a resistência das amostras a vários ensaios de alterabilidade comparando com os dados macro e microscópicos;

6. Definir as potencialidades de cada um dos calcários estudados para exploração como rochas ornamentais.

2 ESTADO DA ARTE

Neste item é feita uma síntese sobre temas gerais do trabalho como o enquadramento geográfico e geológico, os núcleos de extração de onde foram retirados os materiais para a presente investigação e os materiais e métodos utilizados.

2.1 Enquadramento Geográfico e Geológico

Para a presente investigação foram selecionadas duas áreas onde são exploradas rochas carbonáticas para fins ornamentais.

Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue foram coletados na pedreira Casal Farto nº3 com o número de cadastro 6762, pertencente à mineradora Filstone Natural. Está situada no bordo nordeste do Parque Natural da Serra de Aire e Candeeiros, na localidade Casal Farto, aproximadamente a 15 Km para SSW da sede municipal de Ourém, distrito de Santarém, Portugal (Figura 2). Partindo de Lisboa o acesso é feito pela Auto-Estrada A1 sentido sul-norte até à saída de Fátima. Segue pela avenida Papa João XXIII em direção à rotatória sul, onde entra na primeira saída e segue durante 2,5 Km pela estrada nacional N360 até outra rotatória. Nessa rotatória entra-se na segunda saída para a N357 por mais 4,5 Km até chegar à pedreira da Filstone Natural. A área está inserida na folha da Carta Geológica de Portugal de Vila Nova de Ourém (27-A), numa escala de 1:50.000.

O calcário Crema Paraná foi coletado na Mineração Apodi, no processo DNPM nº 848.081/2007, próximo da localidade Miraselva. Situa-se a cerca de 15 km para oeste da sede municipal de Felipe Guerra, no Estado Rio Grande do Norte (RN), microrregião da Chapada do Apodi, mesorregião Oeste Potiguar, região Nordeste do Brasil (Figura 4). Partindo da cidade de Fortaleza o acesso é feito pela Rodovia Federal BR-116 durante 115 Km até ao entroncamento com a BR-304, a partir daí são mais 140 Km até à cidade de Mossoró, pela BR-405 por mais 65 Km até à localidade de Miraselva. Nessa localidade segue-se por uma estrada carroçável por mais 5 Km para noroeste até se chegar à pedreira da Mineração Apodi. Está inserida na folha topográfica de Apodi (SB.24-X-C-VI), numa escala de 1:100.000.

Num contexto geológico, as duas rochas calcárias de Portugal pertencem à Bacia Lusitaniana, dentro do Maciço Calcário Estremenho e inseridas no Planalto de São Mamede, mais concretamente na continuidade deste planalto para a Serra d'Aire, na Formação de Santo António e Candeeiros, Membro de Pé da Pedreira (Figura 2). A variedade do Brasil (Rio Grande do Norte) está inserida na Formação Jandaíra do Grupo Apodi, pertencente à Bacia Potiguar (Figura 4).

2.1.1 *Bacia Lusitaniana (BL)*

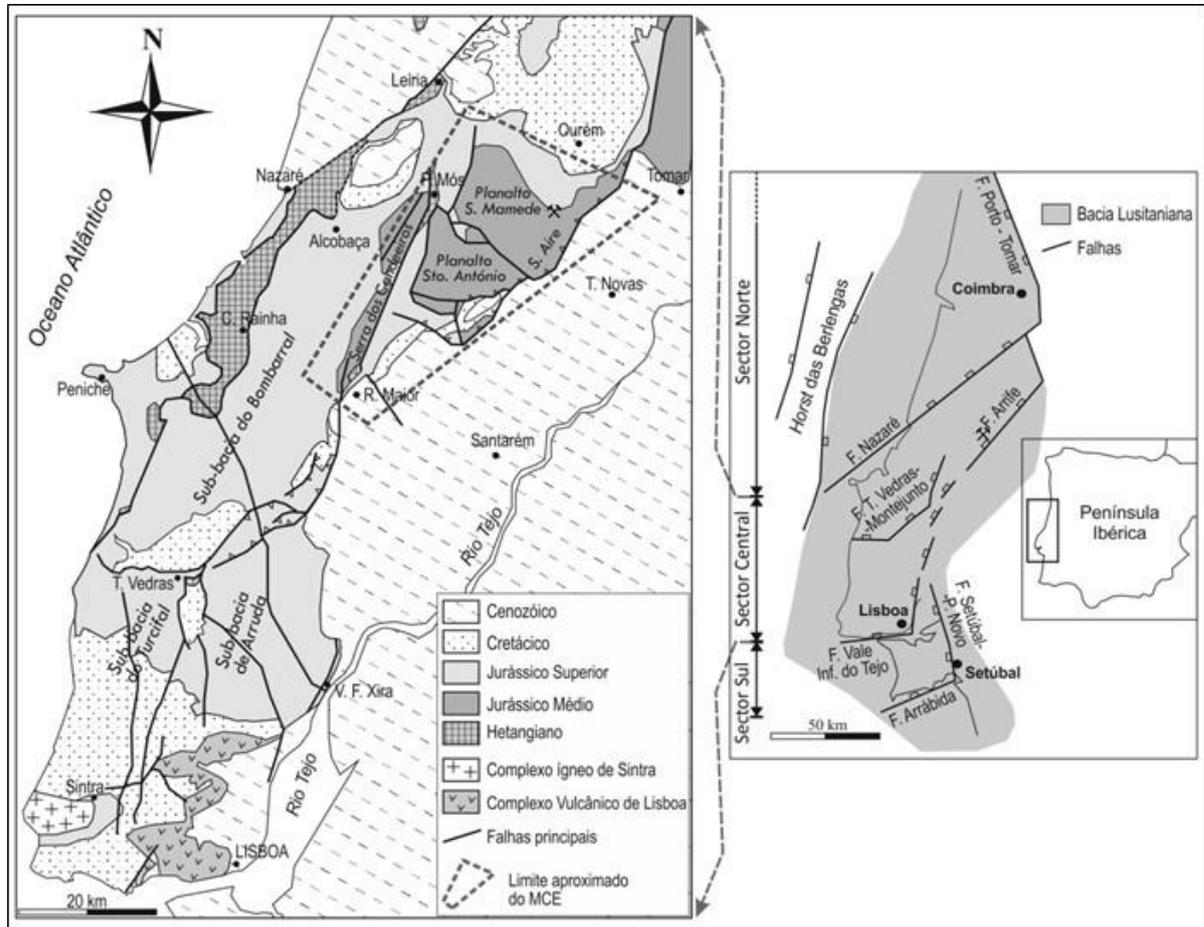
Esta bacia sedimentar estende-se por uma faixa alongada de direção NNE-SSW, com cerca de 250-330 Km de comprimento e 100-150 Km de largura (AZERÊDO, 1993). Consiste numa bacia intracratônica localizada no bordo oeste da microplaca Ibérica, com uma área em torno de 20.000 km² na parte central da Margem Ocidental Ibérica (MOI). Apenas cerca de 2/3 da bacia aflora na área continental emersa, a restante área está imersa na plataforma continental.

Ribeiro *et al.* (1979) e Wilson (1988), defendem que a Bacia Lusitaniana corresponde a um *graben* alongado numa direção NNE-SSW onde se depositaram sedimentos Mesozóicos com uma espessura máxima de 5000 metros na zona central, enquanto que nas regiões laterais não excede os 500-1000 metros, chegando a zero nos limites não tectonizados da bacia com o soco. Segundo Kullberg (2000) e Kullberg *et al.* (2006), possui como limite ocidental a falha do bordo este do *horst* das Berlengas e oriental o sistema de falhas escalonadas Porto–Tomar, Arrife-Vale Inferior do Tejo e Setúbal–Pinhal Novo.

Rocha & Soares (1984), Ribeiro *et al.* (1996), consideram a existência de grandes sequências sedimentares limitadas por descontinuidades, com direções preferenciais NE-SW e E-W, que refletem as sucessivas etapas evolutivas da bacia (Figura 2). Estas sequências são: Meridional (ou Sul) limitada a norte pela falha do Arrife-Torres Vedras-Montejunto e a sul pela falha da Arrábida, Central limitada pela falha da Nazaré a norte e pela falha do Arrife-Torres Vedras-Montejunto a sul, e Setentrional (ou Norte) limitada pela falha de Aveiro a norte e a falha da Nazaré a sul.

A origem da Bacia Lusitaniana está diretamente ligada aos episódios distensivos que atuaram durante o Mesozóico (Triássico Superior – Cretáceo Superior) na fragmentação da Pangeia, mais especificamente na abertura do Oceano Atlântico Norte (WILSON *et al.*, 1996). São constituídas, essencialmente, por rochas carbonáticas (Jurássico) e siliciclásticas (Cretáceo). Desde o final do Cretáceo até à atualidade tem vindo a dar-se, na BL, um período compressivo caracterizado por rochas siliciclásticas. Este período deveu-se à colisão da Microplaca Ibérica com as Placas Africana e Euroasiática, conduzindo à inversão da BL e, conseqüentemente, à exposição subaérea do pacote de rochas carbonáticas do Jurássico (KULLBERG *et al.*, 2013).

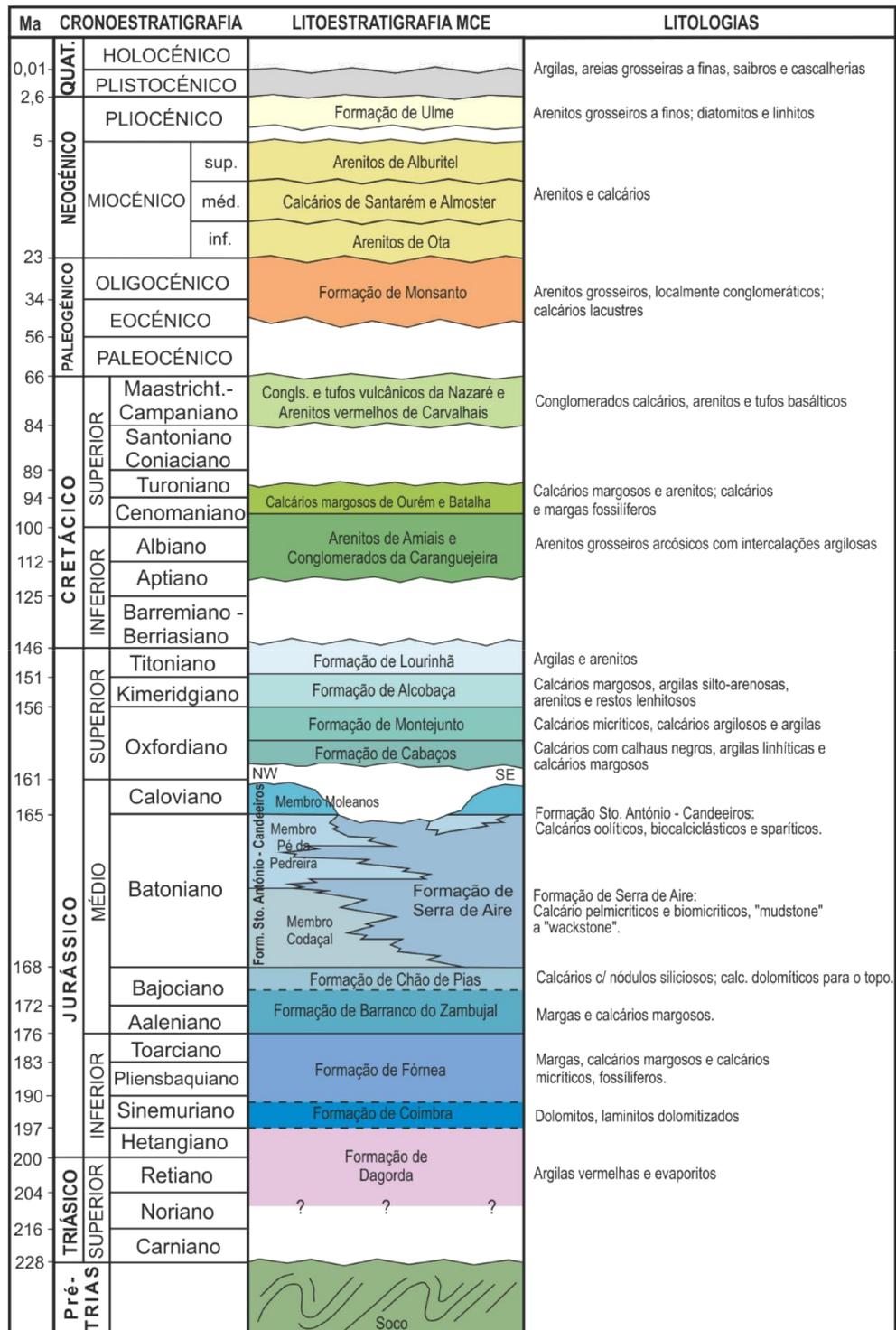
Figura 2 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg *et al.* (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).



Maciço Calcário Estremenho (MCE)

Esforços compressivos reativaram acidentes tectônicos antigos e soergueram uma unidade geomorfológica, alongada de direção NE-SW, denominada de Maciço Calcário Estremenho, delimitada em três direções preferenciais: NNE-SSW, NE-SW e WNW-ESE. Esta estrutura, com cerca de 750 Km², está enquadrada pelas cidades de Ourém, Torres Novas, Rio Maior, Alcobaça e Leiria, no Setor Central da BL e limitada pela Bacia Terciária do Tejo a sudeste, Bacia de Ourém a nordeste e a Bacia de Bombarral-Alcobaça a noroeste. O MCE está compartimentado em três blocos soerguidos constituídos com rochas do Jurássico Médio (Figura 2): Serra do Candeeiros, Planalto de Santo António e Planalto de São Mamede que continua até à Serra d’Aire. Estando separados por depressões com rochas do Jurássico Superior seguindo dois alinhamentos tectônicos principais: Depressão da Mendiga - Depressão de Alqueidão e Depressão de Alvados – Depressão de Minde.

Figura 3 – Coluna estratigráfica do MCE (CARVALHO, 2013).



A sequência litoestratigráfica do MCE (Figura 3) inicia-se no Triássico Superior com a Formação Dagorda formada por rochas margosas e evaporíticas, e os Grés de Silves representados por arenitos vermelhos. Acima das quais ocorre a Formação de Coimbra, datada do Sinemuriano e constituída por dolomitos, dolomitos calcários pouco fossilíferos e calcários interestratificados com níveis centimétricos de margas. O Jurássico Inferior termina com a

Formação da Fórnea e o Jurássico Médio começa com a Formação de Barranco do Zambujal, ambas constituídas por sequências de margas, calcários margosos e calcários micríticos bastante fossilíferos e com bioturbações, atingindo uma espessura total de 220-250 m, em bancos centimétricos. O ambiente de formação é marinho aberto de rampa externa, sendo evidente o aumento da coluna de água e conseqüentemente da componente carbonática pela diminuição das margas da base para o topo. Gradualmente, passa à Formação Chão das Pias (Bajuciano superior) que é composta por calcários argilosos progressivamente mais compactos com fauna de ambiente marinho aberto menos profundo. Esta formação divide-se nos Membros Calcários de Vale da Serra (calcários pouco argilosos e margosos na base, tornando-se mais compactos para o topo, com a ocorrência de nódulos siliciosos, se apresenta em bancadas de espessura reduzida, atingindo uma espessura máxima entre 50 e 60 m) e Dolomitos de Furadouro (intercalações de calcários calciclásticos a dolomitos, bancadas que podem atingir 1,5 m, alcançando uma espessura máxima de 80 m).

Na passagem do Bajociano-Batoniano interdigitam-se fácies de rampa interna representadas pela Formação de Serra de Aire (constituída por dolomitos e calcários micríticos mudstone a wackstone, biocalciclásticos e pelóidicos, bastante fossilíferos, puros e de cores claras, lagunares e perimareais formados nas áreas protegidas ante-barreiras, com bancadas de espessura média de 0,5 m e espessura total na ordem dos 350-400 m). Essas fácies de rampa interna também são representadas por dois dos três Membros da Formação de Santo António-Candeeiros: Codaçal (na base, essencialmente de idade Batoniano Inferior, e com espessuras que atingem os 150 m, composto por calcários bioclásticos e oobioclásticos de cor branca ou creme, esporadicamente dolomitizados) e Pé da Pedreira (descrito em baixo), que consistem de calcários de alta energia, gerados num paleoambiente de ilha-barreira. No Batoniano, a taxa de subida do nível do mar é equilibrada com a taxa de sedimentação na rampa interna, atenuando a progradação e aumentando a agração, que se torna dominante e gerando o máximo desenvolvimento das fácies de alta energia do MCE. Por fim, no Caloviano ocorreu uma variação transgressiva com a intercalação de calcários muito fossilíferos e calcários clásticos, de cor branca ou creme que atingem os 150 m de espessura, devido à retrogradação das fácies de barreira. Estes calcários tipificam o Membro de Moleanos, mais no topo da Formação de Santo António-Candeeiros, contatando, geralmente por falha com a Formação Serra d'Aire e cortado pela desconformidade Jurássico Médio-Jurássico Superior, pela superfície topográfica ou passa em conformidade aparente para a Formação de Cabaços (Figura 3). Este sistema deposicional de rampa carbonática, inclinado de ESW-WNW, é favorecido pela relativa estabilidade tectônica, baixa e homogênea taxa de

subsidência, subida do nível do mar, clima subtropical e topografia suave e uniforme (AZERÊDO, 1993, 1998; WATKINSON, 1989).

A Formação de Santo António-Candeeiros é constituída por uma espessa (>550 m) sucessão de calcários esparíticos *packstone* e *grainstone*, bioclásticos mais ou menos oolíticos, pelóidicos e estratificados, calcários intra/lito/bioclásticos maciços ou gradados, calcários intrapelóidicos, biostromas de coraliários e algas, formando corpos arenosos, ciclotemas subtidais e sedimentos episódicos descontínuos. A cor varia de creme a tons bastante claros, evidenciando o elevado grau de pureza para a porcentagem de óxido de cálcio. As suas bancadas são muitas espessas, chegando a 20 m.

Segundo Carvalho *et al.* (2011), na história evolutiva da BL deram-se importantes episódios magmáticos dispersos pela Bacia, exceto nas Formações da Serra d’Aire e Planalto de São Mamede. Consoante as estruturas podem dividir-se em três grupos: corpos instalados em falhas NW-SE a WNW-ESE (154-93 Ma); corpos associados a estruturas diapíricas (136-103 Ma) e corpos isolados com correspondência a aparelhos vulcânicos (136-140 Ma).

Membro Pé da Pedreira

Os calcários em estudo estão inseridos no MCE, Formação de Santo António-Candeeiros e Membro de Pé da Pedreira (AZERÊDO, 1993, 2007; CARVALHO *et al.*, 2012). Este Membro aflora em três manchas principais: Calcários de Pé da Pedreira (em estudo), Calcários oolíticos de Reguengo do Fetal e Calcários oolíticos de Casal Farto.

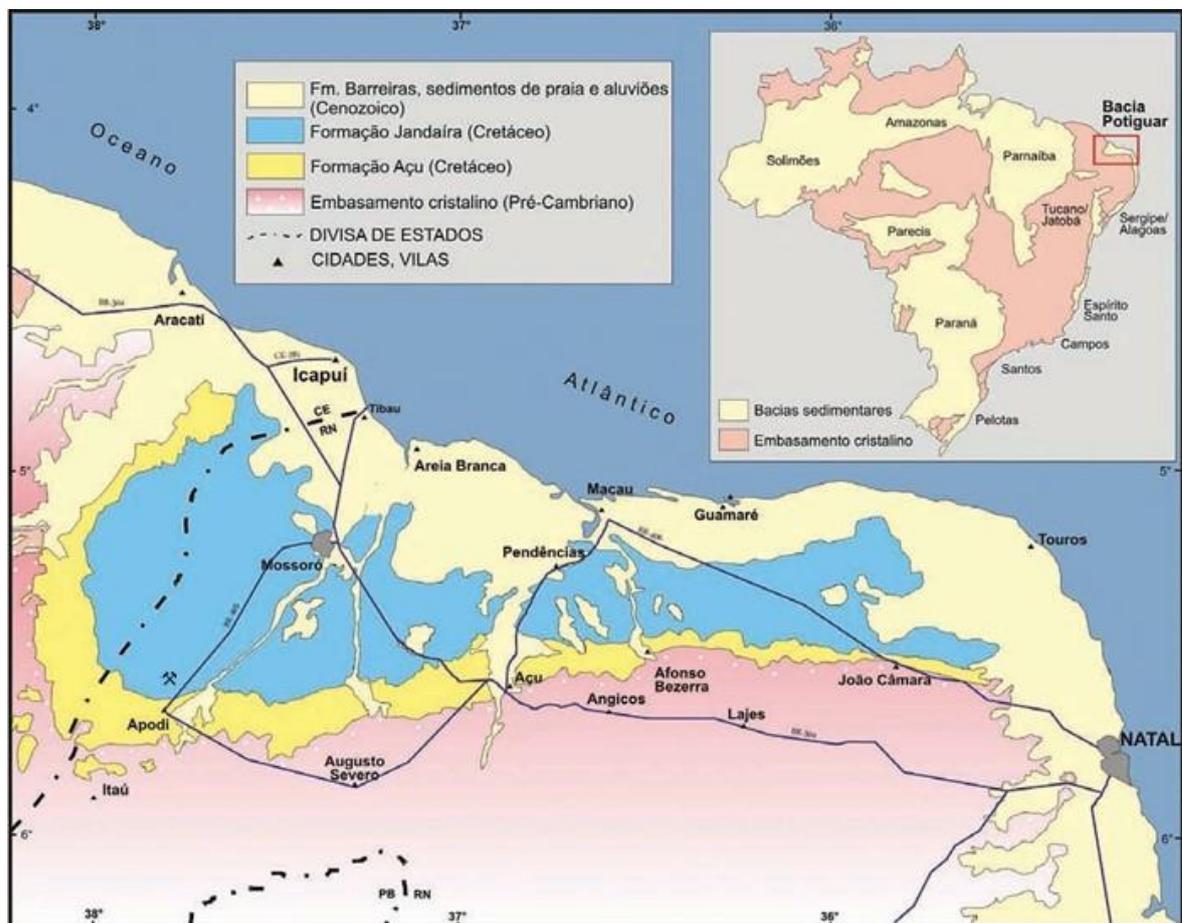
Consiste de uma fácies de rampa interna com calcários de alta energia gerados num paleoambiente de ilha-barreira, com idade Batoniana. Aparece sob a forma de corpos maciços em formato lenticular no seio dos calcários micríticos da Formação de Serra de Aire. Interdigitam-se com os calcários das Formações de Serra de Aire e de Chão de Pias e com os Membros de Cadoçal e de Moleanos da Formação de Santo António-Candeeiros. Os seus níveis superiores encontram-se truncados pelas rochas sobrejacentes. Localmente individualizam-se estratos entre 1 e 2 m, sendo que a espessura do Membro vai desde os 15 aos 150 m.

Composta em calcários calciclásticos, micríticos, oo/bio/intra/pelsparitos “grainstone” a “wackestone” de cor branca, creme e tons de azul. A sua granulação varia de fina a grosseira, muito ricos em bioclastos, correspondendo, por vezes a biostromas descontínuos. Apresentam diversas estratificações e laminações e superfícies de erosão e de reativação. Ocorrem níveis espessos com intensa bioturbação, organizados em ciclotemas subtidais, intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, recristalizações e geodos.

2.1.2 Bacia Potiguar (BP)

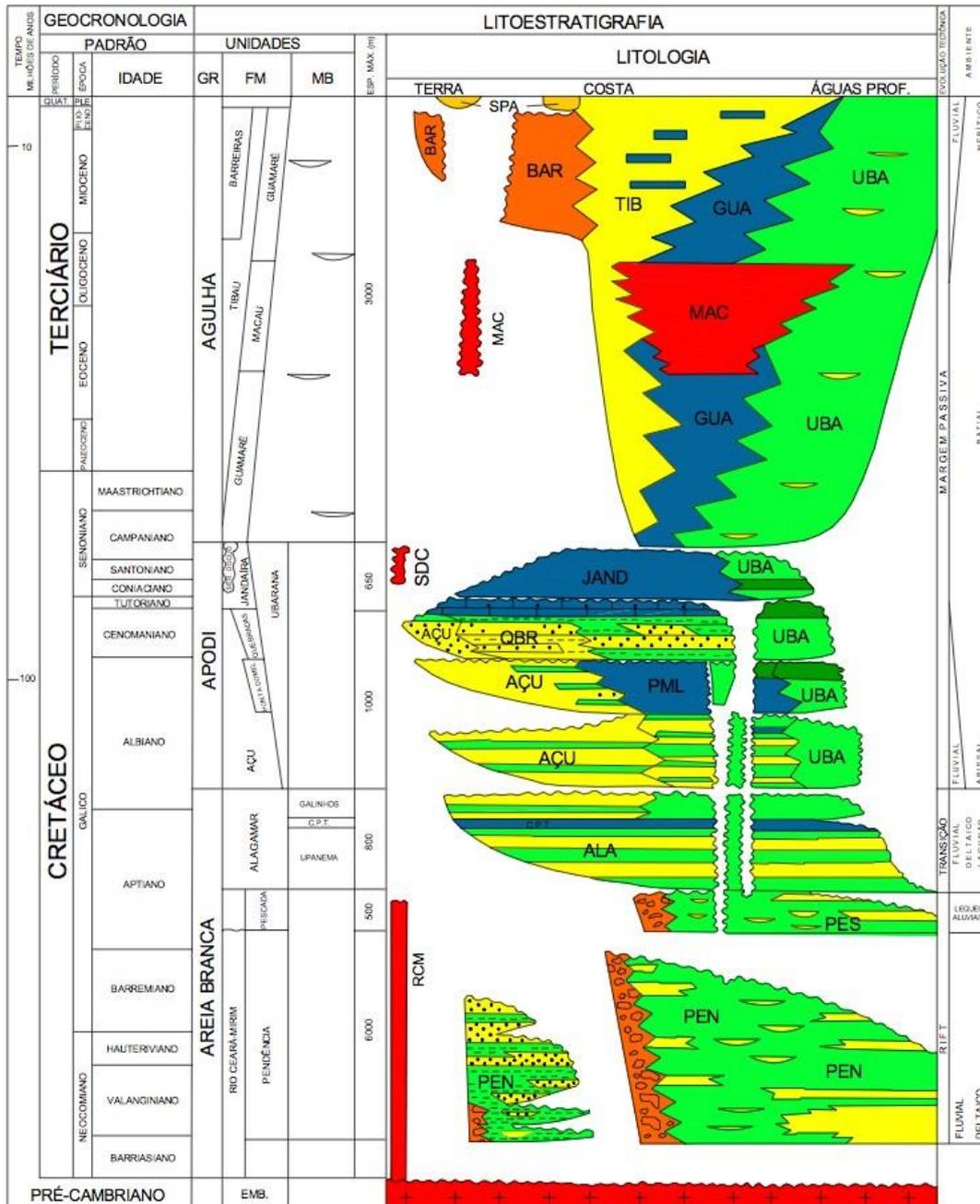
A Bacia Potiguar localiza-se na Província Borborema, descrita por Almeida *et al.* (1977), na interseção da Margem Continental Leste Brasileira com a Margem Continental Equatorial. Ocupa metade da área Setentrional do Rio Grande do Norte, está limitada a norte e a leste com o Oceano Atlântico e a sul e a oeste com o embasamento cristalino. Apresenta uma área total estimada de 60.000 Km², sendo 21.000 Km² emersos (Figura 4).

Figura 4 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS *et al.*, 1990), com a localização da área (martelos).



É uma bacia sedimentar tipo rifte intracontinental, que compõe o sistema de riftes do nordeste brasileiro, na porção emersa e do tipo pull-apart na porção submersa (NEVES, 1987; MATOS, 1992). Françaolin & Szatmari (1987) e Matos (1992) defendem dois modelos evolutivos distintos para a sua formação, contudo, para ambos a sua origem deveu-se à separação do supercontinente Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico. Em termos de idades, o primeiro defende que teve início no Jurássico superior, enquanto que o segundo defende um início no Neocomiano-Eobarremiano.

Figura 5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (ARARIPE; FEIJÓ, 1994 in GOMES, 2008).



Atualmente, a coluna estratigráfica mais utilizada foi elaborada por Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008), que dividiram a BP, da base para o topo, (Figura 5):

1. Grupo Areia Branca – caráter siliciclástico, composto pelas Formações Pendência, Pescada e Alagamar.
2. Grupo Apodi – formado por rochas siliciclásticas e carbonáticas, que aumentam em direção ao topo, é representado pelas Formações Açu, Ponta do Mel, Jandaíra, Quebradas e Ubarana.

3. Grupo Agulha – de composição siliciclástica e carbonática, é formado pelas Formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras.

Na sua história tectônica também fazem parte as Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau que representam três eventos magmáticos.

Segundo Dantas (1998), Françolin & Szatimari (1987) e Hackspacher *et al.*, (1985), defendem que existe um conjunto de falhas paralelas, com características geométricas, estruturais e tectônicas semelhantes, orientadas nas direções NE-SW (Sistema de Falhas Carnaubais) e NW-SE (Sistema de Falhas Afonso Bezerra) que influenciaram toda a dinâmica costeira com reativações tectônicas e provocaram a migração e o armazenamento de óleo na parte rasa da Bacia Potiguar.

Grupo Apodi

A sua formação deveu-se a uma fase pós-rifte, através de uma sequência transgressiva de idade Albiano – Campaniano (107-74 Ma.), formada por uma sedimentação de sistemas fluviais da Formação Açú que em direção ao mar grada lateralmente para as Formações Ponta do Mel e Ubarana. Seguindo-se a implantação da plataforma carbonática, de ambiente marinho profundo, da Formação Jandaíra durante o Turoniano ao Campaniano, que atingiu uma espessura máxima de 650 m.

Está sobreposto ao Grupo Areia Branca e em contato superior, discordante, com o Grupo Agulha. O fim da sedimentação deste Grupo é representado pela discordância erosiva sobre as Formações Jandaíra e Ubarana e pela deposição da sequência marinha regressiva do Grupo Agulha. Esta erosão generalizada deveu-se ao soerguimento regional proveniente do fluxo de calor produzido pela crosta oceânica que se formava na margem equatorial brasileira, reativando várias falhas, dobras e ascensão de magmas (SIAL, 1975; CREMONINI, 1993; CREMONINI & KARNER, 1995).

Formação Jandaíra

Caracteriza-se pela predominância de carbonatos marinhos, de águas quentes, rasas e agitadas, em superfície e subsuperfície de idade Eoturoniana-Eocampaniana (SOARES *et al.*, 2003). Consiste de uma sequência transgressiva carbonática da fase de drifte da evolução da Bacia Potiguar, tendo limite inferior concordante com a Formação Açú ou Quebradas e ocorre localmente interdigitada com a porção inferior da Formação Ubarana (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003).

Na superfície, estas rochas carbonáticas afloram por quase toda a Chapada do

Apodi, numa direção W-E e mergulho suave para NE, estando intensamente erodidas e carstificadas sob a forma de platô. Na zona litorânea encontram-se parcialmente recobertas pelos sedimentos terciários e por aluviões e dunas quaternárias. Em subsuperfície estendem-se à plataforma continental, predominando as fácies de laguna e de planície de maré, compostas por calcarenitos e calcilitos com bioclastos. Com base em perfis de sondagens e dados geofísicos, a sua espessura varia entre 250-300 m, atingindo 600 m como máximo e tendo os extremos leste e oeste as menores espessuras (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982; PROASNE, 2006).

Segundo Cordoba *et al.* (1996), existem cinco fácies deposicionais nos carbonatos da bacia: três atribuídas à sedimentação em barras de maré, uma de planície de maré e outra em laguna, predominando as duas últimas na parte emersa.

Os estratos deste pacote carbonático têm mergulhos suaves e cliniformas sigmoidais típicos de bacias de margem em rampa, dividindo-se em duas seqüências deposicionais: a primeira é formada por *grainstones* bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por *wackestones* e *mudstones* na porção distal; e a segunda caracteriza-se pelo domínio da sedimentação carbonática em toda a bacia (NETO *et al.*, 2007).

Composta por calcários microcristalinos, calcarenitos e calcilitos bioclásticos, com nível evaporítico na base, apresentam uma coloração que varia entre branco, creme e cinza, são finos, compactos, duros, com textura detrítica, possuindo um conteúdo ricamente fossilífero e intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, podendo ter recristalizações e geodos (CASSAB, 2003).

Possui com a Formação Açú um contato inferior transicional, marcado pela entrada do mar na bacia, levando a um acréscimo gradativo do teor de carbonato (VASCONCELOS *et al.*, 1990). Característico desta transição é a intercalação de camadas de folhelhos com os primeiros sedimentos carbonáticos.

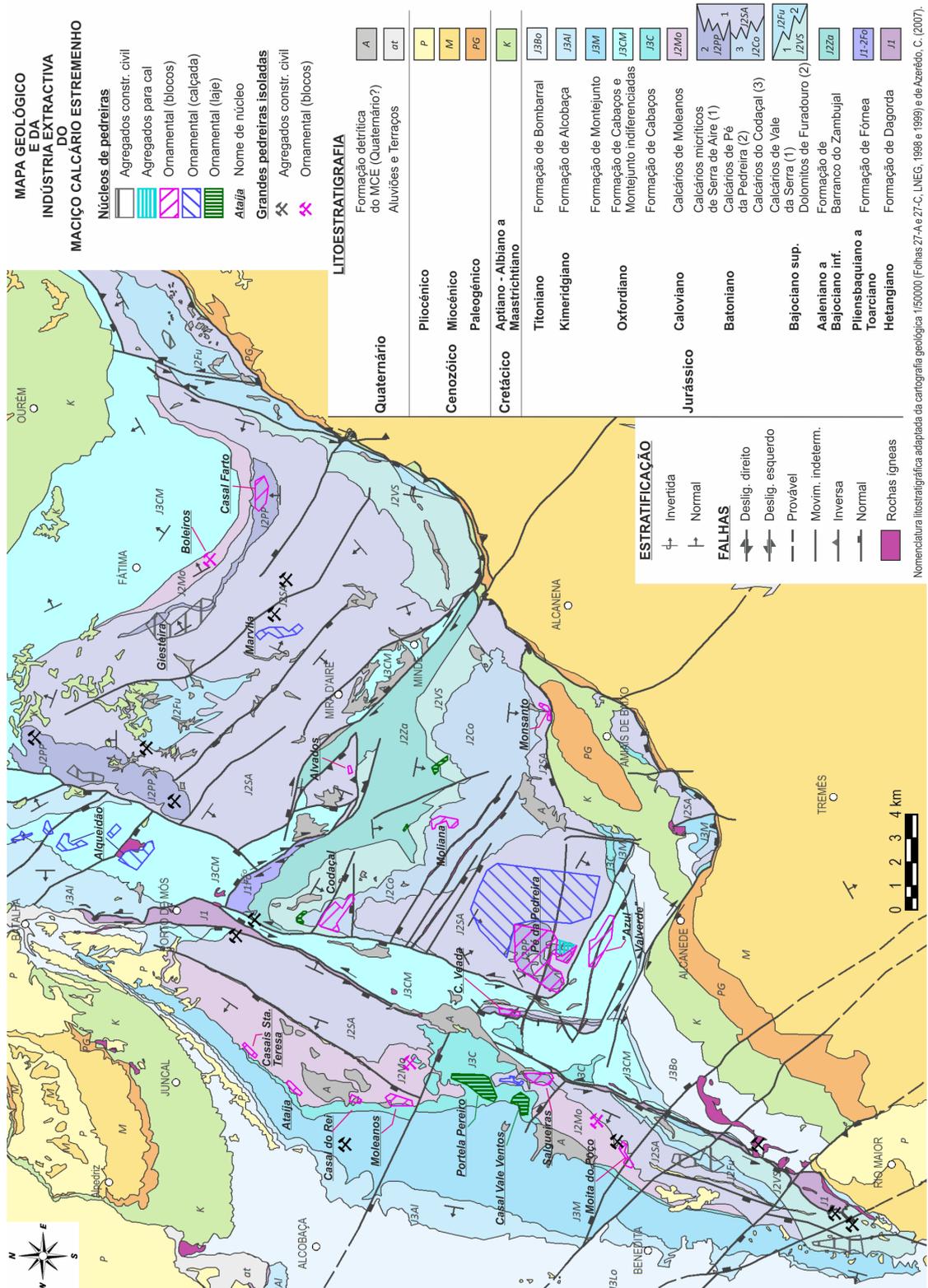
2.2 Núcleos de Extração

2.2.1 Membro Pé da Pedreira

Segundo Carvalho *et al.*, 2011, os recursos geológicos da região são diversos: patrimônio hidrogeológico (dos mais importantes aquíferos de Portugal), patrimônio paisagístico e geomorfológico (Ex: escarpas de falhas, lapiás, dolinas e poljes), patrimônio paleontológico e arqueológico (Ex: trilhos de pegadas de dinossaúrios e fósseis) e patrimônio espeleológico. Por se tratar de uma região com bastante patrimônio e necessidade de

preservação ambiental e dos seus recursos, grande parte do MCE tornou-se no Parque Natural da Serra de Aire e Candeeiros (PNSAC).

Figura 6 – Mapa litoestratigráfico do MCE com a localização dos núcleos extrativos dos calcários ornamentais, retirado de Carvalho *et al.* (2012).



Os calcários explorados na região têm finalidade ornamental e de agregados para a construção civil (fabrico de cal e britas), indústria siderúrgica, vidreira e química.

No mapa da figura 6 estão representados todos os 22 núcleos extrativos de rochas ornamentais do MCE. Destes, 8 estão localizados nos Calcários do Membro de Moleanos, 5 sobre os calcários do Membro Pé da Pedreira, 2 nos Calcários do Membro Codaçal, 4 nos Calcários Micríticos da Formação Serra d’Aire e 3 nos Calcários da Formação de Montejunto. Em função da topografia, as pedreiras desenvolvem-se em poço ou em flanco de encosta com vários níveis. Em média, a altura das pedreiras varia de 6 a 50 m

Segundo, Carvalho *et al.* (2012), o núcleo de Casal Farto tem uma morfologia lenticular, ocupando uma extensa área sobre um único corpo calcário. Apesar do elevado padrão de fraturação sub-vertical do MCE, a zona em exploração encontra-se afetada por um conjunto mais reduzido de fraturas, sendo a família mais representativa orientada NW-SE, com espaçamento médio em torno dos 5 m, e a secundária NE-SW, com o espaçamento médio em volta de 20 m. Também se observam zonas de fratura sub-paralelas à estratificação preenchidas por materiais escuros insolúveis, denominadas de estilólitos, resultantes de processos de carga isostática que afetaram a rocha, e por onde circulavam substâncias solúveis e se acumulavam insolúveis de coloração escura.

A zona mais superficial da pedreira está bastante carsificada, com o desenvolvimento de cavernas mais profundas em algumas áreas (Figura 7).

A pedreira tem bancadas com cerca de 10 m de altura, de direção E-W com caimento em torno de 15° a 20° para norte, seguindo a atitude das estruturas sub-paralelas. A espessura deste corpo está próxima a 200 m, passando a valores muito inferiores lateralmente. Os blocos são retirados com auxílio de cabos diamantados e posteriormente cortados em blocos de menores dimensões, com medidas médias de 2,8 x 1,8 x 1,5 m. No processo de transformação os blocos são serrados “a favor” ou “ao contra”, ou seja, paralelos ou perpendiculares à estratificação/laminação sedimentar.

A variedade ornamental mais comercializada tem a designação de Creme de Fátima ou Filstone Beije (adoptada pela empresa), sendo obtida por corte paralelo à laminação sedimentar. Consoante as diferentes granulações pode-se ter Filstone Beije (Figura 8): MG (Médio-Grosso), M (Médio), MF (Médio-Fino), MFF (Médio -Fino-Fino) e MMF (Médio-Médio-Fino). A rocha explorada consiste de um calcarenito bioclástico com clastos arredondados, pseudo-oolíticos, com tonalidades que variam entre o negro e o cinzento/azulado, grãos bioclásticos com alguma recristalização associada, e calcite microcristalina nos interstícios entre grãos. Apresenta granulação variável, homogêneo, com

coloração creme ou azulada, onde a coloração creme ocorre nas zonas mais superficiais, fraturadas e porosas, podendo aparecer como manchamento no seio das rochas de coloração azul/acinzentada que aumentam com a profundidade.

Figura 7 – (A) Frente de lavra ativa; (B) Frente de lavra com o limite entre os dois níveis; (C) Veio de material orgânico em zona de fraqueza do material Filstone Blue (FONTE: autor).



Figura 8 – Placas de 30 x 30 cm das variedades carbonáticas exploradas na pedreira Filstone Natural (FONTE: Website da Filstone Natural).



Esta variedade de coloração azul/acinzentada é explorada com o nome Azul Celestial ou Filstone Blue (Figura 8), segundo sondagens existentes atinge pelo menos os 130 m, mas não é tão facilmente comercializável, pelo fato da sua cor não ser estável quando aplicada em fachadas.

Em geral, todas as variedades exploradas nesta pedreira são comercializadas em material bruto para o exterior (principalmente China), onde serão beneficiadas e usadas como produtos acabados ou semi-acabados em vários ambientes externos e internos.

2.2.2 Formação Jandaíra

Nas áreas onde ocorrem as rochas desta Formação existe o desenvolvimento de sistemas cársticos (cavernas, lapiás, dolinas, ravinas, cachoeiras, canyons, espeleotemas e relevos ruiformes), que leva ao escoamento preferencial da água em subsuperfície e, por isso, a uma baixa drenagem superficial e a uma complexa rede de drenagem subterrânea. As feições cársticas são atribuídas a uma fácil dissolução pelo ácido carbônico e H_2SO_4 , fraca acidez, mas eficiente para dissolver o carbonato de cálcio (GOMES, 2008). Estes calcários estão associados a importantes ocorrências de reservatórios de hidrocarbonetos, sítios paleontológicos e rochas de aplicação na indústria química e na construção civil (cal, brita e cimento). Na região foi possível ver empresas de brita, fornos de cal, fábrica de cimento e estruturas extrativas de óleo.

Os calcários desta Formação encontram-se cobertos por solos carbonáticos ou expostos em afloramentos (lajedos) de várias dimensões.

A área da Mineração Apodi está próxima a falhas regionais, sendo visíveis zonas com maior número de fraturas caracterizadas pela maior quantidade de rejeito que é usado para fazer calçada. Estes calcários apresentam alguns veios, geralmente orientados com um azimute de $140^\circ/150^\circ$, de calcite, limonita e manganês, estando dispostos em camadas horizontais, provenientes de vários níveis estratigráficos da Formação Jandaíra. Na frente de lavra foi possível identificar os seguintes níveis (Figura 10): 0 - 0,5 m, é material alterado rejeitado; 0,5-0,8 m, primeiro nível de exploração (P1), corresponde ao “Crema Paraná Riviera”; 0,8-2,4 m (P2), corresponde ao “Crema Paraná” a favor da estratificação e ao “Crema Paraná Striatto” contra a estratificação; 2,4-3 m (P3), que não é explorado; >3 m, material de cor azulada/roxa que não é explorado, atingindo pelo menos os 10 m de profundidade, segundo sondagens realizadas. É ainda explorado o material “Crema Fossile que pode aparecer em todos os níveis.

Figura 9 – (A) Frente de lavra ativa; (B) Frente de lavra com os limites entre os níveis P1, P2 e P3; (C) Camada de argila com 4 cm de espessura entre os níveis P2 e P3 (FONTE: autor).

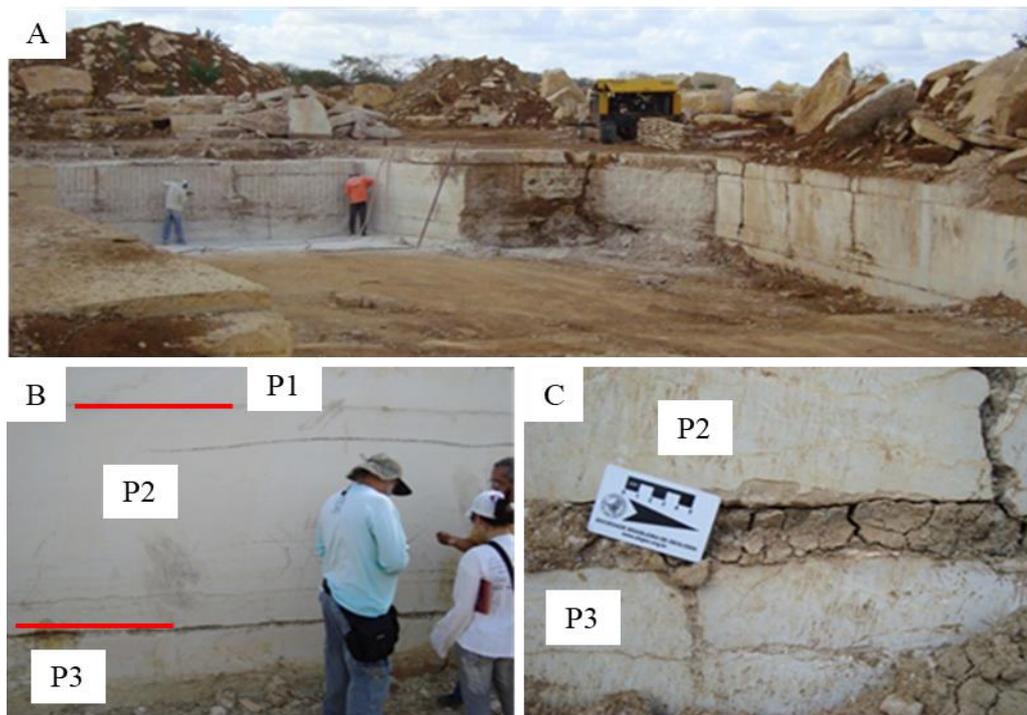


Figura 10 – Variedades carbonáticas exploradas na pedreira Mineração Apodi (FONTE: autor).



Em geral, estes níveis são separados por camadas de argila com espessuras entre 2 a 5 cm (Figura 9). Até aos 3 metros de profundidade, em geral, os calcários apresentam coloração creme clara, estrutura maciça, granulação fina a muito fina e por vezes são reconhecidos níveis porosos resultantes do crescimento de geodos de calcita. É afetado por

estilólitos e fraturas que são preenchidas por recristalização de calcita. Contém um elevado e diversificado conteúdo fossilífero de ambientes marinhos rasos.

A variedade “Crema Paraná” é comercializada em material bruto para o exterior (principalmente Europa, China e Japão) ou são beneficiadas na empresa Granos (Fortaleza – CE) para o mercado nacional, utilizadas como produtos acabados ou semi-acabados em vários ambientes externos e internos.

A sua lavra em bancada baixa desenvolve-se lateralmente e utiliza métodos mecanizados, atingindo profundidade média máxima de 2 m. Para o seu desmonte utilizam-se as tecnologias de fio adiamantado e divisão mecânica por cunhas, extraído-se blocos com espessuras variadas (0,5 – 1,5 m) consoante a camada.

2.3 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento da presente investigação o trabalho foi dividido nas etapas de escritório, campo e laboratório e interpretação dos dados com o intuito de fazer uma melhor caracterização e comparação macro e microscópica, físico-mecânica e de alterabilidade de rochas calcárias de alguns níveis estratigráficos das Bacias Lusitaniana e Potiguar, exploradas para fins ornamentais.

Os trabalhos de escritório se referem à pesquisa bibliográfica sobre características geológicas regionais e locais das áreas de interesse e sobre as metodologias aplicadas na caracterização físico-mecânica e de alterabilidade para as rochas em questão.

Em campo foram selecionados os níveis estratigráficos dos estratos calcários de ambas as bacias, visando a coleta de amostras destinadas aos estudos pretendidos. Foi efetuado um reconhecimento geológico onde estão inseridos os três calcários em estudo, breve caracterização das pedreiras, amostragem, algumas medições e registro fotográfico.

A etapa laboratorial e de interpretação dos dados incidiu sobretudo nas atividades laboratoriais, realizando-se um estudo macro e microscópico (5 lâminas para cada calcário, envolvendo a identificação composicional, textural, alteração, porosidades e contatos), determinação das propriedades físico-mecânicas, testes sobre o meio poroso e ensaios de alterabilidade. Por fim foi efetuado todo o tratamento e interpretação dos dados obtidos nas análises laboratoriais, culminando com a confeção desta tese de doutorado apresentada em formato de artigos em conformidade com o regulamento do Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas três amostras de calcário, sendo duas conhecidas comercialmente como Filstone Beije MF e Filstone Blue, provenientes

de dois níveis estratigráficos diferentes da mesma frente de lavra da pedreira “Filstone Natural”, no núcleo de Casal Farto da Bacia Lusitaniana e uma amostra conhecida como Crema Paraná da frente de lavra da pedreira “Mineração Apodi”, na Formação Jandaíra da Bacia Potiguar.

Os materiais e métodos específicos estão descritos nos textos de cada um dos quatro artigos apresentados nesta tese, correspondendo aos itens 3 a 6.

No primeiro artigo é feita uma caracterização das propriedades físico-mecânicas dos três calcários, comparando com as suas características macro e microscópicas. Para isso, além das atividades de campo e da análise macro e microscópica foram realizados ensaios laboratoriais que consistiram na determinação dos índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água - 10 corpos-de-prova para cada calcário), determinação do coeficiente de dilatação térmica linear (2 corpos-de-prova para cada calcário), determinação da resistência ao congelamento e degelo (5 corpos-de-prova por cada calcário para cada um dos 3 ensaios seguintes), determinação da resistência à compressão uniaxial (10 corpos-de-prova para cada calcário), determinação do módulo de ruptura (10 corpos-de-prova para cada calcário), determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos (10 corpos-de-prova para cada calcário), determinação da resistência ao impacto de corpo duro (5 corpos-de-prova para cada calcário seguindo a norma ABNT e número de corpos-de-prova variáveis para cada calcário seguindo um método experimental do autor), todos seguindo as normas ABNT NBR 15845:2015 e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (nos 15 corpos-de-prova de cada calcário para os três ensaios de resistência mecânica), seguindo a norma ASTM D 2845:2005. Este artigo irá ser submetido para a revista Pesquisas em Geociências da UFRGS.

O segundo artigo trata da análise do coeficiente de atrito superficial dos três materiais, tendo em conta as características macro e microscópicas dos calcários em estudo. Para isso foi feita uma comparação entre os ensaios de determinação da resistência ao escorregamento através de um pêndulo Britânico (8 corpos-de-prova para cada calcário), seguindo a norma BS EN 14231:2003; determinação da microdureza Knoop (1 corpo-de-prova para cada calcário), seguindo a norma BS EN 14205:2003; determinação do desgaste por abrasão (2 corpos-de-prova para cada calcário), seguindo a norma ABNT NBR 12042:2012 e rugosidade (os mesmos 8 corpos-de-prova para cada calcário utilizados no ensaio de escorregamento), seguindo a metodologia do laboratório. Este artigo será submetido para a revista Anuário do Instituto de Geociências – B1.

No terceiro artigo é abordado o estudo do meio poroso dos três calcários, sendo

comparada com as suas características macro e microscópicas, através dos ensaios de porosidade e permeabilidade por intrusão de nitrogênio (4 plugues para cada calcário), porosidade por intrusão de mercúrio (2 plugues para cada calcário), velocidade de ondas ultrassônicas (os mesmos 4 plugues para cada calcário utilizados no ensaio de porosidade e permeabilidade por intrusão de nitrogênio), tomografia computadorizada 3D (2 plugues para cada calcário pelos dois diâmetros diferentes) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), todos seguindo as normas dos respectivos laboratórios. Este artigo irá ser submetido para a revista *Geophysical Journal International* – A2.

No quarto artigo os três calcários são caracterizados através de vários testes de alterabilidade e comparados com as suas características macro e microscópicas. Para isso foram realizados ataques químicos (20 corpos-de-prova para cada calcário, sendo 2 por cada reagente), seguindo a norma ABNT NBR 13818-anexoH:1997; manchamento (15 corpos-de-prova para cada calcário), seguindo a norma ABNT NBR 13818-anexoG:1997; lixiviação contínua através do ensaio com extrator de Soxhlet (1 balão com vários fragmentos aleatórios para cada calcário para 4 reagentes diferentes), seguindo o trabalho de Costa *et al.*, 2010; envelhecimento acelerado em câmaras saturadas em nevoeiro salino (4 corpos-de-prova para cada calcário), seguindo a norma NP EN 14147:2007 e o ensaio de cristalização de sais (8 corpos-de-prova para cada calcário), seguindo a norma BS EN 12370:1999. Para a maioria dos corpos-de-prova utilizados nestes ensaios foram realizadas medições de cor (sistema CIELAB) e de massa, avaliações visuais e fotográficas. Foram ainda realizadas medições de brilho no ensaio de manchamento. Este artigo irá ser submetido para a revista *Construction and Building Materials* ou *Journal of materials in civil engineering* – B1.

Posteriormente, são abordadas as perspectivas futuras para possíveis investigações afim de complementar a pesquisa.

Por fim, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos quatro artigos apresentados nesta tese, correspondendo aos itens 3 a 6.

De seguida vêm as referências bibliográficas usadas no decorrer da presente tese de doutorado.

3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)

Artigo 1 - Revista pesquisas em geociências da UFRGS – B2

Autores

Joni Gaspar Marques, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: jonimarques@ua.pt

Irani Clezar Mattos, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: irani.mattos@ufc.br

José de Araújo Nogueira Neto, UFG – Universidade Federal de Goiás, Rua Mucuri, s/n – Setor Conde dos Arcos, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil. Contato e-mail: nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, CETEM - NRES – Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional do Espírito Santo, Campus do IFES, caixa postal 737, CEP 29311-970 Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil. Contato e-mail: leolysil@cetem.gov.br

Resumo

Brasil e Portugal se encontram entre os dez maiores produtores mundiais de rocha ornamental. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue pertencem ao Membro Pé da Pedreira da Bacia Lusitaniana (Portugal), enquanto que o Crema Paraná pertence à Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte). Esta pesquisa objetiva uma análise comparativa das características tecnológicas das três rochas carbonáticas supracitadas com vista a avaliar a sua melhor aplicação. Para o efeito foram realizados os seguintes ensaios físico-mecânicos: determinação de índices físicos, resistência à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura e à flexão em quatro pontos, resistência ao congelamento e degelo, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, impacto de corpo duro e coeficiente de dilatação térmica, ao abrigo das normas da ABNT, ASTM e de métodos experimentais do autor. Realizaram-se análises macro e microscópicas de três calcários para se comparar com os resultados físico-mecânicos, em especial: composição, quantidade e tamanho de grãos, compactação e porosidade. Estas análises estão concordantes com os ensaios físico-mecânicos

e os resultados destes ensaios, em geral, satisfazem os valores recomendados. O calcário Crema Paraná tem a menor porosidade aparente e absorção de água e a maior densidade aparente e coeficiente de dilatação térmica, tendo o Filstone Beije MF os maiores valores para a porosidade aparente e absorção de água e os menores valores para a densidade aparente e coeficiente de dilatação térmica. As resistências à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura e à flexão em 4 pontos, para as três condições ensaiadas, e as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova usados para estes três ensaios são maiores para o Crema Paraná e, em geral, menores para o Filstone Blue. A resistência ao impacto de corpo duro é maior para o Filstone Blue e menor para o Crema Paraná. Conclui-se que o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento estrutural e de revestimento (interiores e/ou exteriores), enquanto que os dois calcários de Portugal caso sejam aplicados deverão ser impermeabilizados e/ou resinados e as suas placas para revestimento deverão ter mais de 3 centímetros de espessura. Os três calcários poderão ser aplicados em pavimentos, pisos suspensos, escadas, parapeitos e peitoris (janelas e portas) que estejam sujeitas à queda de objetos, sendo que as placas do Crema Paraná deverão ter uma espessura superior a 3 cm (espessura convencional) e/ou ser aplicadas em zonas que não estejam sujeitas a quedas frequentes de objetos. As três variedades carbonáticas podem ser aplicados em ambientes com grandes amplitudes térmicas, mas os calcários Filstone só devem ser aplicados em ambientes secos e/ou interiores e sem a formação de gelo, especialmente o Filstone Blue.

Palavras-chave: Crema Paraná. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Rocha Ornamental. Caracterização Físico-Mecânico.

Abstract

Brazil and Portugal are among the ten largest producers of ornamental rock in the world. Filstone Beije limestones MF and Filstone Blue are members of the Pé da Pedreira Member of the Lusitanian Basin (Portugal), while the Paraná Crema belongs to the Jandaíra Formation of the Potiguar Basin (Rio Grande do Norte). This research aims at a comparative analysis of the technological characteristics of the three carbonated rocks mentioned above in order to evaluate its best application. For this purpose, the following physical-mechanical tests were performed: determination of physical indices, uniaxial compression strength, four-point modulus of rupture and flexion, freezing and thawing resistance, ultrasonic wave propagation velocity, hard body impact and coefficient of thermal expansion, under ABNT, ASTM and experimental methods of the author. Macro and microscopic analyzes of three limestones

were carried out to compare them with the physico-mechanical results, in particular: composition, quantity and grain size, compaction and porosity. These analyzes are consistent with the physico-mechanical tests and the results of these tests, in general, meet the recommended values. The Parma Crema limestone has the lowest apparent porosity and water absorption and the highest bulk density and coefficient of thermal expansion, with Filstone Beije MF having the lowest values for apparent porosity and water absorption and the lowest values for apparent density and coefficient of thermal expansion. The uniaxial compression, the modulus of rupture and the flexion at 4 points, for the three conditions tested, and the ultrasonic wave propagation velocities in the specimens used for these three tests are higher for the Parana Cream and smaller for Filstone Blue. The hard body impact resistance is higher for Filstone Blue and lower for Parana Cream. It is concluded that the Paraná Cream can be applied as a structural and coating element (interior and / or exterior), while the two Portuguese limestones, if applied, should be waterproofed and / or resinated and their coating boards should have more of 3 centimeters thickness. The three limestones may be applied to floors, suspended floors, stairs, parapets and sills (windows and doors) that are subject to falling objects, and the plates of Paraná Cream should have a thickness of more than 3 cm (conventional thickness) and / or be applied in areas that are not subject to frequent dropping of objects. The three carbonated varieties can be applied in environments with large thermal amplitudes, but Filstone limestones should only be applied in dry and / or indoor environments and without the formation of ice, especially Filstone Blue.

Key-words: Paraná Cream. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Dimension Stone. Physical-Mechanical Characterization.

3.1 Introdução

A rocha é um recurso geológico que é usado desde os primórdios. Inicialmente mais para uma função estrutural, mas desde há uns séculos que tem vindo a crescer o seu uso com fim de ornamentação. Segundo Montani (2015), a extração mundial de rochas ornamentais quase que quadruplicou nos últimos 20 anos, tendo um crescimento de 14% por ano com uma tendência duradoura.

Tanto o Brasil como Portugal são dotados de rochas ornamentais de excelentes qualidades que têm sido aplicadas por todo o mundo e, por isso, se têm tornado cada vez mais uma referência mundial como produtores deste recurso. Portugal é conhecido há muitos anos no mercado pelos seus mármore e calcários. O Brasil é conhecido pela sua diversidade de

granitóides, porém os seus mármore e calcários também têm crescido muito neste mercado.

Além da crescente procura de rochas ornamentais tem existido avanços significativos em todas as fases do processo: extração, beneficiamento, aplicação e manutenção. No entanto, estes avanços poderiam ser mais eficientes e acompanhar a crescente demanda das rochas ornamentais através de uma melhor caracterização.

A aceitação de uma rocha para ornamentação e/ou revestimento além da aparência estética, da arte de trabalhar a rocha e da economia, depende da natureza geológica e das propriedades físico-mecânicas, químicas, meio poroso e alterabilidade.

No entanto, a inadequada aplicação e manutenção de rochas ornamentais, as variações ambientais, a ação antrópica e a falta de conhecimento das características das rochas podem levar a adversidades que alteram as suas propriedades, tornando-se crucial efetuar estudos técnicos para prevenção e manutenção da sua estética decorativa.

Assim, o presente estudo teve por objetivo a caracterização macro e microscópica e físico-mecânica de três calcários utilizados no mercado de rochas ornamentais (dois de Portugal e um do Brasil); comparar e correlacionar os resultados entre si e avaliar se satisfazem os vários requisitos necessários para a sua aplicação no setor e quais as suas melhores opções de aplicação como rocha ornamental.

3.2 Contexto Geográfico e Geológico

As duas variedades carbonáticas de Portugal em estudo, com os nomes comerciais “Filstone Beije MF” e o “Filstone Blue”, foram coletadas na pedreira “Filstone Natural” que se encontra a cerca de 15 Km a Sul de Ourém (Santarém, Portugal), ver figura 11. Estes calcários estão inseridos na Bacia Lusitaniana (BL), Maciço Calcário Estremenho (MCE), Formação de Santo António-Candeeiros e Membro de Pé da Pedreira (AZERÊDO, 1993, 2007; CARVALHO *et al.*, 2012).

A variedade carbonática do Brasil em estudo, com o nome comercial “Crema Paraná”, foi coletada na pedreira “Mineração Apodi” que se encontra a cerca de 15 Km a Norte de Apodi (Rio Grande do Norte – RN, Brasil), ver figura 12. Este calcário está inserido na Bacia Potiguar (BP), Grupo Apodi e Formação Jandaíra.

Membro Pé da Pedreira

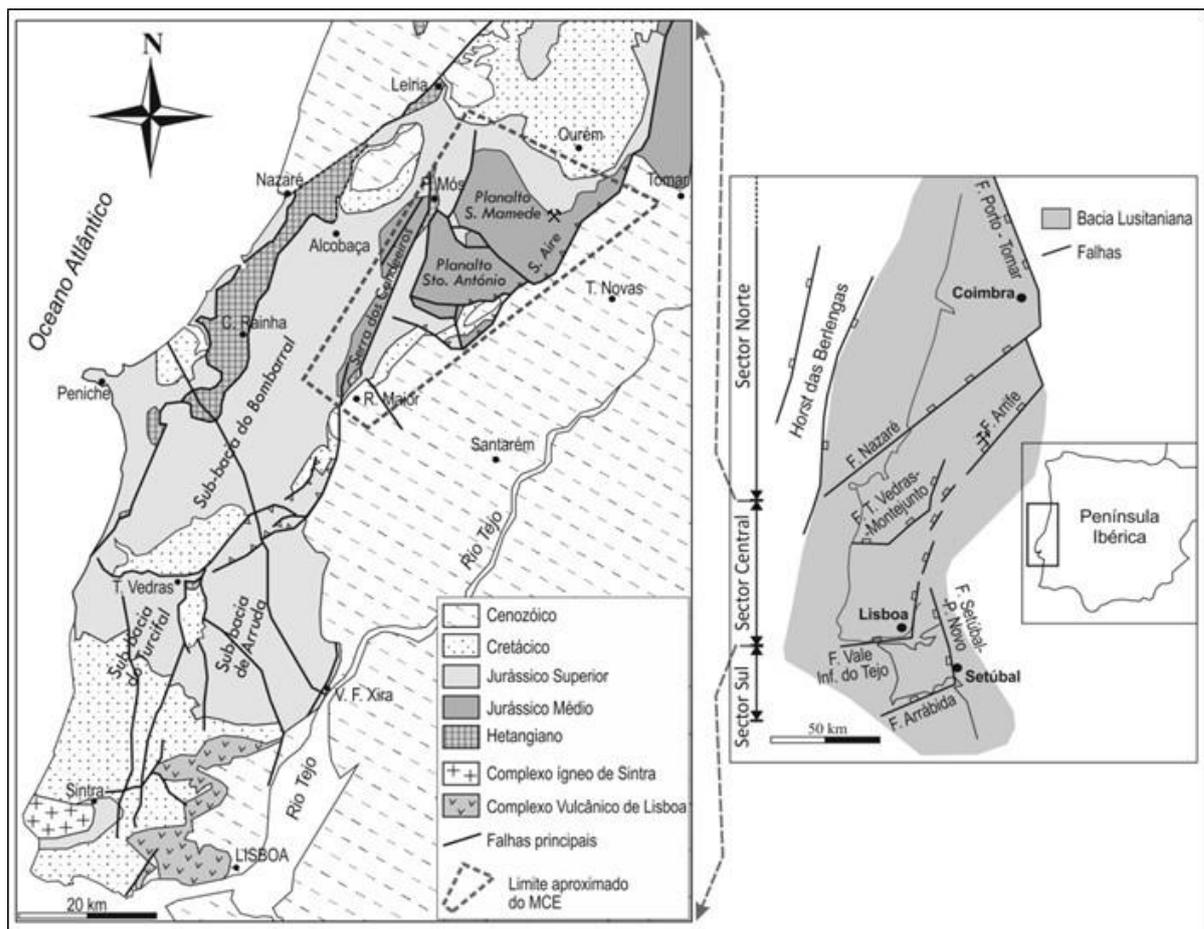
A Bacia Lusitaniana, uma bacia sedimentar intracratônica resultante da fragmentação da Pangeia e abertura do Oceano Atlântico, localizada no bordo oeste da microplaca Ibérica, alongada em uma direção NNE-SSW, tendo 250-330 Km de comprimento

e 100-150 Km de largura (AZERÊDO, 1993), ver figura 11.

Esforços compressivos soergueram uma unidade geomorfológica, alongada de direção NE-SW e com cerca de 750 Km², o Maciço Calcário Estremenho (MCE). É compartimentado em três blocos soerguidos (Figura 11): Serra do Candeeiros, Planalto de Santo António e Planalto de São Mamede que continua até à Serra d’Aire.

O Membro de Pé da Pedreira consiste de uma fácies de rampa interna com calcários de alta energia gerados num paleoambiente de ilha-barreira, com idade Batoniana, aflorando em três manchas principais: Calcários de Pé da Pedreira, Calcários oolíticos de Reguengo do Fetal e Calcários oolíticos de Casal Farto.

Figura 11 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg *et al.* (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).



Este Membro aparece sob a forma de corpos maciços lenticulares no seio dos calcários micríticos da Formação de Serra de Aire que se interdigam com os calcários das

Formações de Serra de Aire e de Chão de Pias e com os Membros de Cadoçal e de Moleanos. Os níveis superiores encontram-se truncados pelas rochas sobrejacentes, individualizando-se, localmente, estratos entre 1 e 2 m, sendo que a espessura do Membro vai dos 15 aos 150 m. É composto por calcários calciclásticos, micríticos, oo/bio/intra/pelsparitos “*grainstone*” a “*wackestone*” de cor branca, crema e tons de azul. A granulação varia de fina a grosseira, muito ricos em bioclastos, correspondendo, por vezes a biostromas descontínuos. Apresentam diversas estratificações e laminações e superfícies de erosão e de reativação. Ocorrem níveis espessos com intensa bioturbação, intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, recristalizações e geodos.

Segundo Carvalho *et al.* (2011), na história evolutiva da BL também ocorreram importantes episódios magmáticos que estão dispersos por toda a Bacia, com exceção da Serra de Aire e Planalto de São Mamede.

Formação Jandaíra

A Bacia Potiguar (BP), uma bacia sedimentar rifte intracontinental formada pela separação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. Localiza-se na interseção da Margem Continental Leste Brasileira com a Margem Continental Equatorial, apresentando uma área total estimada de 60.000 Km² (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1987; MATOS, 1992; ALMEIDA *et al.*, 1977), ver figura 12.

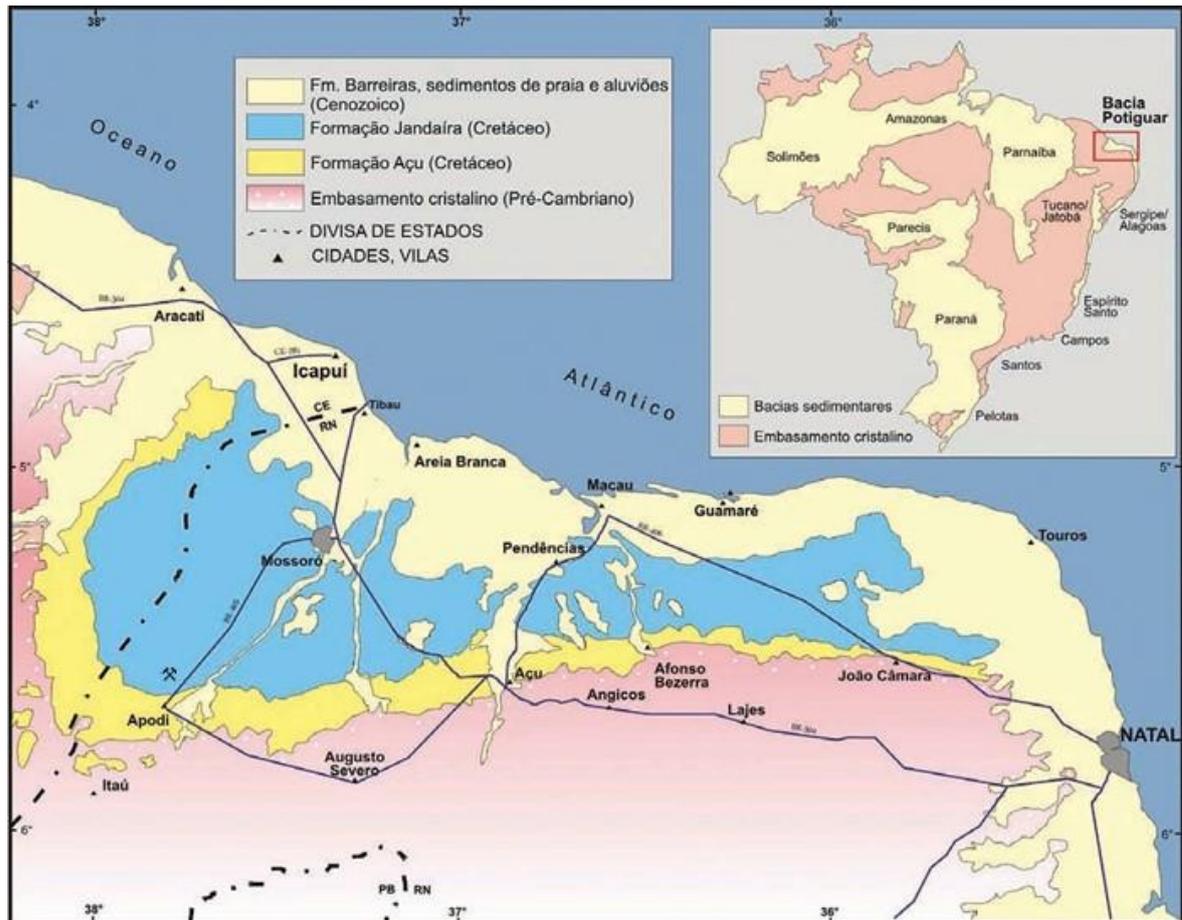
Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008) dividiram a Bacia Potiguar, da base para o topo, em três Grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha.

A Formação Jandaíra consiste de uma sequência transgressiva carbonática, marinha de águas quentes, rasas e agitadas, da fase drifte da evolução da Bacia, com idade Turoniana-Campaniana (SOARES *et al.*, 2003). Tem um limite transicional na base com as Formações Açú e Quebradas e ocorre localmente interdigitada com a base da Formação Ubarana (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003). Exibe uma direção W-E mergulhando suavemente para NE e uma espessura média entre 250-300 m (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982; PROASNE, 2006).

Os estratos deste pacote carbonático têm mergulhos suaves e cliniformas sigmoidais típicos de bacias de margem em rampa, dividindo-se em duas sequências deposicionais: a primeira é formada por *grainstones* bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por *wackestones* e *mudstones* na porção distal; e a segunda caracteriza-se pelo domínio da sedimentação carbonática em toda a bacia (NETO *et al.*, 2007). Composto por calcários microcristalinos, calcarenitos e calcilitos bioclásticos, com nível evaporítico na

base, tem uma coloração que varia entre branco, creme e cinza, são finos, compactos, duros, com textura detrítica, possuindo um conteúdo ricamente fossilífero e intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, podendo ter recristalizações e geodos (CASSAB, 2003).

Figura 12 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS *et al.*, 1990), com a localização da área (martelos).



Na sua história tectônica também fazem parte as Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau que representam três eventos magmáticos.

3.3 Materiais e Métodos

Para esta pesquisa foram utilizadas amostras dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue provenientes de dois níveis estratigráficos diferentes da mesma frente de lava da pedra Filstone no núcleo de Casal Farto da Bacia Lusitaniana (Portugal) e amostras do calcário Crema Paraná da frente de lava da Mineração Apodi na Formação Jandaíra da bacia Potiguar (Brasil).

Para a contextualização geológica foram efetuadas etapas de campo com a coleta

de amostras e uma breve caracterização das pedreiras.

O estudo petrográfico foi realizado no Laboratório de Microscopia Ótica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), usando objetivas de ampliações 4X, 10X, 20X e 40X do microscópio ótico de luz transmitida de marca *Leica* e modelo *EC 3*. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal).

Na descrição das lâminas delgadas seguiram-se os procedimentos estipulados na norma técnica brasileira (ABNT NBR 15845-1:2015) e as orientações de Navarro (1998, 2002) e de Rodrigues *et al.* (1996, 1997), tendo o cuidado de destacar as características que poderiam influenciar nos resultados físico-mecânicos, tais como: aspectos composicionais, texturas, estruturas, disposição e arranjo dos grãos e relações, tipos, quantificação, preenchimento e comunicabilidade de porosidades.

Para a classificação da porosidade utilizou-se o trabalho de Choquette & Pray (1970). Considerando a classificação da textura deposicional foi avaliado segundo a proposta de Dunham (1962). Correlacionando a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos adotou-se a nomenclatura de classificação de Folk (1959).

As propriedades físico-mecânicas foram obtidas através de ensaios laboratoriais que consistiram nas análises macro e microscópica, determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água, determinação do coeficiente de dilatação térmica linear, determinação da resistência ao congelamento e degelo, determinação da resistência à compressão uniaxial, determinação do módulo de ruptura, determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos, determinação da resistência ao impacto de corpo duro, todos seguindo as normas ABNT NBR 15845:2015 e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ASTM D 2845:2005). Todos estes ensaios e respectivos corpo-de-prova foram confeccionados no Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM-NRES) com exceção do ensaio de dilatação térmica que foi efetuado na Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC).

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial, flexão de 3 e 4 pontos foram realizados em corpos-de-prova secos em estufa a 70°C e saturados em água para se avaliar o possível enfraquecimento hidráulico de cada rocha aos esforços exercidos. O coeficiente de enfraquecimento hidráulico *R* (KOWALSKI, 1970 apud MESQUITA, 2002) relaciona a resistência do material seco e saturado, permitindo avaliar o efeito da água na resistência dos materiais rochosos. É obtido pela seguinte equação:

$$R = \sigma_{\text{sat}} / \sigma_{\text{seco}}$$

Onde σ_{seco} e σ_{sat} correspondem à tensão de ruptura do material nos estados seco e saturado, respectivamente.

O ensaio de resistência ao congelamento e degelo também foi efetuado nos corpos-de prova para os ensaios de resistência à compressão uniaxial, flexão de 3 e 4 pontos. Os resultados obtidos para este ensaio são correlacionados com os respectivos resultados das resistências ao natural para se obter o coeficiente de enfraquecimento K (ABNT NBR 15845:2015), através da seguinte equação:

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

Onde: K= coeficiente de enfraquecimento da rocha; σ_{cd} = valor médio da resistência mecânica dos corpos-de-prova após os ciclos de congelamento e degelo (MPa); σ_{nat} = valor médio da resistência mecânica dos corpos-de-prova secos (MPa)

Além da norma da ABNT, para o ensaio de resistência ao impacto de corpo duro também foi testada uma nova metodologia. Primeiramente foram feitas as médias das alturas de ruptura para cada amostra que foi sujeita a este ensaio seguindo a norma da ABNT. Os valores estipulados como ponto de partida para esta metodologia foram os níveis imediatamente abaixo da média para cada uma das variedades. Após cada lançamento da esfera era aumentado para o nível imediatamente acima, mas sempre trocando as placas a cada lançamento.

3.4 Resultados e Discussão

3.4.1 Aspectos Macro e Microscópicos

As características macro e microscópicas dos três calcários estudados nesta investigação são aqui abordadas, culminando com uma tabela síntese (tabela 1)

Filstone Beije MF

Em amostra de mão apresenta uma estrutura maciça, muito baixa anisotropia, coloração esbranquiçada a creme (se úmida), granulação homogênea e muito fina, formada por uma matriz microcristalina carbonática (figura 13). As dimensões dos seus grãos são pequenas de tal ordem que não se conseguem diferenciar ao olho humano. Observam-se veios e geodos calcínicos, estilólitos mais ou menos oxidados e alguns poros como resultado de

dissolução sob pressão (figura 13).

Figura 13 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico.



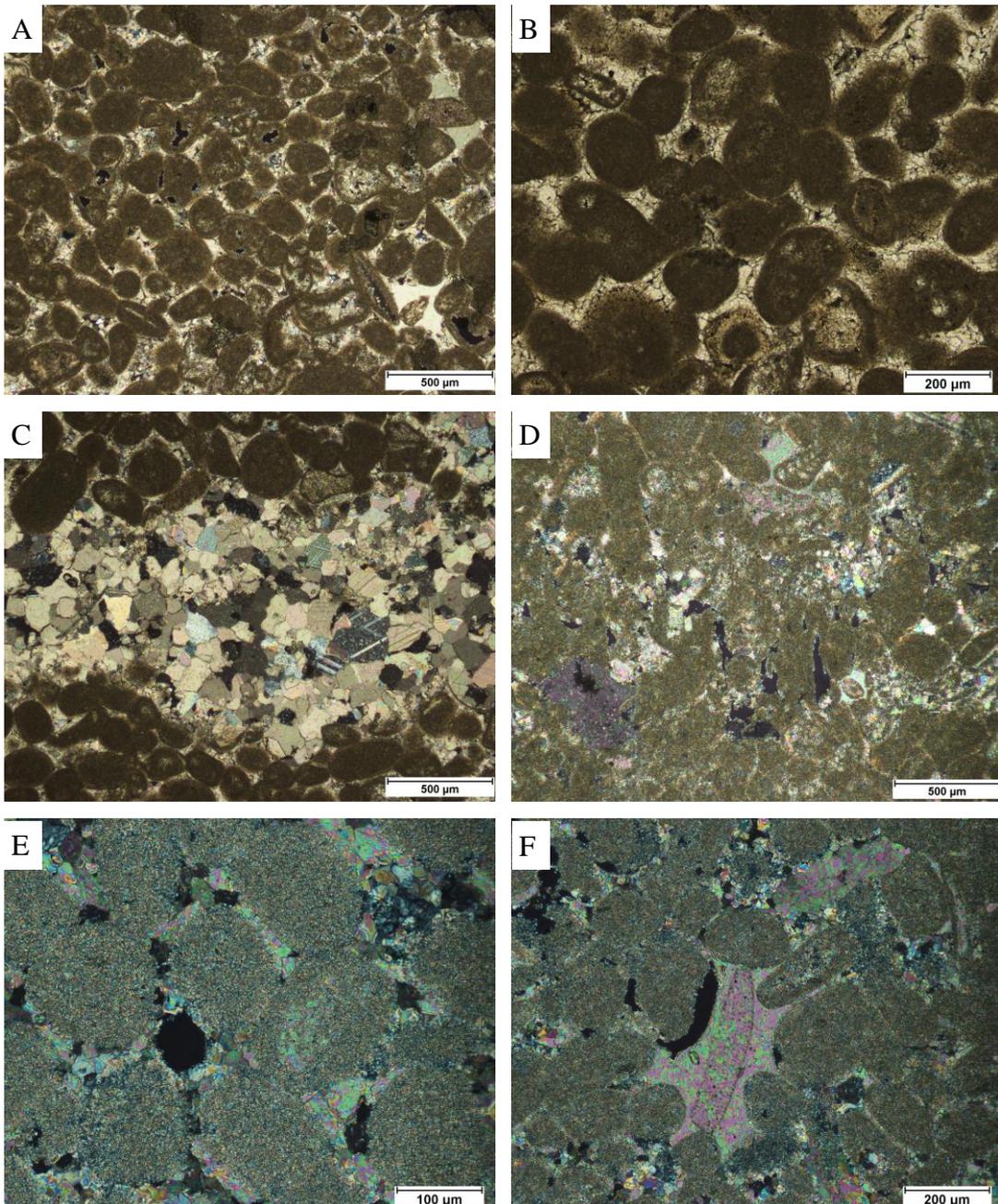
É uma rocha compacta, com uma granulação homogênea, em que, os grãos transportados variam de 0,125 mm a 0,25 mm, podendo atingir os 0,5 mm e o cimento varia entre 0,005 e 0,03 mm (microespato), sob a forma de mosaico, figura 14. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes penetrativo (figura 14 B, D, E e F).

A sua constituição consiste em cerca de: 47% de pelóides, 8% de oóides, 7% de intraclastos, 13% de biolastos (sobretudo foraminíferos, algas e equinodermes, figura 14 B e D), 13% de cimento microespático e 4% de lama microcristalina. A maioria dos seus grãos têm forma esférica a elíptica e apresentam-se bem calibrados com o tamanho, em média, variando entre 0,125-0,25 mm. Assim, segundo a classificação textural de rochas sedimentares de Folk (1959), é considerado um pelparito. São observados veios calcíticos, estilólitos, onde os grãos têm contatos penetrativos ao seu redor, e algumas recristalizações de calcita microespática e micrítica, pontualmente espática, dentro dos fósseis (figura 14 C e D). A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *packstone*.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970), possui porosidade baixa (8%), apesar de ser a mais porosa das três amostras; secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos que aumenta a porosidade da rocha e pelo crescimento sintaxial que a faz diminuir); intragranular; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo), atingindo algumas vezes a dimensão do mesoporo pequeno (0,0625 a 0,5 mm), figura 14 A, E e F.

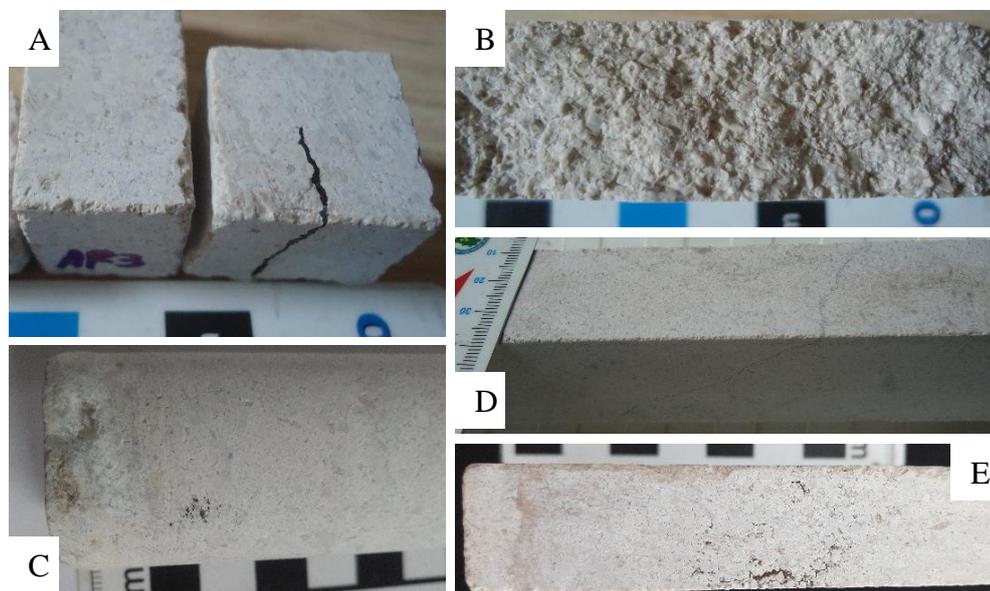
Figura 14 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).



Filstone Blue

Macroscopicamente possui estrutura maciça, com anisotropia muito baixa, coloração cinzento/azulado a creme (especialmente quando manchada ou úmida). A sua granularidade é heterogênea (Figura 15 B). A maioria dos grãos apresentam-se arredondados e alongados, principalmente os bioclastos, e em alguns grãos a sua região central é mais microcristalina em relação à periferia. Além dos bioclastos é possível identificar pelóides e veios e geodos calcíticos (figura 15 A, B e D). Os clastos contatam entre si, sustentando-se entre eles, tendo um cimento microcristalino carbonático a preencher os espaços vazios. Por vezes observam-se estilólitos com grandes concentrações de óxidos, sulfetos e compostos orgânicos. (Figura 15 C, D e E). Em lupa, consegue-se observar cavidades inter- e intra-granulares com crescimentos botroidais, confirmando que são porosidades e não espaços vazios como resultado do processo de corte da amostra.

Figura 15 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração bege, coloração mais cinza na ponta esquerda.



Petrograficamente, a granulação é heterogênea, os grãos apresentam-se arredondados e alongados, muitas vezes com estruturas internas preservadas e na maioria estão preenchidos com calcita microcristalina, porém alguns deles possuem recristalizações microespáticas a espáticas na porção mais central das suas estruturas e calcita microcristalina na periferia (figura 16 A). Em geral, os grãos desta rocha variam entre 0,25 mm e 1 mm,

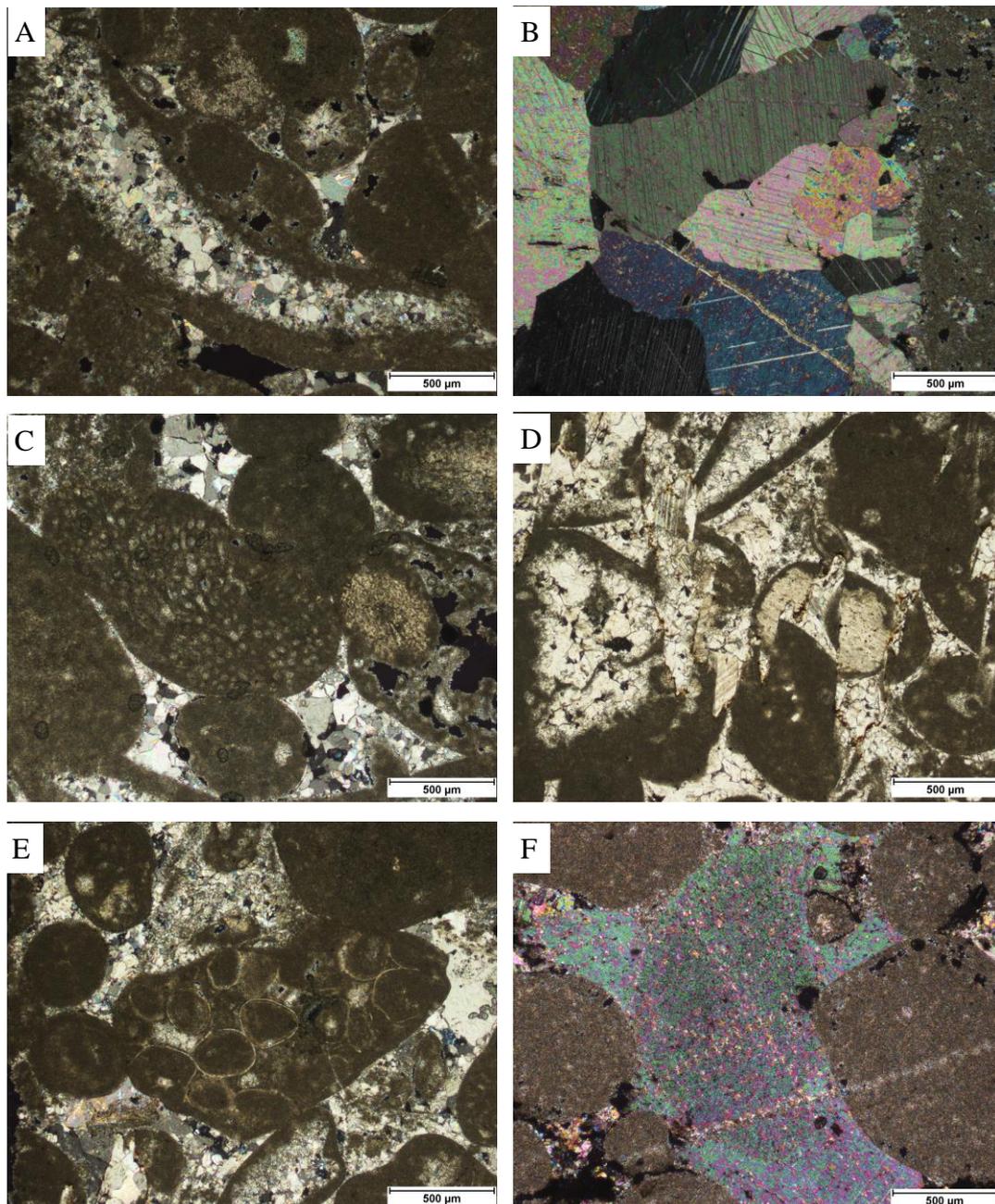
podendo atingir os 3 mm. O cimento tem dimensões superiores a 0,03 mm (espato) e está organizado sob a forma de mosaico.

Este calcário é composto por cerca de 39% de fragmentos de bioclastos de diversas espécies (equinodermes, algas moluscos e foraminíferos, figura 16 C), 20% de pelóides, 8% de intraclastos (tendo encontrado agregados de grãos cimentados – *grapestones*, figura 16 E), 18% de cimento espático, 6% de lama microcristalina e 3% de oóides. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes suturados (figura 16 A, C e D). Contém a presença de aglomerados de cor escura (compostos orgânicos) disseminados inter- e intra-grãos. Há a presença de estilólitos e próximo deles os grãos são mais penetrativos e ocorrem concentrações de compostos de cor castanha/laranja (óxidos, hidróxidos e matéria orgânica) e de cor mais escura (sulfetos de ferro), figura 16 D. Observam-se dissoluções no contato entre grãos como resultado da passagem de fluidos subsaturados em CaCO_3 nos poros da rocha, podendo gerar porosidades secundárias e variar a permeabilidade e a porosidade primária das rochas. Ocorrem recristalizações inter e intragrãos, cimento carbonático micro a macrocristalino que preenche os espaços intersticiais entre os grãos. São encontrados *vugs* preenchidos por cristais de calcita e fraturas preenchidas por calcita pervasiva (figura 16 B).

Estas características sugerem que a compactação e a dissolução inicialmente menos intensa é caracterizada pela aproximação dos grãos e pela percolação pervasiva de fluidos intersticiais pela rocha, entre os quais hidrocarbonetos, permanecendo alguns aglomerados disseminados no interior dos grãos. Posteriormente deu-se uma fase de compactação e dissolução sob pressão mais intensas levando à perda de grande volume de constituintes carbonáticos da rocha, tendo sido solubilizados e exportados, e acumulação de constituintes insolúveis da rocha nas superfícies estilolíticas (figura 16 D). A matéria orgânica disseminada pela rocha é interpretada como hidrocarbonetos muito oxidados do tipo betume, concordando com relatos de exsudações oleosas na rocha quando cortada. Por fim, ocorreu a precipitação do fluido saturado em carbonato no interior dos grãos sob a forma de microcristais de calcita (recristalização) e a formação do cimento nos interstícios dos grãos. Os espaços vazios no interior de grãos e do cimento comprovam que a recristalização foi incompleta. A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade baixa (6%); secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos e formação dos agregados litoclásticos, *grapestones*, fazendo aumentar a porosidade da rocha, e pelo crescimento sintaxial que faz diminuir esta porosidade); intragranular e intercristalina; com um tamanho de poro entre 0,0625 a 0,5 mm (mesoporo pequeno), figura 16 B, E e F.

Figura 16 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (*grapestone*) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados).



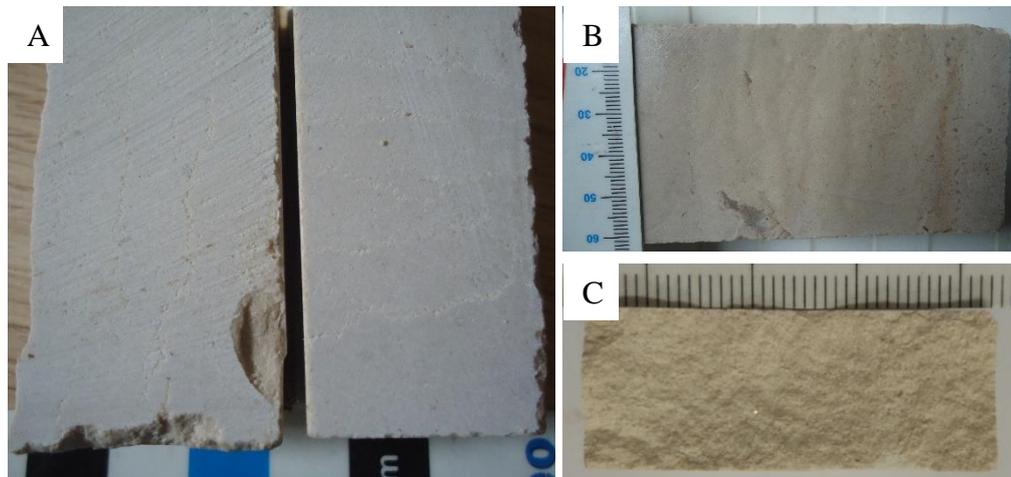
Segundo a classificação textural de Folk (1959) é considerado um biopelsparito.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *grainstone*.

Crema Paraná

Em termos macroscópicos exhibe uma estrutura maciça, com baixa anisotropia, sendo mais perceptível quando úmidos, e uma coloração creme claro quando estão secos e creme quando estão úmidos (figura 17 A e B). A sua granulação é homogênea e muito fina, sendo constituída por uma matriz microcristalina carbonática (figura 17 C). Os grãos apresentam pequenas dimensões, sendo apenas visíveis alguns fósseis de maiores dimensões e alguns veios e geodos de calcita. Observam-se estilólitos com concentrações de óxidos e hidróxidos, e alguns poros resultantes de dissolução (figura 17 B).

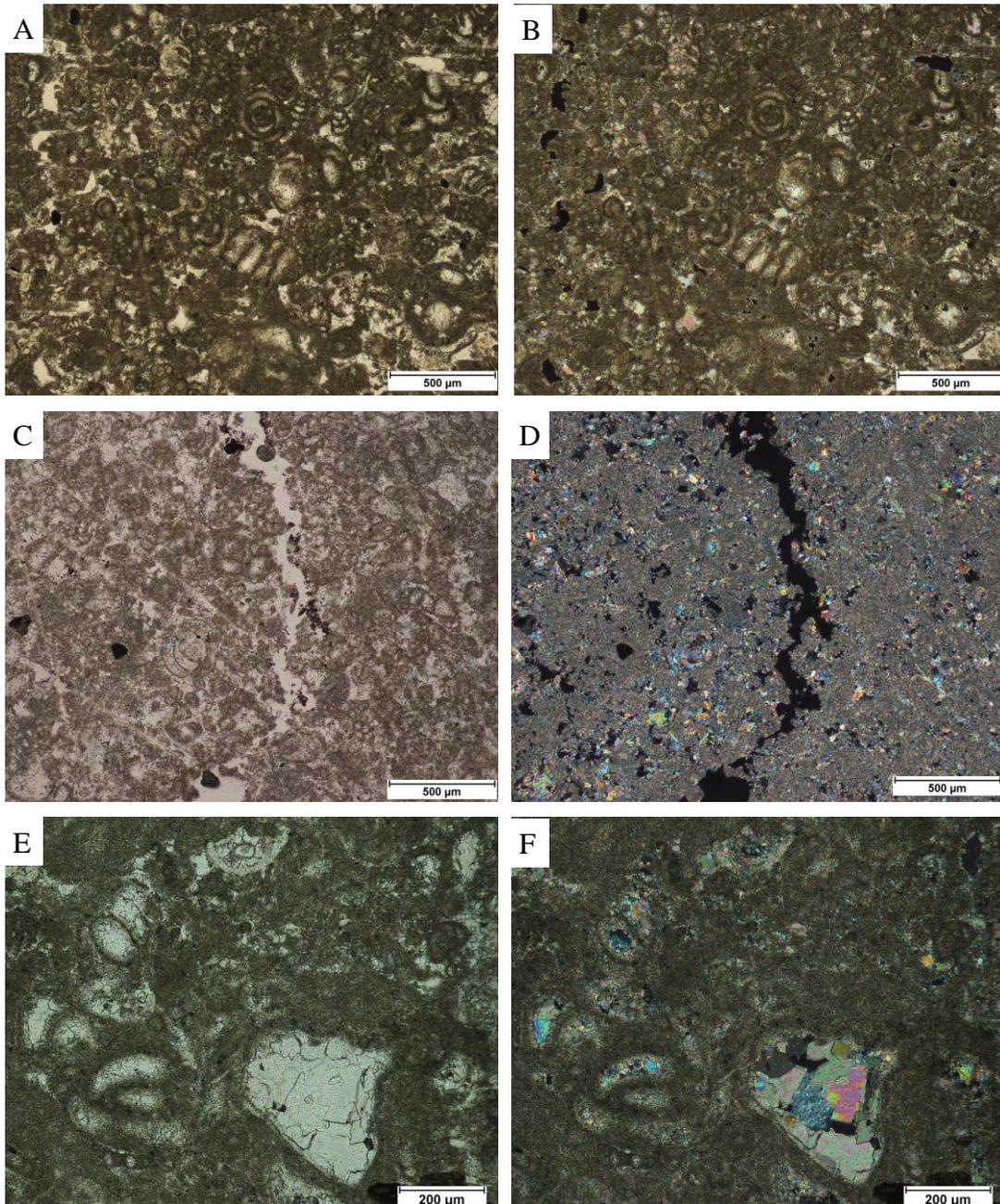
Figura 17 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.



Este calcário compacto tem uma matriz homogênea com o tamanho dos grãos a variar entre 0,062 mm e 0,25 mm, podendo atingir os 0,4 mm e a matriz possui tamanho inferior a 0,005 mm (micrítica), tendo algum cimento microespático (0,005-0,03 mm), figura 18 A, B, C e D. Possui um abundante conteúdo fóssilífero (47%), essencialmente constituído por foraminíferos e gastrópodes, distribuídos homogêneamente em formas esféricas a elípticas e diâmetros variando entre 0,125-0,5 mm, em torno de 30% de matriz micrítica, 4% de intraclastos, 9% de pelóides e 6% de cimento microespático (figura 18 A e B). Em geral, o contato entre grãos é difícil de se ver. São observadas fraturas abertas dispostas de forma irregular na massa rochosa e com espaçamentos heterogêneos (figura 18 C e D). Alguns

fósseis apresentam-se levemente recristalizados em calcita microespática (figura 18 E e F). A compactação da rocha é considerada densa.

Figura 18 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente.



Segundo Folk (1959) é considerada uma rocha aloquímica micrítica, biomicrito.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962), é considerado um *wackestone*.

Em geral, segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade muito baixa (4%), sendo mais porosa próximo aos estilólitos; secundária (pela dissolução da lama e formação dos estilólitos durante a diagênese); intercrystalina; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo).

Tabela 1 – Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.

		Bacia Potiguar	Bacia Lusitaniana		
		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	
Textura	Estrutura	Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	
	Compactação	Densa	Densa/dispersa	Densa/dispersa	
	Granulação	Homogênea (0,062-0,25 mm)	Homogênea (0,125-0,25 mm)	Heterogênea (0,25-1 mm)	
	Contatos	Difícil distinção	Pôntual a Côncavo-convexo	Pôntual a Côncavo-convexo	
	Grãos (%)	60	75	70	
	Matriz (%)	30	4	6	
	Cimento (%)	6	13	18	
	Poros (%)	4	8	6	
Composição	Matriz	Micrítica	Micrítica	Micrítica	
	Cimento	Microespático	Microespático com mosaico	Espático com mosaico	
	Grãos	Bioclastos (%)	78	17	55
		Pelóides (%)	15	63	28
		Oóides (%)	0	11	5
		Intraclastos (%)	7	9	12
	Fratura / Estilólito	Aberta / sem estilólitos	Sem fratura / com estilólitos	Preenchidas por calcita (pervasiva) / com estilólitos	
Porosidade	Secundária; Intercristalina; Microporo – (<0,0625 mm)	Secundária; Intragranular; Micro a Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)	Secundária; Intragranular e intracristalina; Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)		
Observações		Veios calcíticos; Recristalizações microespáticas e micríticas			
Classificação	Dunham (1962)	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	
	Folk (1959)	Biomicro	Pelsparito	Biopelsparito	

3.4.2 Aspectos Físico-Mecânicos

As propriedades físico-mecânicas são correlacionadas entre as três variedades carbonáticas e, sempre que possível, com parâmetros macro e microscópicos, assim como com os valores estipulados como referência para cada ensaio.

Nas tabelas dos itens abaixo estão sintetizados os valores médios obtidos para as propriedades físico-mecânicas dos três calcários em estudo, alguns valores calculados para as suas dispersões e os valores referência de Casal Moura (2007) e da norma ASTM C 568 (2010), definindo-os em calcários de baixa, média ou alta densidades, consoante os resultados para densidade aparente, absorção de água, compressão uniaxial e módulo de ruptura. Além destes ensaios foram ainda feitos os ensaios de porosidade aparente, flexão em 4 pontos, impacto de corpo duro e coeficiente de dilatação térmica. O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi efetuado nos corpos-de-prova dos ensaios compressão uniaxial, módulo de ruptura e flexão em 4 pontos, pois este ensaio permite avaliar a sanidade de uma rocha. Estes valores também são representados em gráficos ao longo dos respectivos itens, facilitando a melhor visualização e correlação entre os diferentes parâmetros. Os valores de Casal Moura (2007) utilizados como referência para este trabalho consistem de uma compilação de resultados obtidos para 21 calcários do Maciço Calcário Estremenho, ao qual pertencem os calcários Filstone Blue e Filstone Beije MF, usados como rocha ornamental. Para isso utilizam-se os valores máximo e o mínimo de Casal Moura (2007) como o intervalo recomendado e a média como valor referência para a sua aplicação ou não como rocha ornamental.

Índices Físicos

Conforme a norma ABNT NBR 15845-2:2015, os índices físicos compreendem a densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Na tabela 2 estão explanados os valores médios para estes parâmetros, alguns valores calculados para as duas dispersões e os valores de referência de Casal Moura (2007) e da norma ASTM C568 (2010) para calcários de média e alta densidade. No gráfico 1 estão representados os valores médios para os índices físicos dos três calcários.

Segundo norma ASTM C568 (2010), os resultados obtidos para os índices físicos são heterogêneos entre os três calcários. O Crema Paraná é considerado um calcário de alta densidade em todos os parâmetros, enquanto que o Filstone Beije MF é considerado de média densidade em todas as avaliações. Já o Filstone Blue é considerado um calcário de média densidade em relação à densidade aparente e de alta densidade em relação à absorção de água,

apesar de estar próximo aos valores limítrofes entre média e alta densidade. Tendo em conta os valores de Casal Moura (2007) todos os resultados satisfazem o intervalo recomendado, podendo ser usados como rochas ornamentais.

Em termos de heterogeneidades observamos que o Filstone Blue é o que possui maior desvio padrão e coeficiente de variação para a densidade aparente por se tratar do calcário menos homogêneo, pois é o que apresenta a maior granulação e menos calibrada. Contudo, para a porosidade aparente e absorção aparente o Crema Paraná é o que possui valores mais elevados devido à sua maior heterogeneidade estrutural, conferida pelo maior número de superfícies estilolíticas.

Tabela 2 – Valores médios dos índices físicos para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010).

	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	ASTM (C 568) médio	ASTM (C 568) alto	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Dens. Aparente Seca (g/cm ³)	2648	2454	2508	≥ 2160	≥ 2560	2697-2305
S	0,00898	0,00811	0,02308	n.e.	n.e.	n.e.
δ (%)	0,34	0,33	0,92			
Dens. Aparente Saturada (g/cm ³)	2660	2543	2574	≥ 2160	≥ 2560	2697-2305
S	0,00582	0,00503	0,02226	n.e.	n.e.	n.e.
δ (%)	0,22	0,20	0,87			
Porosidade Aparente (%)	1,15	8,90	6,53	n.e.	n.e.	12,6-0,5
S	0,34	0,31	0,23	n.e.	n.e.	n.e.
δ (%)	29,90	3,49	3,55			
Absorção Aparente (%)	0,43	3,63	2,60	≤ 7,5	≤ 3	5,5-0,2
S	0,13	0,14	0,10	n.e.	n.e.	n.e.
δ (%)	30,11	3,82	4,01			

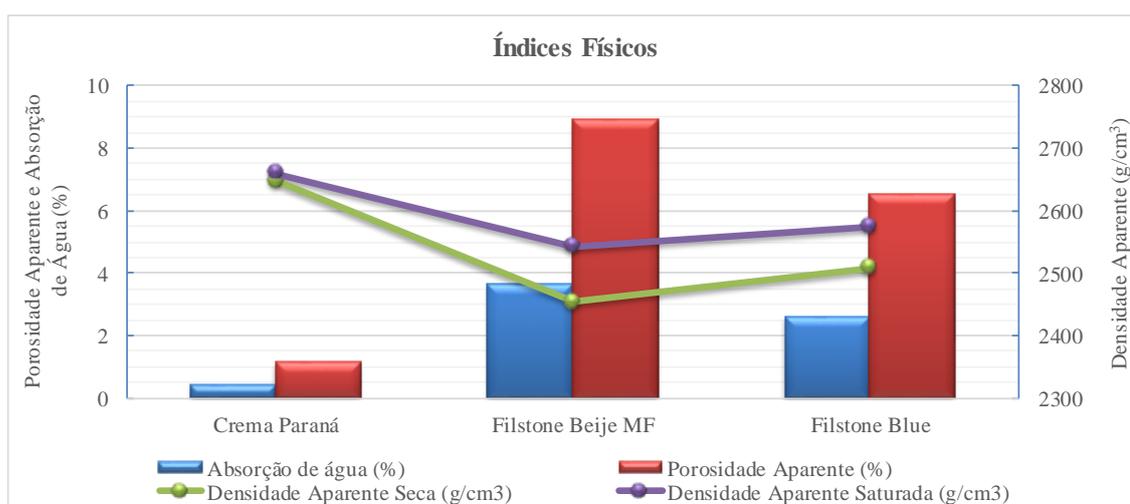
*10 corpos-de-prova para cada calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; n.e. – não especificado.

Como seria esperado, os valores dos índices físicos possuem uma proporcionalidade direta entre si para os três calcários (tabela 2 e gráfico 1). Quanto menor a densidade, maior será o volume de espaços vazios na rocha e, portanto, maior será a porosidade aparente e, possivelmente, a porosidade efetiva (aberta). A maior porosidade aberta traduz-se na existência de poros intercomunicantes, levando a uma maior absorção de água e menor resistência da rocha (BECERRA, 2009).

Em geral, estes resultados dependem da quantidade de espaços vazios, heterogeneidades estruturais e texturais através das concentrações calcíticas granulares, estilólicas e tipos de grãos, cimento e quantidade e tamanho dos grãos (ver, tabela 1).

O Crema Paraná exibe a maior densidade aparente, menor porosidade aparente e conseqüentemente a menor absorção de água. Este fato deve-se a este calcário ser o mais maciço, mais compacto, menos poroso, ter a menor quantidade de grãos e maior quantidade de matriz/cimento, além de ser o que apresenta uma granulação e matriz (micrítica) mais finas. Já Filstone Beije MF possui a menor densidade aparente, maior porosidade aparente e conseqüentemente a maior absorção de água. Uma vez que este calcário é o menos maciço e compacto, mais poroso, tem a maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz/cimento, apesar de ser o calcário Filstone Blue que apresenta a granulação e matriz menos finas.

Gráfico 1 – Representação gráfica dos resultados médios dos índices físicos.



Tendo em conta a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Densidade Aparente = 2564 g/cm³, Porosidade Aparente = 4,3% e Absorção de Água = 1,7%), apenas o Crema Paraná tem densidade aparente superior à média e porosidade aparente e absorção de água inferior à média. Em geral, o Filstone Blue e o Filstone Beije MF apresentam densidades aparentes inferiores à média e porosidades aparentes e absorções de água superiores à média, sendo que o Filstone Beije MF tem sempre os valores mais distantes das médias. Estes dados permitem concluir que apenas o Crema Paraná poderá ser aplicado em ambientes úmidos, desde que não sejam extremamente úmidos, e o Filstone Beije MF é o menos aconselhado a ser utilizado em ambientes úmidos, só com o recurso a impermeabilizantes e resinas. Outro

fator que permite concluir esta utilização em ambientes úmidos é o aumento da densidade aparente em 12 g/cm^3 para o Crema Paraná, 89 g/cm^3 para o Filstone Beije MF e 66 g/cm^3 para o Filstone Blue. Estes aumentos estão em proporcionalidade direta com a porosidade aparente e com a consequente absorção de água. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue deverão ser aplicados apenas em ambientes internos e/ou secos, enquanto que o Crema Paraná poderá ser aplicado em ambientes internos e externos, secos e úmidos.

Compressão Uniaxial

Este ensaio realizou-se mediante a norma ABNT NBR 15845-5:2015, obtendo-se o valor da resistência das rochas quando submetidas a uma pressão compressiva máxima até à sua ruptura. Este parâmetro avalia a qualidade das rochas para serem aplicadas como elemento estrutural.

Este ensaio foi realizado utilizando 5 corpos-de-prova para cada uma das condições: seco, saturado e congelamento e degelo (seguindo a norma ABNT NBR 15845-4:2015). Deste modo foi possível obter os coeficientes de enfraquecimento K e R. Previamente à realização deste ensaio foram medidas as velocidades de propagação de ondas nos 15 corpos-de-prova. Os resultados estão visíveis nas tabelas 3.3 e 3.4, assim como alguns valores calculados para a sua dispersão e os valores recomendados pela ASTM C568 (2010). A tabela 3 também contém os valores de referência de Casal Moura (2007). O gráfico 2 correlaciona os valores médios da compressão uniaxial nas três condições com os respectivos valores das velocidades de onda e com os valores recomendados pela ASTM C568 (2010).

Tendo em conta o valor recomendado pela ASTM C568 (2010) os três calcários são considerados calcários com densidade alta, pois têm valores $\geq 55 \text{ MPa}$, nas três condições ensaiadas. Apesar dos valores de Casal Moura (2007) serem apenas para a condição seca, os três calcários satisfazem o intervalo recomendado nas três condições ensaiadas, podendo ser usados como rochas ornamentais.

A ISRM (1979) classifica as rochas desde extremamente brandas ($< 1 \text{ MPa}$), muito brandas (1-5 MPa), brandas (5-25 MPa), medianas (25-50 MPa), resistentes (50-100 MPa), muito resistentes (100-250 MPa) e extremamente resistentes ($> 250 \text{ MPa}$). Com base nessa classificação o Crema Paraná é considerado muito resistente, enquanto que os calcários de Portugal são considerados resistentes.

Em relação às heterogeneidades percebe-se que o Filstone Blue é o que possui maior desvio padrão e coeficiente de variação na condição seca por se tratar do calcário com

os grãos de maiores dimensões e menos calibrados. Para as condições saturada e de congelamento e degelo é o Filstone Beije MF que tem os valores mais elevados para estes parâmetros, pois apesar de ser um calcário de grão fino e bem calibrado tem o maior grau de porosidade, sendo visíveis veios, estilólitos e fraturas. O Crema Paraná possui maior homogeneidade para as três condições ensaiadas (menores valores de coeficiente de variação comparativamente com os outros dois calcários).

Tabela 3 – Valores médios da resistência à compressão uniaxial para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010).

Condição	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	ASTM (C 568) alta	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Seca (MPa)	139,89	85,91	89,98	≥ 55	(168,9-49,3)
S	15,29	15,79	17,40	n.e.	n.e.
δ (%)	10,93	18,38	19,34		
Saturada (MPa)	124,78	75,19	74,86	≥ 55	(168,9-49,3)
S	19,56	19,68	14,78	n.e.	n.e.
δ (%)	15,68	26,17	19,75		
R	0,89	0,88	0,83		
Congelamento e Degelo (MPa)	142,45	106,75	61,42	≥ 55	(168,9-49,3)
S	17,98	47,74	14,61	n.e.	n.e.
δ (%)	12,62	44,72	23,78		
K	1,018	1,24	0,68		

*5 corpos-de-prova para cada calcário em cada condição; R – coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K – coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; n.e. – não especificado; Filstone Beije MF apenas um corpo-de-prova chegou ao final dos 25 ciclos de congelamento e degelo.

Os valores de resistência à compressão uniaxial, como seria esperado, foram mais elevados para o Crema Paraná nas três condições, pois ele é o calcário mais maciço, com mais matriz, menos grãos e menos porosidade. Por se tratar do calcário menos maciço e compacto, mais poroso e com maior quantidade de grãos e menor de matriz/cimento, o Filstone Beije MF é o que tem as menores resistências na condição seca. Nas condições saturada e de congelamento e degelo, o Filstone Blue é o que tem menores resistências, pois apesar de ser menos poroso que o Filstone Beije MF, tem uma porosidade média e é o calcário de maiores granulações, menos homogêneas e com a matriz menos fina.

O coeficiente de enfraquecimento hidráulico (R) foi em torno de 1, o que significa

que o fato de os corpos-de-prova serem saturados antes da realização do ensaio não influencia muito na sua resistência à compressão uniaxial. O mesmo acontece para o coeficiente de enfraquecimento (K). Contudo, as amostras do Filstone Blue já apresentam valores mais distantes de 1 (0,68), o que já mostra que os corpos-de-prova têm uma resistência mais baixa fazendo 25 ciclos de congelamento e degelo antes da realização do ensaio. O Filstone Beije MF teve o valor mais elevado na condição de congelamento e degelo, apresentando um valor acima do seu valor nas condições secas. Este ocorrido deveu-se ao fato de apenas um dos 5 corpos-de-prova ter chegado ao final dos 25 ciclos, portanto, a média dos 5 corpos fica confinada a esse valor. O Coeficiente de enfraquecimento (K) deu acima de 1 (1,24), o que significa que a tensão para quebrar os corpos-de-prova após os 25 ciclos de congelamento e degelo é maior do que nos corpos-de-prova em condições naturais (seca). Assim, com os ciclos de congelamento e degelo poderá ter ocorrido a redução de espaços vazios pelo preenchimento com novos compostos que conferiram uma maior resistência à rocha. Nas amostras do Crema Paraná o valor foi muito próximo de 1, apesar de ligeiramente superior (1,018) é considerado que a realização dos 25 ciclos de congelamento e degelo não influenciam na sua resistência à compressão uniaxial. Pois este calcário é o mais maciço, com mais matriz e menos grão, menos porosidade, não permitindo que o gelo altere a sua estrutura interna.

Tendo em conta a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Compressão Uniaxial = 111,4 MPa), apenas o Crema Paraná tem uma resistência à compressão uniaxial superior à média em todas as condições ensaiadas. Por outro lado, tanto o Filstone Beije MF como o Filstone Blue apresentam valores de resistência à compressão uniaxial inferiores à média em todas as condições ensaiadas. Estes dados permitem concluir que apenas o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento estrutural. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados como elemento estrutural deverão ser impermeabilizados e/ou resinados.

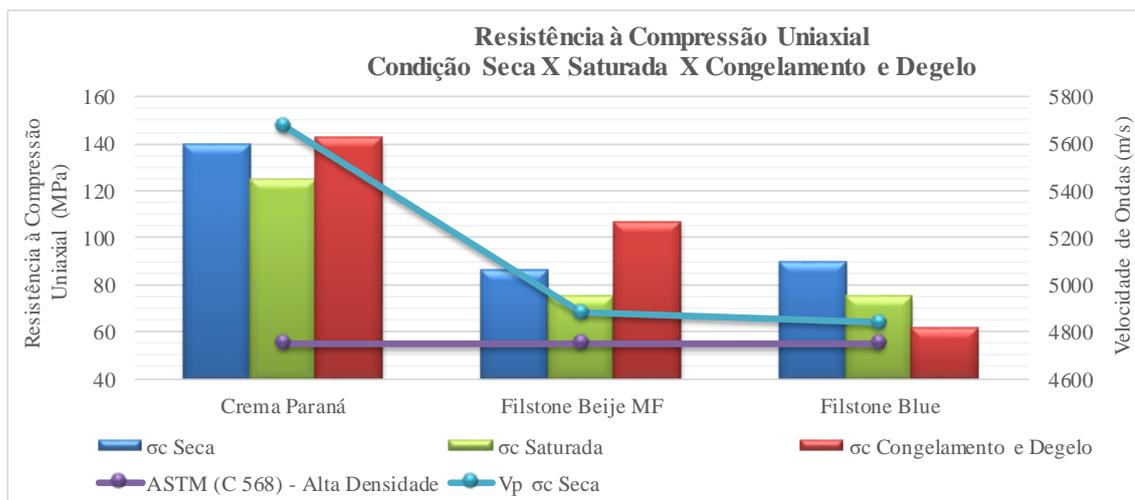
As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais (V_p) destes calcários são elevadas, situando-se entre os 4800 m/s e os 5800 m/s (tabela 4 e gráfico 2). Como seria de esperar, os valores de V_p para o Crema Paraná foram superiores comparativamente com os calcários de Portugal pelas mesmas características geológicas e estruturais que os valores de resistência à compressão uniaxial terem sido maiores. O Filstone Beije MF tem valores mais altos que o Filstone Blue, pois apesar de ter mais porosidades ele tem maior quantidade de grãos e, neste sentido, a quantidade de grãos influencia mais na velocidade de propagação de ondas do que a porosidade.

Tabela 4 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os três calcários em estudo.

Condição		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Seca	$V_p \sigma_c$ (m/s)	5677,40	4879,60	4837,27
	S	173,31	50,89	62,89
	δ (%)	3,05	1,04	1,30
	Anisotropia	7,75	3,48	3,97

*15 corpos-de-prova para cada calcário; $V_p \sigma_c$ (m/s) – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão uniaxial; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Gráfico 2 – Correlações entre os valores médios da resistência à compressão uniaxial nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade.



* $V_p \sigma_c$ – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Módulo de Ruptura

Através da norma ABNT NBR 15845-6:2015 realizou-se o ensaio de módulo de ruptura para se obter o valor da resistência das rochas, quando submetidas a uma pressão flexora máxima até à sua ruptura. Este parâmetro avalia a qualidade das rochas para serem aplicadas como revestimento.

Este ensaio foi realizado utilizando 5 corpos-de-prova para cada uma das condições: seco, saturado e congelamento e degelo (seguindo a norma ABNT NBR 15845-

4:2015). Deste modo foi possível obter os coeficientes de enfraquecimento K e R. Previamente à realização deste ensaio foram medidas as velocidades de propagação de ondas nos 15 corpos-de-prova. Os resultados estão visíveis nas tabelas 3.5 e 3.6, assim como alguns valores calculados para a sua dispersão. A tabela 5 também contém os valores recomendados pela ASTM C568 (2010) e os valores de referência de Casal Moura (2007). O gráfico 3 correlaciona os valores médios do módulo de ruptura nas três condições com os respectivos valores das velocidades de onda e com os valores recomendados pela ASTM C568 (2010). Dois corpos-de-prova do Filstone Beije MF não atingiram o final dos 25 ciclos de congelamento degelo, ficando a média restrita aos valores de três corpos-de-prova.

Tabela 5 – Valores médios da resistência ao módulo de ruptura para os três calcários em estudo e valores referência da norma ASTM C 568 (2010).

	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	ASTM (C 568) alta	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Seca (MPa)	18,49	16,61	12,68	$\geq 6,9$	(20,1-5,2)
S	4,69	2,95	1,25	n.e.	n.e.
δ (%)	25,38	17,769	9,86		
Saturada (MPa)	18,34	10,72	9,26		
S	3,31	2,70	0,48	n.e.	n.e.
δ (%)	18,05	25,20	5,21		
R	0,99	0,65	0,73		
Congelamento e Degelo (MPa)	17,97	10,79	3,75	$\geq 6,9$	(20,1-5,2)
S	1,99	0,61	1,21	n.e.	n.e.
δ (%)	11,06	5,62	32,11		
K	0,97	0,65	0,30		

*5 corpos-de-prova para cada calcário em cada condição; R – coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K – coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; n.e. – não especificado; Filstone Beije MF apenas três corpos-de-prova chegaram ao final dos 25 ciclos de congelamento e degelo.

Tendo em conta o valor recomendado pela ASTM C568 (2010) os três calcários são considerados calcários com densidade alta, uma vez que têm valores $\geq 6,9$ MPa, nas três condições ensaiadas, com exceção do Filstone Blue na condição de congelamento e degelo que é considerado um calcário de densidade média (3,4–6,9). Apesar dos valores de Casal Moura (2007) serem apenas para a condição seca, os três calcários satisfazem o intervalo recomendado nas três condições ensaiadas, podendo ser usados como rochas ornamentais,

com a exceção do Filstone Blue na condição de congelamento e degelo.

Sobre as heterogeneidades observa-se que nas três condições ensaiadas os três calcários em estudo vão alternando entre si os seus respectivos valores mais elevados e mais baixos de desvio padrão e de coeficiente de variação. Este fato evidencia a heterogeneidade dos três calcários com o aumento do tamanho dos corpos-de-prova.

Os valores de módulo de ruptura, como seria esperado, foram mais elevados para o Crema Paraná nas três condições, pois ele é o calcário mais maciço, com mais matriz, menos grãos e menos porosidade. O Filstone Blue é o que tem menores resistências para as três condições, pois apesar de ser menos poroso que o Filstone Beije MF, tem uma porosidade média e é o calcário de maiores granulações, menos homogêneas e com a matriz menos fina.

Os valores para o Crema Paraná apresentam maior homogeneidade para as três condições ensaiadas comparativamente com os outros dois calcários, o que é comprovado pelos coeficientes de enfraquecimentos (R) e (K) ser em torno de 1 nas três condições. Este fato significa que os corpos-de-prova serem saturados ou fazerem 25 ciclos de congelamento e degelo antes da realização do ensaio não influencia muito na sua resistência ao módulo de ruptura. Contudo, as amostras de Portugal já apresentam valores mais distantes de 1 para ambos os coeficientes de enfraquecimento (variando entre 0,30 e 0,73), o que já mostra que os corpos-de-prova têm uma resistência mais baixa sendo saturados ou fazendo 25 ciclos de congelamento e degelo antes da realização do ensaio.

Tendo em conta a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Módulo de Ruptura = 11,1 MPa), apenas o Crema Paraná tem uma resistência ao módulo de ruptura superior à média em todas as condições ensaiadas. Por outro lado, tanto o Filstone Beije MF como o Filstone Blue apresentam valores de resistência ao módulo de ruptura inferiores à média nas condições saturada e de congelamento e degelo, apesar de os valores do Filstone Beije MF serem próximos à média. Assim conclui-se que o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento de revestimento para as três condições ensaiadas. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue podem ser aplicados em condições secas, sendo que o Filstone Beije MF poderá ser aplicado nas demais condições, aplicando impermeabilizantes e resinas. O Filstone Blue não é aconselhado, de todo, a ser aplicado em ambientes com formação de gelo e degelo.

As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais (V_p) destes calcários são elevadas, situando-se entre os 5100 m/s e os 6300 m/s (tabela 6 e gráfico 3). Como seria de esperar, os valores de V_p para o Crema Paraná foram superiores comparativamente com os calcários de Portugal pelas mesmas características geológicas e

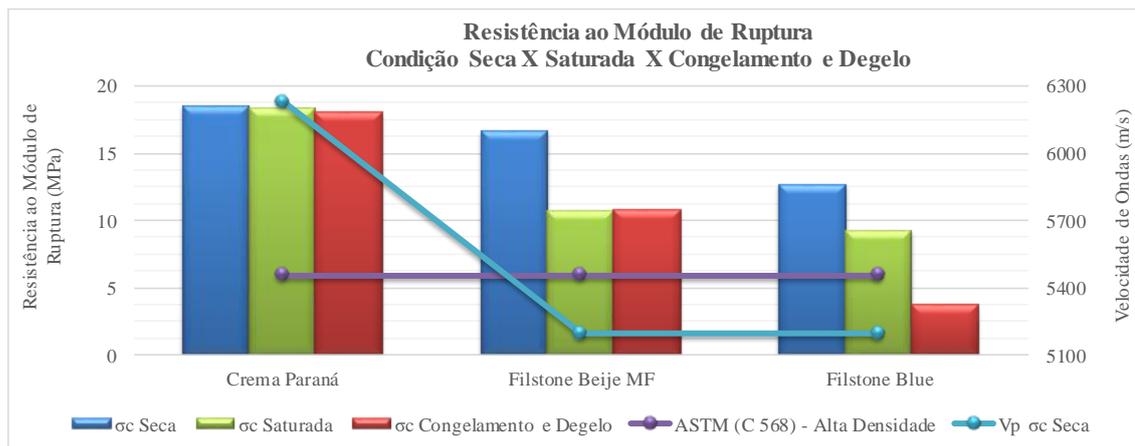
estruturais que os valores de módulo de ruptura são maiores. Em geral, o Filstone Beije MF tem valores inferiores que o Filstone Blue, pois apesar de ter maior quantidade grãos ele tem mais porosidades e, neste caso, a quantidade de grãos influencia menos na velocidade de propagação de ondas do que a porosidade.

Tabela 6 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência ao módulo de ruptura os três calcários em estudo.

Condição		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Seca	$V_p \sigma_c$ (m/s)	6228,40	5196,47	5196,60
	S	64,30	31,55	84,83
	δ (%)	1,03	0,61	1,63
	Anisotropia	3,62	2,34	5,76

*15 corpos-de-prova para cada calcário; $V_p \sigma_c$ (m/s) – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência ao módulo de ruptura; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Gráfico 3 – Correlações entre os valores médios da resistência ao módulo de ruptura nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade.



* $V_p \sigma_c$ – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência ao módulo de ruptura.

Flexão em 4 Pontos

Este ensaio realizou-se mediante a norma ABNT NBR 15845-7:2015, obtendo-se o valor da resistência das rochas quando submetidas a uma pressão flexora máxima até à sua

ruptura. Este parâmetro permite determinar a área e espessura mínimas segura para suportar esforços fletores das placas, quando aplicadas em fachadas ventiladas.

Este ensaio foi realizado utilizando 5 corpos-de-prova para cada uma das condições: seco, saturado e congelamento e degelo (seguindo a norma ABNT NBR 15845-4:2015). Deste modo foi possível obter os coeficientes de enfraquecimento K e R. Os resultados estão visíveis nas tabelas 3.7 e 3.8, assim como alguns valores calculados para a sua dispersão. No gráfico 4 são correlacionados os valores médios da flexão em 4 pontos com os respectivos valores das velocidades de onda. É de referir que dois corpos-de-prova do Filstone Beije MF e três corpos-de-prova do Filstone Blue não chegaram ao final dos 25 ciclos de congelamento degelo, portanto, a média ficou restrita ao valor dos restantes corpos-de-prova.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação. Contudo o calcário Filstone Beije MF tem os valores menos homogêneos por se tratar do calcário ora com mais ora com menos quantidade de cimento presente nos seus corpos-de-prova.

Tabela 7 – Valores médios da resistência à flexão em 4 pontos para os três calcários.

	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Seca (MPa)	15,00	11,49	11,13
S	1,04	4,37	0,67
δ (%)	6,90	38,00	6,05
Saturada (MPa)	10,83	7,82	6,48
S	1,52	2,22	0,81
δ (%)	14,01	28,33	12,50
R	0,72	0,68	0,58
Congelamento e Degelo (MPa)	15,27	8,17	4,73
S	1,13	2,00	1,44
δ (%)	7,38	24,50	30,52
K	1,02	0,71	0,43

*5 corpos-de-prova para cada calcário em cada condição; R – coeficiente de enfraquecimento hidráulico; K – coeficiente de enfraquecimento após 25 ciclos de congelamento/degelo; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; Filstone Beije MF apenas três corpos-de-prova chegaram ao final dos 25 ciclos de congelamento e degelo e Filstone Blue apenas dois.

Os valores de resistência à flexão em 4 pontos, como seria esperado, foram mais elevados para o Crema Paraná, pois ele é o calcário mais maciço, com mais matriz e menos grão, menos porosidade. O Filstone Blue é o que tem menores resistências, pois apesar de ser

menos poroso que o Filstone Beije MF, tem uma porosidade média e é o calcário de maiores granulações, menos homogêneas e com a matriz menos fina.

O coeficiente de enfraquecimento hidráulico (R) de valores abaixo de 1 (entre 0,58 e 0,72), o que significa que o fato de os corpos-de-prova serem saturados antes da realização do ensaio diminui a sua resistência à flexão em 4 pontos. O mesmo acontece para o coeficiente de enfraquecimento (K). Contudo, as amostras do Crema Paraná já apresentam valores próximos de 1, apesar de ligeiramente superior (1,02) é considerado que a realização dos 25 ciclos de congelamento e degelo não influenciam na sua resistência à compressão uniaxial. Uma vez mais pelo fato deste ser o calcário mais maciço, com mais matriz e menos grão, menos porosidade, não permitindo que o gelo altere a sua estrutura interna.

Tendo em conta a média dos valores obtidos o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento de revestimento. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados em fachadas aeradas, as suas placas deverão ter espessuras superiores a 3 centímetros. Pois estes dois calcários têm os valores mais baixos quando submetidos a ações conjuntas de compressão e tração, principalmente o Filstone Blue.

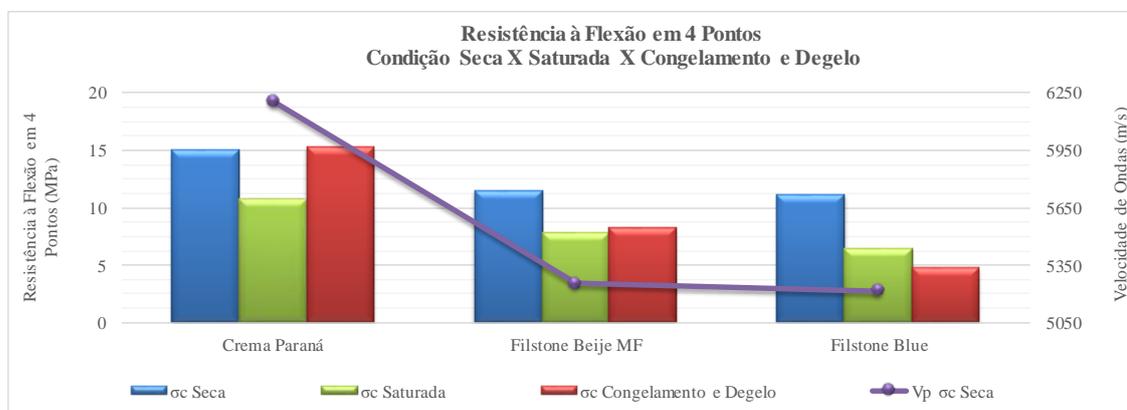
As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais (V_p) destes calcários são elevadas, situando-se entre os 5050 m/s e os 6250 m/s (tabela 8 e gráfico 4). Como seria de esperar, os valores de V_p para o Crema Paraná foram superiores comparativamente com os calcários de Portugal pelas mesmas características geológicas e estruturais que os valores de resistência à compressão uniaxial terem sido mais elevados. Exceto na condição seca, o Filstone Beije MF tem valores mais altos que o Filstone Blue, pois apesar de ter maior porosidade ele tem maior quantidade de grãos e, neste sentido, a quantidade de grãos influencia mais na velocidade de propagação de ondas do que a porosidade.

Tabela 8 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à flexão em 4 pontos dos três calcários em estudo.

Condição		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Seca	$V_p \sigma$ (m/s)	6206,20	5253,27	5217
	S	47,66	96,17	199,91
	δ (%)	0,77	1,83	3,83
	Anisotropia	2,73	7,58	11,87

*15 corpos-de-prova para cada calcário; $V_p \sigma$ (m/s) – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à flexão em 4 pontos; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Gráfico 4 – Correlações entre os valores médios da resistência à flexão em 4 pontos nas condições seca, saturada e após 25 ciclos de congelamento e degelo, com a velocidade de ondas na condição seca, para os três calcários em estudo, com o valor de referência de resistência da ASTM C 568 (2010) para calcários de alta densidade.



* V_p σ_c – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à flexão em 4 pontos.

Impacto de Corpo Duro

Com a simulação da queda de objetos pesados em placas de rocha obteve-se o valor das suas resistências, seguindo as normas da ABNT NBR 15845-8:2015 assim como um método experimental do autor. Este parâmetro é muito usado para avaliação da resistência de rochas aplicadas à pavimentação interior e exterior que estejam sujeitas à queda de objetos.

Na tabela 9 estão explanados os valores médios dos três calcários para as duas situações, alguns valores calculados para as suas dispersões e os valores de referência de Casal Moura (2007). No gráfico 5 estão representados os valores médios da resistência ao impacto de corpo duro nas duas situações ensaiadas, confrontados com a quantidade cimento observado em lâmina delgada, para os três calcários.

Os valores de Casal Moura (2007) são apenas para o ensaio seguindo a norma, sendo que os três calcários satisfazem o intervalo recomendado. Como seria de esperar, os resultados obtidos no método experimental do autor são mais elevados comparativamente com os resultados seguindo a norma e os valores obtidos encontram-se próximo do limite superior do intervalo recomendado ou acima deste intervalo. Por isso, em ambos os casos os três calcários podem ser usados como rochas de revestimento interior e exterior que estejam sujeitas à queda de objetos.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação. Contudo o calcário Filstone Beije MF tem os valores

menos homogêneos por se tratar do calcário ora com mais ora com menos quantidade de cimento presente nos seus corpos-de-prova.

O Crema Paraná é o calcário que tem uma menor resistência para este ensaio, seguindo-se o Filstone Beije MF e o Filstone Blue, com a maior resistência dos três calcários.

Tabela 9 – Valores médios da resistência ao impacto de corpo duro seguindo a norma ABNT e seguindo um método experimental do autor para os três calcários em estudo.

	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Resistência ao impacto de corpo duro seguindo a norma ABNT (m)	0,32	0,41	0,45	(0,50-0,20)
S	0,03	0,08	0,04	n.e.
δ (%)	8,56	20,00	7,86	
Resistência ao impacto de corpo duro seguindo um método experimental do autor (m)	0,48	0,53	0,68	(0,50-0,20)
S	0,06	0,08	0,07	n.e.
δ (%)	11,88	14,31	9,66	

*5 corpos-de-prova para cada calcário seguindo a norma ABNT e número de corpos-de-prova variáveis para cada calcário seguindo um método experimental do autor; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; n.e. – não especificado.

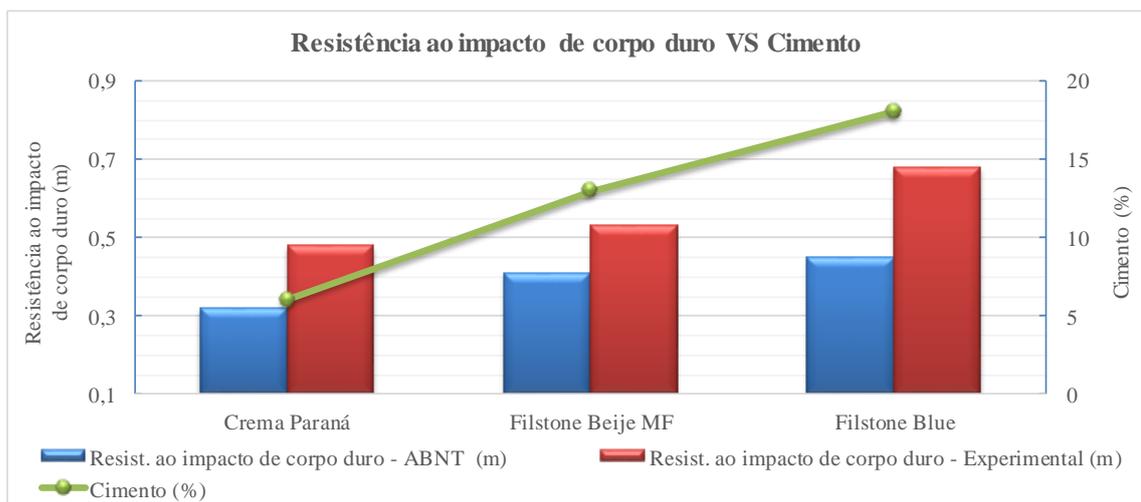
Para este ensaio pode-se concluir que o grau de cimentação é mais importante do que a porosidade e a granulção. Pois o Crema Paraná é o que possui menor resistência ao impacto uma vez que tem a menor quantidade de poros, a menor quantidade de grãos que é balanceada pela maior quantidade de matriz e é o que tem menor grau de cimentação, conferindo uma menor coesão dos grãos e dos corpos-de-prova. Já o Filstone Beije MF é o que tem maior quantidade de poros, maior quantidade de grãos e um grau de cimentação intermediário, tendo então um valor intermediário de resistência ao impacto. O Filstone Blue é o que tem a quantidade média de poros e de grãos e o que possui maior resistência ao impacto, uma vez que é o que tem maior grau de cimentação e, por isso, confere uma maior coesão dos grãos e dos corpos-de-prova.

Outro fator importante é o grau de desenvolvimento do cimento, pois o do Crema Paraná é o menos desenvolvido, sendo microespático. O Filstone Beije MF apesar de ser microespático está em mosaico, conferindo assim uma maior coesão comparativamente ao

Crema Paraná. O Filstone Blue é o calcário que possui cimento mais desenvolvido, espático em mosaico, dando maior coesão em relação aos demais.

No cotidiano uma placa pode ser fraturada através de vários impactos de corpo duro, acumulando tensões até não resistir mais (ensaio seguindo a norma ABNT), ou apenas com um impacto de corpo duro (ensaio experimental do autor). Deste modo, optou-se por fazer um ensaio experimental do autor com o intuito de se comparar os dois resultados e de propor alterações na norma ABNT para que tenha em conta as duas situações. Verificou-se que nas duas situações o Crema Paraná é o que apresenta uma menor resistência ao impacto de corpo duro, o Filstone Beije MF tem uma resistência intermediária e o Filstone Blue é o que possui maior resistência a este ensaio. Como seria de esperar, através destes dois ensaios pode concluir-se que uma placa resiste mais a apenas um impacto do que cinco impactos seguidos, pois não acumula tensões que comprometem a sua estrutura interna. Assim, para que uma placa quebre com apenas um único impacto nos mesmos valores que quebra com a acumulação da energia de cinco impactos, é necessário que para as mesmas alturas o corpo duro seja mais pesado ou que o corpo caia de alturas maiores ganhando assim mais velocidade e energia.

Gráfico 5 – Representação gráfica da relação entre os valores médios da resistência ao impacto de corpo duro com a quantidade de cimento.



Tendo em conta a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Resistência ao Choque = 0,35 m), os três calcários têm uma resistência ao impacto de corpo duro superior à média para as duas condições ensaiadas, apesar do calcário Crema Paraná ter um valor ligeiramente inferior seguindo as condições da norma. Estes dados permitem concluir que os

três calcários poderão ser aplicados como elemento de pavimento interior e exterior que estejam sujeitas à queda de objetos. Para não se comprometer a segurança, o calcário Crema Paraná caso seja aplicado as suas placas deverão ter mais de 3 centímetros de espessura.

Coefficiente de Dilatação Térmica

Este ensaio realizou-se seguindo a norma ABNT NBR 15845-3:2015 para se determinar a variação de volume que a rocha sofre quando submetida às oscilações de temperatura, podendo dilatar ou contrair. Este parâmetro é recomendado para rochas que são utilizadas como ornamentação, principalmente externa exposta à ação direta do sol, situações de calor intenso ou sujeitas a grandes oscilações de temperatura. Assim pode-se dimensionar as juntas de dilatação de placas, painéis e ladrilhos e escolher o processo de ancoragem de placas.

Na tabela 10 estão explanados os valores médios dos três calcários e alguns valores calculados para as suas dispersões e os valores de referência de Casal Moura (2007). No gráfico 6 estão representados os valores médios do coeficiente de dilatação térmica com a porosidade aparente, para os três calcários.

Tendo em conta os valores de Casal Moura (2007) todos os resultados se encontram abaixo do intervalo recomendado, podendo, contudo, ser usados como rochas ornamentais.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação. Contudo o calcário Filstone Blue tem os valores menos homogêneos por se tratar do calcário de maior granulação e menos homogênea.

O Crema Paraná é o calcário que tem um maior coeficiente de dilatação térmica, seguindo-se o Filstone Blue e o Filstone Beije MF, com o menor valor. Deste modo, o Crema Paraná é o calcário que vai resistir mais às oscilações climáticas e o Filstone Beije MF o que vai resistir menos dos três calcários em estudo.

Tabela 10 – Valores médios do coeficiente de dilatação térmica dos três calcários.

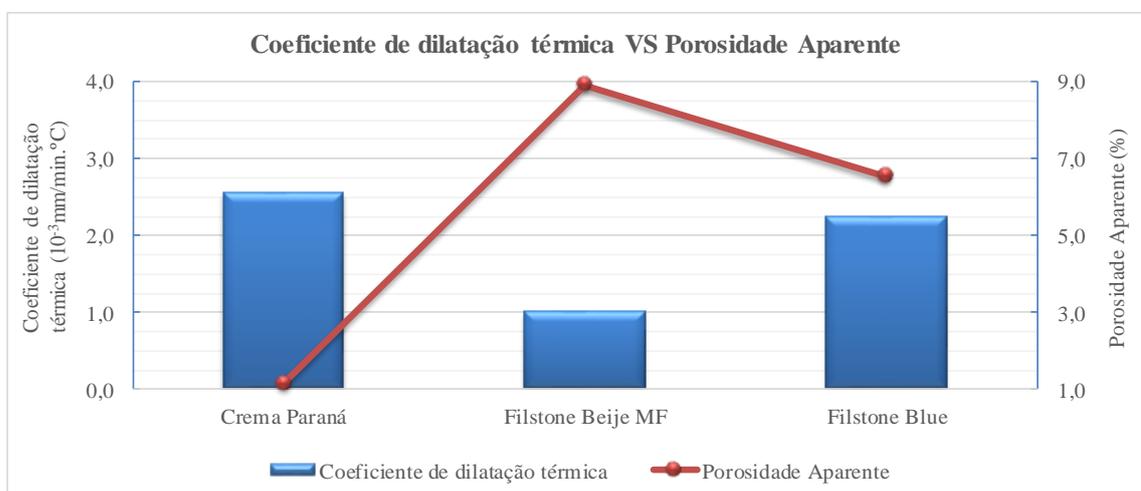
	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Coeficiente de dilatação térmica (10^{-3} mm/min.°C)	2,55	1,00	2,25	(7,1-3,0)
S	0,07	0,00	0,21	n.e.
δ (%)	2,77	0,00	9,43	

*2 corpos-de-prova para cada calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Em geral, os valores para este ensaio dependem de fatores como a composição mineralógica (essencialmente da calcita para o caso dos calcários), tamanho e dimensão dos grãos/cristais, anisotropia e porosidade. Rochas ricas em calcita têm coeficiente de dilatação térmica alto ($5,5 \cdot 10^{-3}$ mm/min.°C para calcários), o que não acontece nestes três calcários que têm valores bem abaixo. Como os três calcários em estudo apresentam uma constituição essencialmente de calcita este fator não explica as diferenças de valores. Nos três calcários não existem estruturas fortemente anisotrópicas, deixando de ser parâmetro que justifique as diferenças de valores. Quanto maior a granulação de um calcário, menor será a sua dilatação térmica. O calcário Crema Paraná apresenta uma menor quantidade e tamanho de grãos, levando a um maior coeficiente de dilatação térmica. O Filstone Blue tem o maior tamanho de grãos, no entanto tem menor quantidade de grãos relativamente ao Filstone Beije MF, fazendo com que tenha valores inferiores ao Filstone Blue. O aumento da porosidade reduz o coeficiente de dilatação térmica, pois os espaços vazios entre os minerais levam a uma redução do módulo de elasticidade. O Filstone Beije MF é o que tem maior porosidade aparente e, por isso, o menor valor para este ensaio. Como o Crema Paraná é o que apresenta a menor porosidade aparente dos três calcários é o que tem a maior dilatação térmica linear.

Tendo em conta a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Coeficiente de Dilatação Térmica = $4,1 \cdot 10^{-3}$ mm/min.°C), os três calcários têm um coeficiente de dilatação térmica inferior à média. Estes dados permitem concluir que os três calcários são de excelente qualidade, recomendando-se a sua aplicação a revestimentos de paredes e de pisos, tanto interiores como exteriores, mesmo em ambientes com grandes amplitudes térmicas.

Gráfico 6 – Representação gráfica da relação entre os valores médios do coeficiente de dilatação térmica com a porosidade aparente.



3.5 Conclusões

O Crema Paraná é considerado um calcário de alta densidade, enquanto que o Filstone Beije MF e o Filstone Blue consoante o ensaio são considerados de alta densidade ou de média densidade.

No ensaio de compressão uniaxial, com base na classificação ISRM (1979), o Crema Paraná é considerado muito resistente, enquanto que os calcários de Portugal são considerados resistentes.

O calcário Crema Paraná possui a maior densidade aparente seca e saturada, a menor porosidade aparente e absorção de água, a maior resistência à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura e à flexão em 4 pontos, para as três condições ensaiadas, as maiores velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova usados para os ensaios de compressão uniaxial, módulo de ruptura e flexão em 4 pontos, o mais alto coeficiente de dilatação térmica, no entanto apresenta a menor resistência ao impacto de corpo duro.

O calcário Filstone Beije MF apresenta a menor densidade aparente, tanto seca como saturada, a maior porosidade aparente e absorção de água, o mais baixo coeficiente de dilatação térmica, mas em geral tem resistências intermediárias à compressão uniaxial, módulo de ruptura e à flexão em 4 pontos, para as três condições ensaiadas, as intermediárias velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova usados para os ensaios de compressão uniaxial, módulo de ruptura, flexão em 4 pontos e intermediária resistência ao impacto de corpo duro.

Estes fatos mostram que a correlação entre os índices físicos e os resultados dos ensaios mecânicos nem sempre é direta e depende de fatores como heterogeneidades, granulação, cimento e compactação. Sendo o Crema Paraná o menos heterogêneo, com menores quantidades e dimensões de grãos, menor quantidade de cimento (microespático) e o mais compacto. Em relação aos três calcários, o Filstone Beije MF tem maior quantidade de grãos e heterogeneidade, quantidade de cimento (microespático com mosaico), compactação e dimensão de grãos intermediária.

Tendo em conta os valores de Casal Moura (2007), para os ensaios físico-mecânicos, conclui-se que apenas o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento estrutural e de revestimento (interiores e/ou exteriores), para as três condições ensaiadas. Por segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados deverão ser impermeabilizados e/ou resinados, principalmente em lugares úmidos e com formação de gelo, dando especial atenção ao Filstone Blue. As placas destes dois calcários quando aplicadas em revestimento deverão ter espessuras superiores a 3 cm. Estes dois calcários

podem ser aplicados em ambientes com grandes amplitudes térmicas, desde que sejam secos e/ou interiores e sem a formação de gelo.

No ensaio de impacto de corpo duro, como seria de esperar, os resultados obtidos no método experimental do autor são mais elevados comparativamente com os resultados seguindo a norma. Conclui-se que os três calcários poderão ser aplicados em pavimentos, pisos suspensos, escadas, parapeitos e peitoris (janelas e portas) que estejam sujeitas à queda de objetos. Para não se comprometer a segurança, a aplicação de placas do Crema Paraná deverá ter uma espessura superior a 3 cm (espessura convencional) e/ou ser aplicadas em zonas que não estejam sujeitas a quedas frequentes de objetos.

As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas (V_p) destes calcários são elevadas para as três dimensões de corpos-de-prova medidos, comparando com valores de outros trabalhos. Assim, conclui-se que estes calcários têm um reduzido grau de alteração e boa integridade física, principalmente o Crema Paraná.

Com a elaboração desta pesquisa deparou-se com a inexistência de normas com valores tabelados para calcários das diversas organizações de normalização internacionais. Sugere-se que seja feita uma compilação de vários trabalhos com calcários, o seu tratamento estatístico e tabelar valores comparativos, gerando dados para elaboração de normas técnicas sobre este tópico relevante.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por permitirem todas as condições para a realização da presente investigação. Ao Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM - NRES), à Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) e à Universidade de Aveiro (UA) por permitirem a execução das análises em questão.

Referências

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste, 2., 1977, Campina Grande, Anais.* Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, p.242-258. 1977.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C568:** Standard Specification for Limestone Dimension Stone. EUA, 2p. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2845:** Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of

Rock. EUA, 7p. 2005.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-1**: Rochas para revestimentos - Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-2**: Rochas para revestimentos - Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-3**: Rochas para revestimentos - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-4**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência ao congelamento e degelo. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-5**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-6**: Rochas para revestimentos - Determinação do módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos). Rio de Janeiro, 5p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-7**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos. Rio de Janeiro, 5p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-8**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

AZERÊDO, A. C. Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). **Comunicações Geológicas**, t. 94, p.29-51. 2007.

AZERÊDO, A. C. **Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica) - análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia**. Tese de Doutorado (não publicada), Dep. de Geologia, Faculdade de Ciências, Univ. Lisboa, + 36 ests. (2 vols), 366p. 1993.

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. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 225p. 2009.

BERTANI, R. T.; COSTA, I.G. & MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo

estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, *In*: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Petrobras, Rio de Janeiro, p.291-310. 1990.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Rochas ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: breve caracterização dos recursos, dos centros de produção e delimitação preliminar de áreas potenciais. **Boletim de Minas**, 47 (1), 22p. 2012.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* **Maciço Calcário Estremenho, Caracterização da situação de referência (relatório interno)**, 42p. 2011.

CASAL MOURA, A. **Mármore e calcários ornamentais de Portugal**. Instituto Nacional de Engenharia - INETI, Tecnologia e Inovação, 383p. 2007.

CASSAB, R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, 54, nº2, p.207-250. 1970.

DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In*: Ham, W. E. (Ed.). Classification of carbonate rocks, A Symposium. **American Association of Petroleum Geologists**, p.108-121. 1962.

FARIAS, P. R. C. *et al.* Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. **Roteiro de Excursão**, 43p. 1990.

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

FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifteamento da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p.196-207. 1987.

GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN. 2008**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2008.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. ISRM. Suggested methods for the determining the uniaxial compressive strength and deformability of rocks materials. **International Journal of Rock Mechanics**, v. 16, Abstract, Nova York. 1979.

KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In* **Geologia de Portugal no contexto da Ibéria** (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, p.317-368. 2006.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. LNEG. **Carta Geológica de Portugal na escala 1:1000000**, 3ªed, LNEG, Lisboa. 2010.

MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.

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

MONTANI, C. **XXVI Report marble and stones in the world 2014**. 2015 Aldus Casa di Edizioni in Carrara. 2015

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 88p. 2002.

NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. *In: Actas II Congresso Uruguaio de Geologia, Uruguai*, p.103-107. 1998.

NETO, O. C. P. *et al.* V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, Rio de Janeiro, p.357-369. 2007.

PROJETO ÁGUA SUBTERRÂNEA DO NORDESTE DO BRASIL. PROASNE. Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú. 2006. SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós- Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, Rio Grande do Norte, p.35-51. 2006.

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, Lisboa-Portugal, p.78-86. 1997.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. Rochas de Qualidade**, nº 127, São Paulo, p80-84. 1996.

SOARES, U. M.; ROSSET, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, nº55, 2003.

SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, 1982, Salvador, **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p.181-183. 1982.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

4 AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO SUPERFICIAL DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)

Artigo 2 - revista Anuário do Instituto de Geociências – B1

Autores

Joni Gaspar Marques, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: jonimarques@ua.pt

Irani Clezar Mattos, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: irani.mattos@ufc.br

José de Araújo Nogueira Neto, UFG – Universidade Federal de Goiás, Rua Mucuri, s/n – Setor Conde dos Arcos, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil. Contato e-mail: nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, CETEM - NRES – Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional do Espírito Santo, Campus do IFES, caixa postal 737, CEP 29311-970 Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil. Contato e-mail: leolysil@cetem.gov.br

Thiago Motta Bolonini, UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, CEP 29075-910 – Goiabeiras, Vitória-ES, Brasil. Contato e-mail: tboloniniufes@gmail.com

Resumo

Brasil e Portugal se encontram entre os dez maiores produtores mundiais de rocha ornamental. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue pertencem ao Membro Pé da Pedreira da Bacia Lusitaniana (Portugal), enquanto que o Crema Paraná pertence à Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte). Esta pesquisa objetiva uma avaliação do atrito superficial das três rochas carbonáticas supracitadas com vista a avaliar a sua melhor aplicação. Para o efeito foram realizados os seguintes ensaios: desgaste por abrasão Amsler, microdureza *knoop*, escorregamento e rugosidade, ao abrigo das normas da ABNT, CEN e de métodos experimentais do autor. Realizaram-se análises macro e microscópicas de três

calcários para se comparar com os resultados do atrito superficial, em especial: composição, quantidade e tamanho de grãos, compactação e porosidade. Estas análises estão concordantes com os ensaios de atrito superficial e os resultados destes ensaios, em geral, satisfazem os valores recomendados. O Crema Paraná tem o maior desgaste por abrasão Amsler e o Filstone Beije MF o menor. Os valores médios acumulados da microdureza *Knoop* são maiores para o Crema Paraná e menores para o Filstone Blue. Para a resistência ao escorregamento na condição seca os valores são maiores para Crema Paraná e menores para o Filstone Blue, enquanto que na condição saturada os valores são maiores para o Filstone Beije MF e menores para o Filstone Blue. A rugosidade superficial na condição seca é menor no calcário Crema Paraná e maior no Filstone Blue, enquanto que na condição saturada é maior para o Filstone Blue e menor para o Crema Paraná. Conclui-se que é aconselhada a sua aplicação como rochas de revestimento em pavimentos e degraus externos e internos, horizontais e de rampa, com muito tráfego, evitando lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas, porém sugere-se a adição de resinas protetoras no uso dos calcários Filstone.

Palavras-chave: Crema Paraná. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Rocha Ornamental. Coeficiente de Atrito Superficial.

Abstract

Brazil and Portugal are among the ten largest producers of ornamental rock in the world. Filstone Beije limestones MF and Filstone Blue belong to the Member of Pedreira da Pedreira of the Lusitaniana Basin (Portugal), while the Paraná Crema belongs to the Jandaíra Formation of the Potiguar Basin (Rio Grande do Norte). This research aims at an evaluation of the surface friction of the above mentioned three carbonate rocks in order to evaluate its better application. For this purpose, the following tests were performed: Amsler abrasion wear, knoop microhardness, slip and roughness, according to ABNT, CEN and experimental methods of the author. Macro and microscopic analyzes of three limestones were carried out to compare with the results of surface friction, in particular: composition, quantity and grain size, compaction and porosity. These analyzes are consistent with the surface friction tests and the results of these tests, in general, meet the recommended values. The Parana Cream has the highest Amsler abrasive wear and the Filstone Beije MF the smallest. The average values of the Knoop microhardness are higher for the Paraná Cream and lower for the Filstone Blue. For the resistance to slipping in the dry condition, the values are higher for Parma Cream and lower for Filstone Blue, while in the saturated condition the values are higher for Filstone

Beije MF and lower for Filstone Blue. The surface roughness in the dry condition is lower in the Paraná Cream limestone and higher in the Filstone Blue, while in the saturated condition it is higher for the Filstone Blue and lower for the Paraná Cream. It is concluded that it is advised to apply as cladding rocks on external and internal floors, horizontal and ramp, with a lot of traffic, avoiding humid places and with high rainfall rates, but it is suggested the addition of protective resins in the use of the Filstone limestones.

Key-words: Paraná Cream. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Dimension Stone. Surface Attriter Coefficient.

4.1 Introdução

A rocha é um recurso geológico que é usado desde os primórdios. Inicialmente mais para uma função estrutural, mas desde há uns séculos que tem vindo a crescer o seu uso com fim de ornamentação. Segundo Montani (2015), a extração mundial de rochas ornamentais quase que quadruplicou nos últimos 20 anos, tendo um crescimento de 14% por ano com uma tendência duradoura.

Tanto o Brasil como Portugal são dotados de rochas ornamentais de excelentes qualidades que têm sido aplicadas por todo o mundo e, por isso, se têm tornado cada vez mais uma referência mundial como produtores deste recurso. Portugal é conhecido há muitos anos no mercado pelos seus mármore e calcários. O Brasil é conhecido pela sua diversidade de granitóides, porém os seus mármore e calcários também têm crescido muito neste mercado.

Além da crescente procura de rochas ornamentais tem existido avanços significativos em todas as fases do processo: extração, beneficiamento, aplicação e manutenção. No entanto, estes avanços poderiam ser mais eficientes e acompanhar a crescente demanda das rochas ornamentais através de uma melhor caracterização.

A aceitação de uma rocha para ornamentação e/ou revestimento além da aparência estética, da arte de trabalhar a rocha e da economia, depende da natureza geológica e das propriedades físico-mecânicas, químicas, meio poroso e alterabilidade.

No entanto, a inadequada aplicação e manutenção de rochas ornamentais, as variações ambientais, a ação antrópica e a falta de conhecimento das características das rochas podem levar a adversidades que alteram as suas propriedades, tornando-se crucial efetuar estudos técnicos para prevenção e manutenção da sua estética decorativa.

Assim, o presente estudo teve por objetivo a caracterização macro e microscópica e do atrito superficial de três calcários utilizados no mercado de rochas ornamentais (dois de

Portugal e um do Brasil); comparar e correlacionar os resultados entre si e avaliar se satisfazem os vários requisitos necessários para a sua aplicação no setor e quais as suas melhores opções de aplicação como rocha ornamental.

4.2 Contexto Geográfico e Geológico

As duas variedades carbonáticas de Portugal em estudo, com os nomes comerciais “Filstone Beije MF” e o “Filstone Blue”, foram coletadas na pedreira “Filstone Natural” que se encontra a cerca de 15 Km a Sul de Ourém (Santarém, Portugal), ver figura 19. Estes calcários estão inseridos na Bacia Lusitaniana (BL), Maciço Calcário Estremenho (MCE), Formação de Santo António-Candeeiros e Membro de Pé da Pedreira (AZERÊDO, 1993, 2007; CARVALHO *et al.*, 2012).

A variedade carbonática do Brasil em estudo, com o nome comercial “Crema Paraná”, foi coletada na pedreira “Mineração Apodi” que se encontra a cerca de 15 Km a Norte de Apodi (Rio Grande do Norte – RN, Brasil), ver figura 20. Este calcário está inserido na Bacia Potiguar (BP), Grupo Apodi e Formação Jandaíra.

Membro Pé da Pedreira

A Bacia Lusitaniana, uma bacia sedimentar intracratônica resultante da fragmentação da Pangeia e abertura do Oceano Atlântico, localizada no bordo oeste da microplaca Ibérica, alongada em uma direção NNE-SSW, tendo 250-330 Km de comprimento e 100-150 Km de largura (AZERÊDO, 1993), ver figura 19.

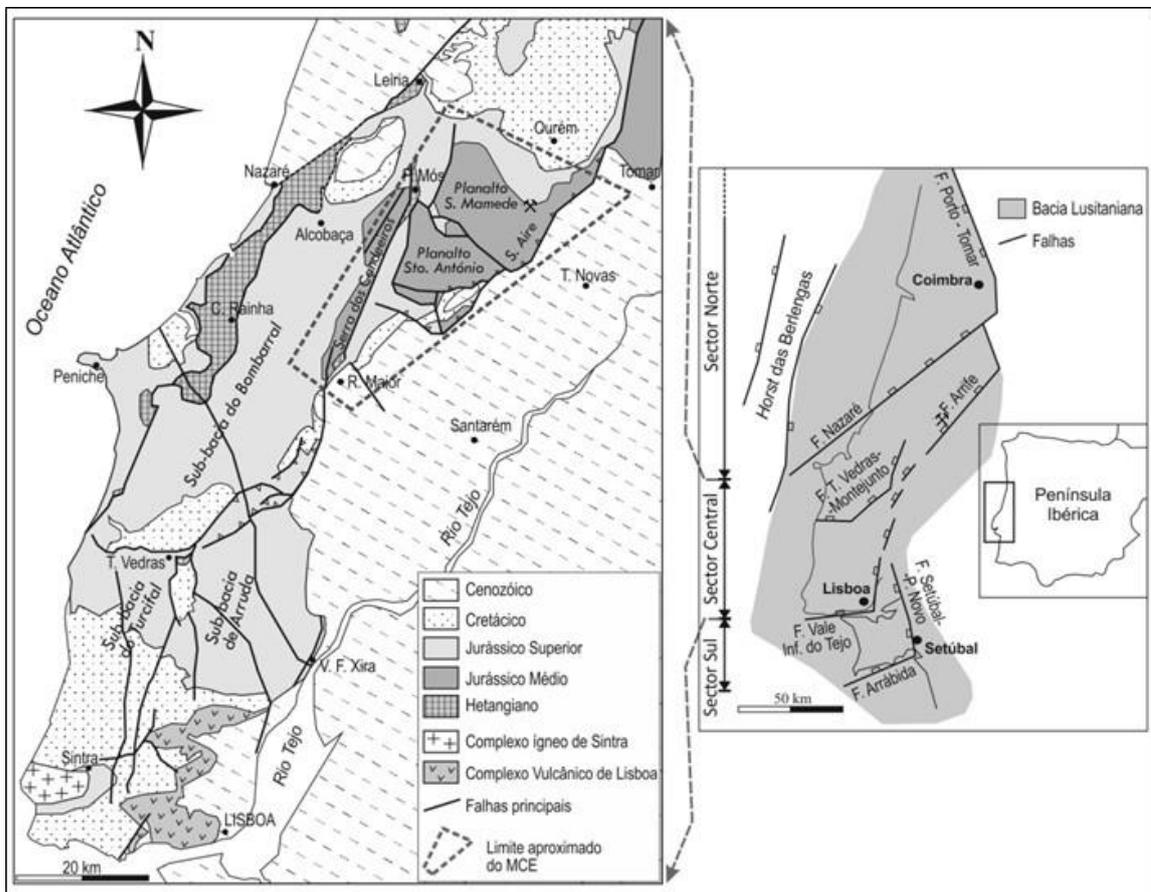
Esforços compressivos soergueram uma unidade geomorfológica, alongada de direção NE-SW e com cerca de 750 Km², o Maciço Calcário Estremenho (MCE). É compartimentado em três blocos soerguidos (Figura 19): Serra do Candeeiros, Planalto de Santo António e Planalto de São Mamede que continua até à Serra d’Aire.

O Membro de Pé da Pedreira consiste de uma fácies de rampa interna com calcários de alta energia gerados num paleoambiente de ilha-barreira, com idade Batoniana, aflorando em três manchas principais: Calcários de Pé da Pedreira, Calcários oolíticos de Reguengo do Fetal e Calcários oolíticos de Casal Farto.

Este Membro aparece sob a forma de corpos maciços lenticulares no seio dos calcários micríticos da Formação de Serra de Aire que se interdigitam com os calcários das Formações de Serra de Aire e de Chão de Pias e com os Membros de Cadoçal e de Moleanos. Os níveis superiores encontram-se truncados pelas rochas sobrejacentes, individualizando-se, localmente, estratos entre 1 e 2 m, sendo que a espessura do Membro vai dos 15 aos 150 m. É

composto por calcários calciclásticos, micríticos, oo/bio/intra/pelsparitos “*grainstone*” a “*wackestone*” de cor branca, creme e tons de azul. A granulação varia de fina a grosseira, muito ricos em bioclastos, correspondendo, por vezes a biostromas descontínuos. Apresentam diversas estratificações e laminações e superfícies de erosão e de reativação. Ocorrem níveis espessos com intensa bioturbação, intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, recristalizações e geodos.

Figura 19 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg *et al.* (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).



Segundo Carvalho *et al.* (2011), na história evolutiva da BL também ocorreram importantes episódios magmáticos que estão dispersos por toda a Bacia, com exceção da Serra de Aire e Planalto de São Mamede.

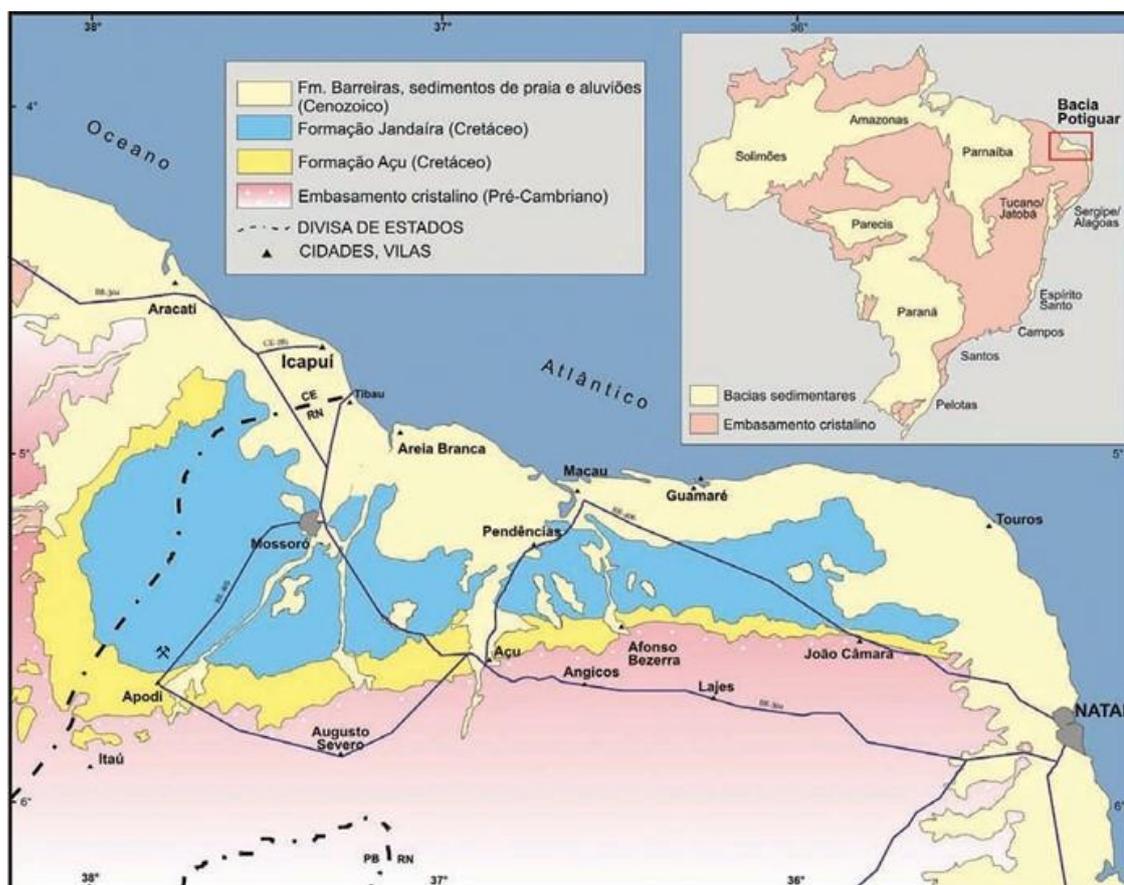
Formação Jandaíra

A Bacia Potiguar (BP), uma bacia sedimentar rifte intracontinental formada pela separação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. Localiza-se na

interseção da Margem Continental Leste Brasileira com a Margem Continental Equatorial, apresentando uma área total estimada de 60.000 Km² (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1987; MATOS, 1992; ALMEIDA *et al.*, 1977), ver figura 20.

Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008) dividiram a Bacia Potiguar, da base para o topo, em três Grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha.

Figura 20 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS *et al.*, 1990), com a localização da área (martelos).



A Formação Jandaíra consiste de uma sequência transgressiva carbonática, marinha de águas quentes, rasas e agitadas, da fase drifte da evolução da Bacia, com idade Turoniana-Campaniana (SOARES *et al.*, 2003). Tem um limite transicional na base com as Formações Açú e Quebradas e ocorre localmente interdigitada com a base da Formação Ubarana (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003). Exibe uma direção W-E mergulhando suavemente para NE e uma espessura média entre 250-300 m (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982; PROASNE, 2006).

Os estratos deste pacote carbonático têm mergulhos suaves e clinofomas sigmoidais típicos de bacias de margem em rampa, dividindo-se em duas sequências

deposicionais: a primeira é formada por *grainstones* bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por *wackestones* e *mudstones* na porção distal; e a segunda caracteriza-se pelo domínio da sedimentação carbonática em toda a bacia (NETO *et al.*, 2007). Composto por calcários microcristalinos, calcarenitos e calcilutitos bioclásticos, com nível evaporítico na base, apresentam uma coloração que varia entre branco, creme e cinza, são finos, compactos, duros, com textura detrítica, possuindo um conteúdo ricamente fossilífero e intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, podendo ter recristalizações e geodos (CASSAB, 2003).

Na sua história tectônica também fazem parte as Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau que representam três eventos magmáticos.

4.3 Materiais e Métodos

Para esta pesquisa foram utilizadas amostras dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue provenientes de dois níveis estratigráficos diferentes da mesma frente de lavra da pedreira Filstone no núcleo de Casal Farto da Bacia Lusitânica (Portugal) e amostras do calcário Crema Paraná da frente de lavra da Mineração Apodi na Formação Jandaíra da bacia Potiguar (Brasil).

Para a contextualização geológica foram efetuadas etapas de campo com a coleta de amostras e uma breve caracterização das pedreiras.

O estudo petrográfico foi realizado no Laboratório de Microscopia Ótica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), usando objetivas de ampliações 4X, 10X, 20X e 40X do microscópio ótico de luz transmitida de marca *Leica* e modelo *EC 3*. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal).

Na descrição das lâminas delgadas seguiram-se os procedimentos estipulados na norma técnica brasileira (ABNT NBR 15845-1:2015) e as orientações de Navarro (1998, 2002) e de Rodrigues *et al.* (1996, 1997), tendo o cuidado de destacar as características que poderiam influenciar nos resultados físico-mecânicos, tais como: aspectos composicionais, texturas, estruturas, disposição e arranjo dos grãos e relações, tipos, quantificação, preenchimento e comunicabilidade de porosidades.

Para a classificação da porosidade utilizou-se o trabalho de Choquette & Pray (1970). Considerando a classificação da textura deposicional foi avaliado segundo a proposta de Dunham (1962). Correlacionando a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos adotou-se a nomenclatura de classificação de Folk (1959).

A avaliação do atrito superficial dos materiais resultou da comparação entre os ensaios de determinação da resistência ao escorregamento através de um pêndulo Britânico (BS EN 14231:2003), rugosidade (segundo a metodologia do laboratório), determinação do desgaste por abrasão Amsler (ABNT NBR 12042:2012) e determinação da microdureza Knoop (BS EN 14205:2003). Todos estes ensaios e respectivos corpo-de-prova foram confeccionados no Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM-NRES).

O ensaio de rugosidade foi efetuado usando as placas polidas para o ensaio de determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos, após a realização do ensaio de escorregamento. Para isso foram utilizadas as duas delimitações de área que tinham sido previamente marcadas, em cada placa, relativamente à superfície de contato do pêndulo. Cada área corresponde a uma direção de movimento do pêndulo para o ensaio de escorregamento e, conseqüentemente para as mesmas direções de leitura da rugosidade. Como não existe intervalo de confiança, norma seguida pelo laboratório e como em medições experimentais do autor deram valores muito diferentes, optou-se por fazer 50 medidas em cada área, seguindo as direções de leitura para o ensaio de escorregamento.

Para a medição ser feita o sensor do rugosímetro utilizado (TR200) deve ser colocado diretamente sobre a superfície da amostra, onde ele vai traçar um percurso de leitura de 0,8 mm, numa velocidade constante e com uma escala de +/- 40 micras, para medir a rugosidade média - Ra. Durante o percurso de leitura a rugosidade da superfície causa um deslocamento no sensor, resultando numa mudança do seu valor indutivo das bobinas internas que por sua vez geram um sinal analógico proporcional à variação da rugosidade superficial medida. Este sinal é recebido no circuito de amplificação, processado através de filtros digitais e enviado para o *display*.

4.4 Resultados e Discussão

4.4.1 Aspectos Macro e Microscópicos

As características macro e microscópicas dos três calcários estudados nesta investigação são aqui abordadas, culminando com uma tabela síntese (tabela 11)

Filstone Beije MF

Em amostra de mão apresenta uma estrutura maciça, muito baixa anisotropia, coloração esbranquiçada a creme (se úmida), granulação homogênea e muito fina, formada por uma matriz microcristalina carbonática (figura 21). As dimensões dos seus grãos são

pequenas de tal ordem que não se conseguem diferenciar ao olho humano. Observam-se veios e geodos calcíticos, estilólitos mais ou menos oxidados e alguns poros como resultado de dissolução sob pressão (figura 21).

Figura 21 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico.



É uma rocha compacta, com uma granulação homogênea, em que, os grãos transportados variam de 0,125 mm a 0,25 mm, podendo atingir os 0,5 mm e o cimento varia entre 0,005 e 0,03 mm (microespato), sob a forma de mosaico, figura 22. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes penetrativo (figura 22 B, D, E e F).

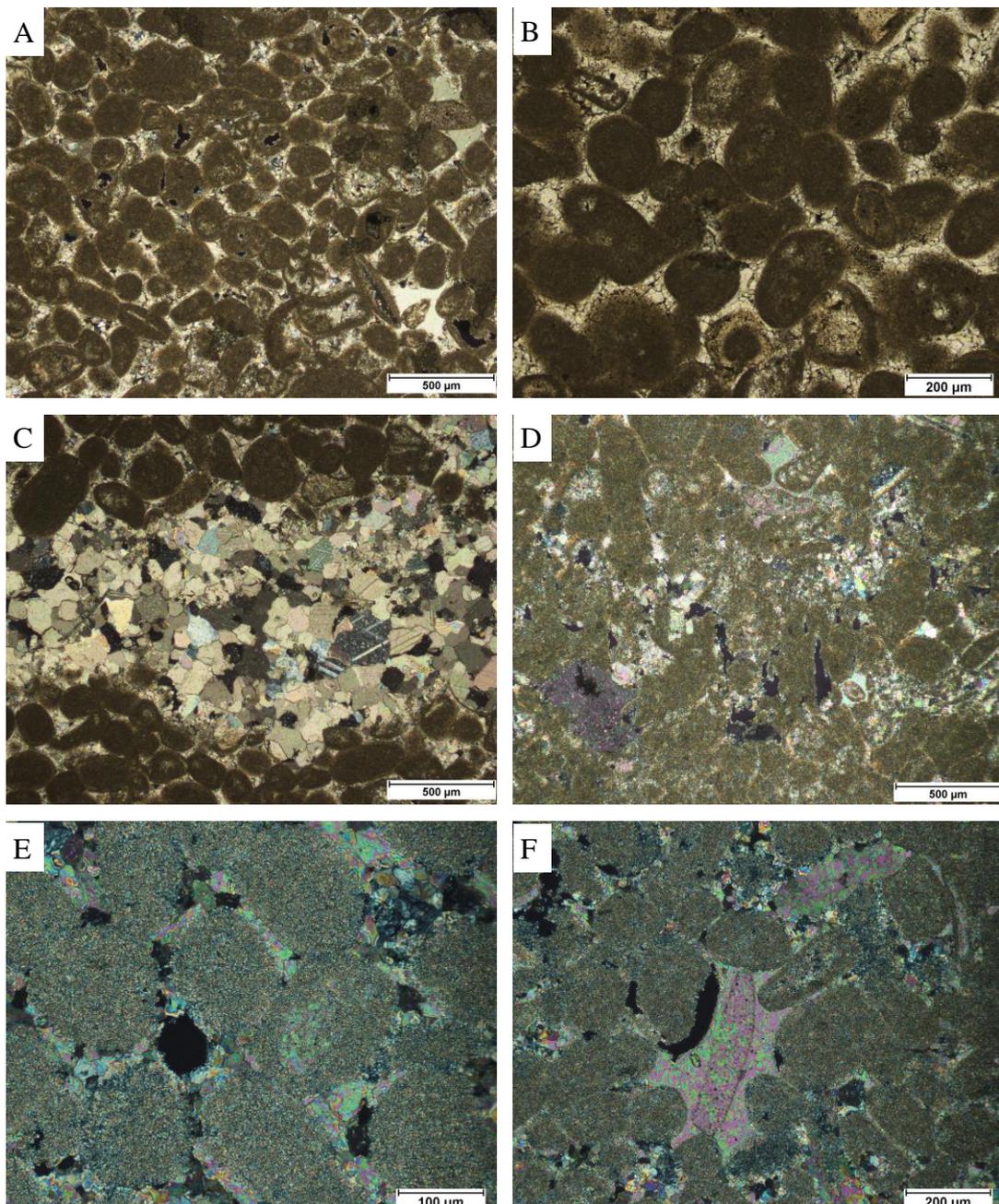
A sua constituição consiste em cerca de: 47% de pelóides, 8% de oóides, 7% de intraclastos, 13% de biolastos (sobretudo foraminíferos, algas e equinodermes, figura 22 B e D), 13% de cimento microespático e 4% de lama microcristalina. A maioria dos seus grãos têm forma esférica a elíptica e apresentam-se bem calibrados com o tamanho, em média, variando entre 0,125-0,25 mm. Assim, segundo a classificação textural de rochas sedimentares de Folk (1959), é considerado um pelsparito. São observados veios calcíticos, estilólitos, onde os grãos têm contatos penetrativos ao seu redor, e algumas recristalizações de calcita microespática e micrítica, pontualmente espática, dentro dos fósseis (figura 22 C e D). A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970), possui porosidade baixa (8%), apesar de ser a mais porosa das três amostras; secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos que aumenta a porosidade da rocha e pelo crescimento sintaxial que a faz diminuir); intragranular; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo), atingindo algumas vezes a dimensão do mesoporo pequeno (0,0625 a 0,5 mm), figura 14 A, E e F.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é

considerado um *packstone*.

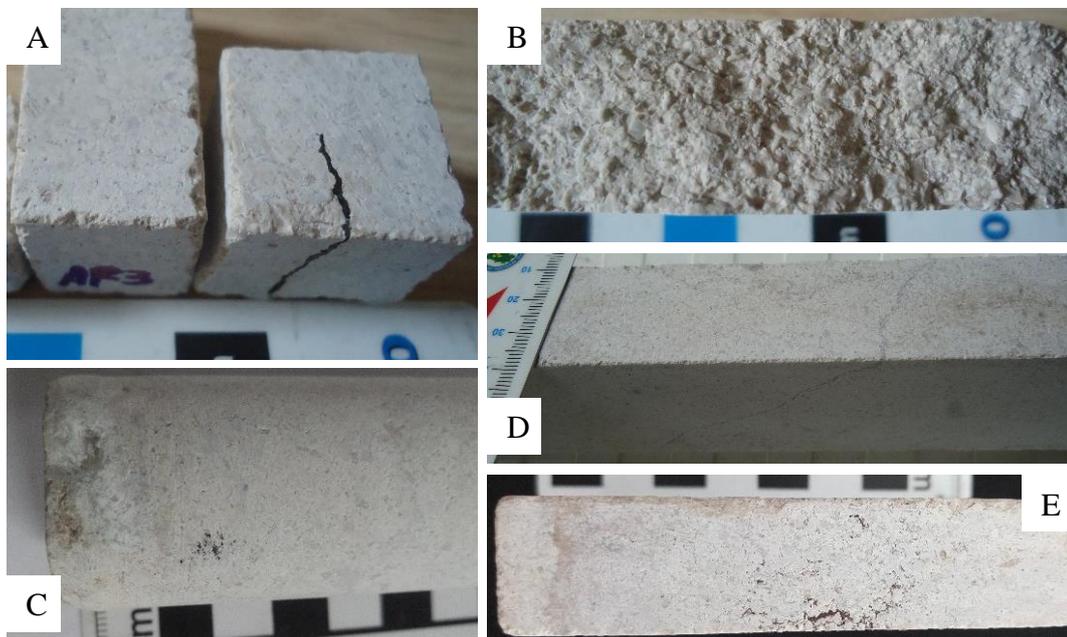
Figura 22 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).



Filstone Blue

Macroscopicamente possui estrutura maciça, com anisotropia muito baixa, coloração cinzento/azulado a creme (especialmente quando manchada ou úmida). A sua granularidade é heterogênea (Figura 23 B). A maioria dos grãos apresentam-se arredondados e alongados, principalmente os bioclastos, e em alguns grãos a sua região central é mais microcristalina em relação à periferia. Além dos bioclastos é possível identificar pelóides e veios e geodos calcíticos (figura 23 A, B e D). Os clastos contatam entre si, sustentando-se entre eles, tendo um cimento microcristalino carbonático a preencher os espaços vazios. Por vezes observam-se estilólitos com grandes concentrações de óxidos, sulfetos e compostos orgânicos. (Figura 23 C, D e E). Em lupa, consegue-se observar cavidades inter- e intra-granulares com crescimentos botroidais, confirmando que são porosidades e não espaços vazios como resultado do processo de corte da amostra.

Figura 23 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração bege, coloração mais cinza na ponta esquerda.



Petrograficamente, a granulação é heterogênea, os grãos apresentam-se arredondados e alongados, muitas vezes com estruturas internas preservadas e na maioria estão preenchidos com calcita microcristalina, porém alguns deles possuem recristalizações microespáticas a espáticas na porção mais central das suas estruturas e calcita microcristalina

na periferia (figura 24 A). Em geral, os grãos desta rocha variam entre 0,25 mm e 1 mm, podendo atingir os 3 mm. O cimento tem dimensões superiores a 0,03 mm (espato) e está organizado sob a forma de mosaico.

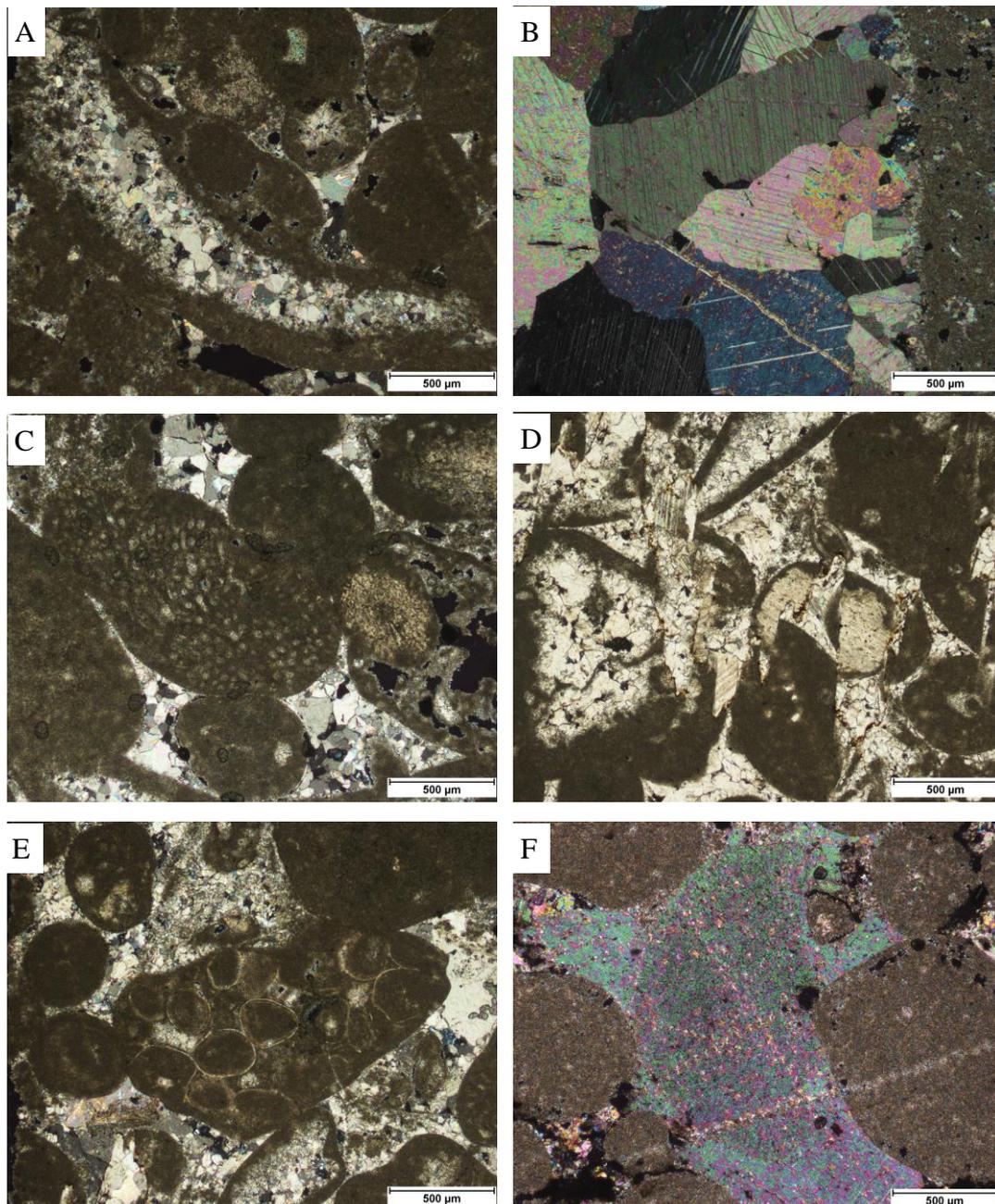
Este calcário é composto por cerca de 39% de fragmentos de bioclastos de diversas espécies (equinodermes, algas moluscos e foraminíferos, figura 24 C), 20% de pelóides, 8% de intraclastos (tendo encontrado agregados de grãos cimentados – *grapestones*, figura 24 E), 18% de cimento espático, 6% de lama microcristalina e 3% de oóides. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes suturados (figura 24 A, C e D). Contém a presença de aglomerados de cor escura (compostos orgânicos) disseminados inter- e intra-grãos. Há a presença de estilólitos e próximo deles os grãos são mais penetrativos e ocorrem concentrações de compostos de cor castanha/laranja (óxidos, hidróxidos e matéria orgânica) e de cor mais escura (sulfetos de ferro), figura 24 D. Observam-se dissoluções no contato entre grãos como resultado da passagem de fluidos subsaturados em CaCO_3 nos poros da rocha, podendo gerar porosidades secundárias e variar a permeabilidade e a porosidade primária das rochas. Ocorrem recristalizações inter e intragrãos, cimento carbonático micro a macrocristalino que preenche os espaços intersticiais entre os grãos. São encontrados *vugs* preenchidos por cristais de calcita e fraturas preenchidas por calcita pervasiva (figura 24 B).

Estas características sugerem que a compactação e a dissolução inicialmente menos intensa é caracterizada pela aproximação dos grãos e pela percolação pervasiva de fluidos intersticiais pela rocha, entre os quais hidrocarbonetos, permanecendo alguns aglomerados disseminados no interior dos grãos. Posteriormente deu-se uma fase de compactação e dissolução sob pressão mais intensas levando à perda de grande volume de constituintes carbonáticos da rocha, tendo sido solubilizados e exportados, e acumulação de constituintes insolúveis da rocha nas superfícies estilolíticas (figura 24 D). A matéria orgânica disseminada pela rocha é interpretada como hidrocarbonetos muito oxidados do tipo betume, concordando com relatos de exsudações oleosas na rocha quando cortada. Por fim, ocorreu a precipitação do fluido saturado em carbonato no interior dos grãos sob a forma de microcristais de calcita (recristalização) e a formação do cimento nos interstícios dos grãos. Os espaços vazios no interior de grãos e do cimento comprovam que a recristalização foi incompleta. A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *grainstone*.

Segundo a classificação textural de Folk (1959) é considerado um biopelsparito.

Figura 24 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (*grapestone*) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados).

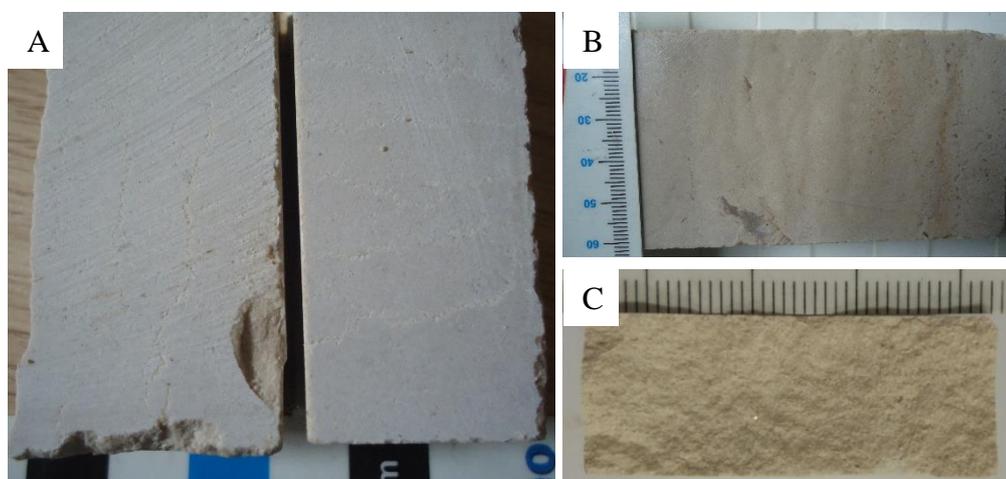


Em geral, segundo Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade baixa (6%); secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos e formação dos agregados litoclásticos, *grapestones*, fazendo aumentar a porosidade da rocha, e pelo crescimento sintaxial que faz diminuir esta porosidade); intragranular e intercrystalina; com um tamanho de poro entre 0,0625 a 0,5 mm (mesoporo pequeno), figura 24 B, E e F.

Crema Paraná

Em termos macroscópicos exibe uma estrutura maciça, com baixa anisotropia, sendo mais perceptível quando úmidos, e uma coloração creme claro quando estão secos e creme quando estão úmidos (figura 25 A e B). A sua granulação é homogênea e muito fina, sendo constituída por uma matriz microcristalina carbonática (figura 25 C). Os grãos apresentam pequenas dimensões, sendo apenas visíveis alguns fósseis de maiores dimensões e alguns veios e geodos de calcita. Observam-se estilólitos com concentrações de óxidos e hidróxidos, e alguns poros resultantes de dissolução (figura 25 B).

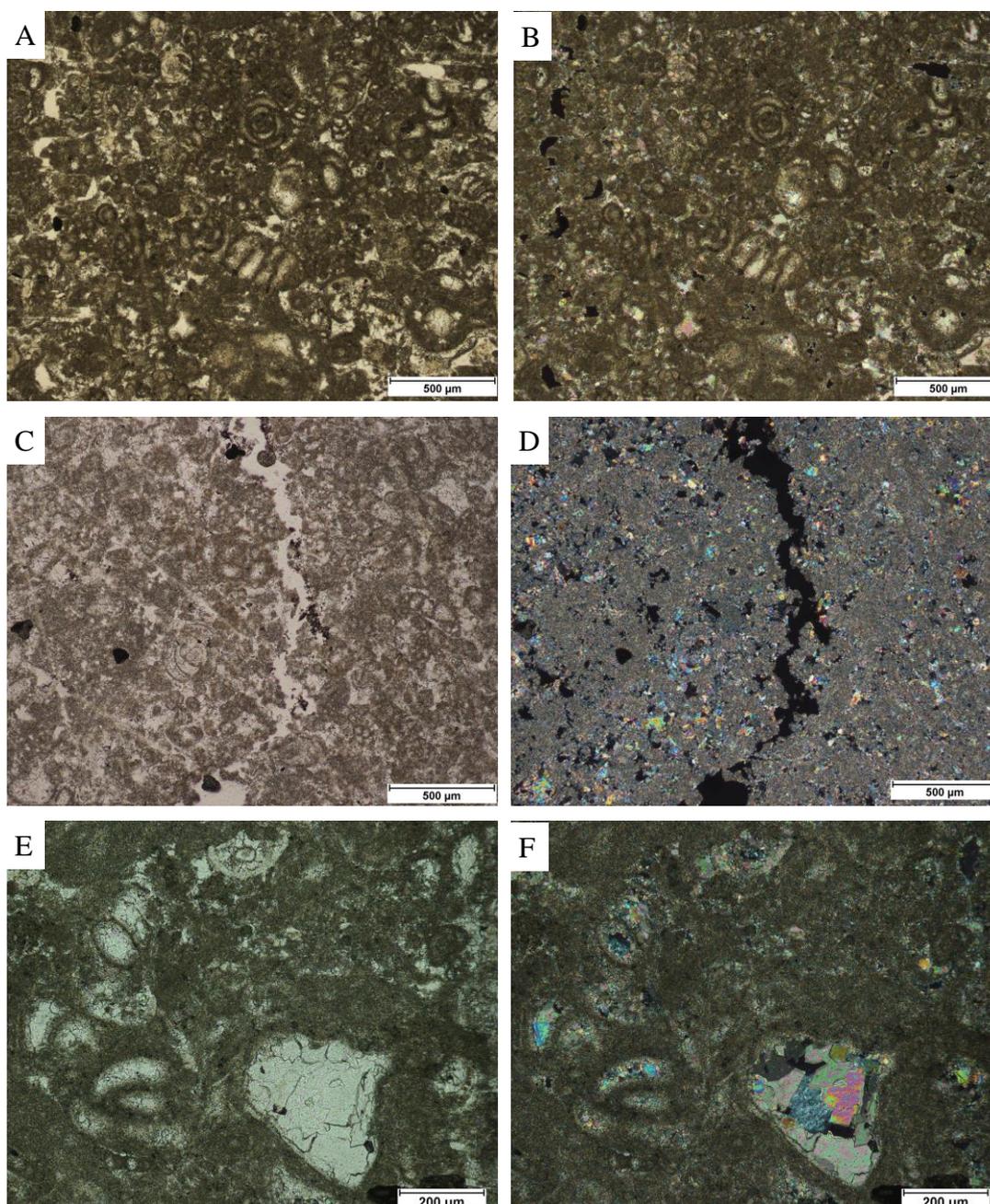
Figura 25 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.



Este calcário compacto tem uma matriz homogênea com o tamanho dos grãos a variar entre 0,062 mm e 0,25 mm, podendo atingir os 0,4 mm e a matriz possui tamanho inferior a 0,005 mm (micrítica), tendo algum cimento microespático (0,005-0,03 mm), figura 26 A, B, C e D. Possui um abundante conteúdo fóssilífero (47%), essencialmente constituído por foraminíferos e gastrópodes, distribuídos homogeneamente em formas esféricas a elípticas e diâmetros variando entre 0,125-0,5 mm, em torno de 30% de matriz micrítica, 4% de intraclastos, 9% de pelóides e 6% de cimento microespático (figura 26 A e B). Em geral, o

contato entre grãos é difícil de se ver. São observadas fraturas abertas dispostas de forma irregular na massa rochosa e com espaçamentos heterogêneos (figura 26 C e D). Alguns fósseis apresentam-se levemente recristalizados em calcita microespática (figura 26 E e F). A compactação da rocha é considerada densa.

Figura 26 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente.



Segundo Folk (1959) é considerada uma rocha aloquímica micrítica, biomicrito.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962), é considerado um *wackestone*.

Em geral, segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade muito baixa (4%), sendo mais porosa próximo aos estilólitos; secundária (pela dissolução da lama e formação dos estilólitos durante a diagênese); intercrystalina; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo).

Tabela 11 – Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.

		Bacia Potiguar	Bacia Lusitaniana		
		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	
Textura	Estrutura	Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	
	Compactação	Densa	Densa/dispersa	Densa/dispersa	
	Granulação	Homogênea (0,062-0,25 mm)	Homogênea (0,125-0,25 mm)	Heterogênea (0,25-1 mm)	
	Contatos	Difícil distinção	Pôntual a Côncavo-convexo	Pôntual a Côncavo-convexo	
	Grãos (%)	60	75	70	
	Matriz (%)	30	4	6	
	Cimento (%)	6	13	18	
	Poros (%)	4	8	6	
Composição	Matriz	Micrítica	Micrítica	Micrítica	
	Cimento	Microespático	Microespático com mosaico	Espático com mosaico	
	Grãos	Bioclastos (%)	78	17	55
		Pelóides (%)	15	63	28
		Oóides (%)	0	11	5
		Intraclastos (%)	7	9	12
	Fratura / Estilólito	Aberta / sem estilólitos	Sem fratura / com estilólitos	Preenchidas por calcita (pervasiva) / com estilólitos	
Porosidade	Secundária; Intercristalina; Microporo – (<0,0625 mm)	Secundária; Intragranular; Micro a Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)	Secundária; Intragranular e intracristalina; Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)		
Observações		Veios calcíticos; Recristalizações microespáticas e micríticas			
Classificação	Dunham (1962)	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	
	Folk (1959)	Biomicro	Pelsparito	Biopelsparito	

4.4.2 Aspectos de Atrito Superficial

Os aspectos de atrito superficial são correlacionados entre os três calcários e, sempre que possível, com parâmetros macro e microscópicos, assim como com os valores estipulados como referência para cada ensaio.

Nas tabelas dos itens abaixo estão sintetizados os valores médios obtidos para os aspectos de atrito superficial dos três calcários em estudo, alguns valores calculados para as suas dispersões e valores referência. Estes valores também são representados em gráficos ao longo dos respectivos itens, facilitando a melhor visualização e correlação entre os diferentes parâmetros.

Desgaste por abrasão Amsler

Segundo Frazão (2002), uma rocha será mais desgastada quanto menor for a sua dureza, que vai depender da sua composição mineralógica, granulação, arranjo e coesão dos grãos e porosidade da rocha. Este parâmetro é muito usado para rochas aplicadas como revestimento em áreas de muito tráfego.

Na tabela 12 estão explanados os valores médios para o desgaste por abrasão Amsler, alguns valores calculados para as suas dispersões e os valores de referência de Casal Moura (2007). No gráfico 7 estão representados os valores médios para o desgaste por abrasão Amsler dos três calcários confrontado com os respectivos valores de porosidade aparente.

Os valores de Casal Moura (2007) são apenas para desgastes de 1000 m, sendo que os três calcários satisfazem o intervalo recomendado, podendo ser usados como rochas de revestimento em áreas de muito tráfego.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação, sendo considerados homogêneos.

Os três calcários são formados principalmente por calcita que tem baixa dureza, 3 na escala de Mohs, pouco abrasiva, dando pouca resistência ao desgaste. Em termos gerais observa-se uma relação direta entre o desgaste abrasivo Amsler e as respectivas porosidades aparentes (Crema Paraná = 1,15%; Filstone Beije MF = 8,90%; Filstone Blue = 6,53%) dos três calcários (gráfico 8), assim como da granulação. Isto é, quanto maior a porosidade e a quantidade de grãos, menor a resistência ao desgaste abrasivo Amsler. A correlação entre o desgaste a 1000m com a porosidade aparente é forte e diretamente proporcional (0,97), enquanto que com a microdureza de *Knoop* média é forte e inversamente proporcional (-0,98). Assim, ambas as correlações têm um importante contributo para os valores de desgaste por

abrasão Amsler.

Para o percurso de 500 m estas permissas não se fazem notar, pois o desgaste é muito superficial não tendo atingido a sua estabilização. Conclui-se que em superfície a influência da porosidade e da quantidade de grãos não são expressivos. O Filstone Blue possui o maior desgaste por ser mais importante a sua menor dureza face aos demais calcários do que o grau de porosidade e granulação. O Crema Paraná tem maior desgaste que o Filstone Beije MF pois apesar de ser mais duro, menos poroso, menor granulação, tem menor quantidade de cimento, conferindo menos coesão.

Tabela 12 – Valores médios do desgaste por abrasão Amsler dos três calcários.

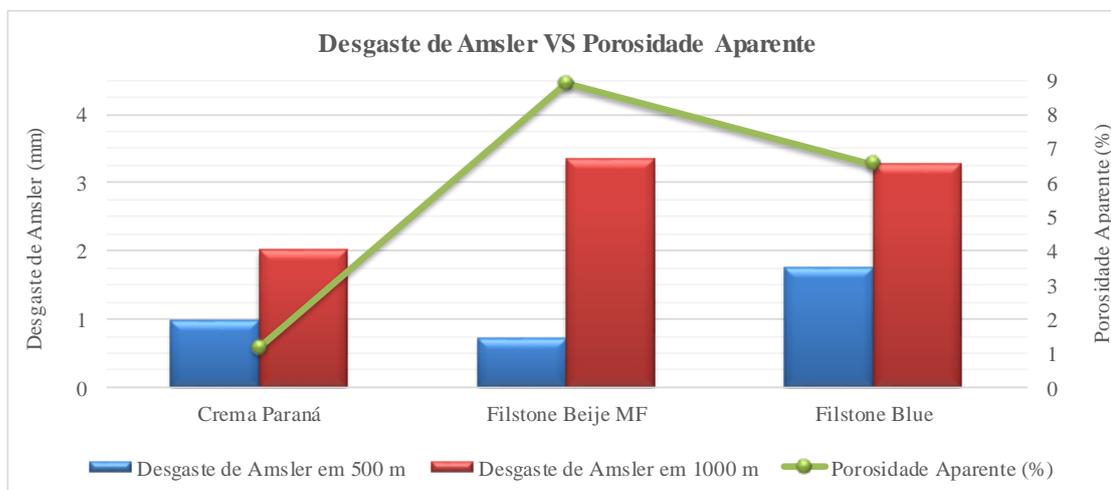
	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	Casal Moura (2007) (máx-mín)
Desgaste por abrasão Amsler (500 m) (mm)	0,98	0,73	1,75	n.e.
S	0,01	0,01	0,03	n.e.
δ (%)	1,27	1,46	1,82	
Desgaste por abrasão Amsler (1000 m) (mm)	1,99	3,34	3,27	(9,3-1,2)
S	0,17	0,25	0,08	n.e.
δ (%)	8,42	7,46	2,49	

*2 corpos-de-prova para cada calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

No percurso de 1000 m, o calcário Filstone Beije MF apresenta o maior desgaste por abrasão Amsler, pois é o mais poroso, tem a maior porcentagem de grãos, menor quantidade de matriz mais cimento, o que confere um menor imbricamento entre os grãos, apesar de ter dureza e tamanho de grão intermediário dos três calcários. Por sua vez, o calcário Crema Paraná possui o menor desgaste por abrasão Amsler, uma vez que é o menos poroso, apresenta a maior dureza, menor porcentagem de grãos, maior quantidade de matriz mais cimento, conferindo um maior imbricamento entre os grãos.

Considerando a média dos valores obtidos em Casal Moura (2007) (Desgaste por abrasão Amsler = 3,5 mm), os três calcários têm um desgaste por abrasão Amsler inferior à média, apesar dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue estarem próximos a este valor. Conclui-se que os três calcários poderão ser aplicados como elemento de pavimento em áreas de médio a alto tráfego. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados com este fim sugere-se a adição de resinas protetoras.

Gráfico 7 – Representação gráfica da relação entre os valores médios do desgaste por abrasão Amsler com a porosidade aparente.



Microdureza *Knoop*

Este teste tem como objetivo medir a dureza através de micro impressões, sendo adequado para materiais frágeis e de elevada dureza como as placas de rochas.

Na tabela 13 estão explanados os valores médios e acumulados para a microdureza *knoop* e alguns valores calculados para as duas dispersões. O gráfico 8 mostra os valores médios e alguns valores calculados para microdureza *knoop* dos três calcários confrontado com os respectivos valores de desgaste por abrasão Amsler.

Os valores médios da microdureza *Knoop* e os valores acumulados são maiores para o Crema Paraná, seguindo-de o Filstone Beije MF e, sendo o Filstone Blue o que apresenta os valores mais baixos. Segundo Winkler (1975), os calcários Filstone estão dentro do intervalo recomendado (75-120 MPa) para os valores médios da microdureza *Knoop*, já o Crema Paraná tem uma microdureza superior. Em relação aos valores acumulados da microdureza *Knoop*, os valores dos três calcários estão dentro do intervalo (883-2256 MPa) que se encontra na literatura (QUICK, 2002). Considerando este ensaio, os três calcários podem ser usados como rochas de revestimento em áreas de médio a alto tráfego.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação, sendo considerados homogêneos.

Tabela 13 – Valores médios da microdureza *Knoop* e valores acumulados dos três calcários.

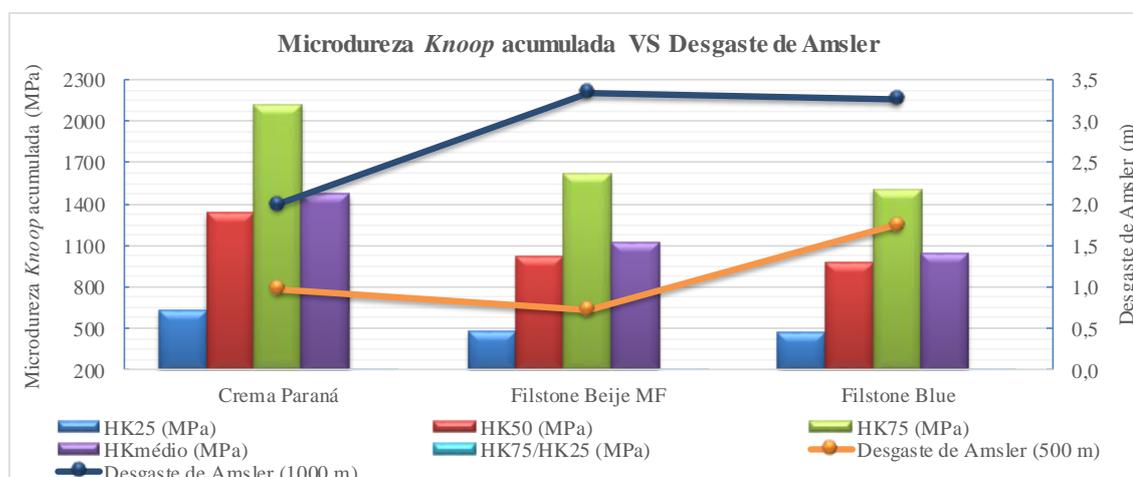
	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Microdureza <i>Knoop</i> média (MPa)	152,80	116,97	103,88
S	24,62	20,74	8,32
δ (%)	16,11	17,73	8,01
Microdureza <i>Knoop</i> acumulada (MPa)	1470,82	1122,16	1044,61
HK 25	628,20	481,90	469,80
HK 50	1335,60	1022,20	970,70
HK 75	2118,20	1615,80	1503,10
HK 75/HK 25	3,37	3,35	3,20

*1 corpo-de-prova para cada calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação; HK – microdureza *Knoop* acumulada.

É calculada a distribuição de dureza por ordem crescente, sendo que a frequência cumulativa HK25 traduz a influência dos minerais menos duros da rocha, o HK50 é o valor mais próximo da dureza média da rocha e o HK75 reflete a influência dos minerais mais duros. As três frequências têm uma forte correlação negativa com o desgaste por abrasão Amsler a 1000 metros, sendo que a mais forte é a HK25 (-0,99), seguida da HK50 (-0,98) e a menos forte a HK75 (-0,97). O HK25 é o melhor indicador de desgaste por abrasão Amsler reforçando a hipótese de que os minerais essenciais de menores durezas são os principais a serem desgastados por abrasão Amsler, uma vez que os minerais mais duros devem ser removidos no decorrer do ensaio. Não são calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação porque este cálculo da dureza não segue uma distribuição normal. É ainda calculado um coeficiente de heterogeneidade HK75/HK25, onde o calcário Crema Paraná é considerado o calcário mais heterogêneo (3,37), o Filstone Beije MF o intermediário (3,35) e o Filstone Blue o menos heterogêneo (3,20).

Deste modo, o calcário Crema Paraná tem a maior microdureza *knoop* e consequentemente o menor desgaste por abrasão Amsler. O calcário Filstone Blue tem a menor microdureza *knoop*, contudo não lhe confere o maior desgaste por abrasão Amsler pois este tem uma maior porcentagem de cimento, que é um cimento mais cristalino (espático em mosaico), conferindo uma maior coesão entre os grãos e resistência da rocha ao desgaste por abrasão Amsler. Conclui-se que os três calcários poderão ser aplicados como elemento de pavimento em áreas de médio a alto tráfego. Para não se comprometer a segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados com este fim sugere-se a adição de resinas protetoras.

Gráfico 8 – Representação gráfica da relação entre os valores médios da microdureza *Knoop* acumulada com a resistência ao desgaste por abrasão Amsler.



*HK – Microdureza *Knoop* acumulada

Escorregamento vs Rugosidade

Tanto a UKSRG (2000) como a UK Health and Safety Executive (1996) consideram que a medição da rugosidade da superfície é importante para complementar o estudo da resistência ao escorregamento.

Na tabela 14 estão explanados os valores médios para o escorregamento e para a rugosidade, nas condições secas e saturada e alguns valores calculados para as suas dispersões. No gráfico 9 estão representados os valores médios para o escorregamento confrontados com os respectivos valores da rugosidade, para as condições secas e saturada dos três calcários.

Segundo os valores da DGEG (2006), considerando os valores na condição seca, praticamente os três calcários cumprem o valor recomendado (≥ 45), podendo ser usados como rochas de pavimento e degraus, externos e internos, horizontais e de rampa, quer tenham rugosidade maior ou menor que 1.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação, sendo considerados homogêneos.

Os valores médios da resistência ao escorregamento na condição seca são maiores para o calcário Crema Paraná, seguindo-se o Filstone Beije MF e o Filstone Blue. Estes valores têm uma proporcionalidade inversa com a rugosidade superficial que é menor no calcário Crema Paraná e maior no Filstone Blue. Esta proporcionalidade deveria ser direta, pois quanto mais sinuosidades tiver a superfície rochosa, mais atrito terá e maior resistência ao escorregamento. Na condição saturada o calcário Filstone Beije MF tem a maior

resistência ao escorregamento e o Filstone Blue possui a menor resistência. Contrariamente, na condição saturada, a rugosidade não é inversamente proporcional à taxa de escorregamento e não existe uma relação entre estes parâmetros, pois o Filstone Blue é o que tem maior quantidade de superfície rugosa e o Crema Paraná a menor quantidade. A inexistência de proporcionalidade direta entre o escorregamento e a rugosidade, tanto na condição seca como saturada, poderá dever-se aos corpos-de-prova utilizados para a medição do escorregamento estavam polidos enquanto que para a rugosidade estavam na condição natural.

A resistência ao escorregamento na condição seca tem valores maiores do que na condição saturada, pois as amostras estão polidas e a água tem maior dificuldade em infiltrar, mantendo-se nas suas superfícies e moldando as rugosidades que conferem maior resistência ao escorregamento. No entanto, na condição saturada o Filstone Beije MF é o calcário com maior resistência ao escorregamento por ter maior porosidade e a água conseguir infiltrar mais na rocha. O Filstone Blue passou a ser o calcário com menor resistência ao escorregamento, apesar de ter maior porosidade que o Crema Paraná, pois tem maior granulação, dificultando a infiltração da água no seu interior.

Tabela 14 – Valores médios da resistência ao escorregamento e da rugosidade superficial dos três calcários em estudo.

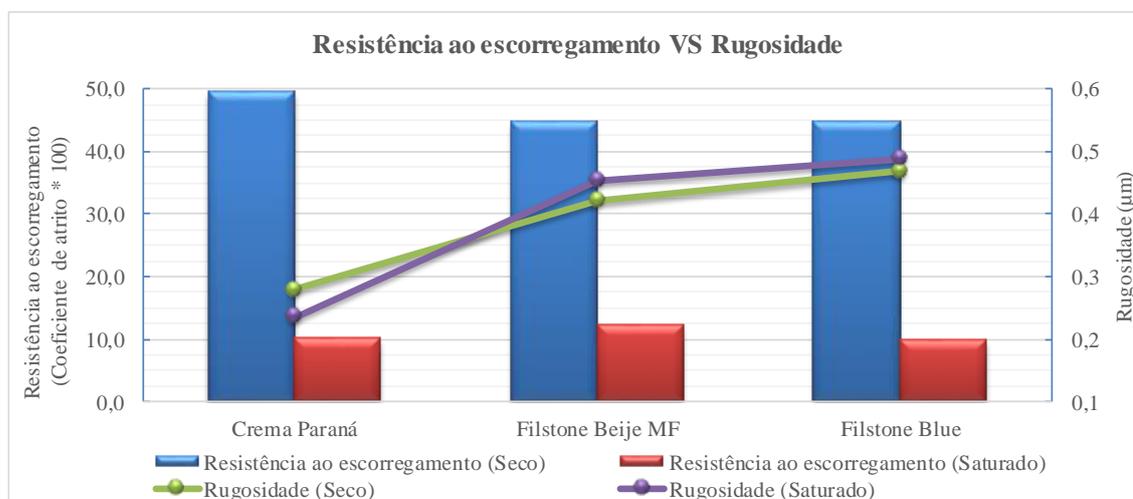
Condição		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Seca	Resistência ao escorregamento (Coeficiente de atrito * 100)	49,44	44,69	44,59
	S	3,64	2,69	2,26
	δ (%)	7,35	6,03	5,07
Saturada	Resistência ao escorregamento (Coeficiente de atrito * 100)	10,03	12,21	9,86
	S	0,99	2,52	0,74
	δ (%)	9,91	20,68	7,53
Seca	Rugosidade (μm)	0,279	0,422	0,468
	S	0,413	0,179	0,291
	δ (%)	148,291	42,296	62,128
Saturada	Rugosidade (μm)	0,236	0,453	0,488
	S	0,312	0,159	0,247
	δ (%)	132,186	35,180	50,558

*8 corpos-de-prova para cada calcário; s– desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Tanto na condição seca ou saturada, os valores médios da rugosidade superficial são sempre mais baixos para o Crema Paraná e mais elevados para o Filstone Blue. Está concordante com a granulação do Crema Paraná ser a mais homogênea e fina e o Filstone

Blue ser a menos homogênea e mais grosseira. No entanto, para o Crema Paraná a rugosidade diminuiu na condição saturada, enquanto que para os outros dois calcários a rugosidade aumentou. Este fato poderá ser explicado pelo Crema Paraná ter menor porosidade, dificultando a infiltração da água nas amostras e fazendo com que a água molde ligeiramente as superfícies rugosas.

Gráfico 9 – Representação gráfica da relação entre os valores médios da resistência ao escorregamento com a rugosidade da superfície.



Considerando os valores da literatura (tabela 15), o potencial de escorregamento para os três calcários em estudo, segundo os valores de escorregamento na condição seca, é baixo, enquanto que na condição saturada passa a ser alto. Considerando os valores da rugosidade superficial, tanto na condição seca como saturada, o potencial de escorregamento para estes três calcários é moderado. Deste modo não é aconselhada a sua aplicação em lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas.

Tabela 15 – Categorias de resistência ao escorregamento. Fonte: UKSRG (2000) & DIN EN ISO 4288 (1996).

Potencial de escorregamento	Valor para pêndulo <i>Four S</i> (Coeficiente de atrito * 100)	Rugosidade superficial Ra (µm)
Alto	< 25	< 0,1
Moderado	25 – 35	0,1 – 2
Baixo	35 – 65	2 – 10
Extremamente baixo	> 65	> 10

Deste modo é aconselhada a sua aplicação como revestimento em pavimento e degraus, externos e internos, horizontais e de rampa, evitando lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas.

4.5 Conclusões

No percurso de 500 m, o calcário Filstone Blue possui o maior desgaste e o Filstone Beije MF o menor. No percurso de 1000 m, o calcário Filstone Beije MF tem o maior desgaste por abrasão Amsler e o Crema Paraná o menor. Esta inconsistência poderá dever-se à influência da porosidade e da quantidade de grãos não serem tão expressivos em superfície.

Os valores médios acumulados da microdureza *Knoop* são maiores para o Crema Paraná e menores para o Filstone Blue.

Estes dados permitem concluir que existe uma proporcionalidade inversa entre os valores de desgaste por abrasão Amsler no percurso de 1000 m com a microdureza *knoop*. Contudo, esta proporcionalidade nem sempre é evidente devido às características petrográficas como a porcentagem de cimento, que é maior e mais desenvolvida no Filstone Blue e menos no Crema Paraná.

Segundo os valores de Casal Moura (2007), Winkler (1975) e Quick (2002), os três calcários podem ser usados como rochas de revestimento em áreas de médio a alto tráfego, porém sugere-se a adição de resinas protetoras no uso dos calcários Filstone.

Os valores médios da resistência ao escorregamento na condição seca são maiores para o calcário Crema Paraná, seguindo-se o Filstone Beije MF e o Filstone Blue. Estes valores têm uma proporcionalidade inversa com a rugosidade superficial que é menor no calcário Crema Paraná e maior no Filstone Blue. Na condição saturada o calcário Filstone Beije MF é o que apresenta maior resistência ao escorregamento, enquanto que o Filstone Blue possui a menor resistência. Não existe uma relação com a rugosidade, pois o Filstone Blue é o que tem maior quantidade de superfície rugosa e o Crema Paraná a menor quantidade. A inexistência de proporcionalidade direta entre o escorregamento e a rugosidade, tanto na condição seca como saturada, poderá dever-se aos corpos-de-prova utilizados para a medição do escorregamento estavam polidos enquanto que para a rugosidade estavam na condição natural.

Considerando os valores de UKSRG (2000) & DIN EN ISO 4288 (1996), o potencial de escorregamento para os três calcários em estudo, segundo os valores de escorregamento na condição seca é baixo, enquanto que na condição saturada passa a ser alto. Considerando os valores da rugosidade superficial, tanto na condição seca como saturada, o

potencial de escorregamento para estes três calcários é moderado. Deste modo é aconselhada a sua aplicação como revestimento em pavimento e degraus, externos e internos, horizontais e de rampa, evitando lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas.

Com a elaboração desta pesquisa deparou-se com a inexistência de normas com valores tabelados para calcários das diversas organizações de normalização internacionais. Sugere-se que seja feita uma compilação de vários trabalhos com calcários, o seu tratamento estatístico e tabelar valores comparativos, gerando dados para elaboração de normas técnicas sobre este tópico relevante.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por permitirem todas as condições para a realização da presente investigação. Ao Centro de Tecnologia Mineral Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM - NRES) e à Universidade de Aveiro (UA) por permitirem a execução das análises em questão.

Referências

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste*, 2., 1977, Campina Grande, **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, p.242-258. 1977.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12042**: Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 5p. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-1**: Rochas para revestimentos - Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

AZERÊDO, A. C. Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). **Comunicações Geológicas**, t. 94, p.29-51. 2007.

AZERÊDO, A. C. **Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica) - análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia**. Tese de Doutorado (não publicada), Dep. de Geologia, Faculdade de Ciências, Univ. Lisboa, + 36 ests. (2 vols), 366p. 1993.

BERTANI, R. T.; COSTA, I.G. & MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, *In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J.*

Origem e evolução de bacias sedimentares. Petrobras, Rio de Janeiro, p.291-310. 1990.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Rochas ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: breve caracterização dos recursos, dos centros de produção e delimitação preliminar de áreas potenciais. **Boletim de Minas**, 47 (1), 22p. 2012.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* **Maciço Calcário Estremenho, Caracterização da situação de referência (relatório interno)**, 42p. 2011.

CASAL MOURA, A. **Mármore e calcários ornamentais de Portugal.** Instituto Nacional de Engenharia - INETI, Tecnologia e Inovação, 383p. 2007.

CASSAB, R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos.** 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, 54, nº2, p.207-250. 1970.

DIRECÇÃO GERAL DE GEOLOGIA E ENERGIA. DGEG. **Boletim de Minas**, volume 41, Nº2. Lisboa, 2006.

DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In*: Ham, W. E. (Ed.). Classification of carbonate rocks, A Symposium. **American Association of Petroleum Geologists**, p.108-121. 1962.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 14205**: Natural stone test methods – Determination of Knoop hardness. British, 12p. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 14231**: Natural stone test methods – Determination of the slip resistance by means of the pendulum tester. British, 16p. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN DIN EN ISO 4288**: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. German, 17p. 1996.

FARIAS, P. R. C. *et al.* Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. **Roteiro de Excursão**, 43p. 1990.

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

FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifteamento da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p.196-207. 1987.

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

GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2008.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Slips and trips: Summary guidance for the food processing industry, **HSE Information Sheet**, Food Sheet No. 6, Sudbury, United Kingdom, September. 1996.

KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, p.317-368. 2006.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. LNEG. **Carta Geológica de Portugal na escala 1:1000000**, 3ªed, LNEG, Lisboa. 2010.

MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.

MONTANI, C. **XXVI Report marble and stones in the world 2014**. 2015 Aldus Casa di Edizioni in Carrara. 2015

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 88p. 2002.

NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. *In: Actas II Congresso Uruguaio de Geologia*, Uruguai, p.103-107. 1998.

NETO, O. C. P. *et al.* V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, Rio de Janeiro, p.357-369. 2007.

PROJETO ÁGUA SUBTERRÂNEA DO NORDESTE DO BRASIL. PROASNE. Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú. 2006. SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós- Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, Rio Grande do Norte, p.35-51. 2006.

QUICK, G. W. **Selective guide to the specification of dimension stone**. Discovering Stone. V.1, p.8-21. 2002.

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, Lisboa-Portugal, p.78-86. 1997.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. Rochas de Qualidade**, nº 127, São Paulo, p80-84. 1996.

SOARES, U. M.; ROSSET, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, nº55, 2003.

SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, 1982, Salvador, **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p.181-183. 1982.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

UK SLIP RESISTANCE GROUP. 2000, **Measurement of Floor Slip Resistance**, Guidelines recommended by the UK Slip Resistance Group Issue 2, Rapra Technology Ltd., Shrewsbury, UK, June.

WINKLER, E. M. **Stone**: properties, durability in man's environment. Second edition. Indiana – U.S.A. 1975.

5 AVALIAÇÃO DO MEIO POROSO DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)

Artigo 3 - revista Geophysical Journal International – A2

Autores

Joni Gaspar Marques, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: jonimarques@ua.pt

Irani Clezar Mattos, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: irani.mattos@ufc.br

José de Araújo Nogueira Neto, UFG – Universidade Federal de Goiás, Rua Mucuri, s/n – Setor Conde dos Arcos, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil. Contato e-mail: nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com

Guilherme Fernandes Vasquez, CENPES – Centro de Pesquisa da Petrobras, Ilha Cidade Universitária, Av. Horário Macedo, 950, CEP 21941-970, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Contato e-mail: vasquez@petrobras.com.br

Márcio José Mörschbacher, CENPES – Centro de Pesquisa da Petrobras, Ilha Cidade Universitária, Av. Horário Macedo, 950, CEP 21941-970, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Contato e-mail: marciojm@petrobras.com.br

Resumo

Brasil e Portugal se encontram entre os dez maiores produtores mundiais de rocha ornamental. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue pertencem ao Membro Pé da Pedreira da Bacia Lusitaniana (Portugal), enquanto que o Crema Paraná pertence à Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte). Esta pesquisa objetiva uma avaliação do meio poroso das três rochas carbonáticas supracitadas com vista a avaliar a sua melhor aplicação. Para o efeito foram realizados os seguintes ensaios: tomografia computadorizada, porosidade e permeabilidade a gás, porosidade por intrusão de mercúrio, velocidade de ondas ultrassônicas e microscopia eletrônica de varredura, seguindo as próprias metodologias laboratoriais e a norma ISO. Realizaram-se análises macro e microscópicas de três calcários

para se comparar com os resultados do meio poroso, em especial: composição, quantidade e tamanho de grãos, compactação e porosidade. Estas análises estão concordantes com os ensaios do meio poroso, que, em geral, satisfazem os valores recomendados. Em geral, o Crema Paraná é o calcário menos poroso e menos susceptível a ser deformado e o Filstone Beije MF o mais poroso e mais susceptível a ser deformado. Conclui-se que é aconselhada a sua aplicação como rochas ornamentais, tendo apenas atenção à sua aplicação em ambientes que possam gerar deformações longitudinais segundo tensões também elas longitudinais.

Palavras-chave: Crema Paraná. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Rocha Ornamental. Meio Poroso.

Abstract

Brazil and Portugal are among the ten largest producers of ornamental rock in the world. Filstone Beije limestones MF and Filstone Blue are members of the Pé da Pedreira Member of the Lusitanian Basin (Portugal), while the Paraná Crema belongs to the Jandaíra Formation of the Potiguar Basin (Rio Grande do Norte). This research aims at evaluating the porous environment of the three carbonated rocks mentioned above in order to evaluate its best application. For this purpose, the following tests were performed: computerized tomography, porosity and gas permeability, mercury intrusion porosity, ultrasonic wave velocity and scanning electron microscopy, following the laboratory methodologies and the ISO standard. Macro and microscopic analyzes of three limestones were carried out to compare them with the results of the porous medium, in particular: composition, quantity and size of grains, compaction and porosity. These analyzes are consistent with the assays of the porous medium, which, in general, meet the recommended values. In general, Parana Cream is less porous limestone and less likely to be deformed and Filstone Beije MF the most porous and most susceptible to be deformed. It is concluded that it is advised to be applied as ornamental and cladding rocks, paying only attention to its application in environments that can generate longitudinal deformations according to longitudinal stresses.

Key-words: Paraná Cream. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Dimension Stone. entourage porous.

5.1 Introdução

A rocha é um recurso geológico que é usado desde os primórdios. Inicialmente mais para uma função estrutural, mas desde há uns séculos que tem vindo a crescer o seu uso com fim de ornamentação. Segundo Montani (2015), a extração mundial de rochas ornamentais quase que quadruplicou nos últimos 20 anos, tendo um crescimento de 14% por ano com uma tendência duradoura.

Tanto o Brasil como Portugal são dotados de rochas ornamentais de excelentes qualidades que têm sido aplicadas por todo o mundo e, por isso, se têm tornado cada vez mais uma referência mundial como produtores deste recurso. Portugal é conhecido há muitos anos no mercado pelos seus mármore e calcários. O Brasil é conhecido pela sua diversidade de granitóides, porém os seus mármore e calcários também têm crescido muito neste mercado.

Além da crescente procura de rochas ornamentais tem existido avanços significativos em todas as fases do processo: extração, beneficiamento, aplicação e manutenção. No entanto, estes avanços poderiam ser mais eficientes e acompanhar a crescente demanda das rochas ornamentais através de uma melhor caracterização.

A aceitação de uma rocha para ornamentação e/ou revestimento além da aparência estética, da arte de trabalhar a rocha e da economia, depende da natureza geológica e das propriedades físico-mecânicas, químicas, meio poroso e alterabilidade.

No entanto, a inadequada aplicação e manutenção de rochas ornamentais, as variações ambientais, a ação antrópica e a falta de conhecimento das características das rochas podem levar a adversidades que alteram as suas propriedades, tornando-se crucial efetuar estudos técnicos para prevenção e manutenção da sua estética decorativa.

Assim, o presente estudo teve por objetivo a caracterização macro e microscópica e do meio poroso de três calcários utilizados no mercado de rochas ornamentais (dois de Portugal e um do Brasil); comparar e correlacionar os resultados entre si e avaliar se satisfazem os vários requisitos necessários para a sua aplicação no setor e quais as suas melhores opções de aplicação como rocha ornamental.

5.2 Contexto Geográfico e Geológico

As duas variedades carbonáticas de Portugal em estudo, com os nomes comerciais “Filstone Beije MF” e o “Filstone Blue”, foram coletadas na pedreira “Filstone Natural” que se encontra a cerca de 15 Km a Sul de Ourém (Santarém, Portugal), ver figura 27. Estes calcários estão inseridos na Bacia Lusitaniana (BL), Maciço Calcário Estremenho (MCE), Formação de Santo António-Candeeiros e Membro de Pé da Pedreira (AZERÊDO, 1993,

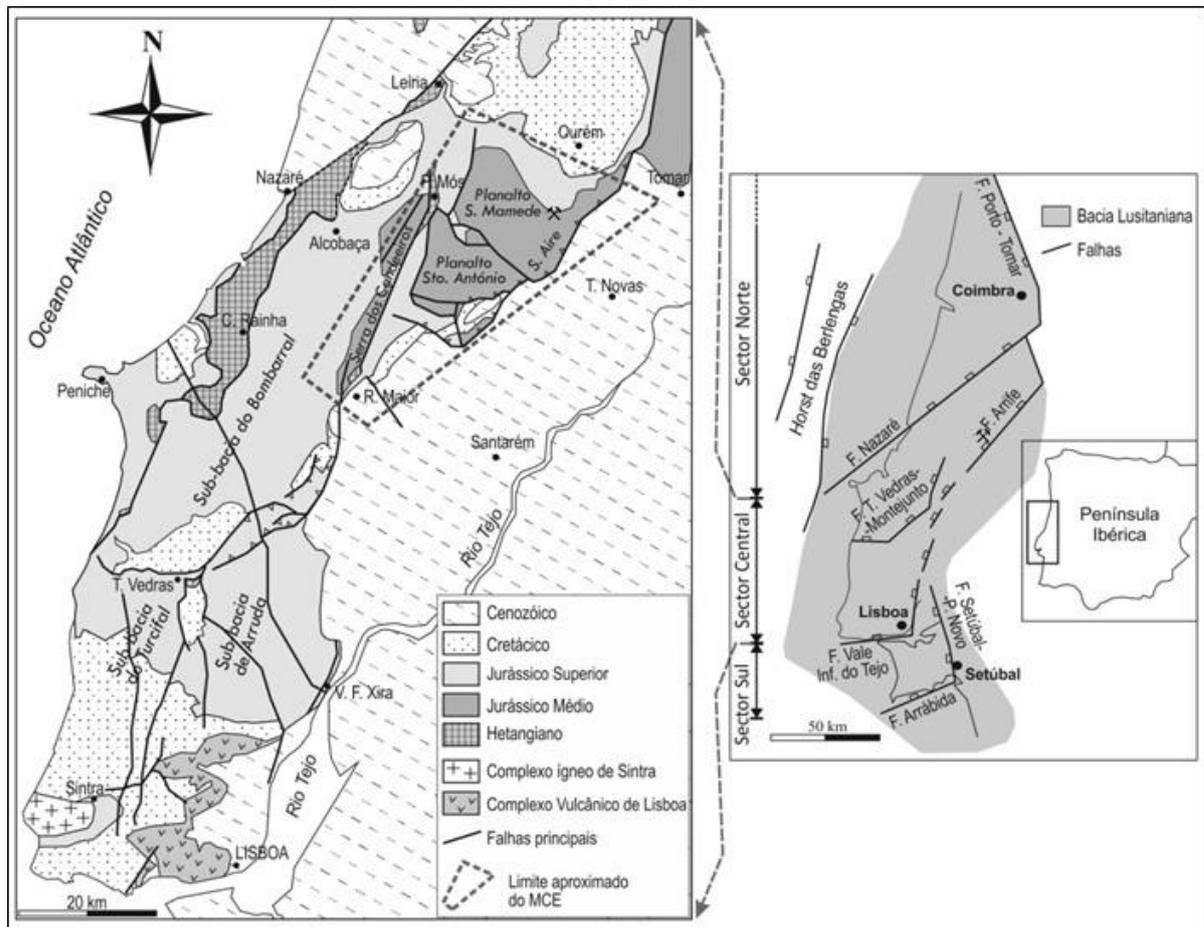
2007; CARVALHO *et al.*, 2012).

A variedade carbonática do Brasil em estudo, com o nome comercial “Crema Paraná”, foi coletada na pedreira “Mineração Apodi” que se encontra a cerca de 15 Km a Norte de Apodi (Rio Grande do Norte – RN, Brasil), ver figura 28. Este calcário está inserido na Bacia Potiguar (BP), Grupo Apodi e Formação Jandaíra.

Membro Pé da Pedreira

A Bacia Lusitaniana, uma bacia sedimentar intracratônica resultante da fragmentação da Pangeia e abertura do Oceano Atlântico, localizada no bordo oeste da microplaca Ibérica, alongada em uma direção NNE-SSW, tendo 250-330 Km de comprimento e 100-150 Km de largura (AZERÊDO, 1993), ver figura 27.

Figura 27 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg *et al.* (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).



Esforços compressivos soergueram uma unidade geomorfológica, alongada de direção NE-SW e com cerca de 750 Km², o Maciço Calcário Estremenho (MCE). É compartimentado em três blocos soerguidos (Figura 27): Serra do Candeeiros, Planalto de Santo António e Planalto de São Mamede que continua até à Serra d’Aire.

O Membro de Pé da Pedreira consiste de uma fácies de rampa interna com calcários de alta energia gerados num paleoambiente de ilha-barreira, com idade Batoniana, aflorando em três manchas principais: Calcários de Pé da Pedreira, Calcários oolíticos de Reguengo do Fetal e Calcários oolíticos de Casal Farto.

Este Membro aparece sob a forma de corpos maciços lenticulares no seio dos calcários micríticos da Formação de Serra de Aire que se interdigitam com os calcários das Formações de Serra de Aire e de Chão de Pias e com os Membros de Cadoçal e de Moleanos. Os níveis superiores encontram-se truncados pelas rochas sobrejacentes, individualizando-se, localmente, estratos entre 1 e 2 m, sendo que a espessura do Membro vai dos 15 aos 150 m. É composto por calcários calciclásticos, micríticos, oo/bio/intra/pelsparitos “*grainstone*” a “*wackestone*” de cor branca, creme e tons de azul. A granulação varia de fina a grosseira, muito ricos em bioclastos, correspondendo, por vezes a biostromas descontínuos. Apresentam diversas estratificações e laminações e superfícies de erosão e de reativação. Ocorrem níveis espessos com intensa bioturbação, intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, recristalizações e geodos.

Segundo Carvalho *et al.* (2011), na história evolutiva da BL também ocorreram importantes episódios magmáticos que estão dispersos por toda a Bacia, com exceção da Serra de Aire e Planalto de São Mamede.

Formação Jandaíra

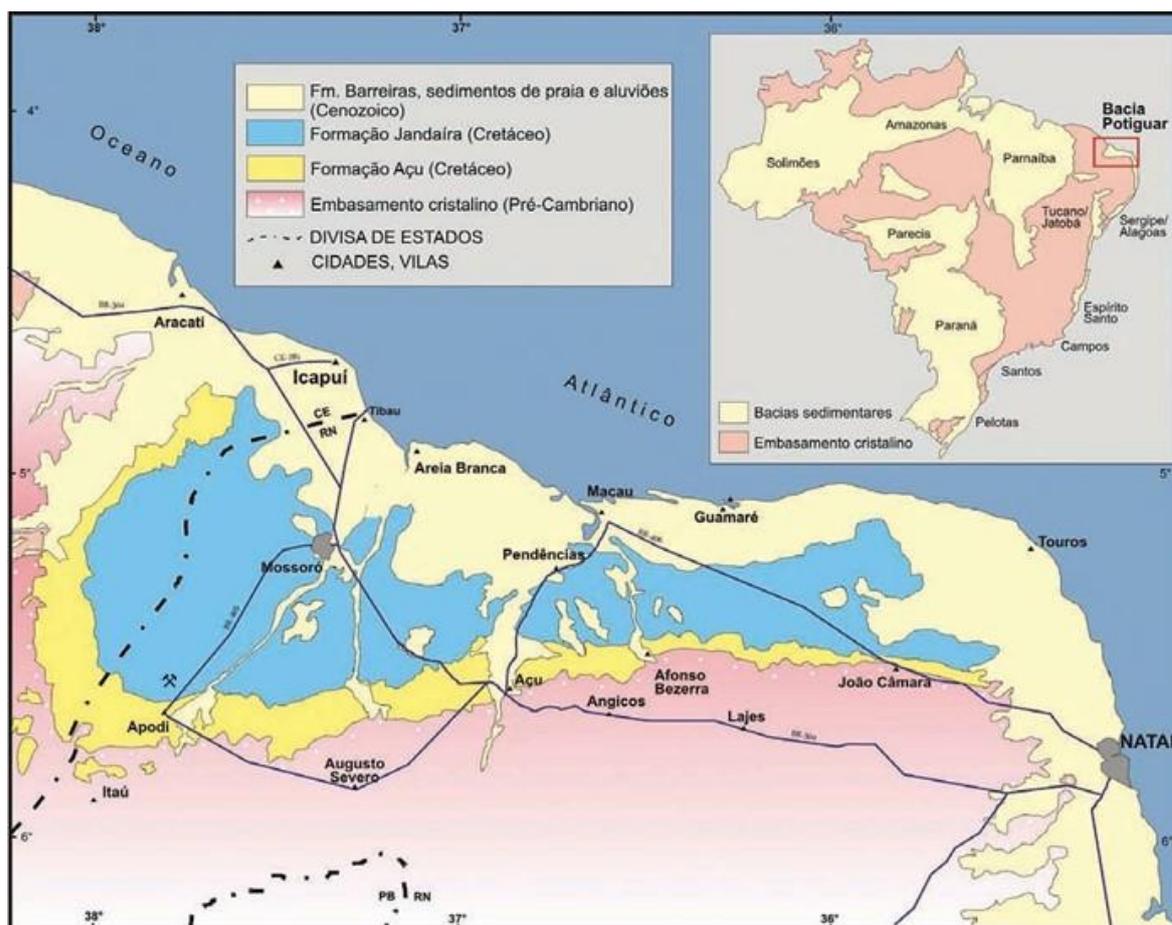
A Bacia Potiguar (BP), uma bacia sedimentar rifte intracontinental formada pela separação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. Localiza-se na interseção da Margem Continental Leste Brasileira com a Margem Continental Equatorial, apresentando uma área total estimada de 60.000 Km² (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1987; MATOS, 1992; ALMEIDA *et al.*, 1977), ver figura 28.

Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008) dividiram a Bacia Potiguar, da base para o topo, em três Grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha.

A Formação Jandaíra consiste de uma sequência transgressiva carbonática, marinha de águas quentes, rasas e agitadas, da fase drifte da evolução da Bacia, com idade Turoniana-Campaniana (SOARES *et al.*, 2003). Tem um limite transicional na base com as

Formações Açú e Quebradas e ocorre localmente interdigitada com a base da Formação Ubarana (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003). Exibe uma direção W-E mergulhando suavemente para NE e uma espessura média entre 250-300 m (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982; PROASNE, 2006).

Figura 28 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS *et al.*, 1990), com a localização da área (martelos).



Os estratos deste pacote carbonático têm mergulhos suaves e clinofomas sigmoidais típicos de bacias de margem em rampa, dividindo-se em duas sequências deposicionais: a primeira é formada por *grainstones* bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por *wackestones* e *mudstones* na porção distal; e a segunda caracteriza-se pelo domínio da sedimentação carbonática em toda a bacia (NETO *et al.*, 2007). Composto por calcários microcristalinos, calcarenitos e calcilitos bioclásticos, com nível evaporítico na base, tem uma coloração que varia entre branco, creme e cinza, são finos, compactos, duros, com textura detrítica, possuindo um conteúdo ricamente fossilífero e intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, podendo ter recristalizações e geodos (CASSAB, 2003).

Na sua história tectônica também fazem parte as Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau que representam três eventos magmáticos.

5.3 Materiais e Métodos

Para esta pesquisa foram utilizadas amostras dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue provenientes de dois níveis estratigráficos diferentes da mesma frente de lavra da pedreira Filstone no núcleo de Casal Farto da Bacia Lusitaniana (Portugal) e amostras do calcário Crema Paraná da frente de lavra da Mineração Apodi na Formação Jandaíra da bacia Potiguar (Brasil).

Para a contextualização geológica foram efetuadas etapas de campo com a coleta de amostras e uma breve caracterização das pedreiras.

O estudo petrográfico foi realizado no Laboratório de Microscopia Ótica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), usando objetivas de ampliações 4X, 10X, 20X e 40X do microscópio ótico de luz transmitida de marca *Leica* e modelo *EC 3*. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal).

Na descrição das lâminas delgadas seguiram-se os procedimentos estipulados na norma técnica brasileira (ABNT NBR 15845-1:2015) e as orientações de Navarro (1998, 2002) e de Rodrigues *et al.* (1996, 1997), tendo o cuidado de destacar as características que poderiam influenciar nos resultados físico-mecânicos, tais como: aspetos composicionais, texturas, estruturas, disposição e arranjo dos grãos e relações, tipos, quantificação, preenchimento e comunicabilidade de porosidades.

Para a classificação da porosidade utilizou-se o trabalho de Choquette & Pray (1970). Considerando a classificação da textura deposicional foi avaliado segundo a proposta de Dunham (1962). Correlacionando a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos adotou-se a nomenclatura de classificação de Folk (1959).

A investigação do meio poroso dos três calcários foi obtida através de ensaios laboratoriais comparados com as suas características macro e microscópicas.

Tomografia computadorizada 3D foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, seguindo a metodologia do laboratório e o manual do equipamento. Analisaram-se 4 plugs por litologia, 2 com diâmetro de 1” (2,54 cm) e comprimento de 4 cm e 2 com diâmetro de 0,6 cm e comprimento variável, no microtomografo Skyscan/Bruker modelo 1173. De cada diâmetro diferente dos três calcários

foram escolhidos plugs com superfície estilolítica e um plugue sem. O processo de absorção dos fótons pelos calcários antes de atingir o detetor é expresso pela seguinte equação de atenuação dos raios-x:

$$I = I^0 e^{-\mu x}$$

Sendo: I= Intensidade medida sem o elemento atenuador; I^0 = Intensidade medida após o elemento atenuador; μ = coeficiente de atenuação linear; x= espessura do objeto atenuador.

O resultado do processo de imageamento é um objeto tridimensional com pixels em escala de cinza, de intensidade proporcional à densidade de cada unidade de volume, que vai ser reconstruído através dos *softwares* CTAn, 3D Viewer e CTvox.

A porosidade e a permeabilidade a gás e a velocidade de ondas ultrassônicas foram realizadas no Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES) na ala geofísica. Seguiram-se as metodologias do laboratório e dos manuais dos equipamentos. Foram analisados quatro plugs de cada litologia, sendo dois com estruturas (veios/estilólitos) e dois sem estruturas. A constante de permeabilidade (C), propriedade de uma rocha permitir a passagem de fluidos sem comprometimento da sua estrutura, é obtida através da seguinte equação (PMI, 1996) com base na lei de Darcy (1856 apud BROWN, 2002):

$$C = 8FTV / VD^2(P^2 - 1)$$

Onde: C= constante de permeabilidade de Darcy; F= fluxo; T= espessura do plug; V= viscosidade do gás ($NO^2=0,0185$); D= diâmetro do plug; P= pressão (atmosferas).

Porosidade por intrusão de mercúrio (MIP) foi realizada no laboratório de análises LAREQUIMTE do Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, seguindo a norma ISO 15901-1. Seguiram-se as adaptações do laboratório e do manual do equipamento AutoPore IV 9500 V1.09 da Micromeritics com um ângulo de contato de 140°, tempos de equilíbrio de 30 segundos em cada etapa de pressão, uma pressão de entrada do mercúrio de 0,50 a 30000 psia e um volume máximo de intrusão de 100 mL/g. O volume utilizado para o ensaio foi entre 29% e 69% da haste para os três calcários, o que está dentro do intervalo de aceitação que é 25% a 90%. O diâmetro de poros medido foi entre 407 a 0,0075 μm . Analisaram-se duas amostras, em estado natural, para cada calcário, sendo utilizados dois cubos de 1 x 1 x 1 cm por cada amostra.

A MIP é baseada na lei capilar que regula a penetração de líquido em pequenos poros e, como líquido “não molhante” e poros cilíndricos, é expressa por:

$$D = - (1/P)4\delta\cos\varphi$$

Onde: D= diâmetro do poro; P= pressão aplicada; δ = tensão superficial; φ = ângulo de contato.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi efetuada na central analítica da UFC usando a norma do laboratório e o manual do equipamento QUANTA-450 FEG - FEI. Este ensaio permitiu a análise superficial dos calcários, em alto e baixo vácuo, produzindo imagens de alta ampliação e resolução através do MEV. Foram analisadas amostras sólidas com tamanhos variados, sendo 3 do Filstone Blue, 2 do Filstone Beije MF e uma do Crema Paraná.

5.4 Resultados e Discussão

5.4.1 Aspetos Macro e Microscópicos

As características macro e microscópicas dos três calcários estudados nesta investigação são aqui abordadas, culminando com uma tabela síntese (tabela 16)

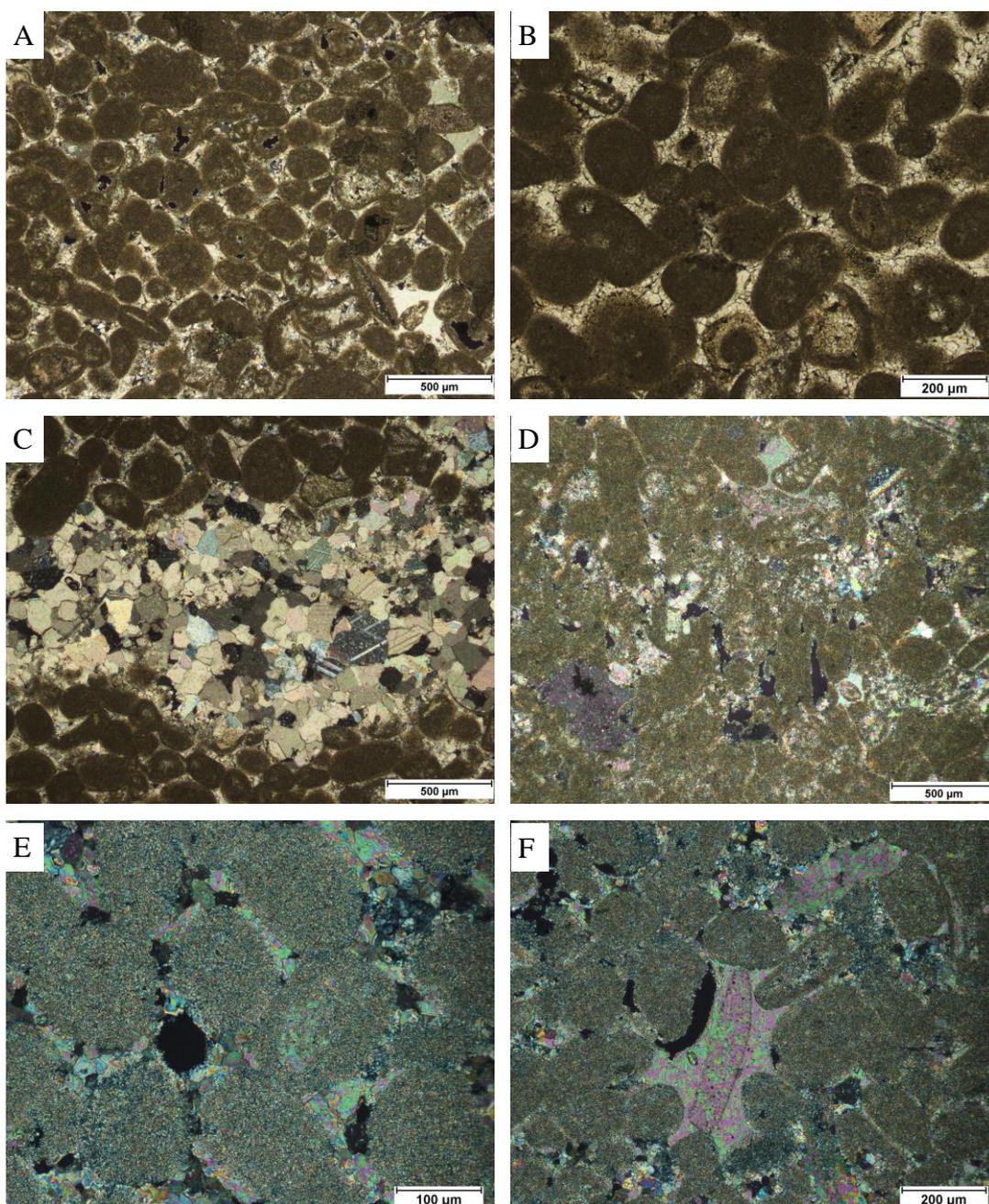
Filstone Beije MF

Em amostra de mão apresenta uma estrutura maciça, muito baixa anisotropia, coloração esbranquiçada a creme (se úmida), granulação homogênea e muito fina, formada por uma matriz microcristalina carbonática (figura 29). As dimensões dos seus grãos são pequenas de tal ordem que não se conseguem diferenciar ao olho humano. Observam-se veios e geodos calcíticos, estilólitos mais ou menos oxidados e alguns poros como resultado de dissolução sob pressão (figura 29).

Figura 29 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico.



Figura 30 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).



É uma rocha compacta, com uma granulação homogênea, em que, os grãos transportados variam de 0,125 mm a 0,25 mm, podendo atingir os 0,5 mm e o cimento varia entre 0,005 e 0,03 mm (microespato), sob a forma de mosaico, figura 30. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes penetrativo (figura 30 B, D, E e F).

A sua constituição consiste em cerca de: 47% de pelóides, 8% de oóides, 7% de intraclastos, 13% de biolastos (sobretudo foraminíferos, algas e equinodermes, figura 30 B e D), 13% de cimento microespático e 4% de lama microcristalina. A maioria dos seus grãos têm forma esférica a elíptica e apresentam-se bem calibrados com o tamanho, em média, variando entre 0,125-0,25 mm. Assim, segundo a classificação textural de rochas sedimentares de Folk (1959), é considerado um pelsparito. São observados veios calcíticos, estilólitos, onde os grãos têm contatos penetrativos ao seu redor, e algumas recristalizações de calcita microespática e micrítica, pontualmente espática, dentro dos fósseis (figura 30 C e D). A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

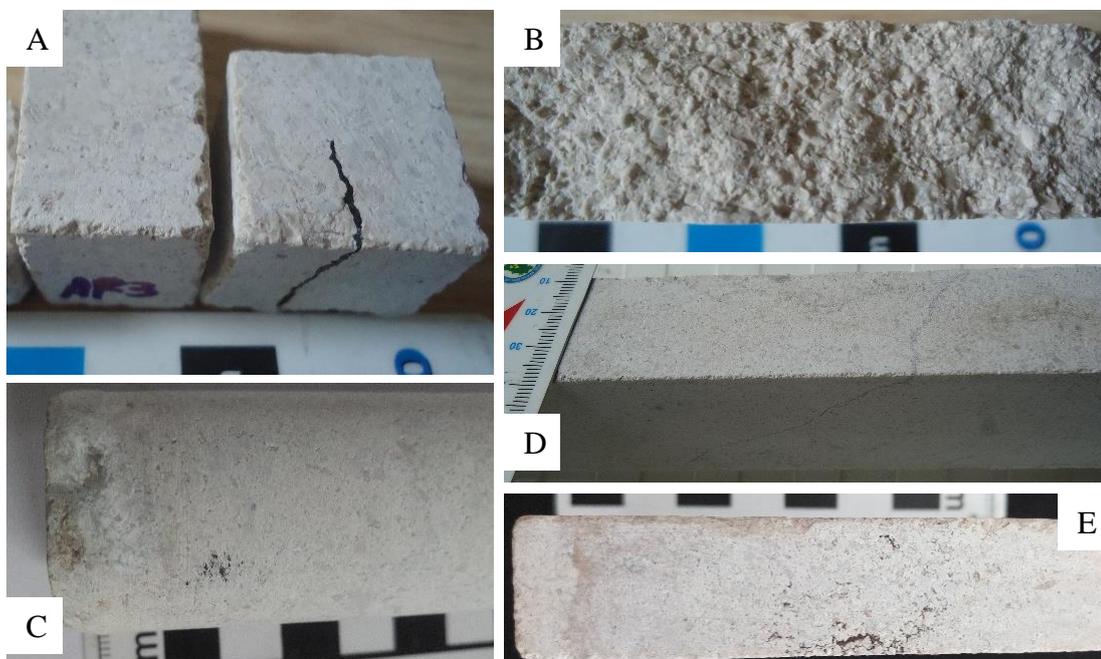
Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *packstone*.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970), possui porosidade baixa (8%), apesar de ser a mais porosa das três amostras; secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos que aumenta a porosidade da rocha e pelo crescimento sintaxial que a faz diminuir); intragranular; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo), atingindo algumas vezes a dimensão do mesoporo pequeno (0,0625 a 0,5 mm), figura 30 A, E e F.

Filstone Blue

Macroscopicamente possui estrutura maciça, com anisotropia muito baixa, coloração cinzento/azulado a creme (especialmente quando manchada ou úmida). A sua granularidade é heterogênea (Figura 31 B). A maioria dos grãos apresentam-se arredondados e alongados, principalmente os bioclastos, e em alguns grãos a sua região central é mais microcristalina em relação à periferia. Além dos bioclastos é possível identificar pelóides e veios e geodos calcíticos (figura 31 A, B e D). Os clastos contactam entre si, sustentando-se entre eles, tendo um cimento microcristalino carbonático a preencher os espaços vazios. Por vezes observam-se estilólitos com grandes concentrações de óxidos, sulfetos e compostos orgânicos. (Figura 31 C, D e E). Em lupa, consegue-se observar cavidades inter- e intra-granulares com crescimentos botroidais, confirmando que são porosidades e não espaços vazios como resultado do processo de corte da amostra.

Figura 31 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilólítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda.



Petrograficamente, a granulação é heterogênea, os grãos apresentam-se arredondados e alongados, muitas vezes com estruturas internas preservadas e na maioria estão preenchidos com calcita microcristalina, porém alguns deles possuem recristalizações microespáticas a espáticas na porção mais central das suas estruturas e calcita microcristalina na periferia (figura 32 A). Em geral, os grãos desta rocha variam entre 0,25 mm e 1 mm, podendo atingir os 3 mm. O cimento tem dimensões superiores a 0,03 mm (espato) e está organizado sob a forma de mosaico.

Este calcário é composto por cerca de 39% de fragmentos de bioclastos de diversas espécies (equinodermes, algas moluscos e foraminíferos, figura 32 C), 20% de pelóides, 8% de intraclastos (tendo encontrado agregados de grãos cimentados – *grapestones*, figura 32 E), 18% de cimento espático, 6% de lama microcristalina e 3% de oóides. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes suturados (figura 32 A, C e D). Contém a presença de aglomerados de cor escura (compostos orgânicos) disseminados inter- e intra-grãos. Há a presença de estilólitos e próximo deles os grãos são mais penetrativos e ocorrem concentrações de compostos de cor castanha/laranja (óxidos, hidróxidos e matéria orgânica) e de cor mais escura (sulfetos de ferro), figura 32 D. Observam-se dissoluções no

contato entre grãos como resultado da passagem de fluidos subsaturados em CaCO_3 nos poros da rocha, podendo gerar porosidades secundárias e variar a permeabilidade e a porosidade primária das rochas. Ocorrem recristalizações inter e intragrãos, cimento carbonático micro a macrocristalino que preenche os espaços intersticiais entre os grãos. São encontrados *vugs* preenchidos por cristais de calcita e fraturas preenchidas por calcita pervasiva (figura 32 B).

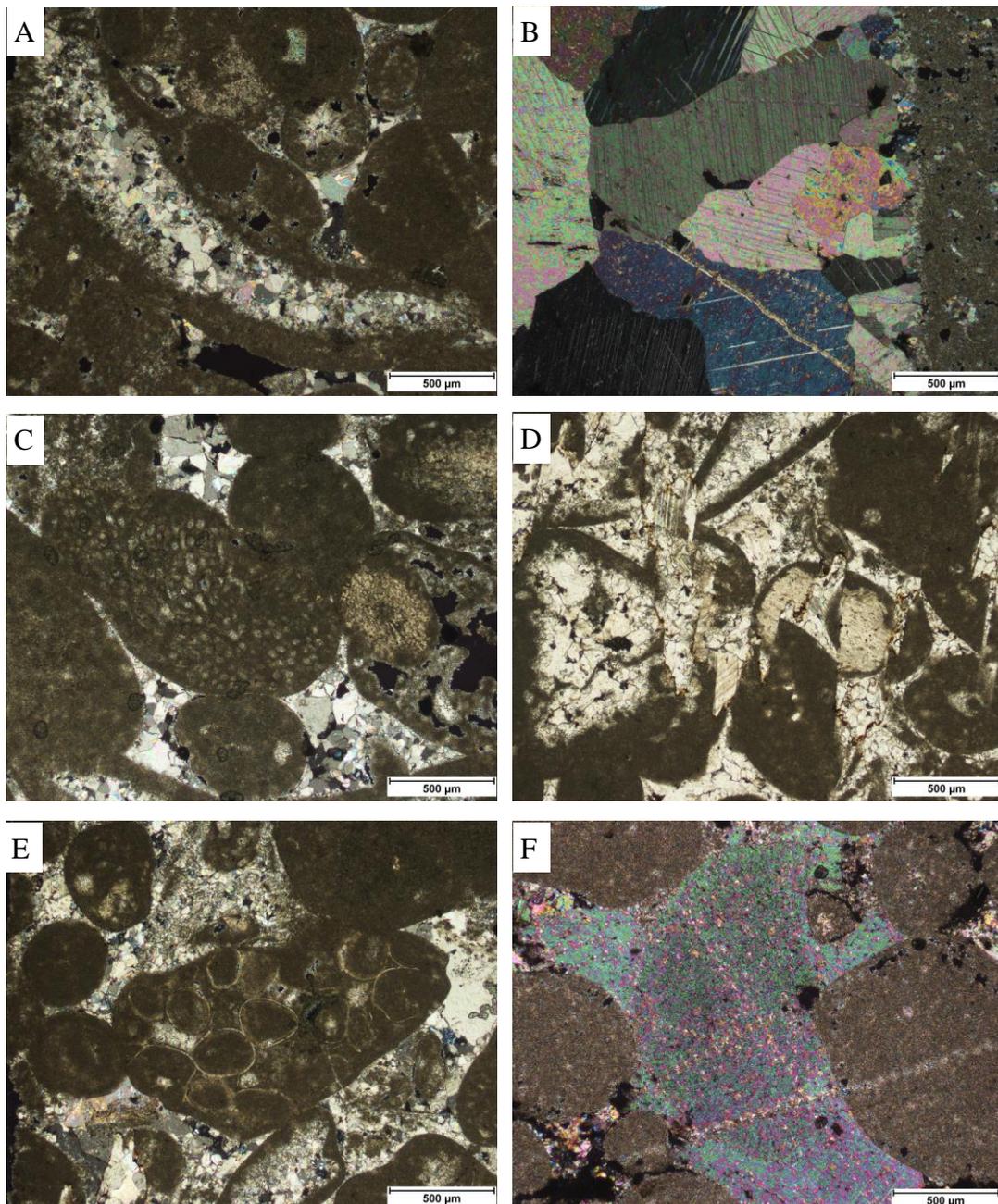
Estas características sugerem que a compactação e a dissolução inicialmente menos intensa é caracterizada pela aproximação dos grãos e pela percolação pervasiva de fluidos intersticiais pela rocha, entre os quais hidrocarbonetos, permanecendo alguns aglomerados disseminados no interior dos grãos. Posteriormente deu-se uma fase de compactação e dissolução sob pressão mais intensas levando à perda de grande volume de constituintes carbonáticos da rocha, tendo sido solubilizados e exportados, e acumulação de constituintes insolúveis da rocha nas superfícies estilolíticas (figura 32 D). A matéria orgânica disseminada pela rocha é interpretada como hidrocarbonetos muito oxidados do tipo betume, concordando com relatos de exsudações oleosas na rocha quando cortada. Por fim, ocorreu a precipitação do fluido saturado em carbonato no interior dos grãos sob a forma de microcristais de calcita (recristalização) e a formação do cimento nos interstícios dos grãos. Os espaços vazios no interior de grãos e do cimento comprovam que a recristalização foi incompleta. A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Segundo a classificação textural de Folk (1959) é considerado um biopelsparito.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *grainstone*.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade baixa (6%); secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos e formação dos agregados litoclásticos, *grapestones*, fazendo aumentar a porosidade da rocha, e pelo crescimento sintaxial que faz diminuir esta porosidade); intragranular e intercristalina; com um tamanho de poro entre 0,0625 a 0,5 mm (mesoporo pequeno), figura 32 B, E e F.

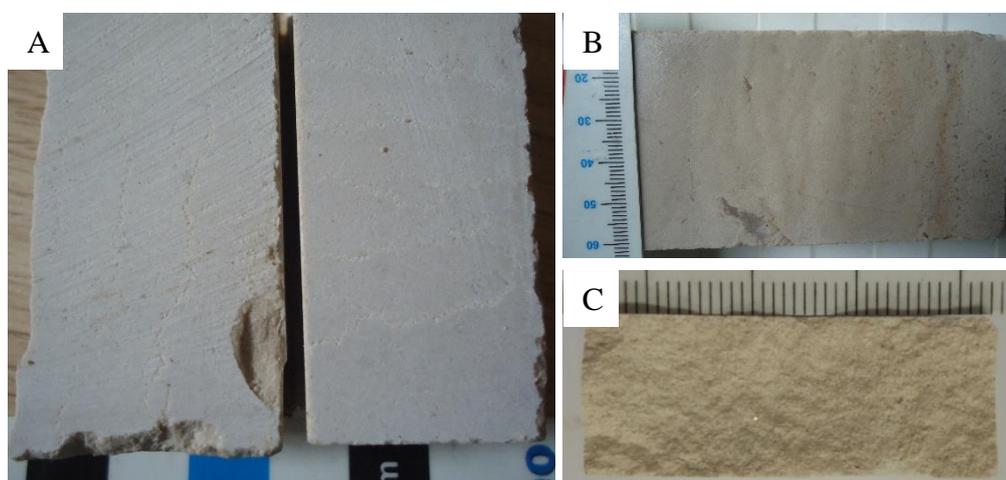
Figura 32 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (*grapestone*) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados).



Crema Paraná

Em termos macroscópicos exibe uma estrutura maciça, com baixa anisotropia, sendo mais perceptível quando úmidos, e uma coloração creme claro quando estão secos e creme quando estão úmidos (figura 33 A e B). A sua granulação é homogênea e muito fina, sendo constituída por uma matriz microcristalina carbonática (figura 33 C). Os grãos apresentam pequenas dimensões, sendo apenas visíveis alguns fósseis de maiores dimensões e alguns veios e geodos de calcita. Observam-se estilólitos com concentrações de óxidos e hidróxidos, e alguns poros resultantes de dissolução (figura 33 B).

Figura 33 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.



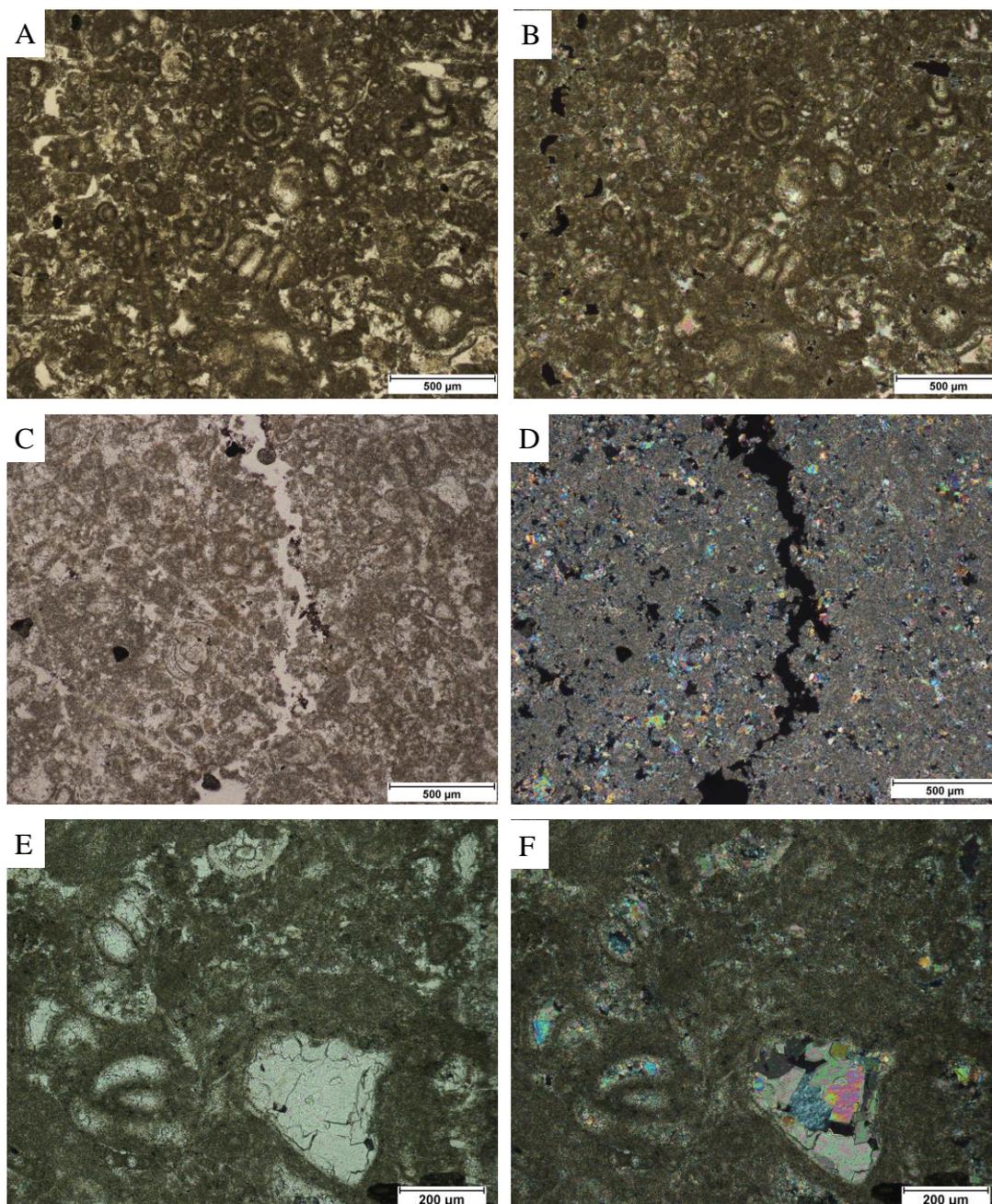
Este calcário compacto tem uma matriz homogênea com o tamanho dos grãos a variar entre 0,062 mm e 0,25 mm, podendo atingir os 0,4 mm e a matriz possui tamanho inferior a 0,005 mm (micrítica), tendo algum cimento microespático (0,005-0,03 mm), figura 34 A, B, C e D. Possui um abundante conteúdo fóssilífero (47%), essencialmente constituído por foraminíferos e gastrópodes, distribuídos homogêneamente em formas esféricas a elípticas e diâmetros variando entre 0,125-0,5 mm, em torno de 30% de matriz micrítica, 4% de intraclastos, 9% de pelóides e 6% de cimento microespático (figura 34 A e B). Em geral, o contato entre grãos é difícil de se ver. São observadas fraturas abertas dispostas de forma irregular na massa rochosa e com espaçamentos heterogêneos (figura 34 C e D). Alguns fósseis apresentam-se levemente recristalizados em calcita microespática (figura 34 E e F). A compactação da rocha é considerada densa.

Segundo Folk (1959) é considerada uma rocha aloquímica micrítica, biomicrito.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962), é

considerado um *wackestone*.

Figura 34 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente.



Em geral, segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade muito baixa (4%), sendo mais porosa próximo aos estilólitos; secundária (pela dissolução da

lama e formação dos estilólitos durante a diagênese); intercrystalina; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo).

Tabela 16 – Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.

		Bacia Potiguar	Bacia Lusitaniana		
		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	
Textura	Estrutura	Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	
	Compactação	Densa	Densa/dispersa	Densa/dispersa	
	Granulação	Homogênea (0,062-0,25 mm)	Homogênea (0,125-0,25 mm)	Heterogênea (0,25-1 mm)	
	Contatos	Difícil distinção	Pôntual a Côncavo-convexo	Pôntual a Côncavo-convexo	
	Grãos (%)	60	75	70	
	Matriz (%)	30	4	6	
	Cimento (%)	6	13	18	
	Poros (%)	4	8	6	
Composição	Matriz	Micrítica	Micrítica	Micrítica	
	Cimento	Microespático	Microespático com mosaico	Espático com mosaico	
	Grãos	Bioclastos (%)	78	17	55
		Pelóides (%)	15	63	28
		Oóides (%)	0	11	5
		Intraclastos (%)	7	9	12
	Fratura / Estilólito	Aberta / sem estilólitos	Sem fratura / com estilólitos	Preenchidas por calcita (pervasiva) / com estilólitos	
Porosidade	Secundária; Intercristalina; Microporo – (<0,0625 mm)	Secundária; Intragranular; Micro a Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)	Secundária; Intragranular e intracristalina; Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)		
Observações		Veios calcíticos; Recristalizações microespáticas e micríticas			
Classificação	Dunham (1962)	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	
	Folk (1959)	Biomicro	Pelsparito	Biopelsparito	

5.4.2 Aspectos do Meio Poroso

Os aspectos do meio poroso são correlacionados entre os três calcários e, sempre que possível, com parâmetros geológicos e petrográficos.

Nas tabelas dos itens abaixo estão sintetizados os valores médios obtidos para os aspectos do meio poroso dos três calcários em estudo e alguns valores calculados para as suas dispersões. Estes valores também são representados em gráficos facilitando a melhor visualização e correlação entre os diferentes parâmetros.

Porosidade e permeabilidade a gás

Com este ensaio conseguiu-se calcular os valores médios dos espaços vazios e da sua comunicabilidade através da injeção de nitrogênio e hélio nos plugues.

Na tabela 17 estão representados os valores médios da massa, volume de grãos, volume de poros, densidade de grão, porosidade, permeabilidade e alguns valores calculados para as suas dispersões. No gráfico 12 estão ilustrados os valores médios da porosidade dos três calcários em comparação com as respectivas permeabilidades.

As medidas dos três calcários têm valores de desvio padrão e coeficiente de variação relativamente baixos, sendo considerados homogêneos.

Neste ensaio utilizaram-se os mesmos plugues de 2,54 cm por 4 cm da tomografia. Estes valores estão concordantes com os da porosidade na tomografia, pois o Crema Paraná é o que possui menores valores e o Filstone Beije MF os maiores valores.

Observa-se que estes valores estão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário que tem a maior massa, maior volume de grãos e menor volume de poros. Por sua vez, o Filstone Beije MF é o calcário que tem a menor massa, menor volume de grãos e maior volume de poros.

Estes valores também estão de acordo com a petrografia, pois o Crema Paraná apresenta menor porosidade, menor quantidade de grãos, mais matriz micrítica e tem a granulação mais baixa, dados que lhe conferem um maior imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar de ter a menor quantidade de cimento. Por sua vez, o Filstone Beije MF possui maior porosidade, maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz, o que lhe confere um menor imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar da quantidade intermediária de cimento.

Em relação à permeabilidade para as amostras do calcário Crema Paraná não foram detectados valores, pois apresenta baixa porosidade e a comunicabilidade dos seus poros deve ser tão baixa que não permitiu a passagem do gás de um lado ao outro das amostras. Para o Filstone Blue apenas se detectaram valores de permeabilidade para uma amostra, enquanto que no Filstone Beije MF apenas para uma amostra não se detectaram valores. Pode-se concluir que o Crema Paraná é o calcário que permite menor permeabilidade no seu interior e o Filstone Beije MF o que permite a maior permeabilidade, o que vai de acordo com a porosidade e nos diz que a comunicabilidade entre as porosidades é baixa.

Para os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue escolheram-se dois plugues com estilólitos e dois homogêneos, notando-se uma maior porosidade para os plugues com estilólitos e sem interferência nos valores da permeabilidade. Para o Filstone Beije MF foram

ainda escolhidos dois plugues com veios calcínicos que não refletiram interferência nem para a porosidade nem para a permeabilidade. Já o Crema Paraná apresenta, em geral, mais estilólitos e, por isso, escolheu-se um plugue que tivesse menos estilólitos, o qual obteve um valor inferior de porosidade.

Tabela 17 – Valores médios da massa, volume de grãos, volume de poros, densidade de grãos, porosidade e da permeabilidade a gás dos três calcários em estudo.

Amostra		Massa (g)	Volume de Grãos (cm ³)	Volume de Poros (cm ³)	Densidade de Grãos (g/cm ³)	Porosidade (%)	Permeabilidade (Darcy)
Crema Paraná	1	48,08	17,83	0,45	2,70	2,40	0,00
	2	52,70	19,52	0,69	2,70	3,40	0,00
	3	51,78	19,18	0,74	2,70	3,70	0,00
	4	52,78	19,55	0,84	2,70	4,10	0,00
	Média	51,34	19,02	0,68	2,70	3,40	0,00
	S	1,92	0,70	0,15	0,00	0,63	0,00
	δ (%)	3,74	3,70	21,45	0,07	18,49	0,00
Filstone Beije MF	1	47,84	17,69	2,32	2,71	11,60	0,00
	2	45,59	16,94	1,89	2,69	10,10	0,01
	3	48,48	17,96	2,25	2,71	11,10	0,05
	4	46,39	17,14	1,92	2,71	10,10	0,03
	Média	47,08	17,43	2,10	2,70	10,73	0,02
	S	1,14	0,41	0,19	0,01	0,65	0,02
	δ (%)	2,43	2,36	9,12	0,25	6,06	90,86
Filstone Blue	1	47,24	17,50	1,44	2,70	7,60	0,00
	2	48,58	17,97	1,32	2,70	6,80	0,01
	3	46,77	17,32	1,39	2,70	7,40	0,00
	4	47,16	17,46	1,26	2,70	6,70	0,00
	Média	47,44	17,56	1,35	2,70	7,13	0,00
	S	0,68	0,25	0,07	0,00	0,38	0,00
	δ (%)	1,44	1,40	5,14	0,03	5,38	173,21

*4 plugues por calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Porosidade por intrusão de mercúrio

Com este ensaio conseguiu-se calcular os valores médios dos espaços vazios através da injeção de mercúrio nos plugues.

Na tabela 18 estão representados os valores médios do volume de intrusão, área total de poros, diâmetro de poro, porosidade e alguns valores calculados para as suas dispersões. No gráfico 12 estão ilustrados os valores médios da porosidade dos três calcários em comparação com as respectivas permeabilidades.

As medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no coeficiente de variação quer no desvio padrão, considerando a sua porosidade homogênea nos diferentes plugues.

Os valores para este ensaio estão concordantes com os da porosidade nos ensaios anteriormente descritos, pois o Crema Paraná continua a ser o que possui menores valores e o Filstone Beije MF o que apresenta os maiores valores de porosidade. Através do volume de intrusão de mercúrio obteve-se o volume de poros que foi menor para o Crema Paraná e maior para o Filstone Beije MF. Através do ângulo de contato do mercúrio e da pressão de intrusão calcula-se o diâmetro do poro, em que maiores pressões indicam menores diâmetros de poro.

O crema Paraná tem os menores diâmetros de poro, enquanto que o Filstone Beije MF os maiores. Contudo, os valores da média de diâmetro de poro são bastante inferiores ao observado nas microscopias. Assim, pode-se concluir que a média de poros destes calcários, em geral, é menor do que a média de diâmetro de poro observado nitidamente ao microscópio.

Tabela 18 – Valores médios do volume de intrusão, área total de poros, diâmetro de poro e da porosidade por intrusão de mercúrio dos três calcários em estudo.

Amostras	Vol. Intrusão (mL/g)	Área total de poros (m ² /g)	Diâmetro de poro (µm)	Porosidade (%)
Crema Paraná	0,01	1,36	0,04	3,78
S	0,00	0,24	0,01	0,16
δ (%)	4,34	17,85	22,14	4,26
Filstone Beije MF	0,04	0,88	0,18	9,61
S	0,00	0,01	0,00	0,02
δ (%)	0,18	1,05	0,87	0,19
Filstone Blue	0,03	0,77	0,14	6,65
S	0,00	0,03	0,00	0,32
δ (%)	5,08	3,78	1,28	4,83

*2 plugues por calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Estes valores também estão de acordo com a petrografia, pois o Crema Paraná apresenta menor porosidade, menor quantidade de grãos, mais matriz micrítica e tem a granulação mais baixa, dados que lhe conferem um maior imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar de ter a menor quantidade de cimento. Por sua vez, o Filstone Beije MF possui maior porosidade, maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz, o que lhe confere um menor imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar da quantidade intermediária de cimento.

Nesta análise atingiu-se a pressão máxima de 30000 psi (200 MPa), permitindo atingir diâmetros de poro com 0,0075 µm (no campo do mesoporo). Tendo em conta o ensaio

de compressão uniaxial, o Filstone Beije MF teve a menor resistência em torno de 85 MPa (item 3 da tese), assim esta pressão poderá ter afetado de alguma maneira a estrutura interna e criar mais espaços vazios que seriam considerados poros e preenchidos pelo mercúrio. No entanto, as amostras não fraturaram nem tiveram qualquer tipo de alteração visível.

Gráfico 10 – Intrusão incremental versus diâmetro do poro (A, C e E) e da intrusão incremental versus a pressão (B, D e F) para os plugues do Crema Paraná (AP1 – A e B; AP2 – C e D) e do Filstone Beije MF (BF1 – E e F), pelo método de intrusão por mercúrio.

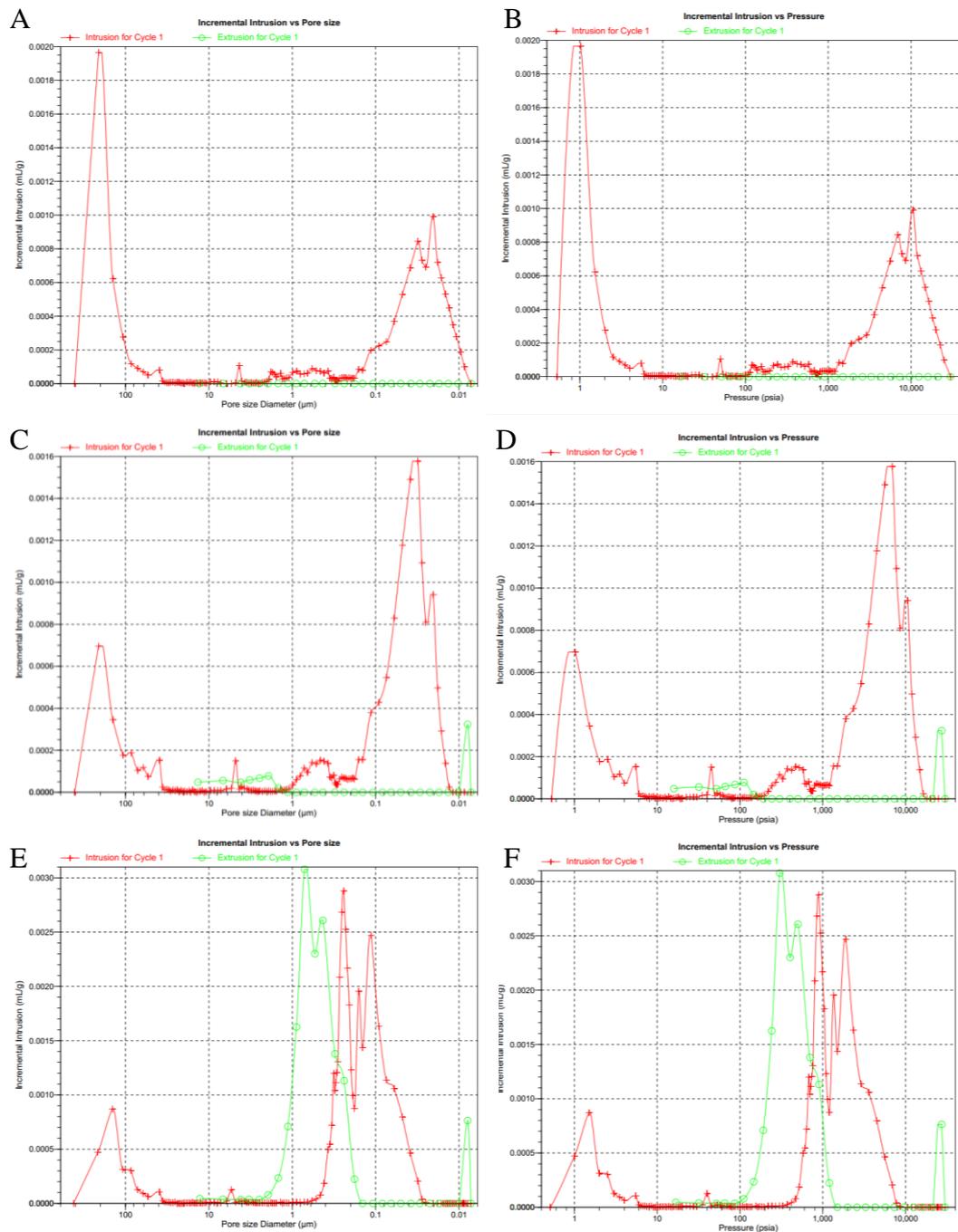
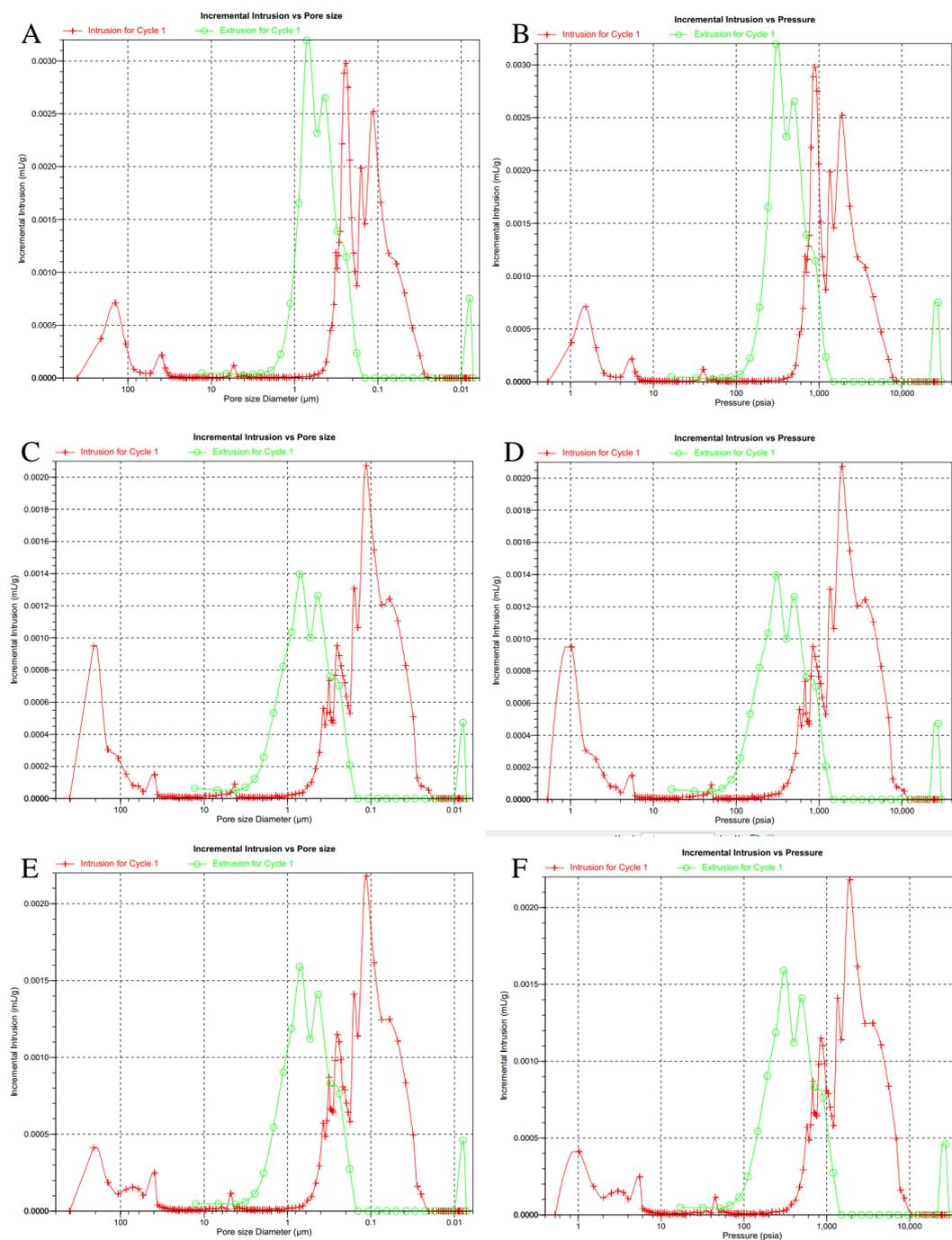


Gráfico 11 – Intrusão incremental versus diâmetro do poro (A, C e E) e da intrusão incremental versus a pressão (B, D e F) para os plugues do Filstone Beije MF (BF2 – A e B) e do Filstone Blue (AF1 – C e D; AF2 – E e F), pelo método de intrusão por mercúrio.



Através dos gráficos de intrusão incremental versus diâmetro do poro e versus a pressão (Gráficos 5.1 e 5.2) conclui-se que o tamanho médio dos poros anda em torno dos 0,1 μm e que a partir das pressões de 10000 psia (70MPa) não existe mais intrusão de mercúrio, figuras 5.10 e 5.11. Portanto não entrou mais mercúrio antes do ponto da possível quebra das

amostras, poderá é ter entrado por algum comprometimento da estrutura das amostras (fissuras, poros) durante o aumento da pressão.

A curva da extrusão acompanha mais ou menos a da intrusão, podendo traduzir-se que os poros são sensivelmente cilíndricos. Esta curva termina a meio pois o restante do mercúrio fica no interior das amostras, sendo até visível a mudança de cor das amostras pós ensaio. O mercúrio vai saindo por gradiente com o tempo, pois irá sair sem pressão, o que demora mais tempo que a intrusão através de pressão.

Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada foi utilizada para o imageamento tridimensional de amostras de calcário, visando à obtenção da porosidade e de um modelo 3D do espaço poroso.

Na tabela 19 estão representados os valores médios da porosidade e alguns valores calculados para as suas dispersões. A figura 35 consiste das imagens do modelo 3D com a representação do espaço poroso.

Os três calcários têm alto coeficiente de variação, sendo necessário repetir o ensaio com maior número de plugues para se diminuir esta heterogeneidade.

Tabela 19 – Valores médios da porosidade por tomografia computadorizada para plugues com diâmetros de 2,54 cm e de 0,6 cm dos três calcários em estudo.

Amostra	Crema Paraná (2,54 cm)	Filstone Beije MF (2,54 cm)	Filstone Blue (2,54 cm)	Crema Paraná (0,6 cm)	Filstone Beije MF (0,6 cm)	Filstone Blue (0,6 cm)
Porosidade (%)	0,00000	0,00005	0,00887	0,00013	0,01502	0,00611
S	0,00000	0,00006	0,01212	0,00019	0,02124	0,00597
δ (%)	0,00000	141,42	136,67	141,42	141,42	97,70

*2 plugues por calcário por diâmetro diferente; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

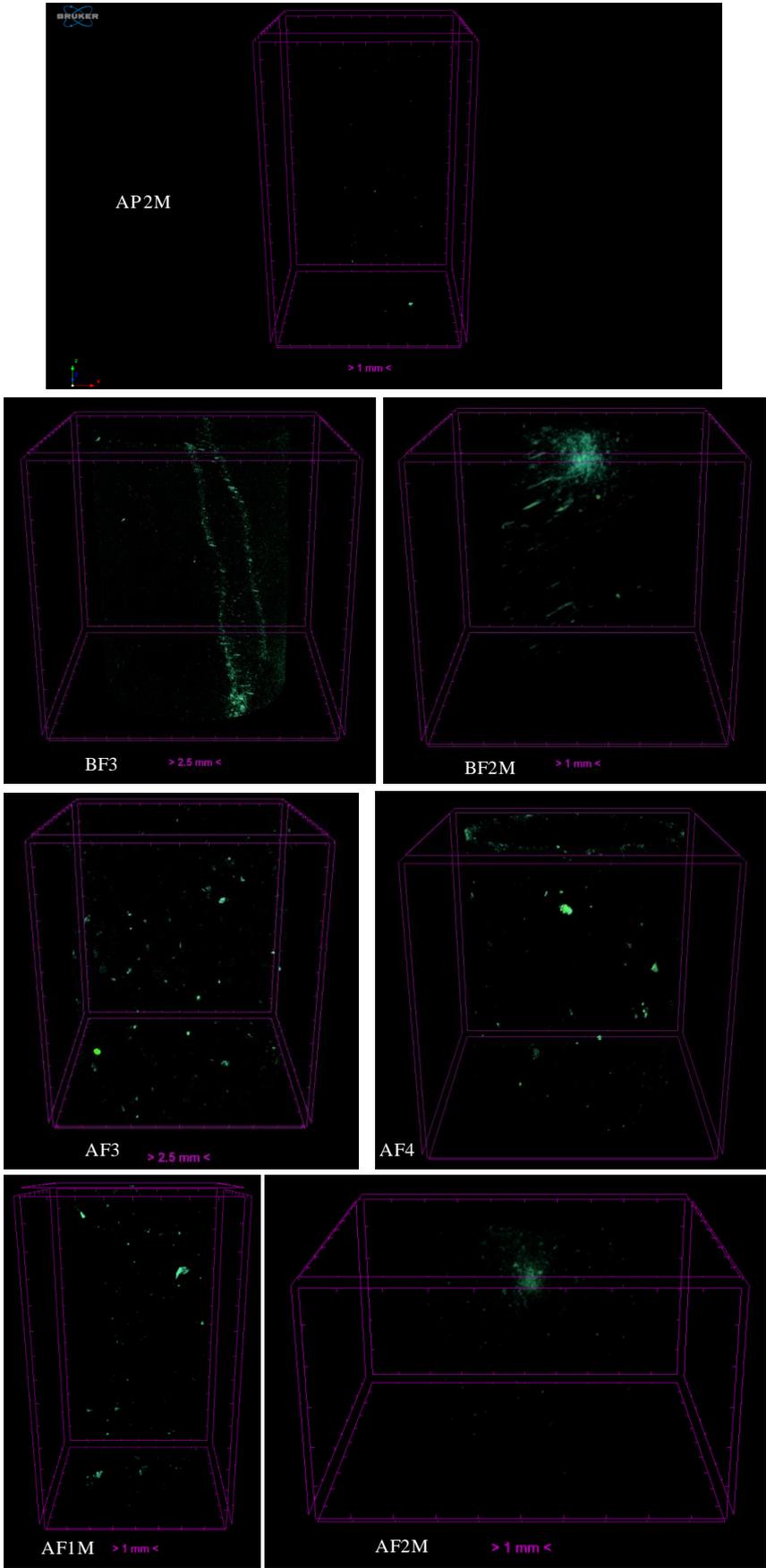
Nos plugues com diâmetro de 1” (2,54 cm) e 4 cm de comprimento observa-se que os três calcários têm valores de porosidade inferiores comparativamente com os plugues com diâmetro de 0,6 cm e comprimento variável. O comprimento dos plugues não influencia nas medições, contudo o diâmetro influencia na resolução máxima que se consegue atingir. Com o diâmetro de 2,54 cm atingem-se resoluções na ordem dos 20 μm , enquanto que com um diâmetro de 0,6 cm atingem-se resoluções na ordem dos 10 μm . Portanto, com um diâmetro de 0,6 cm consegue-se medir uma maior variedade de tamanho de poros e atingir

poros de menores dimensões, tendo uma medição da porosidade mais real. Em geral, como a porosidade para o diâmetro de 0,6 cm é muito superior à porosidade com diâmetro de 2,54 cm para dois dos três calcários, conclui-se que os poros são de menores dimensões e foi necessária uma resolução maior para se conseguir quantificar esta porosidade mais próxima do real. Apenas o calcário Filstone Blue tem valores mais elevados no diâmetro 2,54 cm, pois é o menos homogêneo e com maior granulação dos três em estudo. Contudo pode-se observar que os valores de porosidade, em todos os casos, são muito inferiores aos valores de porosidade comparativamente com os outros ensaios realizados e que estão consistentes entre si. Este fator mostra que existe quase uma inexistente porcentagem de poros com dimensões que possam ser detectadas através dos limites de resolução utilizados e muitos poros com dimensões inferiores aos limites de detecção. Segundo o ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio observou-se que o tamanho médio de poro é bastante inferior ao que poderia ter sido detectado neste método. Portanto, para se ter uma medida mais real possível da dispersão dos poros e dos seus tamanhos torna-se necessária a realização num equipamento com melhor resolução ou a realização de análises de microscopia eletrônica de varredura.

Porém, tendo em conta o diâmetro 0,6 cm como sendo o mais real, conclui-se que o Crema Paraná tem o valor mais baixo de porosidade e o Filstone Beije MF é o calcário com maior porosidade. Estes valores estão concordantes com a petrografia, pois o Crema Paraná apresenta menor porosidade, menor quantidade de grãos, mais matriz micrítica e tem a granulação mais baixa, dados que lhe conferem um maior imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar de ter a menor quantidade de cimento. Por sua vez, o Filstone Beije MF possui maior porosidade, maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz, o que lhe confere um menor imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar da quantidade intermediária de cimento. A ordem dos valores de porosidade neste ensaio também estão de acordo com os restantes ensaios, ou seja, o Crema Paraná é o menos poroso e o Filstone Beije MF é o mais poroso.

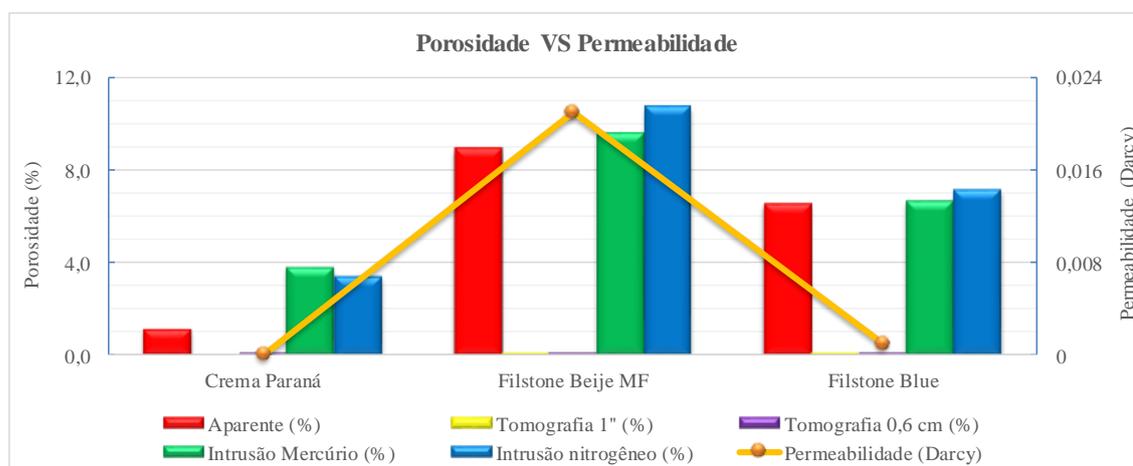
Na figura 35 apenas estão representadas sete imagens 3D referentes ao espaço poroso, pois apenas foi possível detectar poros nestes sete plugues. Este fato corrobora com a quase inexistente porosidade destes três calcários para as resoluções utilizadas, principalmente do Crema Paraná, ao qual apenas se conseguiu detectar poros num único plug. Analisando as imagens conclui-se que as porosidades não mantêm um padrão de dispersão nem de tamanho. Nas imagens do AF2M e do BF2M é possível observar-se um aglomerado de porosidades, o que poderá corresponder a geódos internos. Na imagem do BF3 nota-se um alinhamento inclinado de porosidades, tratando-se de uma superfície estilolítica.

Figura 35 – Imagens 3D dos plugues em que foram detectadas porosidades por tomografia computadorizada.



No gráfico 12 estão representados os valores médios para a porosidade obtida através de todos os ensaios anteriores, assim como a porosidade aparente (Crema Paraná=1,15%, Filstone Beije MF=8,90%, Filstone Blue=6,53%, obtida no artigo 3), em comparação com a permeabilidade dos três calcários.

Gráfico 12 – Representação gráfica da relação entre os valores médios das porosidades com a permeabilidade.



Velocidade de ondas ultrassônicas

O ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas é um ensaio não destrutivo que permite o estudo das propriedades mecânicas e estruturais dos materiais, estando associado à densidade e porosidade.

Na tabela 20 estão representados os valores médios da velocidade de ondas ultrassônicas, alguns módulos calculados em função da velocidade de ondas, valores recomendados de todos os parâmetros (Cheatsheet Rock Physics, 2011) e alguns valores calculados para as suas dispersões. No gráfico 13 estão representados os valores médios e alguns valores calculados para as velocidades de onda dos três calcários.

Segundo Cheatsheet Rock Physics (2011), os três calcários satisfazem os valores recomendados para todos os parâmetros exceto para o módulo de Young. Assim, os três calcários podem ser utilizados como rochas ornamentais, tendo apenas atenção à sua aplicação em ambientes que possam gerar deformações longitudinais segundo tensões longitudinais.

Observa-se que as medidas dos três calcários têm baixa dispersão, quer no desvio padrão quer no coeficiente de variação, sendo considerados homogêneos.

Tabela 20 – Valores médios das propriedades elásticas dos três calcários em estudo.

Amostras	VP (m/s)	VS (m/s)	Módulo de Poisson	Módulo Bulk (GPa)	Módulo Cisalhamento (GPa)	Módulo Young (GPa)
Cheatsheet (2011)	3800 - 6500	1900 - 3250	0,33	37 - 71	9 - 26	97 - 280
Crema Paraná	6004,26	3191,02	0,30	58,66	26,58	69,27
S	30,59	15,52	0,00	0,61	0,26	0,68
δ (%)	0,22	0,49	0,05	1,05	0,97	0,98
Filstone Beije MF	4971,85	2804,12	0,27	34,17	18,87	47,81
S	25,88	16,90	0,00	0,32	0,23	0,55
δ (%)	0,52	0,60	0,23	0,92	1,20	1,16
Filstone Blue	5414,72	2976,61	0,28	43,77	22,15	56,86
S	36,53	11,05	0,00	0,77	0,16	0,51
δ (%)	0,67	0,37	0,67	1,75	0,74	0,89

*4 plugues por calcário; s – desvio padrão; δ – coeficiente de variação.

Como seria de esperar, as ondas P propagam-se mais rapidamente que as ondas S, pois as ondas P propagam-se longitudinalmente, enquanto que as ondas S propagam-se transversalmente. Como a propagação das ondas P e S depende da densidade e porosidade dos meios em que se deslocam, pode-se concluir que o Crema Paraná é o calcário mais denso e menos poroso, dos três calcários em estudo, pois tem os valores mais elevados para a velocidade de ondas, e o Filstone Beije MF é o menos denso e o mais poroso por possuir os valores mais baixos para a velocidade de ondas.

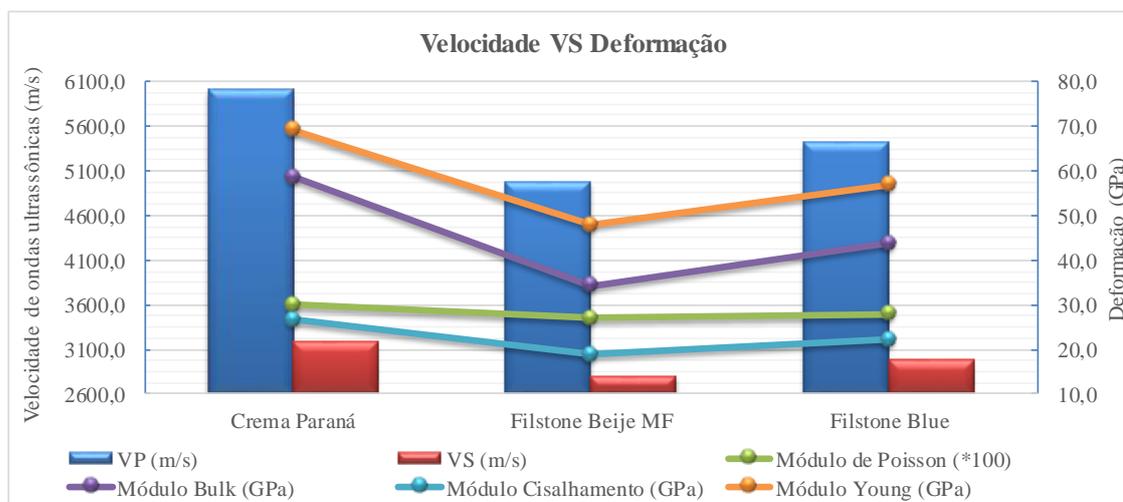
O módulo de Poisson consiste numa medida de deformação transversal segundo uma tensão longitudinal. Assim, o Crema Paraná é o material menos deformado, sendo necessário exercer maiores tensões para se obter deformação. O Filstone Beije MF é o calcário com maior taxa de deformação dos três em estudo.

Através do módulo Bulk consegue-se avaliar a elasticidade volumétrica, ou seja, qual o material que se deforma em todas as direções quando aplicadas tensões em todas as direções. Deste modo, o Filstone Beije MF é o calcário mais compressível, enquanto que o Crema Paraná é o calcário menos compressível dos três materiais.

O módulo cisalhamento permite saber qual o material com maior deformação segundo a aplicação de uma tensão paralela a uma superfície causando o deslocamento de planos paralelos uns aos outros. Assim, o Crema Paraná comportou-se como sendo o material menos deformado, pois é necessário aplicar-se maiores tensões para se deslocarem planos paralelos uns aos outros. Já o Filstone Beije MF é o material mais deformado.

O módulo de Young proporciona uma medida de deformação dos materiais através da medição da deformação longitudinal segundo a aplicação de uma tensão longitudinal. Portanto o Crema Paraná comportou-se como o material menos deformado, pois é necessário exercer maiores tensões para se obter deformação. Enquanto que o Filstone Beije MF é o calcário que mais se deforma dos três em estudo.

Gráfico 13 – Representação gráfica da relação entre os valores da velocidade de ondas ultrassônicas e os módulos calculados para os três calcários.



*VP – ondas P; VS – ondas S.

Estes resultados dos módulos vão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário mais denso e menos poroso e o Filstone Beije MF ser o calcário menos denso e mais poroso dos três materiais em estudo.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

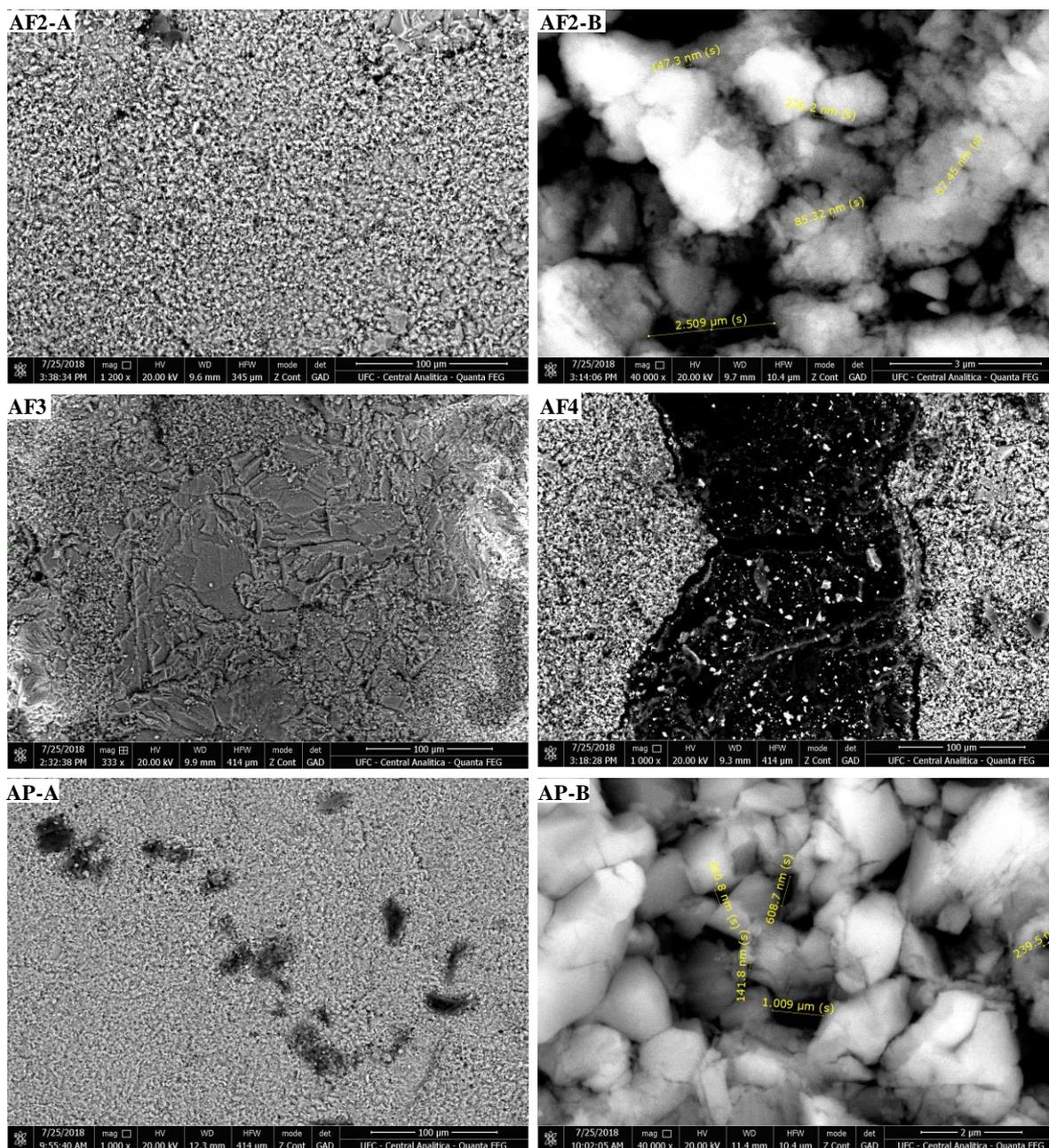
Este ensaio teve como objetivo avaliar a porosidade, principalmente o diâmetro médio dos poros e obter imagens da superfície das amostras com algumas características particulares das mesmas.

Nas figuras 5.10 e 5.11 estão algumas imagens da superfície das amostras evidenciando alguns aspectos particulares e dando ênfase às suas porosidades.

Considerando as imagens das figuras 5.10 e 5.11 observamos que o Crema Paraná (AP) possui a menor granulação e mais homogênea, a menor quantidade e diâmetro de poro, tendo diâmetros de poro mais homogêneos. Já o Filstone Beije MF (BF) observamos que apresenta uma granulação intermediária e homogênea, a maior quantidade e diâmetro de poro. O Filstone Blue (AF) tem a maior granulação e menos homogênea, quantidade e diâmetro de

poro intermediário (mas com valores mais próximos do Filstone Beije MF) e diâmetros de poro menos homogêneos.

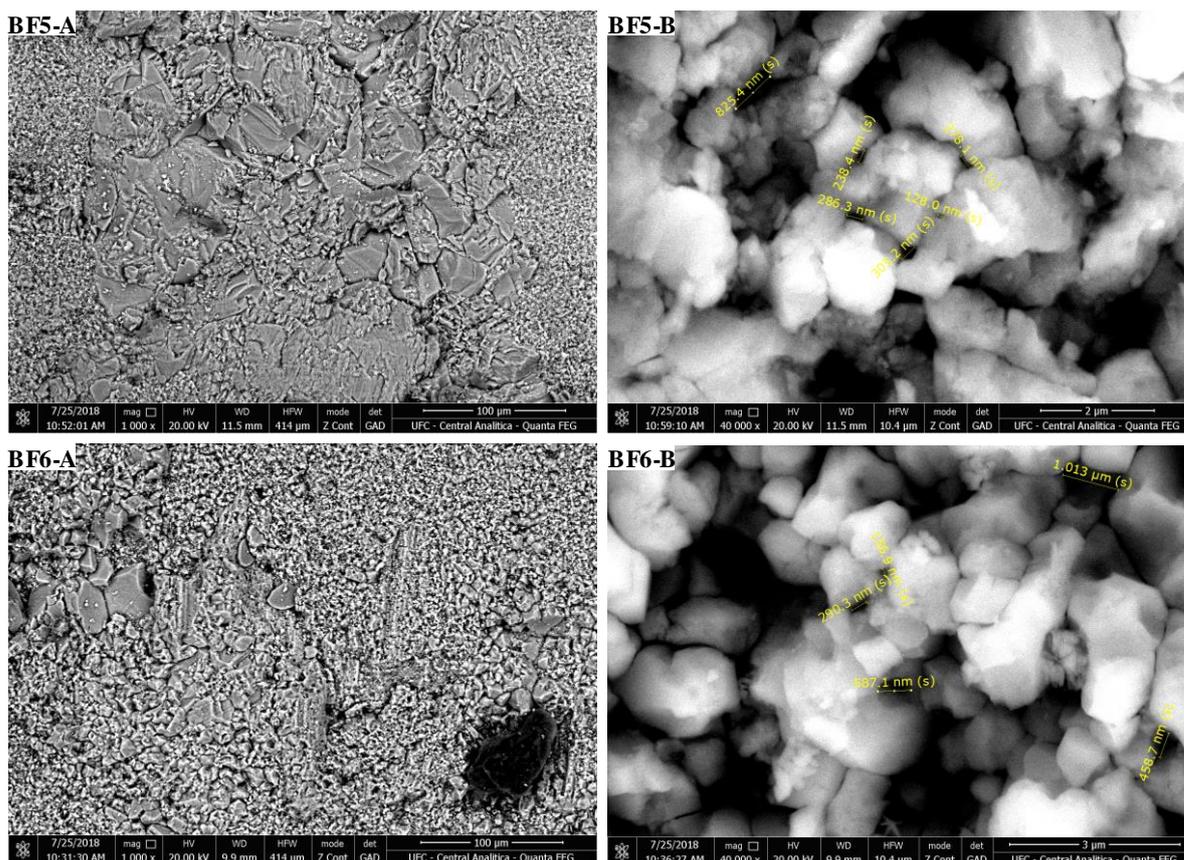
Figura 36 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de amostras do Crema Paraná (AP) e do Filstone Blue (AF), mostrando alguns aspectos particulares e dando ênfase ao diâmetro de poro.



Na imagem AF3 observa-se um estilólito que atravessa grãos de grande e pequenas dimensões. Na imagem AF4 é bem visível um veio de matéria orgânica (a escuro) a atravessar a amostra. Na AP-A tem-se a escuro um estilólito a atravessar a amostra. Na BF5-A

observam-se grãos mais grosseiros em meio de grãos finos, correspondendo a um veio calcítico. Na imagem BF6-A é visível um estilólito.

Figura 37 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de amostras do Filstone Beije MF (BF), mostrando alguns aspectos particulares e dando ênfase ao diâmetro de poro.



Tendo em consideração a classificação dos poros segundo a IUPAC conclui-se que apenas foram visíveis poros na gama dos macroporos, apesar de que se chegou muito próximo do campo dos mesoporos, sendo o tamanho mínimo medido de poro cerca de 0,06 μm (tabela 21).

Tabela 21 – Classificação dos poros segundo a IUPAC (GREGG & SING, 1982, adaptado).

Classificação	Tamanho (Å)	Tamanho (μm)
Microporos	< 20	< 0,002
Mesoporos	20 – 500	0,002 – 0,05
Macroporos	> 500	> 0,05

5.5 Conclusões

Para a porosidade e permeabilidade por nitrogênio e hélio e para a porosidade por intrusão de mercúrio é o Crema Paraná que tem os valores mais baixos e o Filstone Beije MF os valores mais elevados dos três calcários.

Na tomografia computadorizada observa-se que os plugues com diâmetro de 2,54 cm têm menores resoluções que os plugues de 0,6 cm. Para os plugues de 0,6 cm o calcário Crema Paraná é o que apresenta menores porosidades e o Filstone Beije MF as maiores porcentagens de porosidade. Contudo, os valores deste ensaio são muito baixos e revelam que o tamanho médio dos poros é bastante inferior ao que é detectável pelas resoluções utilizadas.

Estes dados estão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário que tem a maior massa, maior volume de grãos, menor volume e diâmetro de poros. Em lâmina delgada, apresenta a menor porosidade, menor quantidade de grãos, mais matriz micrítica e granulação mais baixa, conferindo um maior imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar de ter a menor quantidade de cimento. Já o Filstone Beije MF é o calcário que tem a menor massa, menor volume de grãos, maior volume e diâmetro de poros. Petrograficamente possui a maior porosidade, maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz, conferindo um menor imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar da quantidade intermediária de cimento.

Através do MEV apenas se conseguiram visualizar poros até 0,06 μm e na MIP calculou-se um diâmetro médio dos poros em torno de 0,1 e 0,2 μm para os calcários Filstone e 0,04 μm para o Crema Paraná. Apenas no ensaio de MIP para o Crema Paraná se entrou no início do campo do mesoporo (0,002-0,05 μm), nas restantes condições o diâmetro do poro situa-se no campo do macroporo ($>0,05 \mu\text{m}$).

O Crema Paraná tem as maiores velocidades de onda e o Filstone Beije MF as menores. Segundo os módulos de poisson, Bulk, cisalhamento e Young, o Crema Paraná é o calcário com menor taxa de deformação e o Filstone Beije MF com a maior taxa de deformação. Estes resultados vão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário mais denso e menos poroso e o Filstone Beije MF ser o menos denso e mais poroso dos três calcários.

Segundo Cheatsheet Rock Physics (2011), os três calcários satisfazem os valores recomendados para as propriedades elásticas exceto o módulo de Young. Assim, os três calcários podem ser utilizados como rochas ornamentais, tendo apenas atenção à sua aplicação em ambientes que possam gerar deformações longitudinais segundo tensões também elas longitudinais.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por permitirem todas as condições para a realização da presente investigação, incluindo o doutorado sanduíche. Ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), à Central Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC) e à Universidade de Aveiro (UA) por permitirem a execução das análises em questão.

Referências

- ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste*, 2., 1977, Campina Grande, **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, p.242-258. 1977.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-1**: Rochas para revestimentos - Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 4p. 2015.
- AZERÊDO, A. C. Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). **Comunicações Geológicas**, t. 94, p.29-51. 2007.
- AZERÊDO, A. C. **Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica) - análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia**. Tese de Doutorado (não publicada), Dep. de Geologia, Faculdade de Ciências, Univ. Lisboa, + 36 ests. (2 vols), 366p. 1993.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I.G. & MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, *In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. Origem e evolução de bacias sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, p.291-310. 1990.
- BROWN, G. O. Henry Darcy and the making of a Law. **Water resourcesresearch**, v. 38, nº 7, 12p. 2002.
- CARVALHO, J. M. F. *et al.* Rochas ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: breve caracterização dos recursos, dos centros de produção e delimitação preliminar de áreas potenciais. **Boletim de Minas**, 47 (1), 22p. 2012.
- CARVALHO, J. M. F. *at al.* **Maciço Calcário Estremenho, Caracterização da situação de referência (relatório interno)**, 42p. 2011.

- CASSAB, R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- CHEATSHEET ROCK PHYSICS. 2011: <https://agilescientific.com/blog/2011/3/7/rock-physics-cheatsheet.html>. Acesso em 13 Agosto de 2018.
- CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, 54, nº2, p.207-250. 1970.
- DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris, 1856.
Desenvolvimento da técnica para especificação de cores e a nova nomenclatura para classificação de rochas ornamentais com base nas cores medidas. São Paulo, UNESP, **Geociências**, vol. 25, nº 4, p.403-415. 2006.
- DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In*: Ham, W. E. (Ed.). Classification of carbonate rocks, A Symposium. **American Association of Petroleum Geologists**, p.108-121. 1962.
- FARIAS, P. R. C. *et al.* Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. **Roteiro de Excursão**, 43p. 1990.
- FOLK, R. L. Practical petrographic classification of limestones. **American Association Petroleum Geology Bulletin**, V. 43, p.1-38. 1959.
- FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifteamento da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p.196-207. 1987.
- GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2008.
- GREGG, S. J. & SING, K. S. W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. 2. Auflage, Academic Press, London, 303p. 1982.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **NIST ISO 15901-1** recommended practice guide: Porosity and surface area measurements for solid materials, Peter Klobes, Klaus Meyer and Ronald G. Munro. 2006
- KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In* **Geologia de Portugal no contexto da Ibéria** (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, p.317-368. 2006.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. LNEG. **Carta Geológica de Portugal na escala 1:1000000**, 3ªed, LNEG, Lisboa. 2010.
- MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.
- MONTANI, C. **XXVI Report marble and stones in the world 2014**. 2015 Aldus Casa di

Edizioni in Carrara. 2015

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 88p. 2002.

NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. *In: Actas II Congresso Uruguaio de Geologia*, Uruguai, p.103-107. 1998.

NETO, O. C. P. *et al.* V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, Rio de Janeiro, p.357-369. 2007.

POROUS MATERIALS INC. **PMI Gas Permeameter. User's Manual**. Version 6.0.61 p. 1996.

PROJETO ÁGUA SUBTERRÂNEA DO NORDESTE DO BRASIL. PROASNE. Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú. 2006. SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós- Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, Rio Grande do Norte, p.35-51. 2006.

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, Lisboa-Portugal, p.78-86. 1997.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. Rochas de Qualidade**, nº 127, São Paulo, p80-84. 1996.

SOARES, U. M.; ROSSET, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, nº55, 2003.

SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, 1982, Salvador, **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p.181-183. 1982.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

6 CARACTERIZAÇÃO DA ALTERABILIDADE DOS CALCÁRIOS: CREMA PARANÁ (BRASIL), FILSTONE BEIJE MF E FILSTONE BLUE (PORTUGAL)

Artigo 4 - revista Construction and Building Materials ou Journal of materials in civil engineering – B1

Autores

Joni Gaspar Marques, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: jonimarques@ua.pt

Irani Clezar Mattos, UFC – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici - Bloco 912/913, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil. Contato e-mail: irani.mattos@ufc.br

José de Araújo Nogueira Neto, UFG – Universidade Federal de Goiás, Rua Mucuri, s/n – Setor Conde dos Arcos, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil. Contato e-mail: nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com

Joaquim António dos Reis Silva Simão, FCT/UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento Ciências da Terra, Quinta da Torre, CEP 2829-516 Caparica, Setúbal, Portugal. Contato e-mail: jars@fct.unl.pt

António Carlos Galhano, FCT/UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento Ciências da Terra, Quinta da Torre, CEP 2829-516 Caparica, Setúbal, Portugal. Contato e-mail: acag@fct.unl.pt

Resumo

Brasil e Portugal se encontram entre os dez maiores produtores mundiais de rocha ornamental. Os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue pertencem ao Membro Pé da Pedreira da Bacia Lusitaniana (Portugal), enquanto que o Crema Paraná pertence à Formação Jandaíra da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte). Esta pesquisa objetiva uma avaliação da alterabilidade dos três calcários supracitadas com vista a avaliar a sua melhor aplicação. Para o efeito foram realizados os seguintes ensaios: resistência ao ataque químico, resistência ao manchamento, extrator de Soxhlet, nevoeiro salino e cristalização de sais, seguindo as normas da ABNT, da CEN e de métodos experimentais do autor. Realizaram-se análises macro e

microscópicas de três calcários para se comparar com os resultados da alterabilidade, em especial: composição, quantidade e tamanho de grãos, compactação e porosidade. Estas análises estão concordantes com os ensaios de alterabilidade. O Crema Paraná possui as maiores alterações de cor em ambientes com ácido acético (CH_3COOH) 3% e ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L e com os reagentes limão, lã de aço com detergente e vinagre. O Filstone Beije MF tem as maiores alterações de cor em ambientes com água (H_2O), hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, hidróxido de potássio (KOH) 30 g/L e cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L e com os reagentes café líquido, detergente (pH 5,5), vinho tinto, óleo de soja, suco de uva, coca-cola, desengordurante (veja) e água. O Filstone Blue apresenta as maiores alterações de cor em ambientes com ácido clorídrico (HCl) 3% e 18%, hidróxido de potássio (KOH) 100 g/L e ácido láctico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% e com os reagentes óleo de sardinha enlatada, molho de tomate, desinfetante e urina. Tendo em conta a variação de brilho o Crema Paraná possui as maiores alterações para todos os reagentes com exceção do molho de tomate e da urina que conferem uma maior variação de brilho ao Filstone Beije MF. O calcário Crema Paraná é o que perde menos massa para os ensaios de nevoeiro salino, cristalização de sais e extor de Soxhlet, sendo o Filstone Blue o que perde mais massa. Contudo, o Filstone Beije MF perde maior quantidade de massa para a H_2O e para o H_2SO_4 no extrator de Soxhlet. Em geral, o Crema Paraná é o calcário menos alterável e o Filstone Blue e Filstone Beije MF os mais alteráveis. Conclui-se que a aplicação natural de cada um dos calcários em ambientes de exposição aos reagentes que são mais suscetíveis de causar alterações de cor e brilho deve ser evitada. Assim como se deve evitar a aplicação do calcário Filstone Blue em ambientes salinos ou com ácidos fortes como HCl , HNO_3 e sulfato de sódio, e do calcário Filstone Beije MF em ambientes úmidos ou com o ácido forte H_2SO_4 . Deverá recorrer-se ao uso de impermeabilizantes a fim de evitar as reações que causam mudança de cor, perda de brilho e de massa, gerando patologias e perda da função estética.

Palavras-chave: Crema Paraná. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Rocha Ornamental. Alterabilidade.

Abstract

Brazil and Portugal are among the ten largest producers of ornamental rock in the world. Filstone Beije limestones MF and Filstone Blue are members of the Pé Pedreira member of the Lusitaniana Basin (Portugal), while the Paraná Crema belongs to the Jandaíra Formation of the Potiguar Basin (Rio Grande do Norte). This research aims at evaluating the alterability

of the three limestones mentioned above in order to evaluate their best application. For this purpose, the following tests were performed: resistance to chemical attack, resistance to soiling, Soxhlet extractor, salt fog and salt crystallization, following the ABNT, CEN and experimental methods of the author. Macro and microscopic analyzes of three limestones were carried out to compare them with the alterability results, especially: grain composition, quantity and size, compaction and porosity. These analyzes are consistent with the alterability assays. Paraná Cream has the highest color changes in environments with acetic acid (CH_3COOH) 3% and citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g / L and with reagents lemon, steel wool with detergent and vinegar. Filstone Beije MF has the highest color changes in environments with water (H_2O), sodium hypochlorite (NaClO) 20 mg / L, potassium hydroxide (KOH) 30 g / L and ammonium chloride (NH_4Cl) 100 g / L and with the reagents liquid coffee, detergent (pH 5.5), red wine, soybean oil, grape juice, coke, degreaser (see) and water. Filstone Blue exhibits the highest color changes in environments with 3% and 18% hydrochloric acid (HCl), 100 g / L potassium hydroxide (KOH) and 5% lactic acid ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) and with canned sardine oil reagents, tomato sauce, disinfectant and urine. Taking into account the brightness variation, the Paraná Cream has the biggest changes for all the reagents except for the tomato sauce and urine, which give a greater variation of brightness to Filstone Beije MF. The Crema Paraná limestone is that it loses less mass for the tests of saline fog, crystallization of salts and Soxhlet extractor, being Filstone Blue what loses more mass. However, Filstone Beije MF loses the largest amount of mass for H_2O and H_2SO_4 in the Soxhlet extractor. In general, Crema Paraná is the least changeable limestone and Filstone Blue and Filstone Beije MF the most changeable. It is concluded that the natural application of each limestone in environments exposed to the reagents that are more susceptible to cause changes in color and brightness should be avoided. As well as avoiding the application of Filstone Blue limestone in saline environments or with strong acids such as HCl , HNO_3 and sodium sulfate, and Filstone Beije MF limestone in humid environments or with strong acid H_2SO_4 . The use of waterproofing agents should be used in order to avoid the reactions that cause color change, loss of brightness and mass, generating pathologies and loss of aesthetic function.

Keywords: Paraná Cream. Filstone Blue. Filstone Beije MF. Dimension Stone. Alterability.

6.1 Introdução

A rocha é um recurso geológico que é usado desde os primórdios. Inicialmente mais para uma função estrutural, mas desde há uns séculos que tem vindo a crescer o seu uso com fim de ornamentação. Segundo Montani (2015), a extração mundial de rochas ornamentais quase que quadruplicou nos últimos 20 anos, tendo um crescimento de 14% por ano com uma tendência duradoura.

Tanto o Brasil como Portugal são dotados de rochas ornamentais de excelentes qualidades que têm sido aplicadas por todo o mundo e, por isso, se têm tornado cada vez mais uma referência mundial como produtores deste recurso. Portugal é conhecido há muitos anos no mercado pelos seus mármore e calcários. O Brasil é conhecido pela sua diversidade de granitóides, porém os seus mármore e calcários também têm crescido muito neste mercado.

Além da crescente procura de rochas ornamentais tem existido avanços significativos em todas as fases do processo: extração, beneficiamento, aplicação e manutenção. No entanto, estes avanços poderiam ser mais eficientes e acompanhar a crescente demanda das rochas ornamentais através de uma melhor caracterização.

A aceitação de uma rocha para ornamentação e/ou revestimento além da aparência estética, da arte de trabalhar a rocha e da economia, depende da natureza geológica e das propriedades físico-mecânicas, químicas, meio poroso e alterabilidade.

No entanto, a inadequada aplicação e manutenção de rochas ornamentais, as variações ambientais, a ação antrópica e a falta de conhecimento das características das rochas podem levar a adversidades que alteram as suas propriedades, tornando-se crucial efetuar estudos técnicos para prevenção e manutenção da sua estética decorativa.

Assim, o presente estudo teve por objetivo a caracterização macro e microscópica e de alterabilidade três calcários utilizados no mercado de rochas ornamentais (dois de Portugal e um do Brasil); comparar e correlacionar os resultados entre si e avaliar se satisfazem os vários requisitos necessários para a sua aplicação no setor e quais as suas melhores opções de aplicação como rocha ornamental.

6.2 Contexto Geográfico e Geológico

As duas variedades carbonáticas de Portugal em estudo, com os nomes comerciais “Filstone Beije MF” e o “Filstone Blue”, foram coletadas na pedreira “Filstone Natural” que se encontra a cerca de 15 Km a Sul de Ourém (Santarém, Portugal), ver figura 38. Estes calcários estão inseridos na Bacia Lusitaniana (BL), Maciço Calcário Estremenho (MCE), Formação de Santo António-Candeeiros e Membro de Pé da Pedreira (AZERÊDO, 1993,

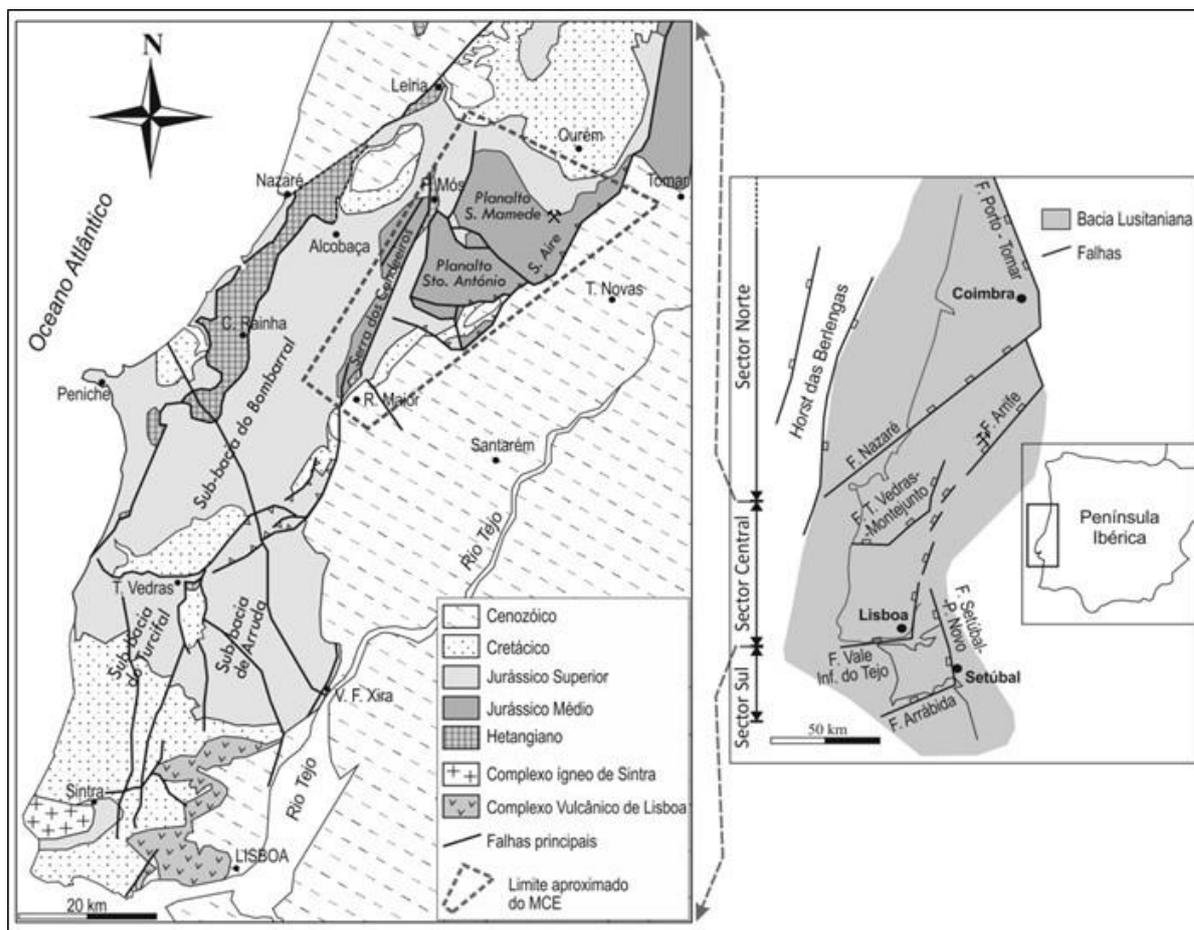
2007; CARVALHO *et al.*, 2012).

A variedade carbonática do Brasil em estudo, com o nome comercial “Crema Paraná”, foi coletada na pedraira “Mineração Apodi” que se encontra a cerca de 15 Km a Norte de Apodi (Rio Grande do Norte – RN, Brasil), ver figura 39. Este calcário está inserido na Bacia Potiguar (BP), Grupo Apodi e Formação Jandaíra.

Membro Pé da Pedreira

A Bacia Lusitaniana, uma bacia sedimentar intracratônica resultante da fragmentação da Pangeia e abertura do Oceano Atlântico, localizada no bordo oeste da microplaca Ibérica, alongada em uma direção NNE-SSW, tendo 250-330 Km de comprimento e 100-150 Km de largura (AZERÊDO, 1993), ver figura 38.

Figura 38 – Enquadramento da Bacia Lusitaniana, com a localização da área de extração (martelos) e do Maciço Calcário Estremenho (picotado). Subdivisões da BL segundo Kullberg *et al.* (2006); adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (LNEG, 2010).



Esforços compressivos soergueram uma unidade geomorfológica, alongada de direção NE-SW e com cerca de 750 Km², o Maciço Calcário Estremenho (MCE). É compartimentado em três blocos soerguidos (Figura 38): Serra do Candeeiros, Planalto de Santo António e Planalto de São Mamede que continua até à Serra d’Aire.

O Membro de Pé da Pedreira consiste de uma fácies de rampa interna com calcários de alta energia gerados num paleoambiente de ilha-barreira, com idade Batoniana, aflorando em três manchas principais: Calcários de Pé da Pedreira, Calcários oolíticos de Reguengo do Fetal e Calcários oolíticos de Casal Farto.

Este Membro aparece sob a forma de corpos maciços lenticulares no seio dos calcários micríticos da Formação de Serra de Aire que se interdigitam com os calcários das Formações de Serra de Aire e de Chão de Pias e com os Membros de Cadoçal e de Moleanos. Os níveis superiores encontram-se truncados pelas rochas sobrejacentes, individualizando-se, localmente, estratos entre 1 e 2 m, sendo que a espessura do Membro vai dos 15 aos 150 m. É composto por calcários calciclásticos, micríticos, oo/bio/intra/pelsparitos “*grainstone*” a “*wackestone*” de cor branca, creme e tons de azul. A granulação varia de fina a grosseira, muito ricos em bioclastos, correspondendo, por vezes a biostromas descontínuos. Apresentam diversas estratificações e laminações e superfícies de erosão e de reativação. Ocorrem níveis espessos com intensa bioturbação, intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, recristalizações e geodos.

Segundo Carvalho *et al.* (2011), na história evolutiva da BL também ocorreram importantes episódios magmáticos que estão dispersos por toda a Bacia, com exceção da Serra de Aire e Planalto de São Mamede.

Formação Jandaíra

A Bacia Potiguar (BP), uma bacia sedimentar rifte intracontinental formada pela separação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. Localiza-se na interseção da Margem Continental Leste Brasileira com a Margem Continental Equatorial, apresentando uma área total estimada de 60.000 Km² (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1987; MATOS, 1992; ALMEIDA *et al.*, 1977), ver figura 39.

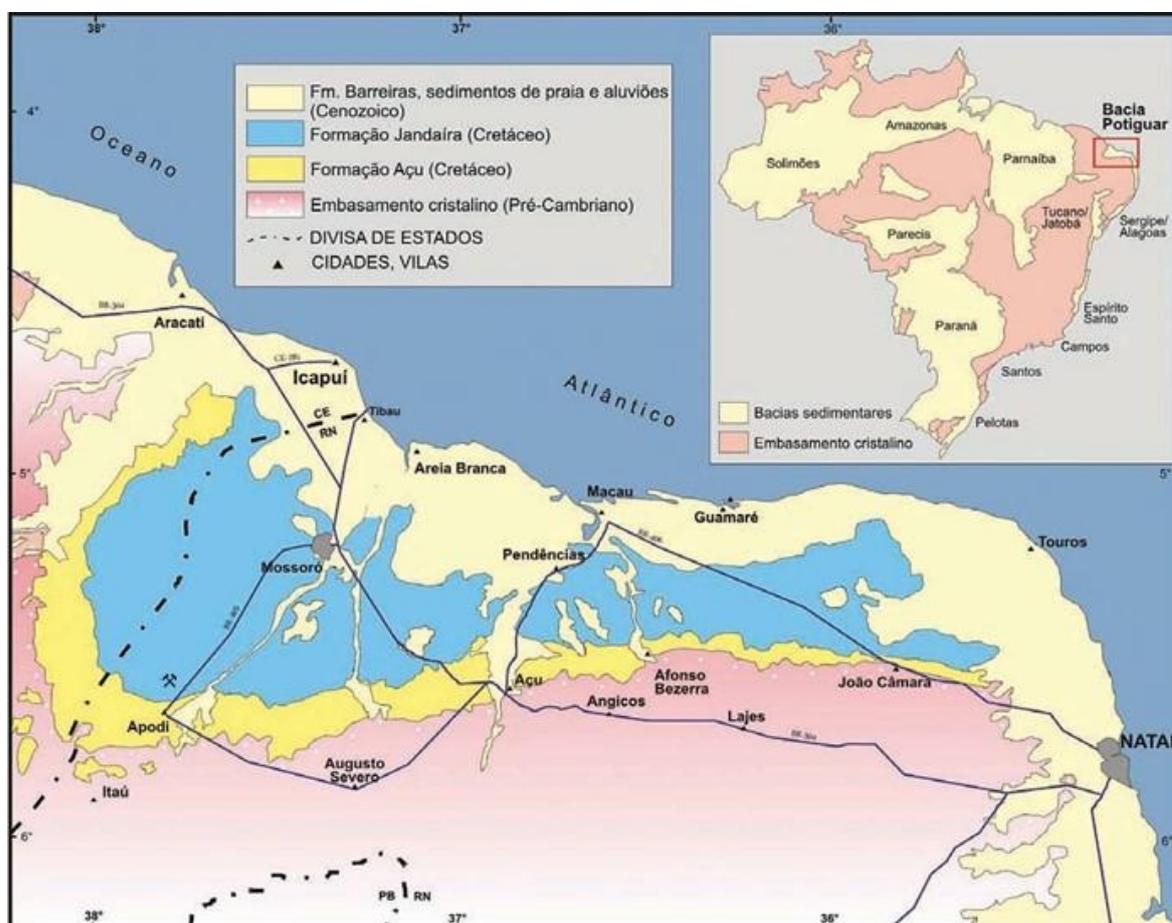
Araripe & Feijó (1994) *in* Gomes (2008) dividiram a Bacia Potiguar, da base para o topo, em três Grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha.

A Formação Jandaíra consiste de uma sequência transgressiva carbonática, marinha de águas quentes, rasas e agitadas, da fase drifte da evolução da Bacia, com idade Turoniana-Campaniana (SOARES *et al.*, 2003). Tem um limite transicional na base com as

Formações Açú e Quebradas e ocorre localmente interdigitada com a base da Formação Ubarana (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003). Exibe uma direção W-E mergulhando suavemente para NE e uma espessura média entre 250-300 m (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982; PROASNE, 2006).

Os estratos deste pacote carbonático têm mergulhos suaves e clinofomas sigmoidais típicos de bacias de margem em rampa, dividindo-se em duas seqüências deposicionais: a primeira é formada por *grainstones* bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por *wackestones* e *mudstones* na porção distal; e a segunda caracteriza-se pelo domínio da sedimentação carbonática em toda a bacia (NETO *et al.*, 2007). Composto por calcários microcristalinos, calcarenitos e calcilitos bioclásticos, com nível evaporítico na base, tem uma coloração que varia entre branco, creme e cinza, são finos, compactos, duros, com textura detrítica, possuindo um conteúdo ricamente fossilífero e intercalações de argilitos e folhelhos negros e carbonosos, podendo ter recristalizações e geodos (CASSAB, 2003).

Figura 39 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (FARIAS *et al.*, 1990), com a localização da área (martelos).



Na sua história tectônica também fazem parte as Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau que representam três eventos magmáticos.

6.3 Materiais e Métodos

Para esta pesquisa foram utilizadas amostras dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue provenientes de dois níveis estratigráficos diferentes da mesma frente de lavra da pedreira Filstone no núcleo de Casal Farto da Bacia Lusitaniana (Portugal) e amostras do calcário Crema Paraná da frente de lavra da Mineração Apodi na Formação Jandaíra da bacia Potiguar (Brasil).

Para a contextualização geológica foram efetuadas etapas de campo com a coleta de amostras e uma breve caracterização das pedreiras.

O estudo petrográfico foi realizado no Laboratório de Microscopia Ótica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), usando objetivas de ampliações 4X, 10X, 20X e 40X do microscópio ótico de luz transmitida de marca *Leica* e modelo *EC 3*. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal).

Na descrição das lâminas delgadas seguiram-se os procedimentos estipulados na norma técnica brasileira (ABNT NBR 15845-1:2015) e as orientações de Navarro (1998, 2002) e de Rodrigues *et al.* (1996, 1997), tendo o cuidado de destacar as características que poderiam influenciar nos resultados físico-mecânicos, tais como: aspetos composicionais, texturas, estruturas, disposição e arranjo dos grãos e relações, tipos, quantificação, preenchimento e comunicabilidade de porosidades.

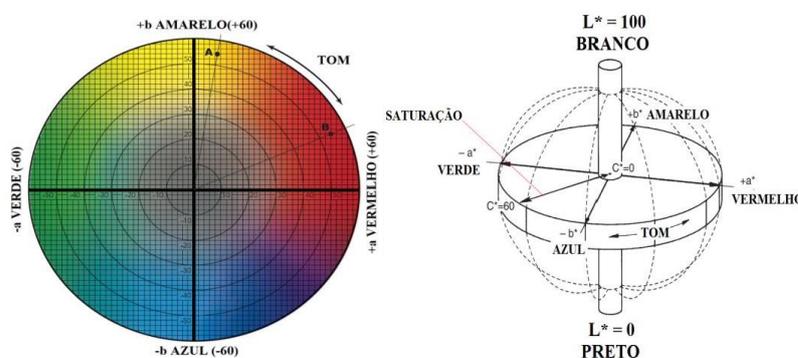
Para a classificação da porosidade utilizou-se o trabalho de Choquette & Pray (1970). Considerando a classificação da textura deposicional foi avaliado segundo a proposta de Dunham (1962). Correlacionando a proporção de ortoquímicos aos aloquímicos adotou-se a nomenclatura de classificação de Folk (1959).

Os ensaios de alterabilidade química permitiram avaliar a resistência da superfície dos corpo-de-prova dos três calcários a vários ataques químicos de reagentes agressivos, comparando-os entre si e com as suas propriedades macro e microscópicas. Estes ensaios foram efetuados no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (Portugal) e no Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo CETEM-NRES. A avaliação dos efeitos causados pelos ataques nas superfícies das amostras ocorreu através de medições antes e após os ataques, observando-se as características morfológicas e texturais

com base em fotografia e digitalização dos corpos-de-prova, do peso e da quantificação das variações do brilho e da cor no espectro RGB, utilizando o sistema de cores CIELAB e equipamentos da BYK.

O CIELAB determina a cor medida de um objeto consoante a interação dos valores ao longo dos eixos “a” que comporta valores entre (+) 60 (Vermelho) e (-) 60 (Verde), “b” possui limite (+) 60 (Amarelo) e (-) 60 (Azul) e “L” com valores entre 100 (branco) e 0 (preto), ver figura 40. Além destes valores é possível medir a saturação (C), o tom (H), as suas respectivas variações (ΔC , ΔH), as variações dos eixos atrás mencionados (Δa , Δb , ΔL) e a variação total de cor (ΔE).

Figura 40 – Padrão de cor CIELAB (à esquerda o plano a, b e à direita a esfera de cor).



Fonte: Adaptado de X-Rite (2013).

Estes parâmetros são calculados segundo as equações 1 a 8 (CIE, 1976 apud BOLONINI, 2015) e avaliam as alterações cromáticas ocorridas após os ataques químicos efetuados nesta investigação, comparando as cores iniciais e finais dos corpos-de-prova.

Varição da cromaticidade ao longo do eixo verde-vermelho:

$$\Delta a = a \text{ (final)} - a \text{ (inicial)} \quad \text{Equação (1)}$$

Varição da cromaticidade ao longo do eixo azul-amarelo:

$$\Delta b = b \text{ (final)} - b \text{ (inicial)} \quad \text{Equação (2)}$$

Varição da luminosidade:

$$\Delta L = L \text{ (final)} - L \text{ (inicial)} \quad \text{Equação 3}$$

Valor da saturação:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{Equação 4}$$

Varição da saturação:

$$\Delta C = C \text{ (final)} - C \text{ (inicial)} \quad \text{Equação 5}$$

Valor do tom:

$$H = (\arctang(b/a) / 6,2832) * 360 \text{ (se } a > 0 \text{ e } b \geq 0) \quad \text{Equação 6}$$

Varição de tom:

$$\Delta H = H \text{ (final)} - H \text{ (inicial)} \quad \text{Equação 7}$$

Varição total da cor:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad \text{Equação 8}$$

Para fins de classificação da intensidade da variação total de cor, determinação da resistência ao ataque e avaliação dos efeitos das variações das cores nos eixos L, a e b são utilizados os valores de referência calculados pelo CETEM (tabelas 6.1 e 6.2).

Tabela 22 – Critérios para classificação da intensidade da variação total de cor (ΔE) e para determinação da resistência ao ataque.

Critérios para Classificação*	Intensidade de ΔE	Resistência ao Ataque
$\Delta E > 10$	Alta	Baixa
$\Delta E > 5 \text{ e } \leq 10$	Moderada	Moderada
$\Delta E \leq 5$	Baixa	Alta

*Classificação baseada em 39750 medições de cor realizadas em 53 diferentes rochas.

Tabela 23 – Classificação dos efeitos das variações das cores nos eixos L, a e b.

Parâmetro	Critérios para classificação	Efeitos das variações das cores**
ΔL	> 0	Clareamento
	< 0	Escurecimento
Δa	> 0	Mais Vermelho
	< 0	Mais Verde
Δb	> 0	Mais Amarelo
	< 0	Mais Azul

**Os efeitos são comparações com as rochas no seu estado original (antes do ensaio)

A indústria de tintas usa uma classificação de intervalos de ΔE , de duas leituras num mesmo local, para a percepção do olho humano (Tabela 24). No entanto, vários autores defendem que apenas valores de ΔE acima de 3 são detectados pela visão humana para inspeção visual cromática superficial.

Tabela 24 – Intervalos de ΔE para a percepção humana, seguindo a norma DIN EN ISO 11664-4 (2012). Extraído de Silva, 2016.

ΔE^{*ab}	Classificação
0,0 – 0,2	Imperceptível
0,2 – 0,5	Muito pequena
0,5 – 1,5	Pequena
1,5 – 3,0	Distinguível
3,0 – 6,0	Facilmente distinguível
Maior que 6	Muito grande

Em relação à medição do brilho, primeiro avalia-se a geometria, ou seja, o valor de semi-brilho (média) tem de estar entre 10 e 70 unidades de brilho para se usar o valor referente ao ângulo de 60°, caso o valor esteja acima das 70 unidades usa-se o valor referente ao ângulo de 20° e se for abaixo das 10 unidades usa-se o valor referente ao ângulo de 85°. Consoante o valor de semi-brilho utiliza-se o valor médio referente a um dos três ângulos referenciados (20°, 60° ou 85°) como o valor do brilho. A determinação da variação de brilho é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta B = ((B_i - B_f) / B_i) * 100$$

onde: B_i = brilho inicial; B_f = brilho final; ΔB = variação de brilho.

As medições de cor e brilho foram realizadas sempre nos mesmos locais dos corpos-de-prova, dentro da área de deteção dos equipamentos, permitindo a comparação dos valores iniciais e finais. Para isso usou-se um molde retilíneo, com 15 medidas, existente no CETEM para medir a cor, medindo dentro e fora do círculo que foi atacado quimicamente, e foi criado um molde com 25 medidas para a medição do brilho, medindo apenas dentro do círculo que foi atacado quimicamente

Os ataques químicos seguiram a norma ABNT NBR 13818-anexoH:1997, tendo algumas adaptações. Foram utilizados 2 corpos-de-prova, polidos, de cada calcário por reagente. Os reagentes para se avaliar a alterabilidade química foram: Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, Ácido Clorídrico (HCl) 3%, Ácido Clorídrico (HCl) 18%, Água (H₂O), todos a atuar durante 96h e, Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5%, que ficaram a atuar durante 24h. Estes reagentes ficaram em contacto com os corpos-de-prova segundo um diâmetro de 5 cm e estavam cobertos com placas de petri para evitar a evaporação excessiva.

O ensaio de manchamento seguiu a norma ABNT NBR 13818-anexoG:1997, contudo teve adaptações afim de tornar o mais próximo possível das condições naturais do dia-a-dia. Não foi utilizada a estufa e usou-se 1 corpo-de-prova, polido, de cada calcário por reagente. Os reagentes atuaram durante 24h, tendo efetuado medições antes do ataque. Após o ataque os corpos-de prova foram lavados em água fria corrente, usando detergente neutro. Depois de 24h a secar naturalmente os corpos-de-prova foram lavados em água morna com detergente neutro. Por fim, e após mais 24h de secagem natural lavaram-se os corpos-de-prova em água morna e com um produto abrasivo. Depois de mais 24h a secar naturalmente efetuaram-se as medições finais. Os reagentes para se avaliar o manchamento foram: limão, óleo de sardinha enlatada, café líquido, detergente (pH 5,5), desengordurante (veja), vinho tinto, vinagre, óleo de soja, molho de tomate, suco de uva, urina, lã de aço com detergente, desinfetante, coca-cola e água.

Para o ensaio com extrator de Soxhlet foi seguido o procedimento realizado no trabalho de Costa *et al.* (2010). Contudo, diferente do trabalho tomado como referência e tendo em conta as diferenças litológicas e o tempo do projeto, optou-se por realizar 4 ciclos de 10 dias para cada litologia. Outra alteração foi a utilização, em separado, dos ácidos sulfúrico (H_2SO_4), nítrico (HNO_3) e clorídrico (HCL), a 0,25% da sua concentração, além da água destilada (H_2O). A cada ciclo foram analisadas pesagens dos fragmentos, fotografias através de lupa binocular do mesmo fragmento e a absorção atômica dos líquidos dos elementos: potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si) e alumínio (Al). De salientar que os fragmentos utilizados não estavam polidos.

O ensaio de nevoeiro salino seguiu a norma portuguesa EN 14147:2007. As pesagens e fotografias dos corpos-de-prova foram feitas antes e após o ensaio. Diferentemente da norma, para este ensaio utilizaram-se 4 corpos-de-prova, não polidos.

No ensaio de cristalização de sais seguiu-se a norma britânica EN 12370:1999. As pesagens e fotografias dos corpos-de-prova foram feitas antes e após o ensaio. As amostras do Filstone Beije MF foram retiradas do ensaio assim que se verificou o comprometimento de um dos corpos-de-prova, sendo medidas. Contudo, decidiu-se proceder a novo ataque para se verificar os resultados das restantes amostras e da amostra comprometida, sendo medidas novamente no final deste ataque. De salientar que os corpos-de-prova não estavam polidos.

6.4 Resultados e Discussão

6.4.1 Aspetos Macro e Microscópicos

As características macro e microscópicas dos três calcários estudados nesta

investigação são aqui abordadas, culminando com uma tabela síntese (tabela 22)

Filstone Beije MF

Em amostra de mão apresenta uma estrutura maciça, muito baixa anisotropia, coloração esbranquiçada a creme (se úmida), granulação homogênea e muito fina, formada por uma matriz microcristalina carbonática (figura 41). As dimensões dos seus grãos são pequenas de tal ordem que não se conseguem diferenciar ao olho humano. Observam-se veios e geodos calcíticos, estilólitos mais ou menos oxidados e alguns poros como resultado de dissolução sob pressão (figura 41).

Figura 41 – Amostra seca evidenciando um estilólito e um veio calcítico.

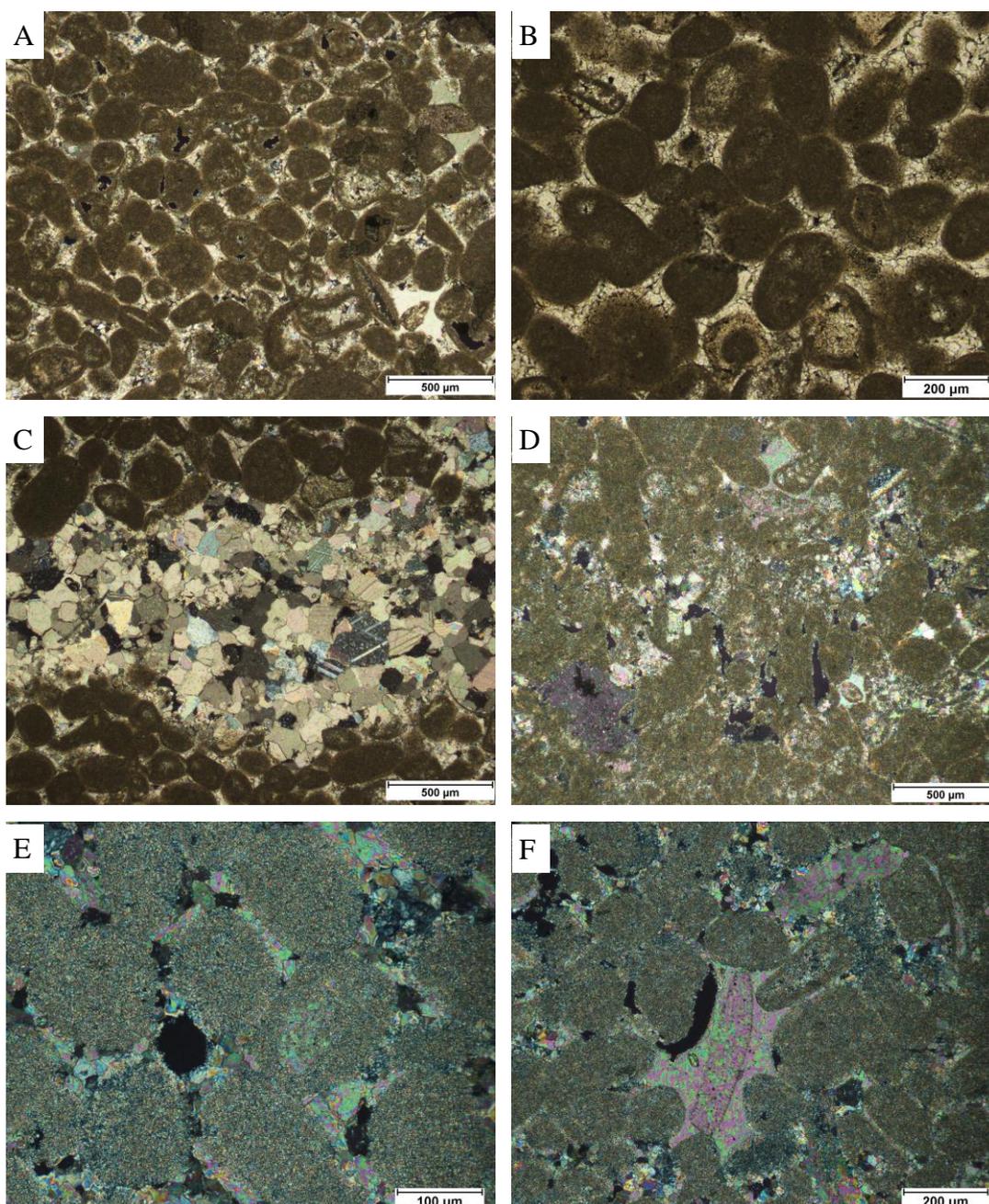


É uma rocha compacta, com uma granulação homogênea, em que, os grãos transportados variam de 0,125 mm a 0,25 mm, podendo atingir os 0,5 mm e o cimento varia entre 0,005 e 0,03 mm (microespato), sob a forma de mosaico, figura 42. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes penetrativo (figura 42 B, D, E e F).

A sua constituição consiste em cerca de: 47% de pelóides, 8% de oóides, 7% de intraclastos, 13% de biolastos (sobretudo foraminíferos, algas e equinodermes, figura 42 B e D), 13% de cimento microespático e 4% de lama microcristalina. A maioria dos seus grãos têm forma esférica a elíptica e apresentam-se bem calibrados com o tamanho, em média, variando entre 0,125-0,25 mm. Assim, segundo a classificação textural de rochas sedimentares de Folk (1959), é considerado um pelsparito. São observados veios calcíticos, estilólitos, onde os grãos têm contatos penetrativos ao seu redor, e algumas recristalizações de calcita microespática e micrítica, pontualmente espática, dentro dos fósseis (figura 42 C e D). A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *Packstone*.

Figura 42 – Amostra: (A) textura da rocha, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, oóides e cimento microespático (nicóis cruzados); (B) contatos pontuais a côncavo-convexos e vestígio de equinoderme e oóide (nicóis paralelos); (C) veio de calcita e grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (D) estilólito, bioclasto de foraminífero recristalizado internamente, pelóides, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (E) contatos pontuais a côncavo-convexos, microporo, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados); (F) microporos e mesoporo pequeno, contatos pontuais a côncavo-convexos e crescimento sintaxial (nicóis cruzados).



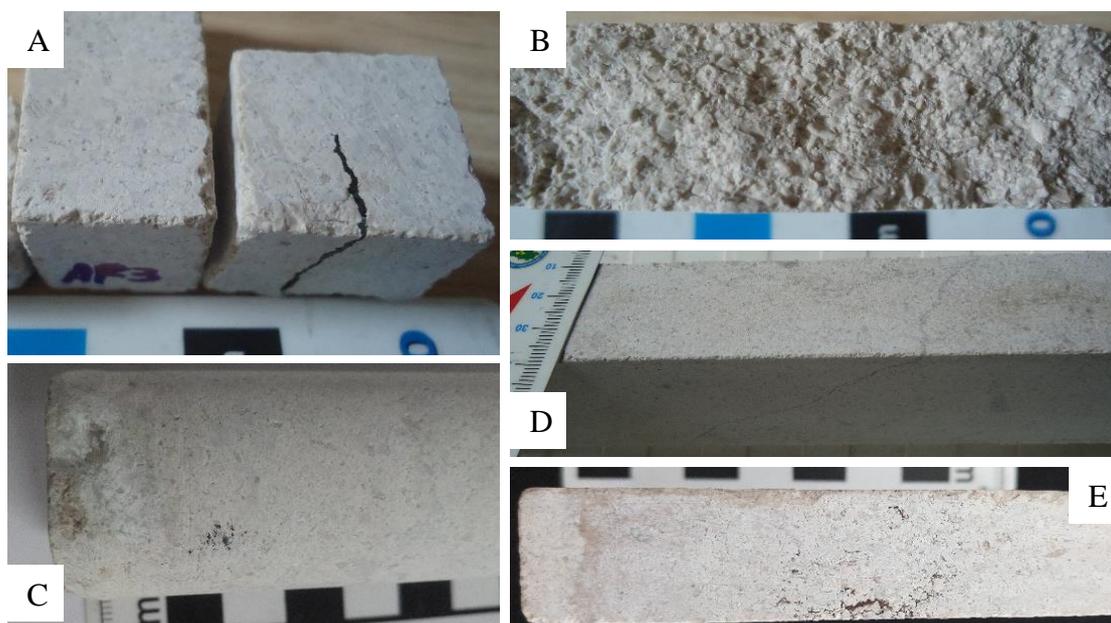
Em geral, segundo Choquette & Pray (1970), possui porosidade baixa (8%),

apesar de ser a mais porosa das três amostras; secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos que aumenta a porosidade da rocha e pelo crescimento sintaxial que a faz diminuir); intragranular; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo), atingindo algumas vezes a dimensão do mesoporo pequeno (0,0625 a 0,5 mm), figura 42 A, E e F.

Filstone Blue

Macroscopicamente possui estrutura maciça, com anisotropia muito baixa, coloração cinzento/azulado a creme (especialmente quando manchada ou úmida). A sua granularidade é heterogênea (Figura 43 B). A maioria dos grãos apresentam-se arredondados e alongados, principalmente os bioclastos, e em alguns grãos a sua região central é mais microcristalina em relação à periferia. Além dos bioclastos é possível identificar pelóides e veios e geodos calcíticos (figura 43 A, B e D). Os clastos contatam entre si, sustentando-se entre eles, tendo um cimento microcristalino carbonático a preencher os espaços vazios. Por vezes observam-se estilólitos com grandes concentrações de óxidos, sulfetos e compostos orgânicos. (Figura 43 C, D e E). Em lupa, consegue-se observar cavidades inter- e intragranulares com crescimentos botroidais, confirmando que são porosidades e não espaços vazios como resultado do processo de corte da amostra.

Figura 43 – Amostra: (A) mostrando veio de carvão; (B) natural não serrada; (C) geodo de calcita e matéria orgânica numa região com poros botroidais; (D) veio estilolítico e manchas creme; (E) coloração azul na região que tem carvão disseminado e poros botroidais, descoloração beije, coloração mais cinza na ponta esquerda.

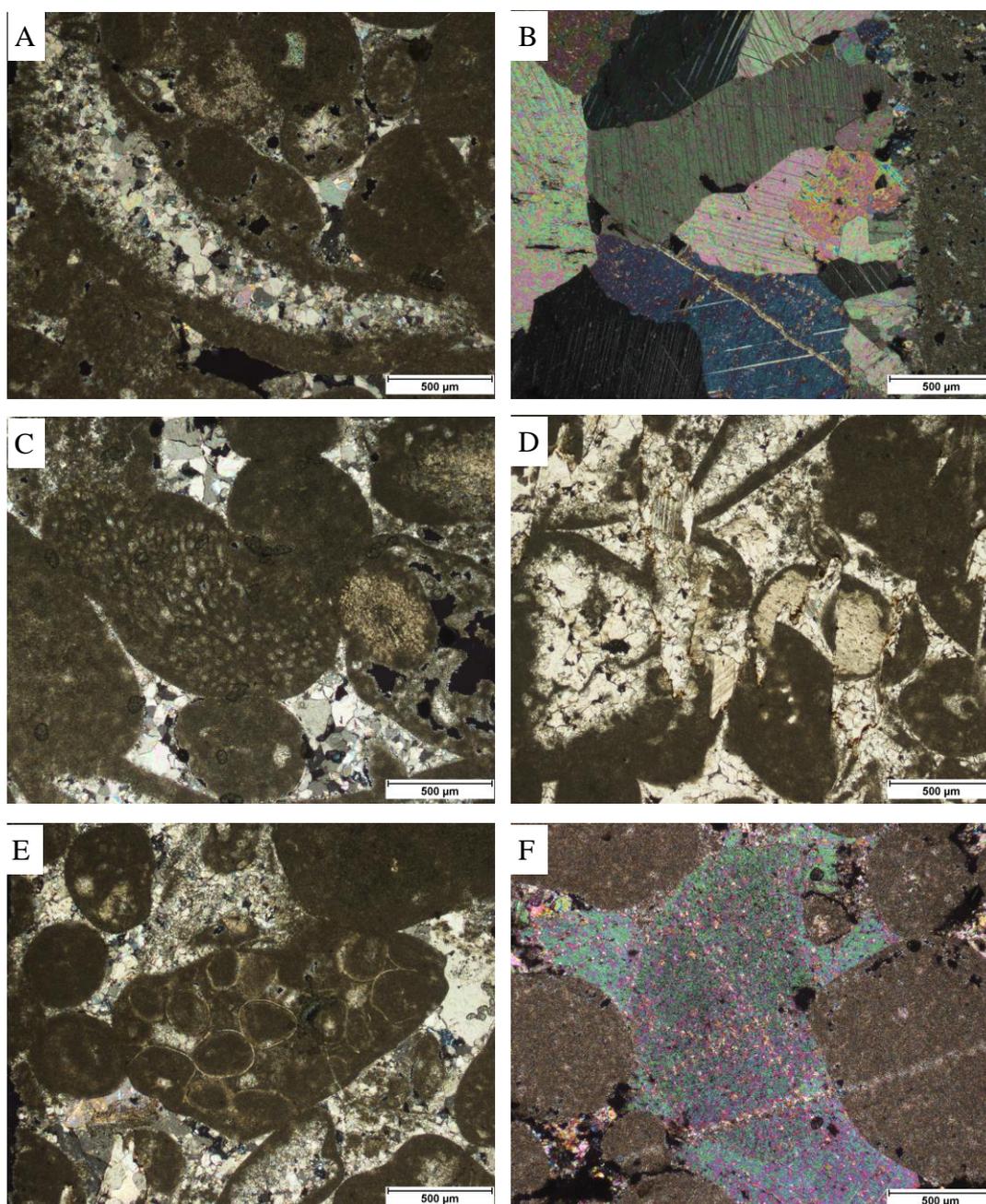


Petrograficamente, a granulação é heterogênea, os grãos apresentam-se arredondados e alongados, muitas vezes com estruturas internas preservadas e na maioria estão preenchidos com calcita microcristalina, porém alguns deles possuem recristalizações microespáticas a espáticas na porção mais central das suas estruturas e calcita microcristalina na periferia (figura 44 A). Em geral, os grãos desta rocha variam entre 0,25 mm e 1 mm, podendo atingir os 3 mm. O cimento tem dimensões superiores a 0,03 mm (espató) e está organizado sob a forma de mosaico.

Este calcário é composto por cerca de 39% de fragmentos de bioclastos de diversas espécies (equinodermes, algas moluscos e foraminíferos, figura 44 C), 20% de pelóides, 8% de intraclastos (tendo encontrado agregados de grãos cimentados – *grapestones*, figura 44 E), 18% de cimento espático, 6% de lama microcristalina e 3% de oóides. Em geral, o contato entre grãos é pontual a côncavo-convexo, por vezes suturados (figura 44 A, C e D). Contém a presença de aglomerados de cor escura (compostos orgânicos) disseminados inter- e intra-grãos. Há a presença de estilólitos e próximo deles os grãos são mais penetrativos e ocorrem concentrações de compostos de cor castanha/laranja (óxidos, hidróxidos e matéria orgânica) e de cor mais escura (sulfetos de ferro), figura 44 D. Observam-se dissoluções no contato entre grãos como resultado da passagem de fluidos subsaturados em CaCO_3 nos poros da rocha, podendo gerar porosidades secundárias e variar a permeabilidade e a porosidade primária das rochas. Ocorrem recristalizações inter e intragrãos, cimento carbonático micro a macrocristalino que preenche os espaços intersticiais entre os grãos. São encontrados *vugs* preenchidos por cristais de calcita e fraturas preenchidas por calcita pervasiva (figura 44 B).

Estas características sugerem que a compactação e a dissolução inicialmente menos intensa é caracterizada pela aproximação dos grãos e pela percolação pervasiva de fluidos intersticiais pela rocha, entre os quais hidrocarbonetos, permanecendo alguns aglomerados disseminados no interior dos grãos. Posteriormente deu-se uma fase de compactação e dissolução sob pressão mais intensas levando à perda de grande volume de constituintes carbonáticos da rocha, tendo sido solubilizados e exportados, e acumulação de constituintes insolúveis da rocha nas superfícies estilolíticas (figura 44 D). A matéria orgânica disseminada pela rocha é interpretada como hidrocarbonetos muito oxidados do tipo betume, concordando com relatos de exsudações oleosas na rocha quando cortada. Por fim, ocorreu a precipitação do fluido saturado em carbonato no interior dos grãos sob a forma de microcristais de calcita (recristalização) e a formação do cimento nos interstícios dos grãos. Os espaços vazios no interior de grãos e do cimento comprovam que a recristalização foi incompleta. A compactação da rocha é considerada densa/dispersa.

Figura 44 – Amostra: (A) textura da rocha, oóide, porosidade intragranular, fósseis recristalizados internamente, contatos pontuais a côncavo-convexos (nicóis cruzados); (B) calcita recristalizada, porosidade intracristalina e intragranular, fratura intergrão preenchida (nicóis cruzados); (C) bioclasto de equinoderme e alga, contatos pontuais a côncavo-convexo (nicóis cruzados); (D) estilólito com óxidos, sulfetos e compostos orgânicos no seu contorno, bioclastos recristalizados internamente por calcita microespática, contatos penetrativos (nicóis paralelos); (E) aglomerado litoclástico (*grapestone*) e matriz espática (nicóis paralelos); (F) crescimento sintaxial, porosidade inter- e intragranular, grãos preenchidos por calcita micrítica (nicóis cruzados).



Segundo a classificação textural de Folk (1959) é considerado um biopelsparito.

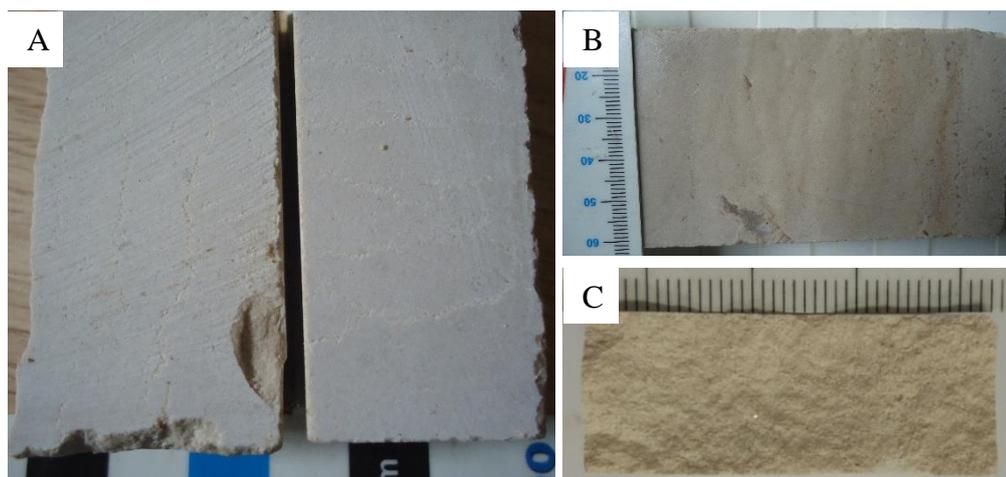
Tendo em conta a classificação segundo a textura deposicional, Dunham (1962) é considerado um *Grainstone*.

Em geral, segundo Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade baixa (6%); secundária (durante a diagênese pela dissolução dos grãos e formação dos agregados litoclásticos, *grapestones*, fazendo aumentar a porosidade da rocha, e pelo crescimento sintaxial que faz diminuir esta porosidade); intragranular e intercrystalina; com um tamanho de poro entre 0,0625 a 0,5 mm (mesoporo pequeno), figura 44 B, E e F.

Crema Paraná

Em termos macroscópicos exibe uma estrutura maciça, com baixa anisotropia, sendo mais perceptível quando úmidos, e uma coloração creme claro quando estão secos e creme quando estão úmidos (figura 45 A e B). A sua granulação é homogênea e muito fina, sendo constituída por uma matriz microcristalina carbonática (figura 45 C). Os grãos apresentam pequenas dimensões, sendo apenas visíveis alguns fósseis de maiores dimensões e alguns veios e geodos de calcita. Observam-se estilólitos com concentrações de óxidos e hidróxidos, e alguns poros resultantes de dissolução (figura 45 B).

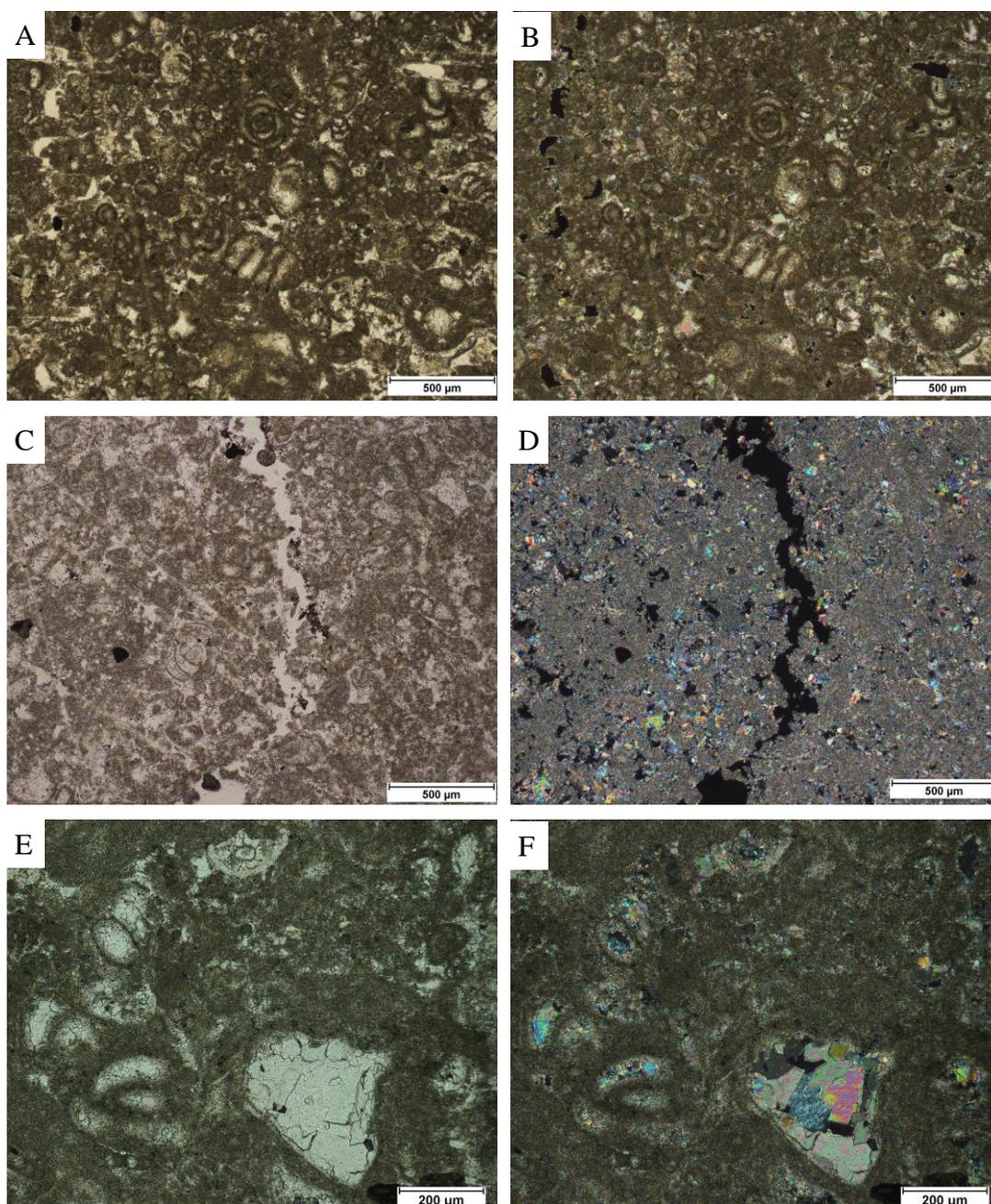
Figura 45 – Amostra: (A) seca com anisotropia pouco perceptível; (B) úmida com maior realce da anisotropia, óxidos e concentração de calcita; (C) natural não serrada.



Este calcário compacto tem uma matriz homogênea com o tamanho dos grãos a variar entre 0,062 mm e 0,25 mm, podendo atingir os 0,4 mm e a matriz possui tamanho inferior a 0,005 mm (micrítica), tendo algum cimento microespático (0,005-0,03 mm), figura 46 A, B, C e D. Possui um abundante conteúdo fossilífero (47%), essencialmente constituído

por foraminíferos e gastrópodes, distribuídos homoganeamente em formas esféricas a elípticas e diâmetros variando entre 0,125-0,5 mm, em torno de 30% de matriz micrítica, 4% de intraclastos, 9% de pelóides e 6% de cimento microespático (figura 46 A e B). Em geral, o contato entre grãos é difícil de se ver.

Figura 46 – Amostra: (A) e (B) matriz micrítica, bioclastos (foraminíferos e gastrópodes), porosidades em planos preferenciais (estilólito), nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (C) e (D) fratura aberta, microporos intergranulares, matriz micrítica, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente; (E) e (F) fósseis recristalizados internamente, nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente.



São observadas fraturas abertas dispostas de forma irregular na massa rochosa e com espaçamentos heterogêneos (figura 46 C e D). Alguns fósseis apresentam-se levemente recristalizados em calcita microespática (figura 46 E e F). A compactação da rocha é considerada densa.

Segundo Folk (1959) é considerada uma rocha aloquímica micrítica, biomicrito.

Pela classificação da textura deposicional de Dunham (1962) é um *wackestone*.

Em geral, segundo a proposta de Choquette & Pray (1970) possui uma porosidade muito baixa (4%), sendo mais porosa próximo aos estilólitos; secundária (pela dissolução da lama e formação dos estilólitos durante a diagênese); intercrystalina; com um tamanho de poro abaixo dos 0,0625 mm (microporo).

Tabela 25 – Síntese das características petrográficas dos três calcários em estudo.

		Bacia Potiguar	Bacia Lusitaniana		
		Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue	
Textura	Estrutura	Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	Muito Baixa anisotropia	
	Compactação	Densa	Densa/dispersa	Densa/dispersa	
	Granulação	Homogênea (0,062-0,25 mm)	Homogênea (0,125-0,25 mm)	Heterogênea (0,25-1 mm)	
	Contatos	Difícil distinção	Pôntual a Côncavo-convexo	Pôntual a Côncavo-convexo	
	Grãos (%)	60	75	70	
	Matriz (%)	30	4	6	
	Cimento (%)	6	13	18	
	Poros (%)	4	8	6	
Composição	Matriz	Micrítica	Micrítica	Micrítica	
	Cimento	Microespático	Microespático com mosaico	Espático com mosaico	
	Grãos	Bioclastos (%)	78	17	55
		Pelóides (%)	15	63	28
		Oóides (%)	0	11	5
		Intraclastos (%)	7	9	12
	Fratura / Estilólito	Aberta / sem estilólitos	Sem fratura / com estilólitos	Preenchidas por calcita (pervasiva) / com estilólitos	
Porosidade	Secundária; Intercristalina; Microporo – (<0,0625 mm)	Secundária; Intragranular; Micro a Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)	Secundária; Intragranular e intracristalina; Mesoporo pequeno – (<0,5 mm)		
Observações		Veios calcíticos; Recristalizações microespáticas e micríticas			
Classificação	Dunham (1962)	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	
	Folk (1959)	Biomicro	Pelsparito	Biopelsparito	

6.4.2 Aspectos de Alterabilidade

Os aspectos de alterabilidade são correlacionados entre os três calcários e, sempre que possível, com parâmetros macro e microscópicos.

Nas tabelas dos itens abaixo estão sintetizados os valores médios obtidos para os aspectos de alterabilidade dos três calcários em estudo e alguns valores calculados para as suas dispersões. Estes valores também são representados em gráficos facilitando a melhor visualização e correlação entre os diferentes parâmetros.

Ataque químico

Este ensaio foi utilizado para se avaliar as alterações visuais através de imagens cromáticas das placas, dos três calcários em estudo, atacadas com determinados reagentes.

Na tabela 26 estão representados os valores das variações de cor total, de cor ao longo dos eixos azul-amarelo e verde-vermelho, da luminosidade e as respectivas resistências ao ataque químico para os três calcários. Nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12 estão ilustradas as pranchetas com as fotografias dos três calcários antes e após serem atacados com os diferentes reagentes.

Para este ensaio não se calcularam as dispersões dos resultados, pois apenas se avaliaram dois corpos-de-prova, de cada um dos calcários, por reagente.

O Crema Paraná possui uma resistência baixa ao Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) 100 g/L, uma resistência moderada ao Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, Ácido Clorídrico (HCl) 18% e Ácido Acético (CH_3COOH) 3% e uma resistência alta aos restantes reagentes.

O Filstone Beije MF e o Filstone blue têm uma resistência baixa ao Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, Ácido Clorídrico (HCl) 18% e ao Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) 100 g/L, resistência moderada ao Ácido Clorídrico (HCl) 3% e uma resistência alta aos restantes reagentes. No entanto, o Filstone Beije MF tem uma resistência moderada ao Hipoclorito de sódio ($NaClO$) 20 mg/L, enquanto que o Filstone Blue tem uma resistência alta para este reagente.

Para os três calcários, estes reagentes têm um efeito de luminosidade de escurecimento, sendo de clareamento apenas para o Ácido Acético (CH_3COOH) 3% e o Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) 100 g/L.

Para o efeito de cor no eixo vermelho-verde o Crema Paraná tem tendência para a cor verde no Ácido Acético (CH_3COOH) 3% e o Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) 100 g/L, o Filstone Beije MF além dos dois reagentes anteriores adiciona-se o Ácido Lático ($C_3H_8O_3$) 5% e o

Filstone Blue além destes três reagentes adiciona-se o Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L. Os restantes reagentes têm tendências para a cor vermelha.

Para o efeito de cor no eixo amarelo-azul, os três calcários têm tendência para a cor azul nos reagentes Ácido Acético (CH_3COOH) 3%, Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L, Ácido Lático ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% e Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L. Os restantes reagentes têm tendências para a cor amarela.

Para os reagentes Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, Ácido Clorídrico (HCl) 3% e Ácido Clorídrico (HCl) 18% o Crema Paraná possui as menores variações de cor e o Filstone Blue as maiores, o que poderá ser explicado pelo Filstone Blue ser o calcário com a granulação mais grosseira e o Crema Paraná o que tem a granulação menor. Para a Água (H_2O), Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L e Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L o Crema Paraná possui as menores variações de cor e o Filstone Beije MF as maiores, pois o Filstone Beije é o calcário mais poroso e o Crema Paraná o menos poroso. O Ácido Acético (CH_3COOH) 3% e o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L conferem as maiores variações ao Crema Paraná e as menores ao Filstone Beije MF, pois estes reagentes poderão atacar mais em calcários com menos quantidade de grãos definidos (Crema Paraná) e reagir menos em calcários com grandes quantidades de grãos definidos (Filstone Beije MF). Para o Ácido Lático ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% o Filstone Beije MF tem as menores variações de cor e o Filstone Blue as maiores, talvez pelo fato de o Filstone Beije MF ter a cor mais clara e o Filstone Blue a cor mais escura, havendo subtração de cor escura.

Para a variação de cor e resistência ao ataque químico dos reagentes, conclui-se que: o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L é o que tem maior poder de ataque, sendo o que gera maior “destruição” à placa; o Hidróxido de Potássio (KOH), tanto 100 g/L como 30 g/L, é o segundo reagente com maior poder de ataque; o Ácido Clorídrico (HCl) é o terceiro, sendo que a 18% o poder de ataque é obviamente maior; seguem-se o Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, o Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L, o Ácido Acético (CH_3COOH) 3%, o Ácido Lático ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% e, como seria de esperar, a Água (H_2O) é o que tem o menor poder de ataque e consequente “destruição” das placas. Comparando com a percepção visual, os dados estão consistentes, excepto para o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L que parece ter um poder de ataque intermediário em relação aos restantes reagentes. Sendo muito importante o cuidado em proteger os calcários durante o manuseio de produtos do quotidiano contendo estes reagentes, por exemplo: limão, vinagre, água sanitária e produtos de limpeza diversos.

Tabela 26 – Valores da resistência ao ataque químico dos três calcários em estudo.

Reagente	Crema Paraná					Filstone Beije MF					Filstone Blue				
	ΔE	Resistência ao ataque químico	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb	ΔE	Resistência ao ataque químico	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb	ΔE	Resistência ao ataque químico	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb
Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L	6,01	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	14,36	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	12,42	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L	6,37	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	13,87	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	16,23	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Ácido Clorídrico (HCl) 3%	2,78	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	7,47	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	8,74	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Ácido Clorídrico (HCl) 18%	5,87	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	11,72	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	14,25	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Água (H ₂ O)	0,62	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	1,70	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	1,17	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L	4,35	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	9,05	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	4,39	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Cloreto de amônio (NH ₄ Cl) 100 g/L	2,89	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul	4,25	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul	3,63	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul
Ácido Acético (CH ₃ COOH) 3%	5,52	Moderada	Clarear	Mais verde	Mais azul	2,28	Alta	Clarear	Mais verde	Mais azul	2,60	Alta	Clarear	Mais verde	Mais azul
Ácido Cítrico (C ₆ H ₈ O ₇) 100 g/L	18,64	Baixa	Clarear	Mais verde	Mais azul	11,05	Baixa	Clarear	Mais verde	Mais azul	17,26	Baixa	Clarear	Mais verde	Mais azul
Ácido Lático (C ₃ H ₅ O ₃) 5%	3,75	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul	2,22	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	3,91	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul

*20 corpos-de-prova para cada calcário sendo 2 por cada reagente

Figura 47 – Imagens do calcário Crema Paraná antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B) Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5%.



Figura 48 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B) Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Láctico (C₃H₈O₃) 5%.



Figura 49 – Imagens do calcário Filstone Blue antes e após o ataque químico, com os seguintes reagentes: (A) Hidróxido de Potássio (KOH) 30 g/L, (B) Hidróxido de Potássio (KOH) 100 g/L, (C) Ácido Clorídrico (HCl) 3%, (D) Ácido Clorídrico (HCl) 18%, (E) Água (H₂O), (F) Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, (G) Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L, (H) Ácido Acético (CH₃COOH) 3%, (I) Ácido Cítrico (C₆H₈O₇) 100 g/L e (J) Ácido Láctico (C₃H₈O₃) 5%.



Segundo a norma DIN EN ISSO 11664-4 (2012), para o Crema Paraná todas as variações de cor são dectáveis à visão humana excepto do Ácido Clorídrico (HCl) 3%, da Água (H₂O) e do Cloreto de amônio (NH₄Cl) 100 g/L; para o Filstone Beije MF todas as variações de cor são dectáveis à visão humana excepto da Água (H₂O), do Ácido Acético (CH₃COOH) 3% e do Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5%; para o Filstone Blue todas as variações de cor são dectáveis à visão humana excepto da Água (H₂O) e do Ácido Lático (C₃H₈O₃) 5%.

Manchamento

O ensaio de manchamento foi utilizado para se avaliar as alterações visuais através de imagens, cromáticas e de brilho das placas, dos três calcários em estudo, face a determinados produtos do quotidiano.

Nas tabelas 6.6 e 6.7 estão representados os valores das variações de cor total, de cor ao longo dos eixos azul-amarelo e verde-vermelho, da luminosidade, as respectivas resistências ao manchamento, do brilho final e das variações de brilho para os três calcários. As figuras 6.13, 6.14 e 6.15 são as pranchetas com as imagens dos três calcários antes e após serem atacados com os diferentes produtos do quotidiano.

Para este ensaio não se calcularam as dispersões dos resultados, pois apenas se avaliou um corpo-de-prova, de cada um dos calcários, por reagente.

O Crema Paraná possui uma resistência moderada ao óleo de sardinha enlatada, café líquido e óleo de soja e uma resistência alta aos restantes reagentes.

O Filstone Beije MF e o Filstone blue têm uma resistência baixa ao café líquido, óleo de soja e coca-cola, resistência moderada ao vinho tinto e ao suco de uva e uma resistência alta aos restantes reagentes. No entanto, o Filstone Beije MF tem uma resistência moderada ao óleo de sardinha enlatada, enquanto que o Filstone Blue tem uma resistência baixa para este reagente.

Nos reagentes óleo de sardinha enlatada, molho de tomate e urina o Crema Paraná possui as menores variações de cor e o Filstone Blue as maiores, o que poderá ser explicado pelo Filstone Blue ser o calcário com a granulação mais grosseira e o Crema Paraná o que tem a granulação menor. Para o café líquido, detergente (pH 5,5), vinho tinto, óleo de soja, suco de uva, coca-cola e água o Crema Paraná possui as menores variações de cor e o Filstone Beije MF as maiores, podendo ser explicado por o Filstone Beije MF ser o calcário mais poroso e o Crema Paraná o menos poroso. Limão e vinagre conferem as maiores variações de cor ao Crema Paraná e as menores ao Filstone Beije MF, pois estes reagentes poderão atacar mais em calcários com menos quantidade de grãos definidos (Crema Paraná) e reagir menos

em calcários com grandes quantidades de grãos definidos (Filstone Beije MF). O desgordurante (veja) dá as maiores variações de cor ao Filstone Beije MF e as menores ao Filstone Blue, talvez pelo fato de o Filstone Beije MF ter a cor mais clara e o Filstone Blue a cor mais escura, havendo adição de cor escura. A lã de aço com detergente dá as maiores variações de cor ao Crema Paraná e as menores ao Filstone Blue, o que poderá ser explicado pela maior suscetibilidade a alteração de um calcário com a menor granulação (Crema Paraná) em função de um calcário com granulação mais grosseira (Filstone Blue). Já o desinfetante dá as maiores variações de cor ao Filstone Blue e as menores ao Filstone Beije MF, pois é mais notória a alteração de cor no calcário mais escuro (Filstone Blue) em relação ao calcário mais claro (Filstone Beije MF), havendo subtração de cor escura.

Para os três calcários, estes reagentes têm um efeito de luminosidade de escurecimento, sendo de clareamento apenas para o limão no Filstone Beije MF e para o detergente (pH 5,5) e a água no Crema Paraná.

O efeito de cor no eixo vermelho-verde o Crema Paraná tem tendência para a cor verde no limão, detergente (pH 5,5), vinagre, suco de uva, desinfetante e água, o Filstone Beije MF é para limão, desgordurante (veja), desinfetante, lã de aço com detergente e água, o Filstone Blue é para o limão, desgordurante (veja), vinagre, suco de uva e desinfetante. Os restantes reagentes têm tendências para a cor vermelha.

O efeito de cor no eixo amarelo-azul, o Crema Paraná tem tendência para a cor azul nos reagentes limão, detergente (pH 5,5), vinho tinto, vinagre, molho de tomate, suco de uva, desinfetante e água; o Filstone Beije MF é para o limão e o vinagre; o Filstone Blue é para o limão, detergente (pH 5,5), vinagre e suco de uva. Os restantes reagentes têm tendências para a cor amarela.

Para a medição do brilho usou-se o ângulo de 60° para o Crema Paraná, 85° para o Filstone Beije MF e consoante o reagente usou-se o ângulo de 60° ou 85° para o Filstone Blue.

O brilho final no limão, óleo de sardinha enlatada, detergente (pH5,5), desgordurante (veja), vinho tinto, vinagre, suco de uva, lã de aço com detergente, desinfetante, coca-cola e água é menor no Crema paraná e maior no Filstone Blue. Já no café líquido e no óleo de soja é menor no Filstone Blue e maior no Filstone Beije MF. Para o molho de tomate o brilho final é menor no Filstone Beije MF e maior no Filstone Blue. Em relação à urina os corpos-de-prova do Filstone Blue têm o brilho final menor e o Crema Paraná o brilho final maior.

Tabela 27 – Valores da resistência ao manchamento dos três calcários em estudo.

Reagente	Crema Paraná					Filstone Beije MF					Filstone Blue				
	ΔE Final	Resistência ao Manchamento	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb	ΔE Final	Resistência ao Manchamento	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb	ΔE Final	Resistência ao Manchamento	Efeito ΔL	Efeito Δa	Efeito Δb
Limão	2,37	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	0,79	Alta	Clarear	Mais verde	Mais azul	2,28	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul
Óleo de Sardinha enlatada	7,82	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	8,51	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	13,69	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Café líquido	6,24	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	12,7	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	10,54	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Detergente (pH 5,5)	0,86	Alta	Clarear	Mais verde	Mais azul	1,36	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	1,17	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul
Desengordurante (Veja)	0,65	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	1,74	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo	0,54	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo
Vinho tinto	2,77	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul	9,32	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	8,44	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Vinagre	1,66	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	0,57	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	1,02	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul
Óleo de Soja	8,15	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	16,62	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	16,52	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Molho de Tomate	1,64	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais azul	4,66	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	4,98	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Suco de Uva	3,73	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	8,31	Moderada	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	6,62	Moderada	Escurecer	Mais verde	Mais azul
Urina	1,14	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	2,37	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	3,95	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Lã de Aço com Detergente	0,74	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	0,6	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo	0,57	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Desinfetante	1,69	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais azul	1,26	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo	1,76	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo
Coca Cola	3,79	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	14,5	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo	13,15	Baixa	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo
Água	0,2	Alta	Clarear	Mais verde	Mais azul	0,81	Alta	Escurecer	Mais verde	Mais amarelo	0,5	Alta	Escurecer	Mais vermelho	Mais amarelo

*15 corpos-de-prova para cada calcário

Tabela 28 – Valores do brilho dos três calcários, para a resistência ao manchamento.

Reagente	Brilho Final (Crema Paraná)			Brilho Final (Filstone Beije MF)			Brilho Final (Filstone Blue)		
	Ângulo	Brilho	ΔB (%)	Ângulo	Brilho	ΔB (%)	Ângulo	Brilho	ΔB (%)
Limão	60°	1,7	95	85°	2,5	94,8	85°	3,5	93,5
Óleo de Sardinha enlatada		2,7	94,7		11,6	73,5		18,1	67,3
Café líquido		5,4	83,4		14,2	73,3	60°	3,4	69,9
Detergente (pH 5,5)		5,4	89,5		8,7	81,9	85°	15	72,4
Desengordurante (Veja)		10,1	68,2		24,9	35,2		33,3	37,9
Vinho tinto		2,7	90,7		4	91,4		9,5	80,2
Vinagre		2,1	95		2,3	94,4	5	91,3	
Óleo de Soja		8,3	85,3		22,3	49,7	60°	4,2	63,8
Molho de Tomate		4,8	90,9		2,3	93,5	85°	13,6	71,8
Suco de Uva		3,1	91		6	86,1		6,7	88,4
Urina		7,5	81,8		6,4	85,3	60°	3	72,7
Lã de Aço com Detergente		5,9	80,7		13,1	66,7	85°	34,2	37,8
Desinfetante		10,8	74,4		12,5	67,4		23,4	54,1
Coca Cola		2,8	94,7		6,3	82,3		15,8	72,7
Água		9,4	85,2		17,6	62,1		35,2	32,4

*15 corpos-de-prova para cada calcário

A variação de brilho é maior no Crema Paraná e menor no Filstone Blue para os reagentes: limão, óleo de sardinha enlatada, café líquido, detergente (pH5,5), vinho tinto, vinagre, lã de aço com detergente, desinfetante, coca-cola e água, o que poderá ser explicado pela maior suscetibilidade a alteração de um calcário com a menor granulação (Crema Paraná) em função de um calcário com granulação mais grosseira (Filstone Blue). Para o desengordurante (veja), óleo de soja e suco de uva a variação de brilho é maior no Crema Paraná e menor no Filstone Beije MF, pois estes reagentes poderão atacar mais em calcários com menos quantidade de grãos definidos (Crema Paraná) e reagir menos em calcários com grandes quantidades de grãos definidos (Filstone Beije MF). Já o molho de tomate e a urina conferem uma maior variação de brilho ao Filstone Beije MF e a menor variação ao Filstone Blue, talvez pelo fato de o Filstone Beije MF ter a cor mais clara e o Filstone Blue a cor mais escura, havendo adição de cor escura.

Figura 50 – Imagens do calcário Crema Paraná antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água.



Figura 51 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água.

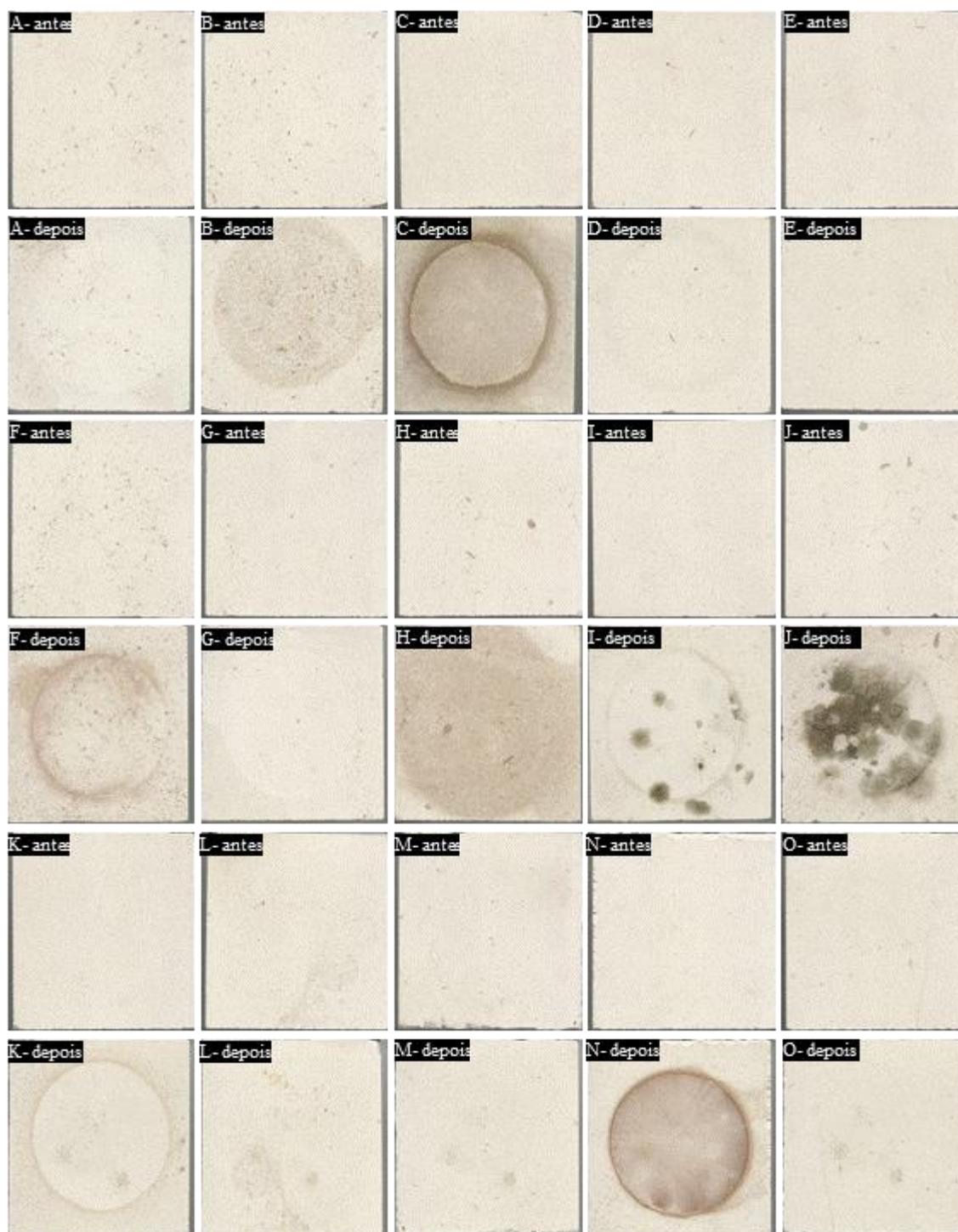
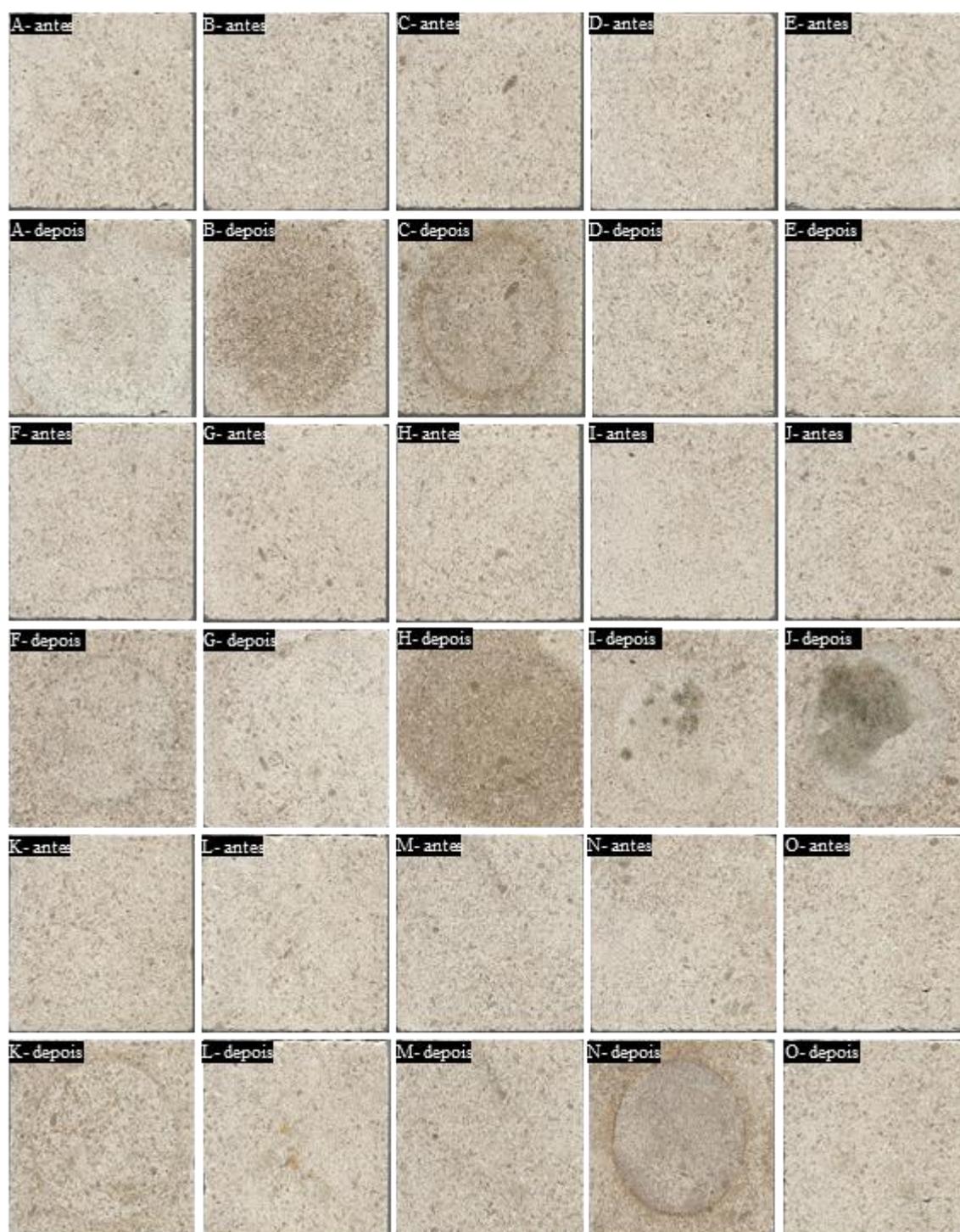


Figura 52 – Imagens do calcário Filstone Blue antes e após o manchamento, com os seguintes reagentes: (A) limão, (B) óleo de sardinha enlatada, (C) café líquido, (D) detergente (pH5,5), (E) desengordurante (veja), (F) vinho tinto, (G) vinagre, (H) óleo de soja, (I) molho de tomate, (J) suco de uva, (K) urina, (L) lã de aço com detergente, (M) desinfetante, (N) coca-cola e (O) água.



Para a variação de cor e resistência ao ataque de manchamento dos reagentes, conclui-se que: óleo de soja é o que tem maior poder de ataque, gerando maior “destruição” à placa; coca cola é o segundo reagente com maior poder de ataque, óleo de sardinha enlatada é o terceiro; seguem-se o café líquido, vinho tinto, suco de uva, molho de tomate, urina, limão, desinfetante, detergente (pH 5,5), vinagre, desgordurante (Veja), lã de aço com detergente e, como esperado, a água tem o menor poder de ataque e conseqüente “destruição” das placas.

Para a variação de brilho através dos reagentes, conclui-se que: limão é o que tem maior perda de brilho; vinagre é o segundo reagente com maior perda de brilho; suco de uva é o terceiro; seguem-se o vinho tinto, molho de tomate, coca cola, detergente (pH 5,5), urina, óleo de sardinha enlatada, café líquido, óleo de soja, desinfetante, lã de aço com detergente, água e desgordurante (Veja). Curiosamente, a água tem a segunda menor perda de brilho, podendo dever-se à sua composição ser mais forte que o desgordurante (Veja).

Comparando com a percepção visual conclui-se que as substâncias mais gordurosas e escuras são as que afetam mais a coloração e os produtos de limpeza afetam menos. Contudo as substâncias mais ácidas, incluindo a maioria dos produtos de limpeza, afetam mais a alteração de brilho, que nem sempre é perceptível ao olho humano.

Segundo a norma DIN EN ISSO 11664-4 (2012), para o Crema Paraná a maioria das variações de cor não são dectáveis à visão humana excepto do óleo de sardinha enlatada, café líquido, óleo de soja, suco de uva e coca-cola; para o Filstone Beije MF a maioria das variações de cor não são dectáveis à visão humana excepto do óleo de sardinha enlatada, café líquido, vinho tinto, óleo de soja, molho de tomate, suco de uva e coca-cola; para o Filstone Blue a maioria das variações de cor não são dectáveis à visão humana excepto do óleo de sardinha enlatada, café líquido, vinho tinto, óleo de soja, molho de tomate, suco de uva, urina e coca-cola.

Extrator de Soxhlet

Este ensaio consiste em simular a lixiviação contínua através de um extrator Soxhlet utilizando H₂O destilada, HCl, HNO₃ e H₂SO₄, todos a 0,25% da sua concentração, avaliando-se as alterações cromáticas e visual com registro fotográfico de fragmentos, dos três calcários em estudo.

Nas tabelas 6.8 e 6.9 e nos gráficos 6.1, 6.2 e 6.3 estão representados os valores da porcentagem de massa perdida acumulada e a quantidade acumulada de elementos químicos da absorção atômica presentes entre os ciclos, dos três calcários, para os quatro reagentes. Nas

figuras 6.16 e 6.17 são as pranchetas com as fotografias dos três calcários antes e após de serem lixiviados com os diferentes reagentes.

Para este ensaio não se calcularam as dispersões dos resultados, pois apenas se avaliou uma amostra, de cada um dos calcários, por reagente.

Tabela 29 – Valores da porcentagem de massa perdida acumulada dos três calcários no ensaio com extrator de Soxhlet.

Reagente	Amostra	% Massa perdida acumulada			
		1º Ciclo	2º Ciclo	3º Ciclo	4º Ciclo
H ₂ O	Filstone Beije MF	0,44	0,83	0,99	1,31
	Filstone Blue	0,33	0,69	0,79	1,09
	Crema Paraná	0,27	0,57	0,84	1,07
HCl	Filstone Beije MF	1,43	1,75	1,82	1,95
	Filstone Blue	1,47	1,78	1,97	2,20
	Crema Paraná	0,27	0,53	0,81	1,84
HNO ₃	Filstone Beije MF	0,16	0,53	0,80	0,95
	Filstone Blue	0,25	0,58	1,03	1,45
	Crema Paraná	0,61	0,67	0,78	1,33
H ₂ SO ₄	Filstone Beije MF	0,59	0,94	2,24	2,56
	Filstone Blue	0,66	1,08	2,00	2,44
	Crema Paraná	0,75	0,79	1,08	1,68

*1 balão com vários fragmentos aleatórios para cada calcário e cada reagente

Para a H₂O, em geral, nos quatro ciclos o Filstone Beije MF é o que perde mais massa e o Crema Paraná o que perde menos quantidade, sendo essa a ordem de massa total perdida, pois este reagente lixivia e altera mais facilmente um calcário mais poroso (Filstone Beije MF) em relação a um calcário menos poroso (Crema Paraná).

Utilizando HCl o Filstone Blue é o que perde mais massa nos primeiros dois ciclos, enquanto que o Crema Paraná perde mais massa no 3º e 4º ciclos. Avaliando a massa total perdida observa-se que o Filstone Blue é o que tem o valor mais elevado e o Crema Paraná o valor mais baixo, o que poderá ser explicado pelo Filstone Blue ser o calcário com a granulação mais grosseira e o Crema Paraná o que tem a granulação menor.

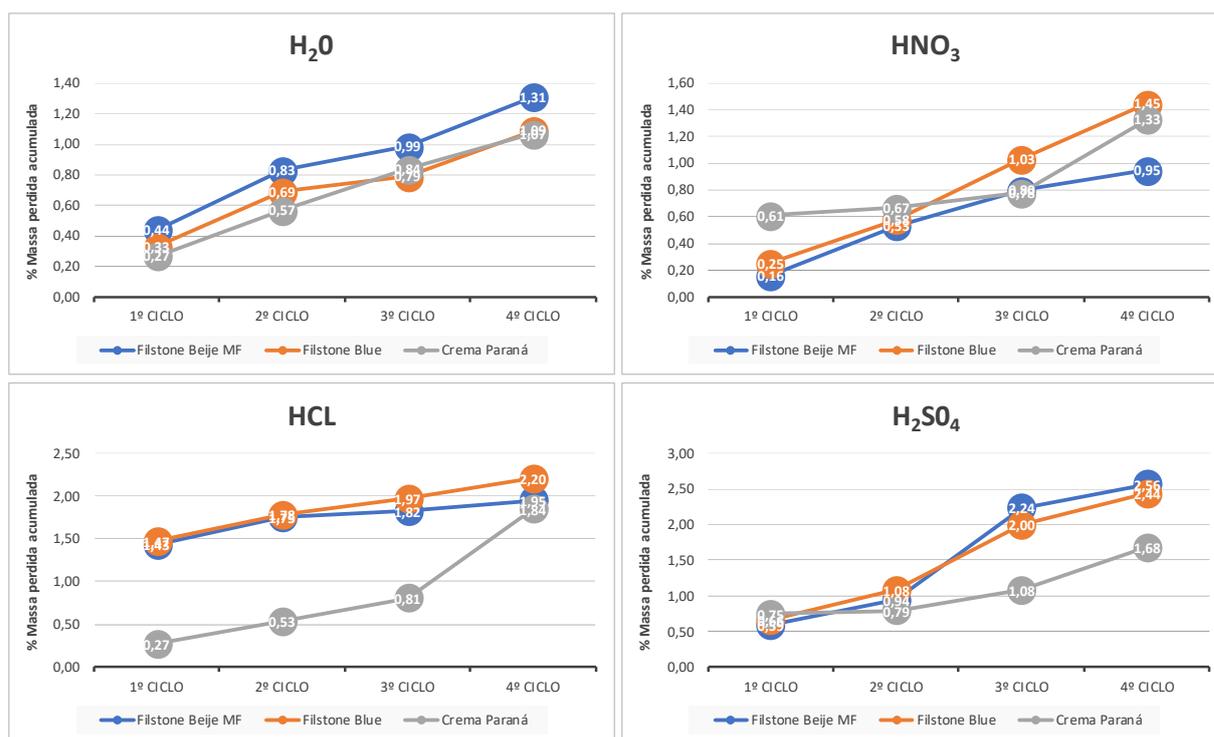
Em relação ao HNO₃ é o Crema Paraná que perde mais massa nos primeiros dois ciclos, enquanto que o Filstone Blue perde mais massa no 3º e 4º ciclos. Mas tendo em conta a perda total de massa, o Filstone Blue é o que perde mais e o Filstone Beije MF o que perde menos, pois o Filstone Blue é o que tem a granulação mais grosseira e esse fator influencia mais do que a sua porosidade intermediária e a sua maior quantidade de cimento que lhe

poderia conferir maior coesão. Já o Filstone Beije MF perde menos pois apesar de ser o mais poroso e ter a maior quantidade de grãos, tem uma granulação fina e uma quantidade de cimento intermediária que lhe confere maior coesão e resistência à perda de massa.

Para o H_2SO_4 , em geral, a perda total de massa é maior no Filstone Beije MF e menor para o Crema Paraná. Pois este reagente lixiviar e alterar mais facilmente um calcário mais poroso (Filstone Beije MF) em relação a um calcário menos poroso (Crema Paraná).

Em geral, o Crema Paraná é o que perde menos massa para os 4 reagentes, enquanto que o Filstone Beije MF perde maior quantidade de massa para a H_2O e para o H_2SO_4 . Já o Filstone Blue é o que perde mais massa para o HCl e o HNO_3 .

Gráfico 14 – Representação gráfica da porcentagem de massa perdida acumulada de cada calcário entre os ciclos para cada um dos quatro reagentes utilizados no ensaio com extrator de Soxhlet.



Através das figuras 6.16 e 6.17 observa-se que existe uma ligeira alteração nos fragmentos analisados dos três calcários, principalmente para os ácidos HCl , HNO_3 e H_2SO_4 .

Figura 53 – Imagens do calcário Filstone Blue (A), Crema Paraná (B) e Filstone Beije MF (C) antes do ensaio com extrator de Soxhlet (0) e após os ciclos 1, 2, 3 e 4 aos reagentes H₂O e HCl.

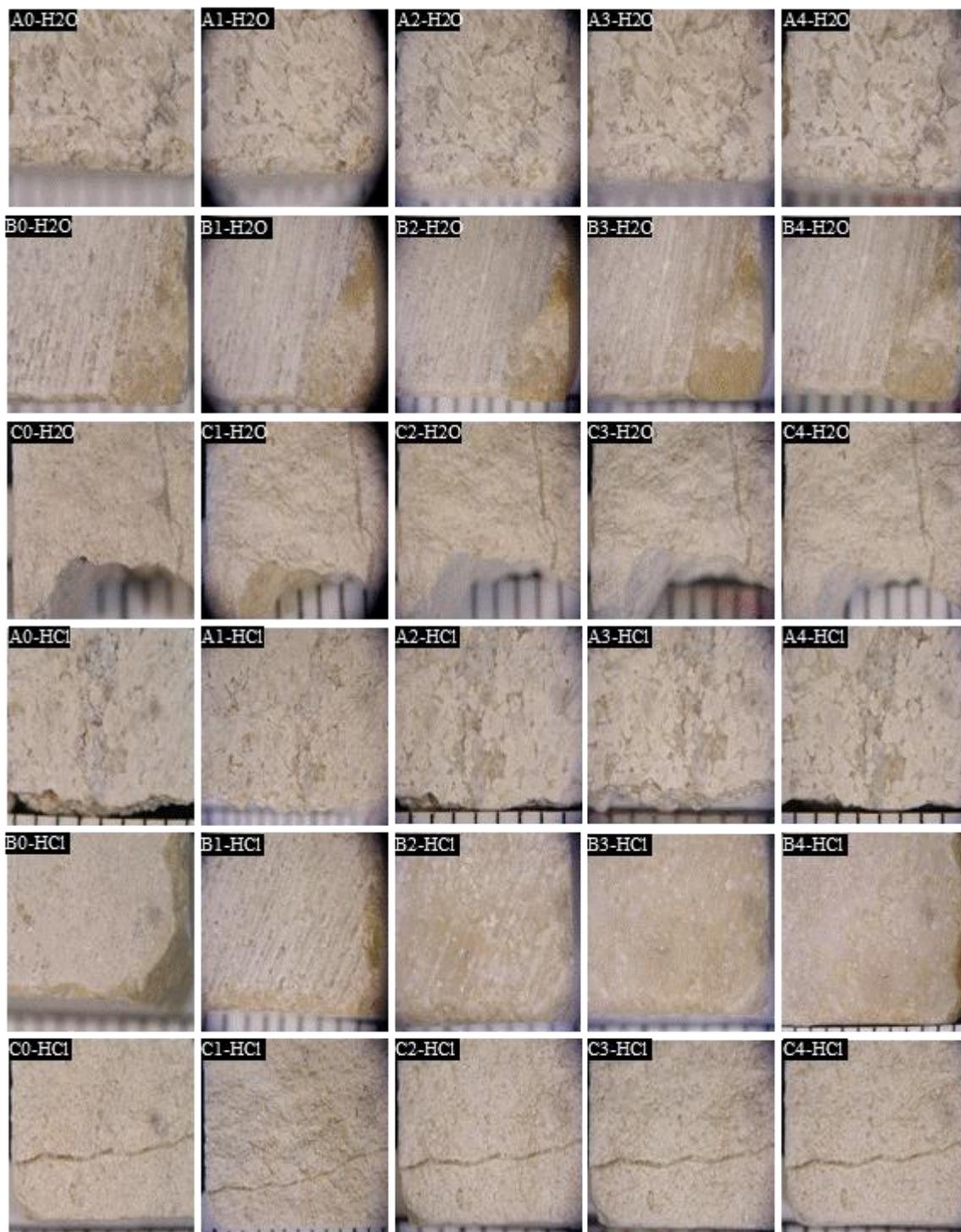


Figura 54 – Imagens do calcário Filstone Blue (A), Crema Paraná (B) e Filstone Beije MF (C) antes do ensaio com extrator de Soxhlet (0) e após os ciclos 1, 2, 3 e 4 aos reagentes HNO_3 e H_2SO_4 .

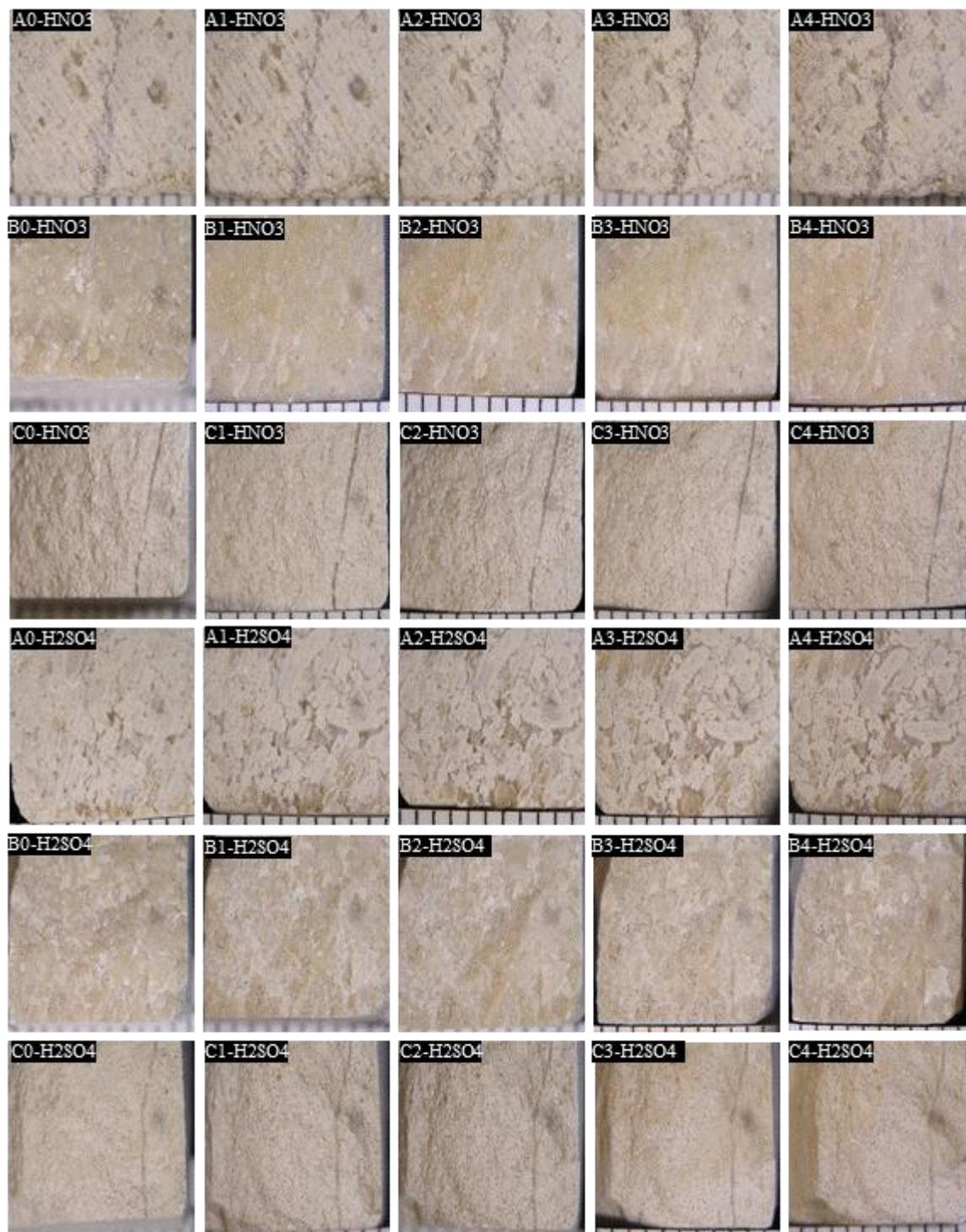


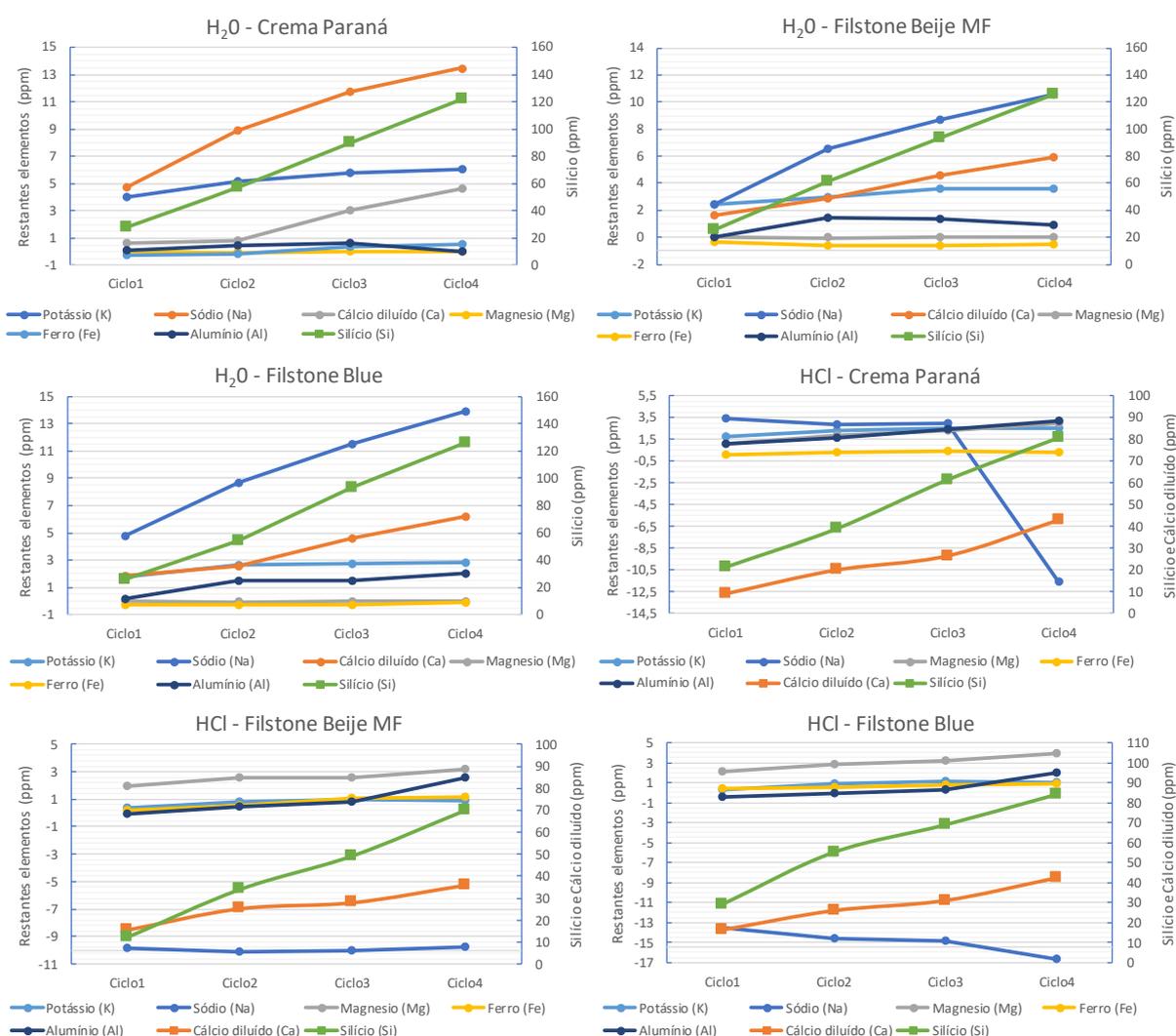
Tabela 30 – Valores acumulados das análises químicas por absorção atômica dos três calcários, para o ensaio com extrator de Soxhlet, com valores resultantes de diluição a cinza.

		Amostra	Potássio (K)	Sódio (Na)	Cálcio diluído (Ca)	Magnésio (Mg)	Ferro (Fe)	Silício (Si)	Alumínio (Al)
H ₂ O	Crema Paraná	Ciclo1	4,014	4,728	0,662	0,002	-0,271	27,92	0,122
		Ciclo2	5,196	8,868	0,783	0	-0,166	57,42	0,478
		Ciclo3	5,747	11,687	3,047	0,001	0,383	89,83	0,626
		Ciclo4	6,086	13,478	4,597	0,003	0,519	121,98	0,041
	Filstone Beije MF	Ciclo1	2,464	2,394	1,626	0,004	-0,339	25,97	0,065
		Ciclo2	2,987	6,574	2,848	0,001	-0,568	61,17	1,43
		Ciclo3	3,566	8,732	4,613	0,002	-0,626	93,65	1,335
		Ciclo4	3,613	10,582	5,94	0,006	-0,484	125,9	0,905
	Filstone Blue	Ciclo1	1,785	4,766	1,863	0,002	-0,249	25,91	0,197
		Ciclo2	2,648	8,667	2,574	0	-0,264	53,95	1,54
		Ciclo3	2,772	11,503	4,605	0,001	-0,247	92,95	1,469
		Ciclo4	2,853	13,882	6,18	0,005	-0,088	126,28	2,017
HCl	Crema Paraná	Ciclo1	1,74	3,408	9,339	1,086	0,129	21,45	1,116
		Ciclo2	2,247	2,834	20,159	1,857	0,271	39,03	1,659
		Ciclo3	2,531	2,944	26,591	2,292	0,426	61,44	2,431
		Ciclo4	2,506	-11,526	42,871	2,929	0,349	80,67	3,218
	Filstone Beije MF	Ciclo1	0,394	-9,879	15,44	1,909	0,15	12,1	-0,086
		Ciclo2	0,832	-10,134	25,175	2,538	0,572	33,94	0,477
		Ciclo3	0,969	-10,03	27,94	2,586	1,089	49,25	0,792
		Ciclo4	0,915	-9,748	35,91	3,18	1,192	69,98	2,544
	Filstone Blue	Ciclo1	0,25	-13,57	16,23	2,106	0,363	28,6	-0,438
		Ciclo2	0,913	-14,646	25,926	2,81	0,528	54,78	-0,096
		Ciclo3	1,07	-14,852	30,986	3,172	0,822	68,63	0,257
		Ciclo4	1,038	-16,624	42,276	3,963	0,899	83,89	1,94
HNO ₃	Crema Paraná	Ciclo1	-0,017	-1,686	13,09	0,958	-0,267	12,68	0,374
		Ciclo2	-0,019	-3,578	18,288	1,407	0,119	19,556	-0,238
		Ciclo3	-0,018	-3,809	22,858	1,856	0,31	32,156	0,107
		Ciclo4	-0,019	-4,708	35,608	2,625	0,115	44,756	-0,122
	Filstone Beije MF	Ciclo1	-0,015	0,67	7,966	0,845	-0,156	23,61	0,534
		Ciclo2	-0,032	-1,623	19,056	1,503	-0,009	37,77	2,404
		Ciclo3	-0,037	-2,878	29,126	2,085	0,352	47,047	2,517
		Ciclo4	-0,024	-3,037	37,093	2,579	0,157	57,487	2,945
	Filstone Blue	Ciclo1	-0,036	0,434	10,23	0,894	0,022	17,95	0,309
		Ciclo2	-0,067	-1,735	20,98	1,556	0,186	24,473	0,184
		Ciclo3	-0,063	-3,282	32,86	2,306	0,202	34,863	-0,005
		Ciclo4	-0,075	-4,549	44,62	3,03	-0,055	41,091	-0,238
H ₂ SO ₄	Crema Paraná	Ciclo1	-0,012	1,515	9,454	1,514	0,266	35,45	2,354
		Ciclo2	0,024	0,794	12,782	1,819	0,385	41,688	3,096
		Ciclo3	0	3,04	23,362	3,205	0,29	66,308	4,118
		Ciclo4	0,024	3,265	34,702	4,215	0,238	87,508	4,595
	Filstone Beije MF	Ciclo1	-0,003	0,279	11,45	1,568	0,727	16,14	1,787
		Ciclo2	0,018	0,904	22,38	2,547	0,765	30,19	2,238
		Ciclo3	0,015	0,639	33,46	2,554	0,749	49,65	2,846
		Ciclo4	0,036	1,022	43,83	3,225	0,855	69,11	3,051
	Filstone Blue	Ciclo1	0	0,645	11,34	1,707	-0,016	15,93	2,821
		Ciclo2	0,028	-0,651	22,63	2,555	-0,343	29,04	3,826
		Ciclo3	0,007	-0,026	33,7	2,563	-0,461	51,8	5,179
		Ciclo4	0,031	0,05	44,64	3,345	-0,528	71	5,776

*1 leitura de cada calcário, por ciclo para cada reagente

Utilizando H₂O ao longo de 4 ciclos nota-se que existe uma lixiviação de silício, sódio, cálcio e de potássio, fazendo aumentar a porcentagem de magnésio, ferro e alumínio nas amostras do Crema Paraná; lixiviação de silício, sódio, cálcio e de potássio, fazendo aumentar a porcentagem de magnésio, ferro e alumínio nas amostras do Filstone Beije MF; lixiviação de silício, sódio, cálcio, potássio e de ferro, fazendo aumentar a porcentagem de magnésio e alumínio nas amostras do Filstone Blue.

Gráfico 15 – Representação gráfica da quantidade acumulada de elementos químicos presentes entre os ciclos para os reagentes H₂O e HCl, nos três calcários.

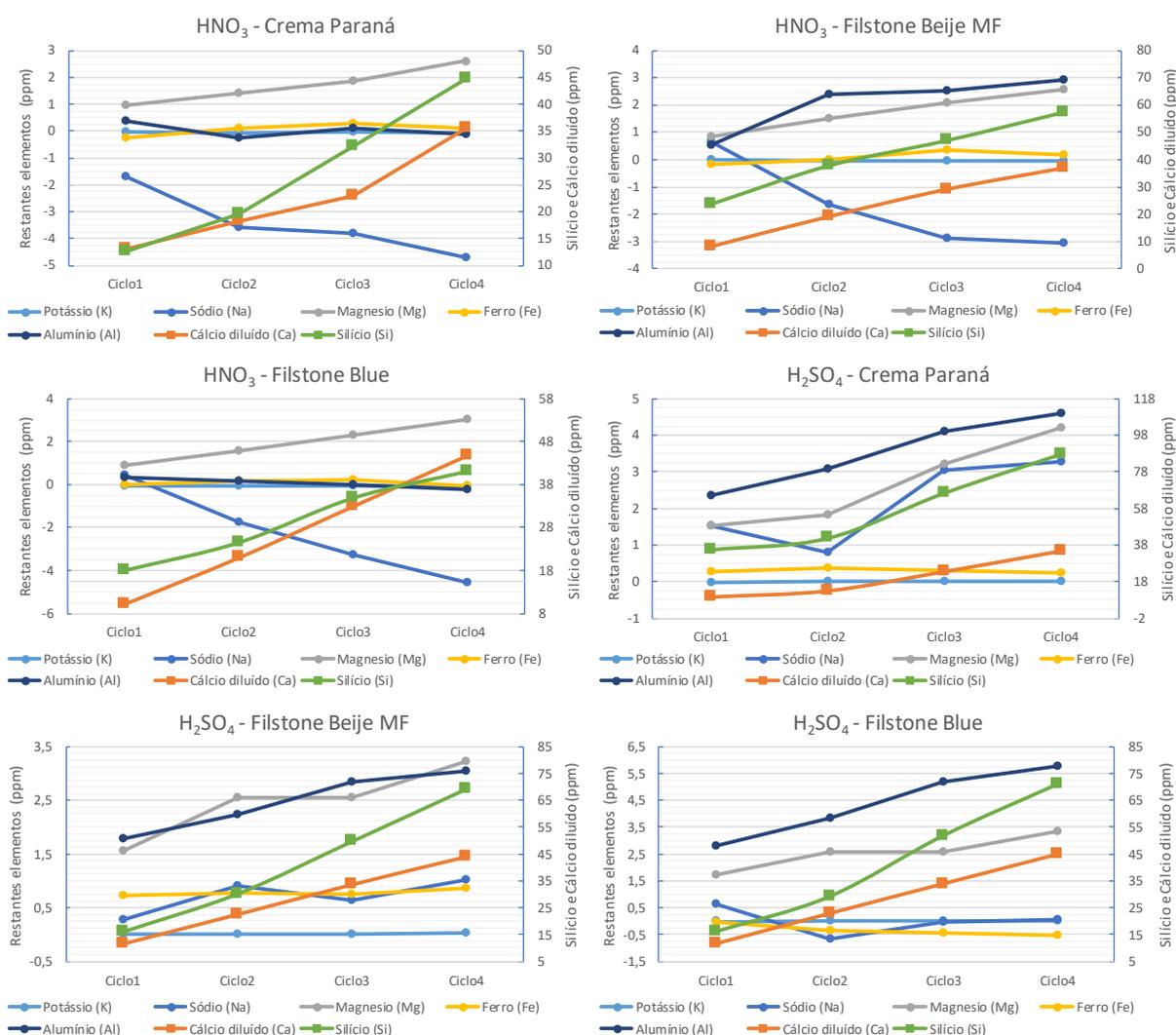


Utilizando HCl nos 4 ciclos observa-se que existe uma lixiviação de cálcio, silício e alumínio, fazendo aumentar a porcentagem de sódio, potássio, magnésio e ferro nas amostras do Crema Paraná; lixiviação de silício, cálcio, magnésio e de alumínio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio e de ferro nas amostras do Filstone Beije MF; lixiviação de

silício, cálcio, magnésio e de alumínio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio e de ferro nas amostras do Filstone Blue.

Utilizando HNO_3 nos 4 ciclos observa-se a lixiviação de cálcio, silício e de magnésio, aumentando a porcentagem de alumínio, sódio, potássio e de ferro nas amostras do Crema Paraná; lixiviação de silício, cálcio, magnésio e de alumínio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio e de ferro nas amostras do Filstone Beije MF; lixiviação de silício, cálcio e de magnésio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio, alumínio e de ferro nas amostras do Filstone Blue.

Gráfico 16 – Representação gráfica da quantidade acumulada de elementos químicos presentes entre os ciclos para os reagentes HNO_3 e H_2SO_4 , nos três calcários.



Utilizando H_2SO_4 observa-se que existe uma lixiviação de cálcio, silício, alumínio, magnésio e de sódio, fazendo aumentar a porcentagem de potássio e ferro nas

amostras do Crema Paraná; lixiviação de silício, cálcio, magnésio e de alumínio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio e de ferro nas amostras do Filstone Beije MF; lixiviação de silício, cálcio, magnésio e de alumínio, aumentando a porcentagem de sódio, potássio e de ferro nas amostras do Filstone Blue.

Nevoeiro salino

Este ensaio permite simular a ação da salinidade nos calcários em estudo utilizando uma câmara controlada, avaliando-se pesos e alterações em registro fotográfico.

Na tabela 31 estão representados os valores da massa inicial e final dos três calcários em estudo, assim como alguns valores calculados para as suas dispersões. Na figura 55 está representada a prancheta com as fotografias dos três calcários antes e após do ensaio de alterabilidade.

Os três calcários têm baixa dispersão, quer no coeficiente de variação quer no desvio padrão, considerando os resultados deste ensaio como homogêneos.

O Filstone Blue é o calcário que tem a maior perda de massa, enquanto que o Crema Paraná é o que tem a menor perda de massa, pois o Filstone Blue é o calcário com a granulação mais grosseira e o Crema Paraná o que apresenta a granulação menor.

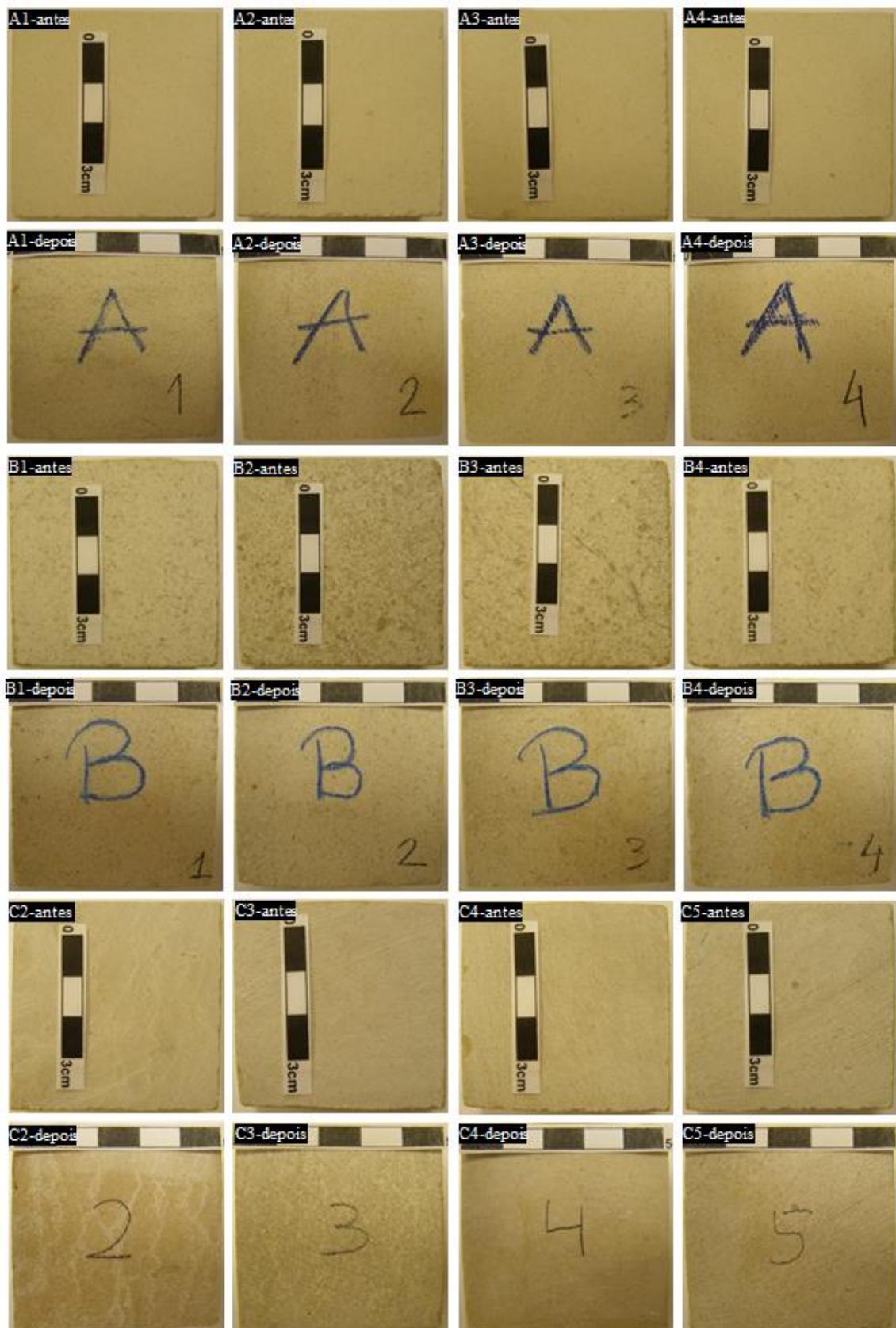
Tabela 31 – Valores da massa inicial e final dos três calcários em estudo.

Amostra	Filstone Blue	Crema Paraná	Filstone Beije MF
Média inicial (g)	359,2	359,32	313,88
Desvio Padrão inicial	10,29	21,01	5,37
Coeficiente de Variação inicial	2,86	5,85	1,71
Média final (g)	313,15	344,07	283,48
Desvio Padrão final	1,36	12,5	1,07
Coeficiente de Variação final	0,43	3,63	0,38
Perda de massa	46,05	15,25	30,40

*4 corpos-de-prova para cada calcário

Observando a figura 55 notamos que não existe um desgaste nem alteração de cor acentuadas nos três calcários em estudo. Serão necessários mais ciclos de alteração e um estudo mais pormenorizado da alteração cromática.

Figura 55 – Imagens do calcário Filstone Blue (B), Filstone Beije MF (A) e Crema Paraná (C) antes e após o ensaio de nevoeiro salino.



Cristalização de sais

Este ensaio consiste em avaliar o peso e a alteração segundo registro fotográfico dos três calcários através da submersão numa solução de sulfato de sódio decahidratado 14%.

Na tabela 32 estão representados os valores da massa inicial e final dos três calcários, assim como alguns valores calculados para as suas dispersões. No gráfico 17 estão correlacionados os valores da massa inicial e final dos três calcários. Nas figuras 6.19, 6.20 e 6.21 estão representadas as pranchetas com as fotografias dos três calcários antes e após do ensaio de alterabilidade.

Os três calcários têm baixa dispersão, quer no coeficiente de variação quer no desvio padrão, considerando os resultados deste ensaio como homogêneos.

O Filstone Blue é o calcário que apresenta a maior perda de massa, enquanto que o Crema Paraná é o que tem a menor perda de massa, inclusive tem um ligeiro ganho de massa, pois o Filstone Blue é o calcário com a granulação mais grosseira e o Crema Paraná o que tem a granulação menor. O ligeiro ganho de massa do Crema Paraná poderá dever-se à formação de novos compostos no interior dos corpos-de-prova pela sua interação com a solução de sulfato de sódio decahidratado 14%.

A realização do segundo ciclo de alteração nos corpos-de-prova do Filstone Beije MF mostraram uma perda de massa muito inferior ao primeiro ciclo. Portanto a realização de um segundo ciclo de alteração para este ensaio parece tornar-se desnecessária, apesar de se verificar um maior desgaste em alguns corpos-de-prova (figura 57).

Tabela 32 – Valores da massa inicial e final dos três calcários em estudo.

Amostra	Filstone Blue	Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Beije MF continuação
Média inicial (g)	163,08	166,39	152,75	143,54
Desvio Padrão inicial	4,25	4,77	2,83	19,14
Coefficiente de Variação inicial	2,6	2,87	1,85	13,33
Média final (g)	144,37	166,41	144,74	142,72
Desvio Padrão final	5,63	4,7	19,51	23,05
Coefficiente de Variação final	3,9	2,83	13,48	16,15
Perda de massa	18,71	-0,02	8,01	0,82

*8 corpos-de-prova para cada calcário

Observando as figuras 6.19, 6.20 e 6.21 notamos que existem diferenças nas alterações dos corpos-de-prova dos três calcários em estudo. Não existe um desgaste perceptível nos corpos-de-prova do Crema Paraná. Cinco dos oito corpos-de-prova do

Filstone Beije MF sofreram alterações mais perceptíveis comparativamente com os restantes, inclusive são evidentes desgastes e quebras mais acentuadas em algumas superfícies de frequência. Relativamente ao Filstone Blue, todos os corpos-de-prova sofreram grandes alterações, preferencialmente nas suas arestas.

Figura 56 – Imagens do calcário Crema Paraná antes (A) e após (B) o ensaio.



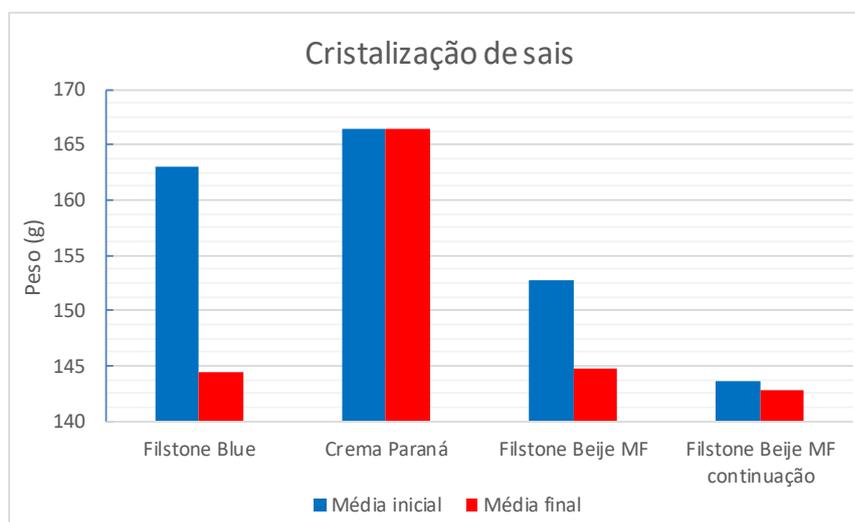
Figura 57 – Imagens do calcário Filstone Beije MF antes (A), após o primeiro ciclo (B) e após o segundo ciclo (C).



Figura 58 – Imagens do calcário Filstone Blue antes (A) e após (B) o ensaio.



Gráfico 17 – Representação gráfica do peso inicial e final dos três calcários.



6.5 Conclusões

Segundo o ensaio de ataque químico, o Crema Paraná tem as maiores alterações em ambientes com ácido acético (CH_3COOH) 3% e o ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L; o Filstone Beije MF tem as maiores alterações em ambientes com água (H_2O), hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, hidróxido de potássio (KOH) 30 g/L e cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L; o Filstone Blue apresenta as maiores alterações em ambientes com ácido clorídrico (HCl) 3% e 18%, hidróxido de potássio (KOH) 100 g/L e ácido láctico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5%.

Para a variação de cor e resistência ao ataque químico dos reagentes, conclui-se que: o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L é o que tem maior poder de ataque, sendo o que gera maior “destruição” à placa; o Hidróxido de Potássio (KOH), tanto 100 g/L como 30 g/L, é o segundo reagente com maior poder de ataque; o Ácido Clorídrico (HCl) é o terceiro, sendo que a 18% o poder de ataque é obviamente maior; seguem-se o Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, o Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L, o Ácido Acético (CH_3COOH) 3%, o Ácido Láctico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% e, como seria de esperar, a Água (H_2O) é o que tem o menor poder de ataque e consequente “destruição” das placas. Comparando com a percepção visual, os dados estão consistentes, excepto para o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L que parece ter um poder de ataque intermediário em relação aos restantes reagentes. Sendo muito importante o cuidado em proteger os calcários durante o manuseio de produtos do quotidiano contendo estes reagentes, por exemplo: limão, vinagre, água sanitária e produtos de limpeza diversos.

No ensaio de manchamento, o Crema Paraná possui as maiores alterações de cor para os reagentes limão, lã de aço com detergente e vinagre; o Filstone Beije MF tem as maiores alterações de cor para os reagentes café líquido, detergente (pH 5,5), vinho tinto, óleo de soja, suco de uva, coca-cola, desengordurante (veja) e água; o Filstone Blue apresenta as maiores alterações de cor para os reagentes óleo de sardinha enlatada, molho de tomate, desinfetante e urina. Tendo em conta a variação de brilho o Crema Paraná possui as maiores alterações para todos os reagentes com exceção do molho de tomate e da urina que conferem uma maior variação de brilho ao Filstone Beije MF. Através da variação de cor e da resistência ao ataque de manchamento dos reagentes, conclui-se que: óleo de soja é o que tem maior poder de ataque, gerando maior “destruição” à placa; coca cola é o segundo reagente com maior poder de ataque, óleo de sardinha enlatada é o terceiro; seguem-se o café líquido, vinho tinto, suco de uva, molho de tomate, urina, limão, desinfetante, detergente (pH 5,5), vinagre, desengordurante (Veja), lã de aço com detergente e, como esperado, a água tem o menor poder de ataque e consequente “destruição” das placas.

A variação de brilho através dos reagentes permite concluir que: limão é o que tem maior perda de brilho; vinagre é o segundo reagente com maior perda de brilho; suco de uva é o terceiro; seguem-se o vinho tinto, molho de tomate, coca cola, detergente (pH 5,5), urina, óleo de sardinha enlatada, café líquido, óleo de soja, desinfetante, lã de aço com detergente, água e desengordurante (Veja). Curiosamente, a água tem a segunda menor perda de brilho, podendo dever-se à sua composição ser mais forte que o desengordurante (Veja). Comparando com a percepção visual conclui-se que as substâncias mais gordurosas e escuras são as que afetam mais a coloração e os produtos de limpeza afetam menos. Contudo as substâncias mais ácidas, incluindo a maioria dos produtos de limpeza, afetam mais a alteração de brilho, que nem sempre é perceptível ao olho humano.

O calcário Crema Paraná é que perde menos massa para os ensaios de nevoeiro salino, cristalização de sais e extrator de Soxhlet, sendo o Filstone Blue o que perde mais massa. Contudo, o Filstone Beije MF perde maior quantidade de massa para a H₂O e para o H₂SO₄ no extrator de Soxhlet. Estes fatos mostram uma correlação direta entre a perda de massa e fatores petrográficos como a granulação, porosidade e cimento. Sendo o Crema Paraná com menores quantidades e dimensões de grãos, menos poroso e menor quantidade de cimento (microespático). Em relação aos três calcários, o Filstone Blue tem quantidade intermediária de grãos sendo os de maiores dimensões, porosidade intermediária e a maior quantidade de cimento (espático com mosaico).

A aplicação natural de cada um dos calcários em ambientes de exposição aos reagentes que são mais suscetíveis de causar alterações de cor e brilho deve ser evitada. Assim como se deve evitar a aplicação do calcário Filstone Blue em ambientes salinos ou com ácidos fortes como HCl, HNO₃ e sulfato de sódio, e do calcário Filstone Beije MF em ambientes úmidos ou com o ácido forte H₂SO₄. Deverá recorrer-se ao uso de impermeabilizantes a fim de evitar as reações que causam mudança de cor, perda de brilho e de massa, gerando patologias e perda da função estética.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por permitirem todas as condições para a realização da presente investigação, incluindo o doutorado sanduíche. Ao Centro de Tecnologia Mineral Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM - NRES), à Faculdade de Ciências e Tecnologia da

Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) e à Universidade de Aveiro (UA) por permitirem a execução das análises em questão.

Referências

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste*, 2., 1977, Campina Grande, **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, p.242-258. 1977.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818-anexo H**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios - Determinação da resistência ao ataque químico. Rio de Janeiro, 8p. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818-anexo G**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios - Determinação da resistência ao manchamento. Rio de Janeiro, 8p. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-1**: Rochas para revestimentos - Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

AZERÊDO, A. C. Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). **Comunicações Geológicas**, t. 94, p.29-51. 2007.

AZERÊDO, A. C. **Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica) - análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia**. Tese de Doutorado (não publicada), Dep. de Geologia, Faculdade de Ciências, Univ. Lisboa, + 36 ests. (2 vols), 366p. 1993.

BERTANI, R. T.; COSTA, I.G. & MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, *In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. Origem e evolução de bacias sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, p.291-310. 1990.

BOLONINI, T. M. **Estudo das aplicações das variedades de um quartzo-sienito com hiperstênio, como rochas ornamentais, com auxílio da caracterização tecnológica e das análises de cor e imagem**. 2015. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 133p. 2015.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Rochas ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: breve caracterização dos recursos, dos centros de produção e delimitação preliminar de áreas potenciais. **Boletim de Minas**, 47 (1), 22p. 2012.

CARVALHO, J. M. F *at al.* **Maciço Calcário Estremenho, Caracterização da situação de referência (relatório interno)**, 42p. 2011.

- CASSAB, R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, 54, nº2, p.207-250. 1970.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE. Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms, Supplement No. 2 to CIE publication No 15, Colorimetry, **Bureau Central de la CIE**, Paris. 1976.
- COSTA, A. P. L. *et al.* Rochas ornamentais: alterabilidade dos gnaisses enderbíticos no ensaio de lixiviação contínua através do extrator Soxhlet. **HOLOS**, 26, Vol. 3, 10p. 2010.
- DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In*: Ham, W. E. (Ed.). Classification of carbonate rocks, A Symposium. **American Association of Petroleum Geologists**, p.108-121. 1962.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 12370**: Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallization. British, 8p. 1999.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN DIN EN ISO 11664-4**: Colorimetry Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space (ISSO 11664-4:2008). German, 12p. 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN NP EN 14147**: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao envelhecimento por nevoeiro salino. Portugal, 14p. 2000.
- FARIAS, P. R. C. *et al.* Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. **Roteiro de Excursão**, 43p. 1990.
- FOLK, R. L. Practical petrographic classification of limestones. **American Association Petroleum Geology Bulletin**, V. 43, p.1-38. 1959.
- FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifting da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p.196-207. 1987.
- GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2008.
- KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In* **Geologia de Portugal no contexto da Ibéria** (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, p.317-368. 2006.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. LNEG. **Carta Geológica de Portugal na escala 1:1000000**, 3ªed, LNEG, Lisboa. 2010.

MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.
MONTANI, C. **XXVI Report marble and stones in the world 2014**. 2015 Aldus Casa di Edizioni in Carrara. 2015

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 88p. 2002.

NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. *In: Actas II Congresso Uruguaio de Geologia*, Uruguai, p.103-107. 1998.

NETO, O. C. P. *et al.* V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, Rio de Janeiro, p.357-369. 2007.

PROJETO ÁGUA SUBTERRÂNEA DO NORDESTE DO BRASIL. PROASNE. Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú. 2006. SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós- Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, Rio Grande do Norte, p.35-51. 2006.

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, Lisboa-Portugal, p.78-86. 1997.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. Rochas de Qualidade**, nº 127, São Paulo, p80-84. 1996.

SILVA, F. D. O. **Avaliação da cor e taxa de exalação de radônio em rochas graníticas entre ciclos de envelhecimento acelerado**. 2016. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 159p. 2016.

SOARES, U. M.; ROSSET, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, nº55, 2003.

SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, 1982, Salvador, **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p.181-183. 1982.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

X-RITE. **A guide to understanding color communication**. X-Rite, Incorporated. Disponível em: <http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001 Understand Color en.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2017.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS DO TRABALHO

Relativamente aos ensaios anteriormente apresentados, é de salientar que o ensaio de nevoeiro salino continua a decorrer para se obter a maior alteração possível das amostras.

Com o decorrer da pesquisa, a pedreira Filstone Natural deparou-se com uma problemática num dos calcários. O calcário Filstone Blue com o passar do tempo começa a perder a sua cor azulada e a ficar manchado. Assim, durante esta pesquisa delinearam-se novos objetivos: descobrir o porquê desse calcário apresentar a coloração azul, o porquê de perder essa coloração e como retirar ou manter por completo essa mesma coloração.

Pode-se adiantar que a causa deste novo objetivo está relacionada com a presença de matéria orgânica. Portanto esta pesquisa foi direcionada na questão da matéria orgânica e prevê-se que seja publicado mais um artigo, possivelmente para a revista “international journal of coal geology – A2”.

A matéria orgânica está sendo avaliada em relação aos três calcários desta pesquisa, mas dando principal ênfase ao Filstone Blue e suas particularidades. No decorrer do doutorado foi possível realizar alguns ensaios, em que já se obtiveram resultados para alguns deles e outros que ainda estão em fase laboratorial, e outra parte dos ensaios estão para serem realizados, sendo que a maioria segue as normas dos respectivos laboratórios e equipamentos utilizados.

Foi realizada uma análise termogravimétrica (ATG) e uma análise térmica diferencial (ATD) no Laboratório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Minerais não Metálicos (LabINOVA) do Departamento de Química da Universidade Federal do Ceará, seguindo as normas do próprio laboratório e dos equipamentos.

A determinação da quantidade de carbono orgânico total e de carbono inorgânico teve lugar no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás.

Na Central Analítica no Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A análise por difração de raios X e fluorescência de raios X está a ser efetuada no Laboratório de DRX e FRX do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal).

Será feita uma análise petrográfica específica para matéria orgânica no Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (Portugal).

No Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (Portugal) foram realizados dois ensaios experimentais pelo autor com a finalidade de avaliar a alteração da cor. Um dos ensaios ainda está a decorrer e consiste na aplicação de 4 placas de 12 x 8 x 3 cm de cada litologia: duas delas usadas em condições naturais e outras duas impermeabilizadas em todas as faces com uma resina. Estas placas foram colocados ao ar livre durante 4 ciclos de 14 dias. No final de cada ciclo as placas eram colocados 24h na estufa a 60°C. Depois eram retiradas por 2h para um exsiccador até arrefecerem para a temperatura ambiente. Posto isto, eram feitas as pesagens, registro fotográfico das superfícies selecionadas e feita a medição de cor em 4 quadrantes das mesmas superfícies selecionadas para as fotografias. Após estes 4 ciclos, aumentou-se para 30 dias a durabilidade de 1 ciclo. Para o outro ensaio utilizaram-se 2 corpos-de-prova com 18 x 3 x 3 cm de cada litologia para cada reagente. Os reagentes escolhidos foram: hipoclorito de sódio (NaClO), HCL (0,25%), HNO₃ (0,25%), H₂SO₄ (0,25%) e peróxido de hidrogénio (H₂O₂) a 30%. Adicionaram-se dois corpos-de-prova, com as mesmas dimensões, impermeabilizados em todas as faces com a mesma resina e submetidos ao H₂O₂ 30%. Os corpos-de-prova ficaram com ¼ da sua altura submersa nos reagentes, durante dois dias. Após os dois dias os corpos-de-prova eram colocados por 24h na estufa a 60°C. Depois eram retirados por 2h para um exsiccador até arrefecerem para a temperatura ambiente. Posto isto, eram feitas as pesagens, registro fotográfico das alterações visíveis nas superfícies e feita a medição de cor, sempre na mesma superfície e nas mesmas 4 posições sequenciais. Previamente a este ensaio experimental do autor, foram feitos outros dois ensaios usando os mesmos provetes de 18 x 3 x 3 cm, com o intuito de os correlacionar:

- Capilaridade – Seguiu a norma portuguesa EN1925:2000 – Métodos de ensaio para pedra natural – “Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade”, que por si só já explica o objetivo do ensaio. Além das dimensões dos provetes terem sido diferentes da norma, os tempos iniciais das medições também foram modificados. Os tempos utilizados para as medições foram: 2, 4, 6, 10, 15, 30, 60, 480 e 1440 minutos. Em termos de resultados apenas se retiraram os pesos para depois se calcular o coeficiente de absorção.

- Massas volúmicas e porosidades – Seguiu a norma portuguesa EN1936:2001 – “Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta”, que também explica o objetivo do ensaio. Os vários pesos e consequente cálculo das equações são os únicos resultados para este ensaio.

Após uma saída de campo à pedreira Filstone Natural, no Casal Farto, recolheram-se dois materiais específicos que aparecem associados ao calcário Filstone Blue, que é objeto de estudo na pesquisa de doutorado. Um dos materiais aparece disseminado no calcário Filstone Blue e tem uma cor escura, o qual se atribuiu o nome carvão. O outro material aparece sob a forma de camadas associadas ao calcário Filstone Blue e tem uma tonalidade cinza, o qual se atribuiu o nome matéria orgânica. Destes dois materiais e de cada um dos três calcários em estudo foram moídos cerca de 20g até à fração fina. Foram secados na estufa a 60°C por 24h. Depois foram colocados no exsiccador por 2h até arrefecerem para a temperatura ambiente. Posto isto, seleccionaram-se dois cadinhos para o material de tom cinza, para o carvão e para cada calcário. Fizeram-se as pesagens dos cadinhos, cadinhos mais amostra (10 g cada) e colocaram-se na mufla até atingir os 450°C durante 2h. Após as 2h desligou-se a mufla até a temperatura atingir os 60°C, inseriram-se os cadinhos com as amostras no exsiccador por 2h até arrefecerem para a temperatura ambiente. Procederam-se às pesagens e colocaram-se de novo os cadinhos mais amostra na mufla até atingir os 1000°C durante 1h. Posteriormente desligou-se a mufla até a temperatura atingir os 60°C, inseriram-se os cadinhos com as amostras no exsiccador por 2h até arrefecerem para a temperatura ambiente e procederam-se às pesagens.

Em paralelo, também com o pó moído até à fração fina de cada calcário, já seco na estufa a 60°C por 24h e posto no exsiccador por 2h até arrefecerem para a temperatura ambiente, seleccionaram-se dois copos para cada um deles. Pesaram-se os copos, copos mais amostra (em torno de 10g cada) e colocou-se 25 ml de H₂O₂ em cada copo a atuar durante 24h. Foram-se agitando os copos de forma a homogeneizar a amostra mais o H₂O₂. Após as 24h levaram-se os copos para a estufa a 60°C por 24h. Colocaram-se no exsiccador por 2h até arrefecerem para a temperatura ambiente. Pesaram-se os copos com a amostra e adicionaram-se mais 25 ml de H₂O₂ em cada copo a atuar durante 24h. Este processo repetiu-se durante 4 ciclos.

8 CONCLUSÕES

Considerando todos os objetivos específicos propostos para a realização deste pesquisa constata-se que todos eles foram atingidos.

O Crema Paraná é considerado um calcário de alta densidade, enquanto que o Filstone Beije MF e o Filstone Blue consoante o ensaio são considerados de alta densidade ou de média densidade.

No ensaio de compressão uniaxial, com base na classificação ISRM (1979), o Crema Paraná é considerado muito resistente, enquanto que os calcários de Portugal são considerados resistentes.

O calcário Crema Paraná possui a maior densidade aparente seca e saturada, a menor porosidade aparente e absorção de água, a maior resistência à compressão uniaxial, ao módulo de ruptura e à flexão em 4 pontos, para as três condições ensaiadas, as maiores velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova usados para os ensaios de compressão uniaxial, módulo de ruptura e flexão em 4 pontos, o mais alto coeficiente de dilatação térmica, no entanto apresenta a menor resistência ao impacto de corpo duro.

O calcário Filstone Beije MF apresenta a menor densidade aparente, tanto seca como saturada, a maior porosidade aparente e absorção de água, o mais baixo coeficiente de dilatação térmica, mas em geral tem resistências intermediárias à compressão uniaxial, módulo de ruptura e à flexão em 4 pontos, para as três condições ensaiadas, as intermediárias velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova usados para os ensaios de compressão uniaxial, módulo de ruptura, flexão em 4 pontos e intermediária resistência ao impacto de corpo duro.

Estes fatos mostram que a correlação entre os índices físicos e os resultados dos ensaios mecânicos nem sempre é direta e depende de fatores como heterogeneidades, granulação, cimento e compactação. Sendo o Crema Paraná o menos heterogêneo, com menores quantidades e dimensões de grãos, menor quantidade de cimento (microespático) e o mais compacto. Em relação aos três calcários, o Filstone Beije MF tem maior quantidade de grãos e heterogeneidade, quantidade de cimento (microespático com mosaico), compactação e dimensão de grãos intermediária.

Tendo em conta os valores de Casal Moura (2007), para os ensaios físico-mecânicos, conclui-se que apenas o Crema Paraná poderá ser aplicado como elemento estrutural e de revestimento (interiores e/ou exteriores), para as três condições ensaiadas. Por segurança, os calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue caso sejam aplicados deverão ser

impermeabilizados e/ou resinados, principalmente em lugares úmidos e com formação de gelo, dando especial atenção ao Filstone Blue. As placas destes dois calcários quando aplicadas em revestimento deverão ter espessuras superiores a 3 cm. Estes dois calcários podem ser aplicados em ambientes com grandes amplitudes térmicas, desde que sejam secos e/ou interiores e sem a formação de gelo.

No ensaio de impacto de corpo duro, como seria de esperar, os resultados obtidos no método experimental do autor são mais elevados comparativamente com os resultados seguindo a norma. Conclui-se que os três calcários poderão ser aplicados em pavimentos, pisos suspensos, escadas, parapeitos e peitoris (janelas e portas) que estejam sujeitas à queda de objetos. Para não se comprometer a segurança, a aplicação de placas do Crema Paraná deverá ter uma espessura superior a 3 cm (espessura convencional) e/ou ser aplicadas em zonas que não estejam sujeitas a quedas frequentes de objetos.

As velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas (V_p) destes calcários são elevadas para as três dimensões de corpos-de-prova medidos, comparando com valores de outros trabalhos. Assim, conclui-se que estes calcários têm um reduzido grau de alteração e boa integridade física, principalmente o Crema Paraná.

No percurso de 500 m, o calcário Filstone Blue possui o maior desgaste e o Filstone Beije MF o menor. No percurso de 1000 m, o calcário Filstone Beije MF é o que tem maior desgaste por abrasão Amsler e o Crema Paraná o menor. Esta inconsistência poderá dever-se à influência da porosidade e da quantidade de grãos não serem tão expressivos em superfície.

Os valores médios acumulados da microdureza *Knoop* são maiores para o Crema Paraná e menores para o Filstone Blue.

Estes dados permitem concluir que existe uma proporcionalidade inversa entre os valores de desgaste por abrasão Amsler no percurso de 1000 m com a microdureza *knoop*. Contudo, esta proporcionalidade nem sempre é evidente devido às características petrográficas como a porcentagem de cimento, que é maior e mais desenvolvida no Filstone Blue e menos no Crema Paraná.

Segundo os valores de Casal Moura (2007), Winkler (1975) e Quick (2002), os três calcários podem ser usados como rochas de revestimento em áreas de médio a alto tráfego, porém sugere-se a adição de resinas protetoras no uso dos calcários Filstone.

Os valores médios da resistência ao escorregamento na condição seca são maiores para o calcário Crema Paraná, seguindo-se o Filstone Beije MF e o Filstone Blue. Estes

valores têm uma proporcionalidade inversa com a rugosidade superficial que é menor no calcário Crema Paraná e maior no Filstone Blue. Na condição saturada o calcário Filstone Beije MF é o que apresenta maior resistência ao escorregamento, enquanto que o Filstone Blue possui a menor resistência. Não existe uma relação com a rugosidade, pois o Filstone Blue é o que tem maior quantidade de superfície rugosa e o Crema Paraná a menor quantidade. A inexistência de proporcionalidade direta entre o escorregamento e a rugosidade, tanto na condição seca como saturada, poderá dever-se aos corpos-de-prova utilizados para a medição do escorregamento estavam polidos enquanto que para a rugosidade estavam na condição natural.

Considerando os valores de UKSRG (2000) & DIN EN ISO 4288 (1996), o potencial de escorregamento para os três calcários em estudo, segundo os valores de escorregamento na condição seca é baixo, enquanto que na condição saturada passa a ser alto. Considerando os valores da rugosidade superficial, tanto na condição seca como saturada, o potencial de escorregamento para estes três calcários é moderado. Deste modo é aconselhada a sua aplicação como revestimento em pavimento e degraus, externos e internos, horizontais e de rampa, evitando lugares úmidos e com grandes taxas pluviométricas.

Para a porosidade e permeabilidade por nitrogênio e hélio e porosidade por intrusão de mercúrio também é Crema Paraná tem os valores mais baixos e o Filstone Beije MF os valores mais elevados dos três calcários.

Na tomografia computadorizada observa-se que os plugues com diâmetro de 2,54 cm têm menores resoluções que os plugues de 0,6 cm. Para os plugues de 0,6 cm o calcário Crema Paraná é o que apresenta menores porosidades e o Filstone Beije MF as maiores porcentagens de porosidade. Contudo, os valores deste ensaio são muito baixos e revelam que o tamanho médio dos poros é bastante inferior ao que é detectável pelas resoluções utilizadas.

Estes dados estão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário que tem a maior massa, maior volume de grãos, menor volume e diâmetro de poros. Em lâmina delgada, apresenta a menor porosidade, menor quantidade de grãos, mais matriz micrítica e granulação mais baixa, conferindo um maior imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar de ter a menor quantidade de cimento. Já o Filstone Beije MF é o calcário que tem a menor massa, menor volume de grãos, maior volume e diâmetro de poros. Petrograficamente possui a maior porosidade, maior quantidade de grãos e menor quantidade de matriz, conferindo um menor imbricamento e coesão dos seus constituintes, apesar da quantidade intermediária de cimento.

Através do MEV apenas se conseguiram visualizar poros até 0,06 μm e na MIP

calculou-se um diâmetro médio dos poros em torno de 0,1 e 0,2 μm para os calcários Filstone e 0,04 μm para o Crema Paraná. Apenas no ensaio de MIP para o Crema Paraná se entrou no início do campo do mesoporo (0,002-0,05 μm), nas restantes condições o diâmetro do poro situa-se no campo do macroporo ($>0,05 \mu\text{m}$).

Segundo Cheatsheet Rock Physics (2011), os três calcários satisfazem os valores recomendados para as propriedades elásticas exceto o módulo de Young. Assim, os três calcários podem ser utilizados como rochas ornamentais, tendo apenas atenção à sua aplicação em ambientes que possam gerar deformações longitudinais segundo tensões também elas longitudinais.

O Crema Paraná tem as velocidades de onda mais elevadas e o Filstone Beije MF as mais baixas. Segundo o módulo de poisson, Bulk, cisalhamento e Young, o Crema Paraná é o calcário com a menor taxa de deformação e o Filstone Beije MF com a maior. Estes resultados vão de acordo com o Crema Paraná ser o calcário mais denso e menos poroso e o Filstone Beije MF ser o menos denso e mais poroso dos três calcários em estudo.

Segundo Cheatsheet Rock Physics (2011), os três calcários satisfazem os valores recomendados para as propriedades elásticas exceto o módulo de Young. Assim, os três calcários podem ser utilizados como rochas ornamentais, tendo apenas atenção à sua aplicação em ambientes que possam gerar deformações longitudinais segundo tensões também elas longitudinais.

Segundo o ensaio de ataque químico, o Crema Paraná tem as maiores alterações em ambientes com ácido acético (CH_3COOH) 3% e o ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L; o Filstone Beije MF tem as maiores alterações em ambientes com água (H_2O), hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, hidróxido de potássio (KOH) 30 g/L e cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L; o Filstone Blue apresenta as maiores alterações em ambientes com ácido clorídrico (HCl) 3% e 18%, hidróxido de potássio (KOH) 100 g/L e ácido láctico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5%.

Para a variação de cor e resistência ao ataque químico dos reagentes, conclui-se que: o Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 100 g/L é o que tem maior poder de ataque, sendo o que gera maior “destruição” à placa; o Hidróxido de Potássio (KOH), tanto 100 g/L como 30 g/L, é o segundo reagente com maior poder de ataque; o Ácido Clorídrico (HCl) é o terceiro, sendo que a 18% o poder de ataque é obviamente maior; seguem-se o Hipoclorito de sódio (NaClO) 20 mg/L, o Cloreto de amônio (NH_4Cl) 100 g/L, o Ácido Acético (CH_3COOH) 3%, o Ácido Láctico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 5% e, como seria de esperar, a Água (H_2O) é o que tem o menor poder de ataque e conseqüente “destruição” das placas. Comparando com a percepção visual, os dados

estão consistentes, excepto para o Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) 100 g/L que parece ter um poder de ataque intermediário em relação aos restantes reagentes. Sendo muito importante o cuidado em proteger os calcários durante o manuseio de produtos do quotidiano contendo estes reagentes, por exemplo: limão, vinagre, água sanitária e produtos de limpeza diversos.

No ensaio de manchamento, o Crema Paraná possui as maiores alterações de cor para os reagentes limão, lã de aço com detergente e vinagre; o Filstone Beije MF tem as maiores alterações de cor para os reagentes café líquido, detergente (pH 5,5), vinho tinto, óleo de soja, suco de uva, coca-cola, desengordurante (veja) e água, o Filstone Blue apresenta as maiores alterações de cor para os reagentes óleo de sardinha enlatada, molho de tomate, desinfetante e urina. Tendo em conta a variação de brilho o Crema Paraná possui as maiores alterações para todos os reagentes com exceção do molho de tomate e da urina que conferem uma maior variação de brilho ao Filstone Beije MF. Através da variação de cor e da resistência ao ataque de manchamento dos reagentes, conclui-se que: óleo de soja é o que tem maior poder de ataque, gerando maior “destruição” à placa; coca cola é o segundo reagente com maior poder de ataque, óleo de sardinha enlatada é o terceiro; seguem-se o café líquido, vinho tinto, suco de uva, molho de tomate, urina, limão, desinfetante, detergente (pH 5,5), vinagre, desengordurante (Veja), lã de aço com detergente e, como esperado, a água tem o menor poder de ataque e consequente “destruição” das placas.

A variação de brilho através dos reagentes permite concluir que: limão é o que tem maior perda de brilho; vinagre é o segundo reagente com maior perda de brilho; suco de uva é o terceiro; seguem-se o vinho tinto, molho de tomate, coca cola, detergente (pH 5,5), urina, óleo de sardinha enlatada, café líquido, óleo de soja, desinfetante, lã de aço com detergente, água e desengordurante (Veja). Curiosamente, a água tem a segunda menor perda de brilho, podendo dever-se à sua composição ser mais forte que o desengordurante (Veja). Comparando com a percepção visual conclui-se que as substâncias mais gordurosas e escuras são as que afetam mais a coloração e os produtos de limpeza afetam menos. Contudo as substâncias mais ácidas, incluindo a maioria dos produtos de limpeza, afetam mais a alteração de brilho, que nem sempre é perceptível ao olho humano.

O calcário Crema Paraná é que perde menos massa para os ensaios de nevoeiro salino, cristalização de sais e extrator Soxhlet, sendo o Filstone Blue o que perde mais massa. Contudo, o Filstone Beije MF perde maior quantidade de massa para a H_2O e para o H_2SO_4 no extrator de Soxhlet. Estes fatos mostram uma correlação direta entre a perda de massa e fatores petrográficos como a granulação, porosidade e cimento. Sendo o Crema Paraná com

menores quantidades e dimensões de grãos, menos poroso e menor quantidade de cimento (microespático). Em relação aos três calcários, o Filstone Blue tem quantidade intermediária de grãos sendo os de maiores dimensões, porosidade intermediária e a maior quantidade de cimento (espático com mosaico).

A aplicação natural de cada um dos calcários em ambientes de exposição aos reagentes que são mais suscetíveis de causar alterações de cor e brilho deve ser evitada. Assim como se deve evitar a aplicação do calcário Filstone Blue em ambientes salinos ou com ácidos fortes como HCl, HNO₃ e sulfato de sódio, e do calcário Filstone Beije MF em ambientes úmidos ou com o ácido forte H₂SO₄. Deverá recorrer-se ao uso de impermeabilizantes a fim de evitar as reações que causam mudança de cor, perda de brilho e de masa, gerando patologias e perda da função estética.

Com a elaboração desta pesquisa deparou-se com a inexistência de normas com valores tabelados para calcários das diversas organizações de normalização internacionais. Sugere-se que seja feita uma compilação de vários trabalhos com calcários, o seu tratamento estatístico e tabelar valores comparativos, gerando dados para elaboração de normas técnicas sobre este tópico relevante.

Na tabela 33 estão sintetizadas as principais aplicações para cada um dos três calcários em estudo

Em suma, conclui-se que o Crema Paraná poderá ser aplicado na maioria dos ambientes sem restrições, com exceção do revestimento em pavimentos sujeitos a quedas frequentes de objetos, em que as placas aplicadas deverão ter uma espessura superior a 3 cm, e pavimentos sujeitos a médio/alto tráfego em condições úmidas e aplicações ornamentais diversas que estejam sujeitas a alterações através de ambientes concentrados ou por contato direto, em que se deverá recorrer a impermeabilizantes e resinas protetoras.

A aplicação sem proteção dos calcários Filstone Beije MF e Filstone Blue não é aconselhada para qualquer ambiente externo nas condições úmida e de formação de gelo. Para os restantes ambientes podem ser aplicados sem restrições no revestimento em pavimentos sujeitos a quedas frequentes de objetos e em ambientes sujeitos a grandes variações térmicas. A sua utilização com uma função estrutural, pavimentação sujeita a médio/alto tráfego e aplicações ornamentais diversas que estejam sujeitas a alterações através de ambientes concentrados ou por contato direto deverão ser aplicados impermeabilizantes e resinas protetoras. Em ambiente seco as placas destes calcários devem ter mais de 3 cm de espessura para serem aplicadas como revestimento. Para um ambiente úmido com uso interno as placas

destes materiais devem ser impermeabilizadas e resinadas e ter mais de 3 cm de espessura para serem aplicadas como revestimento. A aplicação como revestimento em ambiente interno em condições de formação de gelo do calcário Filstone Beije MF deve ser com recurso de impermeabilizantes e resinas protetoras e as placas devem ter mais de 3 cm de espessura, enquanto que para o Filstone Blue não é aconselhada a sua aplicação sem proteção.

Tabela 33 – Síntese das principais aplicações para os três calcários em estudo.

			Crema Paraná	Filstone Beije MF	Filstone Blue
Ambiente Seco	Interno	Estrutura	X	Y	Y
		Revestimento	X	Z	Z
		Pavimento (Impacto)	Z	X	X
	Externo	Estrutura	X	Y	Y
		Revestimento	X	Z	Z
		Pavimento (Impacto)	Z	X	X
Ambiente Úmido	Interno	Estrutura	X	Y	Y
		Revestimento	X	Y & Z	Y & Z
		Pavimento (Impacto)	Z	X	X
	Externo	Estrutura	X	NA	NA
		Revestimento	X	NA	NA
		Pavimento (Impacto)	Z	NA	NA
Gelo e Degelo	Interno	Estrutura	X	Y	Y
		Revestimento	X	Y & Z	NA
		Pavimento (Impacto)	Z	X	X
	Externo	Estrutura	X	NA	NA
		Revestimento	X	NA	NA
		Pavimento (Impacto)	Z	NA	NA
Variação Térmica			X	X	X
Pavimento médio/alto tráfego	Ambiente Seco		X	Y	Y
	Ambiente Úmido		Y	Y	Y
Alteração	Atmosferas Concentradas		Y	Y	Y
	Contato direto (bancadas e pavimentos)		Y	Y	Y

*X - sem restrições; Y - com recurso a impermeabilizantes e resinas; Z - placas com mais de 3 cm de espessura; NA – não aconselhado sem proteção.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ABIROCHAS. Balanço das Exportações de Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2017. **Informe 01/2018**, 16p. 2018.
- ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste*, 2., 1977, Campina Grande, **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, p.242-258. 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C568**: Standard Specification for Limestone Dimension Stone. EUA, 2p. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2845**: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. EUA, 7p. 2005.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12042**: Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 5p. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818-anexo H**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios - Determinação da resistência ao ataque químico. Rio de Janeiro, 8p. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818-anexo G**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios - Determinação da resistência ao manchamento. Rio de Janeiro, 8p. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 23p. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-1**: Rochas para revestimentos - Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 4p. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-2**: Rochas para revestimentos - Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 4p. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-3**: Rochas para revestimentos - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Rio de Janeiro, 4p. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-4**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência ao congelamento e degelo. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-5**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-6**: Rochas para revestimentos - Determinação do módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos). Rio de Janeiro, 5p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-7**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos. Rio de Janeiro, 5p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-8**: Rochas para revestimentos - Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro, 4p. 2015.

AZERÊDO, A. C. Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). **Comunicações Geológicas**, t. 94, p.29-51. 2007.

AZERÊDO, A. C. Geometry and facies dynamics of Middle Jurassic carbonate ramp sandbodies, WestCentral Portugal. *In*: Wright, V. P. & Burchete, T. P. (Editors), **Geological Society Special Publication** 149, p.281-314. 1998.

AZERÊDO, A. C. **Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica) - análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia**. Tese de Doutorado (não publicada), Dep. de Geologia, Faculdade de Ciências, Univ. Lisboa, + 36 ests. (2 vols), 366p. 1993.

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. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 225p. 2009.

BERTANI, R. T.; COSTA, I.G.; MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, *In*: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Petrobras, Rio de Janeiro, p.291-310. 1990.

BOLONINI, T. M. **Estudo das aplicações das variedades de um quartzo-sienito com hiperstênio, como rochas ornamentais, com auxílio da caracterização tecnológica e das análises de cor e imagem**. 2015. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 133p. 2015.

BOWLES, O.; COONS, A. T. Dimension Stone. *In*: Kiessling, O. E. (Editor), **Minerals Yearbook 1932-33**. Washington: **U. S. Bureau of Mines**, United States Government Printing Office, p.577-593. 1933.

BOWLES, O. **The Stone Industries**, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company. 1939.

BROWN, G. O. Henry Darcy and the making of a Law. **Water resources research**, v. 38, nº 7, 12p. 2002.

CARVALHO, J. M. F. Rochas Ornamentais Portuguesas – Cluster da Pedra Natural. *In: Encontros de História da Arte da Antiguidade*. 2012.

CARVALHO, J. M. F. **Tectónica e caracterização da fraturação do Maciço Calcário Estremenho, Bacia Lusitaniana**. Contributo para a prospeção de rochas ornamentais e ordenamento da atividade extrativa. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 443p. 2013.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Rochas ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: breve caracterização dos recursos, dos centros de produção e delimitação preliminar de áreas potenciais. **Boletim de Minas**, 47 (1), 22p. 2012.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 45, p1306–1319. 2008.

CARVALHO, J. M. F. *at al.* **Maciço Calcário Estremenho, Caracterização da situação de referência (relatório interno)**, 42p. 2011.

CASAL MOURA, A. **Mármore e calcários ornamentais de Portugal**. Instituto Nacional de Engenharia - INETI, Tecnologia e Inovação, 383p. 2007.

CASSAB, R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CHATTERJEE, K. K. **Uses of Industrial Minerals, Rocks and Freshwater**. **Nova Science Publishers, Inc.** New York, 598p. 2009.

CHEATSHEET ROCK PHYSICS. 2011: <https://agilescientific.com/blog/2011/3/7/rock-physics-cheatsheet.html>. Acesso em 13 Agosto de 2018.

CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, 54, nº2, p.207-250. 1970.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE. Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms, Supplement No. 2 to CIE publication No 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, 1996, Rio Claro, **Anais**. Rio Claro, UNESP, p.107-110. 1996.

COSTA, A. P. L. *et al.* Rochas ornamentais: alterabilidade dos gnaisses enderbíticos no ensaio de lixiviação contínua através do extrator Soxhlet. **HOLOS**, 26, Vol. 3, 10p. 2010.

CREMONINI, O. A. & KARNER, G. D. Soerguimento termal e erosão na Bacia Potiguar submersa e seu relacionamento com a evolução da faixa equatorial brasileira. *In: Simpósio de*

Geologia do Nordeste, XVI, 1995, Recife, **Anais**. Recife. SGB/NE, V1, p.152-156. 1995

CREMONINI, O. A. **Caracterização estrutural e evolução da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1993.

DANTAS, E. P. **Gravimetria e sensoriamento remoto: Uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1998.

DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris, 1856.
Desenvolvimento da técnica para especificação de cores e a nova nomenclatura para classificação de rochas ornamentais com base nas cores medidas. São Paulo, UNESP, **Geociências**, vol. 25, nº 4, p.403-415. 2006.

DIREÇÃO GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. DGEG. **Comércio Internacional da indústria Extrativa**, dados de 2017. Lisboa. 2018.

DIREÇÃO GERAL DE GEOLOGIA E ENERGIA. DGEG. **Boletim de Minas**, volume 41, Nº2. Lisboa, 2006.

DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In*: Ham, W. E. (Ed.). Classification of carbonate rocks, A Symposium. **American Association of Petroleum Geologists**, p.108-121. 1962.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 12370**: Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallization. British, 8p. 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 14205**: Natural stone test methods – Determination of Knoop hardness. British, 12p. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN 14231**: Natural stone test methods – Determination of the slip resistance by means of the pendulum tester. British, 16p. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN DIN EN ISO 11664-4**: Colorimetry Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space (ISSO 11664-4:2008). German, 12p. 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN DIN EN ISO 4288**: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. German, 17p. 1996.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN NP EN 14147**: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao envelhecimento por nevoeiro salino. Portugal, 14p. 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN NP EN 1925**: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação do coeficiente de absorção de água por

capilaridade. Portugal, 11p. 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN NP EN 1936**: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Portugal, 13p. 2001.

FARIAS, P. R. C. *et al.* Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. **Roteiro de Excursão**, 43p. 1990.

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

FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifteamento da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p.196-207. 1987.

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

GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2008.

GREGG, S. J. & SING, K. S. W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. 2. Auflage, Academic Press, London, 303p. 1982.

HACKSPACHER P. C. *et al.* A Falha de Afonso Bezerra como evidência de significativo tectonismo frágil NW-SE, na Bacia Potiguar emersa - RN. **Boletim do Departamento de Geologia/UFRN**. Natal, v. 10, p.33-44. 1985.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Slips and trips: Summary guidance for the food processing industry, **HSE Information Sheet**, Food Sheet No. 6, Sudbury, United Kingdom, September. 1996.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **NIST ISO 15901-1** recommended practice guide: Porosity and surface area measurements for solid materials, Peter Klobes, Klaus Meyer and Ronald G. Munro. 2006

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. ISRM. Suggested methods for the determining the uniaxial compressive strength and deformability of rocks materials. **International Journal of Rock Mechanics**, v. 16, Abstract, Nova York. 1979.

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, p.456-464. 1970.

KULLBERG, J. C. **Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitânica**. Tese de Doutoramento (Não publicada), Univ. Nova de Lisboa, Portugal, 361p. 2000.

KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In* **Geologia de Portugal no contexto da Ibéria** (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C.

Kullberg, Eds.). Univ. Évora, p.317-368. 2006.

KULLBERG, J. C. *et al.* A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In:* Dias, R. *et al.* (Editors). **Geologia de Portugal**, Vol. II - Geologia Meso-cenozóica de Portugal. Livraria Escolar Editora. Lisboa, 156p. 2013.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. LNEG. **Carta Geológica de Portugal na escala 1:1000000**, 3ªed, LNEG, Lisboa. 2010.

MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.

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

MONTANI, C. **XXVI Report marble and stones in the world 2014**. 2015 Aldus Casa di Edizioni in Carrara. 2015

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 88p. 2002.

NAVARRO, F. C. Granitos ornamentais: Análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. *In:* **Actas II Congresso Uruguaio de Geologia**, Uruguai, p.103-107. 1998.

NETO, O. C. P. *et al.* V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, Rio de Janeiro, p.357-369. 2007.

NEVES, C. A. O. **Análise regional do trinômio geração-migração-acumulação de hidrocarbonetos na seqüência continental Eocretácea da Bacia Potiguar emersa, NE do Brasil**. 1987. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 1987.

POROUS MATERIALS INC. **PMI Gas Permeameter. User's Manual**. Version 6.0.61 p. 1996.

PROJETO ÁGUA SUBTERRÂNEA DO NORDESTE DO BRASIL. PROASNE. Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú. 2006. SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós- Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, Rio Grande do Norte, p.35-51. 2006.

QUICK, G. W. **Selective guide to the specification of dimension stone**. Discovering Stone. V.1, p.8-21. 2002.

RIBEIRO, A. *et al.* Introduction à la Géologie Générale du Portugal. **Serv. Geol. Portugal**, Lisboa, 114p. 1979.

RIBEIRO, A. *et al.* **Tectonics of the Lusitanian Basin**. Final Report. ICTE/GG/GeoFCUL,

Proj. MILUPOBAS, Contract No. JOU2-CT94-0348, Lisboa. 1996.

ROCHA, R. B. & SOARES, A. F. **Algumas reflexões sobre a sedimentação jurássica na orla meso-cenozóica ocidental de Portugal. Memórias e Notícias da Universidade de Coimbra**, 97, p.133-142. 1984.

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, Lisboa-Portugal, p.78-86. 1997.

RODRIGUES, E. DE P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. Rochas de Qualidade**, nº 127, São Paulo, p80-84. 1996.

SILVA, F. D. O. **Avaliação da cor e taxa de exalação de radônio em rochas graníticas entre ciclos de envelhecimento acelerado**. 2016. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 159p. 2016.

SOARES, U. M.; ROSSET, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, nº55, 2003.

SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, 1982, Salvador, **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p.181-183. 1982.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

UK SLIP RESISTANCE GROUP. **Measurement of Floor Slip Resistance**, Guidelines recommended by the UK Slip Resistance Group Issue 2, Rapra Technology Ltd., Shrewsbury, UK, June. 2000.

VASCONCELOS, E. P., LIMA NETO, F. F.; ROOS, S. Unidades de correlação da formação Açú-Bacia Potiguar. *In*.: Congresso Brasileiro de Geologia., 36, 1990, Natal, **Anais**. Natal: SBG/Núcleo Nordeste, p.227-240. 1990.

WATKINSON, M. **Triassic to Middle Jurassic sequences from the Lusitanian Basin Portugal, and their equivalents in other North Atlantic margin basins**. Unpublished PhD Thesis, Open University, Milton Keynes, United Kingdom, 390p. 1989.

WILSON, R. C. L. Mesozoic development of the Lusitanian basin, Portugal. **Rev. Soc. Geol. España** 1 (3-4), Madrid, p.393-407. 1988.

WILSON, R. C. L. *et al.* **Seismic stratigraphy and tectonic history of the Iberian Abyssal Plain**. Proc. ODP, Sc. Results, College Station, 149, p.617-633. 1996.

WINKLER, E. M. **Stone**: properties, durability in man's environment. Second edition. Indiana – U.S.A. 1975.

X-RITE. **A guide to understanding color communication**. X-Rite, Incorporated. Disponível

em: http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf. Acesso em: 10 de setembro de 2017.