



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

SUELY ANDRADE DA SILVA

**ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO
DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES
TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS.**

FORTALEZA

2015

SUELY ANDRADE DA SILVA

**ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO
DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES
TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS.**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de Concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof^o Dr. José de Araújo Nogueira Neto

Co-orientador: Prof^o Dr. Evenildo Bezerra de Melo

Co-orientador (Exterior): Prof^o. Dr. Joaquim A.R.S.Simão

FORTALEZA

2015

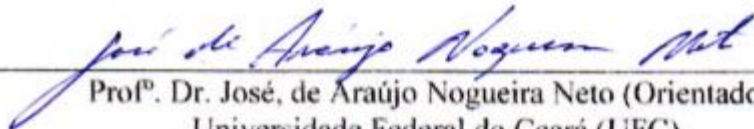
SUELY ANDRADE DA SILVA


**ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO
DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES
TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS.**

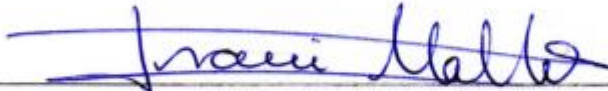
Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos minerais.


Aprovada em: 03/08/2015.

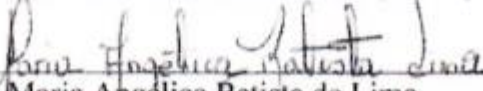
BANCA EXAMINADORA


Prof.^o. Dr. José, de Araújo Nogueira Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof.^o. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)


Prof.^o. Dra. Irani Clezar Mattos
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof.^o. Dra. Risale Neves Almeida
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)


Dra. Maria Angelica Batista de Lima
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM-PE)

Dedico a Deus e a espiritualidade, a meus pais Edvaldo Bandeira (*in memoriam*) e Ana Maria, irmãos e irmãs, que sem eles não teria conseguido chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado e pela bolsa no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) – Processo BEX 4869/ 13-3, sem a qual não teria sido possível realizar esta pesquisa.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) instituição que propiciou a realização dessa etapa acadêmica na minha vida.

Ao Centro de Estudos Geológicos, do Departamento de Ciência da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa, que viabilizou a execução de doutoramento em convênio firmado com Universidade Federal do Ceará (UFC) aqui representada pelos Prof^{os} Drs (as) José Carlos Kullberg, Manuela Simões, Martim Chichorro, Carlos Galhano, Lígia Castro, Maria das Graças, Fatima Silva, Eduarda, Hermínia e D. Rosa.

Ao Instituto Superior Técnico (Centro de Petrologia e Geoquímica-CEPGIST, que viabilizou a execução dos ensaios aqui representada pelos Prof^{os} Drs. (as) Carlos Figueiredo, Maurício, Manoel Francisco, Maria Orquídea, Amélia Dionísio e Dulce Simão. O meu profundo agradecimento pelo aprendizado e convivência durante a minha estadia em Portugal.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Laboratório de Rochas Ornamentais da Pós-Graduação de Engenharia Mineral – PPGMinas, representada pelos Prof^{os} Drs. (as) Felisbela, Júlio César, José Rolim, Márcio, Kênia e Drs. Valdir manso, Gorki, Marcelo Reis (Geologia) e aos funcionários, Voleide Barros, Edna Maria e aos colegas Farah Diba, Suely Machado, Renata Barreto, Ely Brasil. Pelo aprendizado e convívio.

Ao Orientador e amigo Dr. José de Araújo Nogueira Neto (Zeca), a oportunidade de tê-lo como orientador, pela paciência e apoio durante todo esse percurso.

Ao co-orientador Dr. Evenildo Bezerra de Melo pelo incentivo, amizade e discussões no decorrer de toda a investigação.

Ao Dr. Joaquim António dos Reis Silva Simão pela co-orientação, sugestões, incentivo e pela acolhida na Universidade Nova de Lisboa - Portugal, que viabilizou a execução de estágio de doutoramento.

Agradeço de forma muito especial ao Dr. Eldemar de Albuquerque Menor, pelas valiosas revisões, que paciente e sabiamente me conduziu, limitando meus excessos, e investigando para o melhor.

Á Prof^ª. Dra. Zenaide C. G. Silva, pela disponibilidade e privilégio da amizade, durante o estágio de doutorado sanduíche desenvolvido na Universidade Nova de Lisboa (FCT), em Portugal.

A todos os professores do DEGEO, sendo impossível listar todos que de uma forma direta ou indiretamente acrescentaram em conhecimentos para a elaboração da tese, em especial aos Drs. George Satander, Clóvis Vaz, Christiano Magini, César Veríssimo, Itabaraci Cavalcante e as Dras. Sônia Vasconcelos, Iranir Clazer e Diolande Freire.

Aos Professores visitantes que trouxeram importantes colaborações no processo de aprendizagem.

Aos funcionários do DEGEO, João Benício Júnior, Antônio Leal, Valmir, Verônica, Márcia, Mara e Gilvânia Brasil (Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação).

Aos amigos de pós-graduação Glória, Leiliane, Marta, Jefferson, Elenilza e Tereza Neri, grande incentivadora e amiga nota mil.

Como não poderia deixar ser, os agradecimentos ao Grande Arquiteto do Universo e a espiritualidade, por despertar em mim força e perseverança, impedindo-me de esmorecer e muito menos de desistir.

A todos o meu muitíssimo OBRIGADA!!!

"Mudar o passado é impossível, mas
é possível iniciar e mudar o futuro".

Chico Xavier

RESUMO

A composição mineralógica do calcário Bege Bahia (BB) foi caracterizada por análise petrográfica, DRX, análises químicas sobre rocha-total (RT), e MEV sobre elementos figurados da textura lítica. Os resultados demonstraram que este tipo de calcete é dolomítico (dolomita > 10% em RT), atingindo mais de 50% em suas feições grumosas. A matriz é essencialmente calcítica, enquanto quartzo (< 5% RT) e palygorskita são os minerais acessórios mais frequentes. Os mecanismos de alteração do BB, como revestimento de edificações, foram investigados a partir da perda de brilho, utilizando-se placas lustradas *in natura* em bancada, para comparação com observações *in situ* em área litorânea metropolitana (Recife-PE), sob clima tropical úmido. Ensaio de alterabilidade acelerada envolvendo atmosferas com saturação salina (NaCl) e em SO₂, ataques por soluções ácidas (HCl, HNO₃, H₂SO₄), água de chuva e água do mar, foram conduzidos segundo normas ABNT ou experimentalmente, envolvendo corpos de prova lustrados *in natura*. Considerando-se crítica uma intensidade de brilho ≤ 40 , seja para os corpos de prova quanto em aplicações *in situ*, torna-se possível uma confiável predição a partir dos dados de bancada. Na maior parte dos casos, este nível crítico é atingido em torno do terceiro ciclo dos ensaios, correspondendo a 10 anos em condições de alteração *in situ*. Os mecanismos mais atuantes foram a câmara de gás com saturação em SO₂ e a água do mar, sendo o brilho crítico atingido entre 2 a 2,5 ciclos em bancada. O conjunto dos resultados não confirmou se manchamentos férricos e crostas negras são de origem litogênica, enquanto que “crostas brancas” são constituídas de gipsita (CaSO₄.H₂O), por reação de H₂SO₄ com a superfície calcítica do BB. Assim, confirma-se a inadequação de aplicação deste produto em revestimentos externos, particularmente em presença de *spray* marinho ou situações metropolitanas, onde a atmosfera apresenta-se impregnada com SO₂.

Palavras-chave: Alteração acelerada. Calcário Bege Bahia. Predição de alteração *in situ*. Calcete.

ABSTRACT

The mineralogical composition of the Beige Bahia (BB) limestone was characterized by petrographic analysis, XRD, total-rock (TR) chemical analysis, and SEM on figurative elements of lytic texture. The results demonstrated that this type of calcrete is dolomitic (dolomite > 10% in TR), reaching over 50% in its lumpy features. The matrix is primarily calcite, whereas quartz (< 5% TR) and palygorskite are the most common accessory minerals. The changing mechanisms of the BB, as a building covering, were investigated from the loss of brightness, using in natura polished boards in bench, for comparison with observations carried out in situ in a metropolitan coastal area (Recife-PE), under humid tropical climate. Tests of accelerated changeability involving atmospheres with saline saturation (NaCl) and in SO₂, attacks by acid solutions (HCl, HNO₃, H₂SO₄), rain water and sea water, were conducted according to the Brazilian Association of Technical Standards/ABNT or experimentally, involving in natura polished test specimen. By considering as critical a brightness intensity ≤ 40 , whether for test specimen or for applications carried out in situ, a reliable prediction is possible based on bench data. In most cases, this critical level is reached around the third testing cycle, corresponding to ten years in in situ changing conditions. The most active mechanisms were the gas chamber with SO₂ saturation, and the sea water; and the critical brightness was reached between 2 and 2.5 cycles in bench. The set of results did not confirm if the ferric staining and black crusts are of lithogenic origin, whereas “white crusts” are made of gypsum (CaSO₄.H₂O), by the reaction of H₂SO₄ with the calcite surface of the BB. Therefore, the inadequacy of the application of this product on external coverings is confirmed, particularly in the presence of sea spray or in metropolitan situations, where the atmosphere is impregnated with SO₂.

Keywords: Accelerated change. Beige Bahia limestone. Prediction of in situ change. Calcrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Imagem de satélite em diversas escalas da localização da área de estudo (Edificações da Região Litorânea do Recife-Pernambuco)...	26
Figura 2.1	Esquema de classificação unificada de travertinos.....	43
Figura 2.2	Diagrama de P-T e regimes de diagênese.....	44
Figura 3.1	Panorâmica da área de estudo, região litorânea do Recife-Pernambuco. (Local de onde foi retirada os corpo-de-prova e realizada a leitura de brilho)	48
Figura 3.2	Gráfico da aplicação do Calcário Bege Bahia nas fachadas das edificações da região litorânea da cidade do Recife, Praia de Boa Viagem, Pernambuco.....	49
Figura 3.3	Placas (40x40 cm) do Calcário Bege Bahia: (A) <i>in natura</i> (recém ilustradas) e (B) Alterada, material usado para revestimento.....	49
Figura 3.4	Fluxograma da pesquisa.....	50
Figura 3.5	(A) Espectrofotômetro Color-Guide BYK (PPGMinas/UFPE, Recife, Pernambuco) E (B) Espectrofotômetro MINOLTA, modelo CM-508i 99 (CEPGIST)/ IST, Lisboa, Portugal.....	55
Figura 3.6	Câmara ASCOTT S120T.....	57
Figura 3.7	Fluxograma da metodologia do ensaio por envelhecimento por spray salino.....	59
Figura 3.8	Esquema do Extrator Soxhlet (Laboratório de Rochas Industriais e Sedimentologia/FCT). Adaptado de Simão (2003)	60
Figura 3.9	Fluxograma da metodologia do Ensaio Soxhlet.....	61
Figura 3.10	Realização do ensaio de lixiviação contínua do Calcário Bege Bahia no Laboratório de Rochas Industriais e Sedimentologia (FCT)/ Universidade Nova de Lisboa.....	62
Figura 3.11	Câmara de Climatização FITOCLIMA 300 EDTU.....	63
Figura 3.12	Fluxograma da metodologia dos ensaios de envelhecimento em câmara climática com atmosfera contendo 10 ppm de SO ₂	64
Figura 3.13	Fluxograma Metodológica do ensaio com substâncias acidificadas.	67
Figura 3.14	Difratômetro RX PANALYTICAL X PERT PRO utilizado na pesquisa.....	68

Figura 3.15	Microscópico eletrônico de varredura (MEV/EDS) HITACHI TM-300 (A) e EDS SWIFT ED3000 (B), utilizados nesta pesquisa.....	70
Figura 5.1	Registros de velocidades dos ventos na RMR (2005 a 2014).....	79
Figura 5.2	Precipitação pluviométrica na RMR, de 2005 a 2014.....	80
Figura 5.3	Registros de temperaturas máximas e mínimas na RMR (2005 a 2014).....	82
Figura 5.4	Registros da radiação solar na RMR (2005 a 2014).....	85
Figura 5.5	Registros da umidade relativa do ar na RMR (2005 a 2014).....	86
Figura 6.1	Mapa da área de afloramentos do Calcário Bege Bahia em Ourolândia-BA.....	88
Figura 6.2	Escarpa formada por Calcários Bege Bahia, município de Ourolândia-BA.....	90
Figura 6.3	Relação espacial entre as formações Salitre e Caatinga.....	91
Figura 6.4	Calcário Salitre ao canto inferior da foto, contornando por fragmentos do calcário Caatinga, perto da cidade de Ourolândia...	91
Figura 6.5	Cavidades vazias por dissolução cártica do calcário Bege Bahia.....	92
Figura 6.6	Fotomicrografia: textura microbrechada em concrete da Formação Caatinga, a norte de Ourolândia.....	92
Figura 6.7	Nódulos de silex em calcrete da Formação Caatinga.....	93
Figura 6.8	Evolução de um perfil de calcrete.....	94
Figura 7.1	Manchamentos em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife	96
Figura 7.2	Eflorescências em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	97
Figura 7.3	Arenização (desintegração granular) revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	98
Figura 7.4	Alveolização em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	99
Figura 7.5	Lascagem em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	99
Figura 7.6	Fissuras em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	100

Figura 7.7	Fratura em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	101
Figura 7.8	Presença de manchas ou nódoas acastanhadas, marrons ou avermelhadas no revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	101
Figura 7.9	Crostras negras em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife.....	102
Figura 7.10	Variação do intemperismo e o clima.....	103
Figura 8.1	Variações das médias de leituras (n = 10) da densidade aparente, densidade aparente saturada, porosidade e absorção d'água de corpos de prova de BB <i>in natura</i> , confeccionados a partir de uma mesma placa lustrada deste produto e utilizados nesta pesquisa.....	106
Figura 8.2 (ABC)	A, B, C. DRX de pó de BB oriundo de placas deste produto aplicadas como revestimento há 5 anos (A), 10 anos (B) e 15 anos (C)	108
Figura 8.3	DRX de resíduos sólidos de fundo do Soxhlet (hidrólise de fragmentos de BB)	110
Figura 8.4	DRX de resíduos sólidos de fundo do Soxhlet (hidrólise sobre placas de BB).....	110
Figura 8.5	DRX de resíduos sólidos resultantes do ensaio com Spray Salino sobre placa de BB.....	111
Figura 8.6	DRX de resíduos sólidos resultantes do ensaio em câmara de SO ₂ sobre placa de BB.....	111
Figura 8.7	DRX de resíduos sólidos de fundo de Soxhlet a partir de ataques ácidos sobre corpos de prova de BB.....	112
Figura 8.8	Crosta pelicular branca formada sobre a placa de BB após reação com H ₂ SO ₄	113
Figura 8.9(A1)	Aspecto em MEV da crosta branca sobre superfície de placa de BB (8.0) - Análise composicional pontual desta superfície.....	113
Figura 8.9 (A2)	Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular	114
Figura 8.10(A1)	Aspecto grumoso de BB tipo escuro, e ponto de análise composicional.....	114

Figura 8.10 (A2)	Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular.....	115
Figura 8.11 (A1)	Aspecto grumoso (cinza claro) de BB tipo escuro, com ponto de análise composicional.....	116
Figura 8.11 (A2)	Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular (rever a figura 11 (A)	116
Figura 8.12 (A1)	Aspecto grumoso (cinza claro) de BB tipo escuro, com ponto de análise composicional.....	117
Figura 8.12 (A2)	Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular (rever a figura 12)	117
Figura 8.13 (A1)	Visualização de matriz de BB, com marcação de ponto de espectro analítico.....	118
Figura 8.13 (A2)	Espectro analítico pontual de matriz de BB (tipo escuro).....	118
Figura 8.14 (A1)	Visualização de área analítica de BB tipo escuro e seu aspecto petrografico grumoso.....	119
Figura 8.14 (A2)	Espectro analítico de área em BB (tipo escuro) da Figura 8.14 (A)	119
Figura 8.15 (B)	Espectro analítico de área em BB (tipo escuro) da figura 8.15 (A)..	120
Figura 8.16	Evolução da lixiviação de cátions por hidrólise de fragmentos de BB em Soxhlet, em tempo limitado de ciclos.....	121
Figura 8.17	Evolução da lixiviação de cátions por hidrólise de placa de BB em Soxhlet, durante um número limitado de ciclos e de tempo por ciclo.....	122
Figura 8.18	Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio com spray salino.....	123
Figura 8.19	Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio em câmara enriquecida em SO ₂	124
Figura 8.20	Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio com diferentes tipos de soluções ácidas e solução salina (água do mar).....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações para uso dos mármore, calcários e travertinos.....	47
Tabela 3.1	Demonstrativo dos laboratórios onde foram realizados os ensaios tecnológicos, Alterabilidade/Aceleradas e as análises complementares.....	52
Tabela 3.2	Ensaio tecnológicos realizados nesta pesquisa com base nas Normas: ABNT – NBR, ASTM, DIN, AFANOR, NP e EN.....	53
Tabela 3.3	Ensaio de caracterização tecnológica: ABNT/NBR 15845/2010....	54
Tabela 3.4	Demonstrativo dos ensaios de alteração acelerada realizados na pesquisa.....	56
Tabela 3.5	Soluções ácidas (ABNT/NBR 13818/2007- Anexo H) e outras soluções (naturais) utilizáveis em ensaios de alterabilidade de materiais pétreos.....	66
Tabela 6.1	Características físico-mecânicas do Calcário Bege Bahia.....	95
Tabela 7.1	Simulações de condições ambientais degradantes para rochas carbonáticas em geral.....	104
Tabela 8.1	Análises químicas (eflorescência RX) de BB <i>in natura</i> e intemperizado (placa com mais de 15 anos de aplicação) e suas respectivas composições RT por estequiometria.....	107

LISTA DE PRANCHAS

- Prancha 4.1 Fotomicrografia 01 – Seção SAS 01 exibindo densa matriz micrítica composta por calcita. Luz Ortoscópica (LO); Fotomicrografia 02 – Seção SAS 02 exhibe um “veio” de calcita espática e ao centro da seção de cor azul um grão de quartzo circundado por calcita, e todo o conjunto suportado pela matriz micrítica (LO); Fotomicrografia 03 – Seção SAS 03- (5 anos) com porosidade do tipo cavernosa e preenchimento parcial de calcita em lamelas similares a drusas (LO); Fotomicrografia 04 – Seção SAS 03- (5 anos): feições similares a elementos aloquímicos oncolíticos (LO); Fonte: Elaborado pela autora..... 41
- Prancha 4.2 Fotomicrografia 05 – Seção SAS 03- (5 anos) exibindo feições similares a elementos aloquímicos: intraclastos/litoclastos (LO); Fotomicrografia 06 – Seção SAS 01 apresentando grãos de quartzo com molduras de calcita microespática, cujas feições são típicas em calcretes/tufos (LO); Fotomicrografia 07 – Seção SAS 01 apresentando relíquia de filamentos vegetais parcialmente envoltos por calcita microespática na porção central mais escurecida da seção, representando feições encontradas em calcretes/tufos (LO); Fotomicrografia 08 – Seção SAS 02 exibindo “filões/veios” de calcita espática similares a canais. Luz Natural Polarizada (LNP). 42

LISTA DE ABREVIACÃO E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standard Institution
BB	Bege Bahia
BB escuro	Bege Bahia Escuro
BB claro	Bege Bahia Claro
CEN	European Committee for Standardization (TC 246 – Natural Stone Paving Units and Kerbs; TC 128 – Roof covering for discontinuous laying and products for wall cladding)
CEE	Comunidade Econômica Européia
CIE	Commissin Internationale d' Eclairage - Comissão Internacional de Iluminação
CIELAB	Espaço da cor que segue as normas da CIE e tem coordenadas cartesianas L^* , a^* , b^* ou coordenadas polares C^* ,
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
λ	Comprimento de onda
DIN	Deutche Institut fur Normung
DRX	Difração de Raio-X
EDS	Energia dispersiva
F	Frequência
FCT	Faculdade de Ciência e Tecnologia
IST	Instituto Superior Técnico
IPT	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas
K	Absorvência para cada comprimento de onda λ
Kg/m^3	Massa especifica aparente
L^*	Luminosidade
L^* , a^* e b^*	Coordenadas no Sistema CIELab
MEV	Microscópio eletrônico de Varredura
MCDs	Diferença média de cor do padrão
MPa	Mega pascal
m/s	Metros/segundo

M_o	Massa do corpo-de-prova seco, em gramas
Nícois X	Nícois Cruzados
Nícois //	Nícois paralelos
PPGMinas	Programa de Pós Graduação de Engenharia de Minas
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
Q	Fator de qualidade
% var	Percentagem de variação relativamente ao valor inicial
μm	Micrômetros
(A)	Angstrom ($10^{-10}\text{m} = 10^{-8}\text{ cm}$)
μM	Micrometro (10^{-6} m)
$\text{m}\mu$	milimicron ($10^{-3}\text{ micro} = 10^{-9}\text{ m}$)
nm	Nanômetro (10^{-9} m)
η	Porosidade
ρ_{asc}	Massa específica aparente no estado seco
ρ_{sat}	Massa específica aparente no estado saturado
M_{sec}	Massa da amostra no estado seco
M_{sat}	Massa da amostra no estado saturado
M_{sub}	Massa da amostra submersa
<	É menor que
>	É maior que
\leq	É menor ou igual que
\geq	É maior ou igual que
ΔM	Perda de massa, em percentagem
RT	Rocha Total
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	22
INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Considerações Iniciais.....	22
1.2 Motivação /Justificativa.....	24
1.3 Localização da área de estudo.....	24
1.3.1 Características geo-ambientais.....	26
1.4 Objetivos.....	27
1.4.1 Objetivos Gerais.....	27
1.4.2 Objetivos Específicos.....	27
CAPÍTULO II.....	29
REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	29
2.1 Estado da Arte.....	29
2.2 Alteração/alterabilidade de rochas carbonáticas ornamentais.....	30
2.2.1 Efeitos da alteração.....	30
2.2.1.1 Perda de resistência mecânica.....	30
2.2.1.2 Modificação dos parâmetros de deformabilidade.....	30
2.2.2 Agentes de alteração.....	31
2.3 Processos de alteração das rochas carbonáticas ornamentais.....	31
2.3.1 Fatores intrínsecos.....	31
2.3.1.1 Composição mineral.....	31
2.3.1.2 Porosidade.....	31
2.3.2 Fatores extrínsecos.....	32
2.3.2.1 Condições ambientais.....	32
2.4 Rochas sedimentares carbonáticas.....	37
2.4.1 Calcrete.....	38
2.4.1.1 Classificação de Calcrete.....	39
2.4.2 Travertinos.....	40
2.4.2.1 Classificações de Travertinos.....	41
2.4.2.1.1 Critério Geoquímico.....	41
2.4.2.2.2 Critério petrotrama (fabric)	42

2.4.2.2.3 Critério morfológico.....	42
2.4.3 Processos de formação: sedimentação e diagênese.....	43
2.4.3.1 Compactação.....	44
2.4.3.2 Cimentação.....	45
2.4.3.3 Dissolução.....	45
2.4.3.4 Recristalização	45
2.4.3.5 Dolomitização.....	46
2.4.4 Rochas carbonáticas e seus usos ornamentais.....	46
CAPÍTULO III.....	48
MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Materiais e área de localização.....	48
3.2 Métodos de pesquisa.....	50
3.3 Descrição dos ensaios tecnológicos realizados.....	53
3.3.1 Confecção e análise de seções delgadas (Petrografia): ABNT/NBR 15845/2010 Anexo A (Normativo).....	54
3.3.2 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água: ABNT/NBR 15845/2010 – Anexo B (Normativo).....	54
3.3.3 Intensidade de Brilho.....	55
3.4 Descrição dos ensaios de envelhecimento acelerado.....	56
3.4.1 Determinação da resistência ao envelhecimento por spray salino NP 14147/2007.....	57
3.4.2 Ensaio com o Extrator de Soxhlet.....	60
3.4.3 Ensaio em câmara com atmosfera saturada com dióxido de enxofre (SO ₂): EN 13919/2002.....	63
3.4.4 Ensaio com soluções acidificadas: ABNT/NBR 13818/2007 – Anexo H.....	65
3.5 Análises complementares.....	68
3.5.1 Difractometria de Raios-X (DRX).....	68
3.5.2 Fluxograma de cálculos por estequiometria visando a composição mineralógica RT.....	69
3.5.3 Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS).....	69
3.5.3 Aferição de pH.....	70
3.5.4 Aferição de condutividade elétrica.....	70

3.5.5 Análises de Absorção atômica (chama)	70
CAPÍTULO IV.....	72
ASPECTOS PETROGRAFICOS.....	72
4.1 Generalidades.....	72
CAPÍTULO V.....	76
CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA ORLA LITORÂNEA DO RECIFE....	76
5.1 Mecanismos atmosféricos atuantes.....	77
5.2 Parâmetros atmosféricos condicionantes na orla litorânea do Recife.....	78
5.2.1 Influência da velocidade dos ventos.....	78
5.2.2 Pluviometria.....	80
5.2.3 Temperatura.....	81
5.2.4 Radiação solar e umidade relativa do ar.....	84
CAPÍTULO VI.....	88
CONTEXTO GEOLÓGICO DO CALCÁRIO BEGE BAHIA.....	88
6.1 Generalidades.....	88
6.2 Geologia Regional e Local.....	89
6.3 Formação de um perfil calcrete.....	93
6.4 Caracterização comercial.....	95
CAPÍTULO VII.....	96
ASPECTOS DESCRITIVOS DE ALTERAÇÃO/ALTERABILIDADE DAS EDIFICAÇÕES (ORLA DE RECIFE)	96
7.1 Formas de deterioração de rochas carbonáticas.....	96
7.1.1 Formação de manchas.....	96
7.1.2 Eflorescências.....	97
7.1.3 Arenização.....	97
7.1.4 Alveolização.....	98
7.1.5 Lascagem.....	99
7.1.6 Fissuras.....	100
7.1.7 Fraturas.....	100

7.1.8 Oxidação.....	101
7.1.9 Depósitos superficiais ou sujeiras.....	102
7.1.9.1 Crostas negras.....	102
7.2 Causas de degradação das rochas.....	102
CAPÍTULO VIII.....	105
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E ALTERAÇÃO/ALTERABILIDADE DO BEGE BAHIA.....	105
8.1 Densidade aparente, porosidade e absorção aparente.....	105
8.2 Análises químicas por fluorescência de RX/ estequiometria (BB <i>in natura</i>).....	107
8.3 Análises por difração de RX (DRX)	108
8.3.1 DRX de resíduos sólidos sedimentados em Soxhlet.....	110
8.4 Observações em microscopia eletrônica por varredura – MEV.....	114
8.5 Análises químicas de soluções residuais em Soxhlet	119
8.5.1 Soluções a partir de fragmentos de BB após hidrólise.....	119
8.6 Intensidade de Brilho.....	121
8.6.1 Intensidade de brilho do BB versus Spray Salino.....	122
8.6.2 Intensidade de brilho do BB versus SO ₂	123
8.6.3 Intensidade de brilho do BB versus ataques por soluções acidificadas e solução NaCl.....	123
8.7 Intensidade de brilho de placas de revestimentos de BB <i>in situ</i>	125
CAPÍTULO IX.....	127
CONCLUSÃO.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A.....	143

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A utilização de rochas é conhecida desde tempos remotos da história da Humanidade, inclusive de formas mais aprimoradas em grandes construções, prevalecendo nestas utilizações as funções estruturais ou de revestimento, na busca da agregação de valor estético e de durabilidade.

Desta forma, muitas edificações vêm resistindo à ação destruidora do tempo, perpetuando a história da Humanidade. Nos últimos séculos, mais precisamente após o crescimento de atividades industriais, os processos de intemperismo se acentuaram e vêm deteriorando nossas heranças arquitetônicas, culturais e históricas, assim como o valor econômico destes registros. Medidas estão sendo empreendidas globalmente para a revitalização destas construções, o que motivou a otimização dos procedimentos de análises das deteriorações, o controle de seus processos, além do desenvolvimento de sistemas de monitoramento. Nas últimas décadas as pesquisas sobre o intemperismo de produtos líticos atingiram um nível sem precedentes. No entanto, dificuldades persistem no caso de rochas carbonáticas, justamente um dos produtos mais utilizados em grandes edificações históricas.

Na região litorânea do Recife – Pernambuco, Brasil, mais de 40% das edificações possuem revestimentos externos constituídos de calcários, dentre os quais os conhecidos comercialmente como “Bege Bahia”. Algumas destas edificações, ainda que pese o entendimento de que materiais de revestimento lítico tendem naturalmente a se degradar ao longo do tempo, sabe-se que este processo pode ser acelerado sob condições climáticas agressivas, o que constitui objeto de estudo desse trabalho, ao longo dos capítulos que seguem.

Moraes (1999) salienta que rochas ornamentais, aplicadas como revestimento de interiores ou exteriores, devem possuir requisitos que assegurem um desempenho de qualidade. Neste caso, espera-se: alta resistência ao intemperismo e aos agentes químicos agressivos em revestimentos externos; baixa absorção de líquidos, para evitar manchamentos e deteriorações; baixa dilatação térmica para garantir a estabilidade do revestimento; baixa condutividade térmica para promover conforto térmico; alta resistência à flexão para suportar a ação dos ventos; boa resistência ao desgaste quando aplicadas em piso e durabilidade de materiais da construção, todos estes aspectos à luz

da Norma de Desempenho da Construção Civil ABNT - NBR 15.575, em vigor desde 8 de julho de 2015. Na norma, “Durabilidade” está expresso, qualitativamente, as condições em que a edificação e seus sistemas mantenham o desempenho requerido durante a vida útil, devendo ainda ser quantificada, e avaliada “em nos”.

Sabe-se também que um ambiente litorâneo, devido à sua proximidade com o oceano, é caracterizado por uma atmosfera salina capaz de produzir danos severos de corrosão nos mais diversos materiais, acelerando a deterioração de revestimentos pétreos e suas funções estéticas.

De acordo com Lima (2006), a presença de cloretos é o principal fator de corrosividade em ambientes costeiros, cujo *spray* é conduzido pelos ventos para o interior do continente. O Cl⁻ e demais elementos têm um efeito sinérgico na degradação das rochas. Em situações urbanas costeiras, além de cloretos, acrescentam-se outros contaminantes como SO₂, CO₂ e materiais particulados liberados pela combustão de derivados de petróleo, produzidos por veículos circulantes. O SO₂ deixa como vestígio típicas crostas negras, observadas em placas pétreas de revestimento de rochas carbonáticas na região litorânea do Recife. Além disto, também incidem poeiras de desgaste dos pisos das ruas, produzidos pela abrasão dos pneus de veículos. Sabe-se que a reação entre estes contaminantes é danosa para as rochas de um modo geral, podendo ocorrer, em alguns casos, o colapso total do revestimento. Em vista disso, a importância do conhecimento sobre os mecanismos de atuação destes componentes atmosféricos, como forma de planejamento e prevenção e/ou revitalização desses revestimentos, torna-se imperativa.

Neste contexto, realizou-se uma revisão bibliográfica com a finalidade de fundamentar a discussão acerca de problemas relacionados com as condições climáticas agressivas (*spray* salinos) particularmente sobre as rochas carbonáticas de revestimentos conhecidas como BB. Em seguida, diversas análises de caracterização tecnológica e de alterabilidade acelerada foram realizadas, com intuito de simular situações naturais, por meio de ensaios laboratoriais, que permitissem antecipar as possíveis consequências sobre este tipo de rocha. Dessa forma, agregaram-se aspectos de resistência, durabilidade e estética na ocasião das opções.

1.2 Motivação/Justificativas

A motivação para esta pesquisa decorre da importância do uso de rochas carbonáticas para fins ornamentais ou de revestimentos, na construção civil e na Arquitetura. Até o século passado, este material pétreo foi principalmente aplicado em edificações históricas de grande porte, não somente pela sua abundância, mas também por seus atributos estéticos. Contudo, desde então, essas matérias-primas tomaram uma acentuada diversificação em suas aplicações e um crescimento acentuado de emprego na construção civil.

Os produtos resultantes do intemperismo são, via de regra, de caráter irreversível. Assim, a adoção das medidas preventivas adequadas, em face da carência de informações técnicas relativas à alteração das rochas carbonáticas, assim como em relação às suas condições de aplicação, se fazem necessárias.

Na extensa costa marítima da cidade do Recife são observados muitos exemplos de intemperismo sobre rochas carbonáticas de revestimento empregadas em edificações, em decorrência do *spray* salino, cujos efeitos resultam em redução de brilho, variação de permeabilidade, aumento de porosidade e perda de massa.

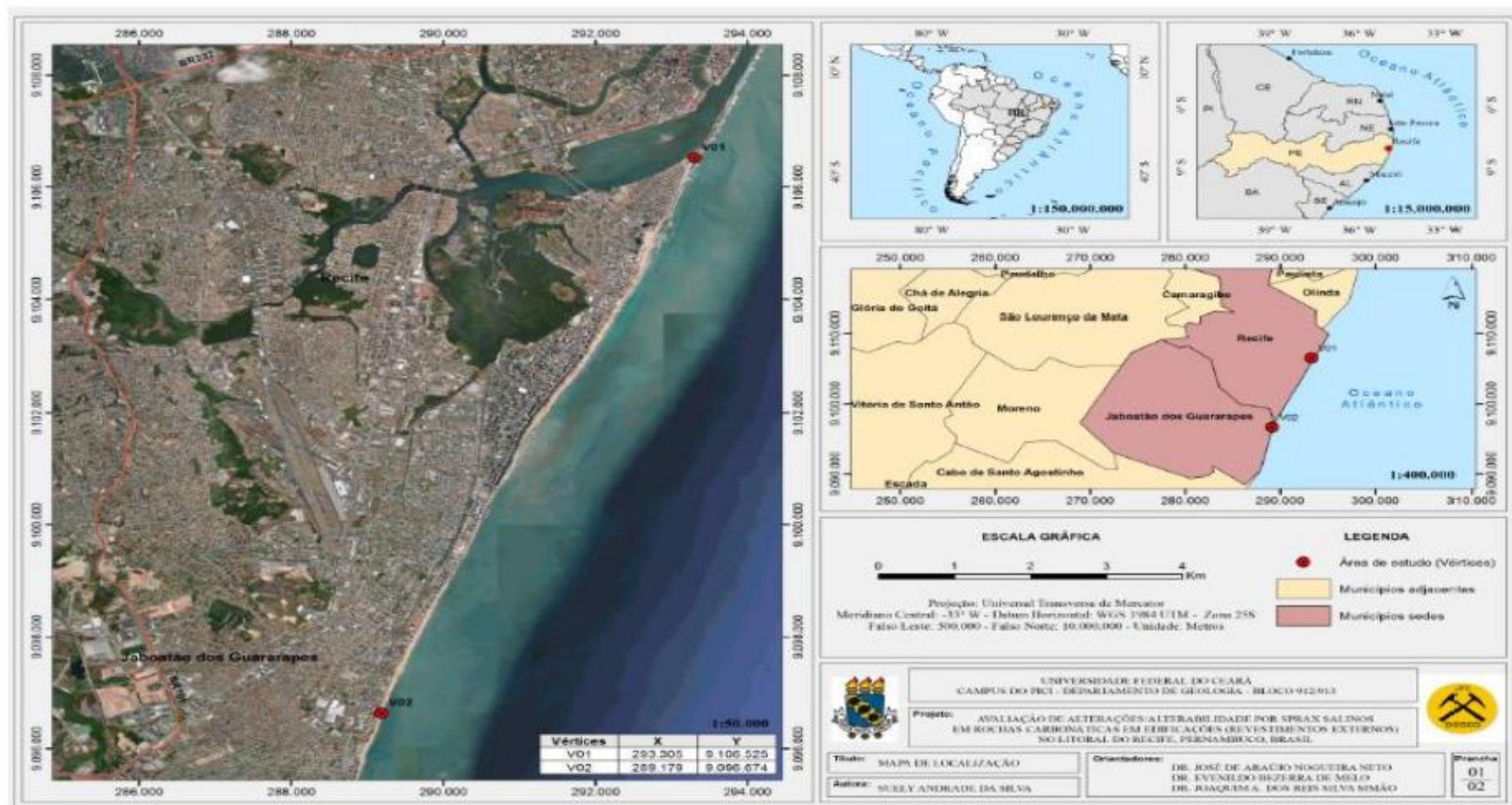
Dados meteorológicos de 2005-2014 da região litorânea do Recife demonstraram que a umidade relativa média mensal varia entre 66-88%, a temperatura média mensal entre 20-33°C, e as médias mensais de insolação de 250 horas são persistentes ao longo de todos os meses do ano (Laboratório de Meteorologia de PE - SEOMA/INMET; dados inclusos nos apêndices). Tais dados explicitam condições favoráveis a um mais intenso desenvolvimento de processos de alteração de rochas carbonáticas, expostas em revestimentos de edificações.

Desta forma, a presente tese tem como objetivo contribuir para o cumprimento normativo da norma NBR 15.575/2013, visando discernir sobre sua melhor empregabilidade, relacionada com a resistência e durabilidade de produtos líticos face a diferentes aplicações, especificamente a de rochas carbonáticas (Bege Bahia), prevenindo-se problemas futuros para este tipo de produto.

1.3 Localização da área de estudo

A área de estudo situa-se na região metropolitana do Recife-PE, Brasil, banhada pelo Oceano Atlântico. Este ambiente litorâneo abriga uma população de mais de 100 mil habitantes em seus bairros de Boa Viagem e Brasília Teimosa. Sua extensão, de 6 km, está compreendida entre as coordenadas geográficas de 8° 05' 02" e 8° 08' 06" S de latitude e longitude entre 32° 52' 02" W e 34° 53' 47" W (**Figura 1.1**).

Figura 1.1 Imagens de satélite em diversas escalas da localização da área de estudo (Edificações na região Litorânea do Recife, Pernambuco).



Fonte: Elaborado pela autora.

1.3.1 Características geo-ambientais

As características geo-ambientais que compõem a área estudada são diversificadas, seja sob aspectos geológicos e geomorfológicos, ou aqueles relacionados com a vegetação. Além da heterogeneidade do meio físico, outra característica observada é sua vulnerabilidade frente às modificações antrópicas que ocorrem no interior do perímetro em pesquisa.

Do ponto de vista geológico os sedimentos que integram a área de estudo são terraços marinhos holocênicos (LIMA & SILVA, 2000) que se distribuem ao longo do litoral, ocupando os bairros de Brasília Teimosa e parte de Boa viagem, sendo limitados pelo canal de Setúbal e pela linha de costa. A disposição destes sedimentos está intimamente relacionada a processos marinhos, que aí se instalaram ao longo de milhares de anos.

A área apresenta uma grande variedade morfológica que inclui desde baixios de marés, que são unidades formadas por sedimentos flúvio-marinhos, a terraços marinhos holocênicos descontínuos e paralelos à linha da costa. Os depósitos de praia atuais correspondem a uma unidade composta por cordões de dunas, pós-praia, estirâncio e ante-praia, onde a ação marinha configura suas morfologias de acordo com a demanda de energia, ora mais branda (estação seca), ora mais energética (estação chuvosa com ventos de maior intensidade), modificando sazonalmente os perfis de praia.

Da vegetação original que recobria as áreas restam poucos vestígios, em função do desmatamento que se fez necessário para a construção de casas de veraneio e, em seguida, nas últimas décadas, para uma urbanização intensiva verticalizante. Da primitiva mata-atlântica que recobria boa parte da área, não são mais encontrados vestígios atualmente. A vegetação de mangue foi quase inteiramente devastada. Seus resquícios resumem-se a uma restrita zona de proteção ambiental (ZEPA), criada em 1996 pelo decreto municipal Nº 16.176/96, correspondendo localmente ao Parque dos Manguezais, hoje sob custódia da Marinha do Brasil.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos gerais

Caracterizar e determinar a deterioração do Bege Bahia por *spray* salino, tipo de rocha carbonática predominante, utilizada como revestimento externo na área de pesquisa. São também objetivos gerais: a avaliação dos fatores composicionais e texturais incidentes na alterabilidade destas rochas, os processos de alteração nas placas de revestimento externo de edificações urbanas locais, e as características das alterações destas placas sob interferência de *spray* salino e substâncias nocivas presentes na atmosfera urbana, por meio de ensaios de alteração estática acelerada em laboratório. Objetivou-se também contribuir, através do estudo pormenorizado dos calcários “Bege-Bahia”, para seu melhor aproveitamento na indústria da construção civil, tendo em vista sua boa aceitação nos mercados nacional e internacional.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos realizados nesta pesquisa, envolveram as placas de revestimento do Bege Bahia:

Identificar os processos de alteração que ocorreram no decorrer da vida útil deste produto, devido ao *spray* salino, após mais de duas décadas de sua aplicação;

Determinar as propriedades relacionadas com as características petrográficas (mineralogia, textura, natureza da matriz, arcabouço e cimento) e com a composição química, que influenciaram na alteração deste produto;

Estabelecer as características relacionadas com o sistema poroso e a dinâmica da circulação dos fluídos, que regem os processos de absorção e evaporação de fluidos deste produto quando exposto ao meio ambiente litorâneo;

Avaliar as alterações decorrentes dos processos de cristalização salina e exposição a substâncias poluentes presentes em regiões urbanas e litorâneas, por meio de ensaios de lixiviação estática, através da imersão em líquidos reativos, em laboratório;

Estabelecer uma metodologia para o desenvolvimento de ensaios laboratoriais que possam auxiliar na previsão do comportamento desses materiais em situações de uso, através de parâmetros que possibilitem nortear as escolhas de usuários, sobretudo empreendedores da construção civil e arquitetos.

Interpretar e estabelecer o significado dos resultados apresentados em relação às alterações das rochas carbonáticas (calcário Bege Bahia) da Formação Caatinga, levando-se em consideração ambientes costeiros sob *spray* marinho.

Assim, especificamente, colaborar para a modernização do segmento de “rochas ornamentais”, através do desenvolvimento de estudos que possibilitem uma melhor identificação do comportamento petrofísico destes produtos, oferecendo, portanto, condições de valorização para seu padrão de qualidade;

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estado da Arte

Ao longo do tempo as rochas sofrem diferentes processos de alteração que lhes afetam as características físicas, mecânicas e até mesmo as composições químicas e mineralógicas. A durabilidade de um material pétreo não é eterna, mesmo para litotipos resistentes às condições climáticas mais adversas. As rochas são sistemas químicos constituídos por várias fases, as quais, no momento da sua formação, estão em perfeito equilíbrio entre si e com o meio ambiente (AIRES-BARROS, 1991b, 2001). Se as condições termodinâmicas mudam, uma rocha tenderá a se adaptar às novas condições de pressão e temperatura, tendo início um novo processo de “alteração”, que nada mais é do que sua adaptação às novas condições ambientais.

Para maior confiabilidade dos materiais pétreos que vão revestir pisos e fachadas, ou outros fins (estatuária, lápides, móveis, etc.), é indispensável conhecer sua Geologia, seus comportamentos mecânico e químico, através de ensaios tecnológicos e de alterabilidade.

Segundo Aires-Barros (1991b, 2001), alteração e alterabilidade são duas feições que, embora afetem um mesmo material, agem de formas diferentes. Alteração refere-se aos fenômenos em escala de tempo geológico (milhão de anos), e alterabilidade aos que transcorrem em escala humana (dezenas ou centenas de anos). Os principais tipos de alteração que afetam os materiais pétreos são de origem deutérica (igualmente chamada de primária ou hipogênica) e de origem meteórica, também denominada de secundária ou supergênica. A alteração primária é a que se desenvolve preferencialmente durante os estágios de formação da rocha, mais especificamente durante a consolidação magmática ou em processos paralelos daí resultantes. A alteração secundária é a resultante da rocha quando analisada dentro do contexto litosfera /atmosfera/hidrosfera. A meteorização não passa, deste modo, de um conjunto de processos que tratam da passagem de uma rocha formada em condições endógenas, de modo a provocar a sua adaptação às novas condições exógenas (AIRES-BARROS, 2001).

Os processos de alteração secundária ou meteórica envolvem todo um conjunto de transformações sofridas pela rocha durante o período em que está exposta às intempéries, quer no revestimento de edifícios quer em outras aplicações. Os estudos de alterabilidade são assim necessários para, dentro da medida do possível, tentar prever estas patologias e preconizar quais tipos de soluções devem ser dadas para evitá-las ou, pelo menos, minimizá-las.

Simão (2003) considera que a alteração de uma rocha está relacionada com a sua transformação, decomposição e degradação, através de agentes físicos e químicos, que a transformam noutro produto, em equilíbrio com o meio ambiente. E conclui que a alterabilidade e a degradação delas, enquanto produtos utilizados em construções e revestimentos de edifícios, não dependem apenas de fatores relacionados com aspectos climáticos e ambientais, mas também com a arquitetura de construções, além de aspectos humanos e biológicos.

2.2 Alteração/alterabilidade de rochas carbonáticas ornamentais

A avaliação da alteração e da alterabilidade constitui um dos mais complexos problemas da Engenharia Civil. A alteração de rochas ocorre, num intervalo geológico de tempo, ou seja: centenas a milhares de anos. Todavia, alterações significativas também podem, em alguns casos, ocorrer num intervalo muito menor, isto é, de alguns anos ou mesmos meses. Este fato foi observado em fachadas de edificações na região litorânea do Recife-PE, Brasil.

2.2.1 Efeitos da alteração

Vários são os fatores relacionados aos efeitos de alteração sobre materiais rochosos utilizados em obras da construção civil, destacando-se:

2.2.1.1 Perda de resistência mecânica

A perda de resistência mecânica de materiais rochosos ocasiona a redução do fator de segurança da obra. Além dos casos clássicos, em que a rocha perde resistência à compressão ou à tração, pode ocorrer sua desagregação, provocada pela alteração ao longo de fissuras. Apenas excepcionalmente a alteração pode aumentar a resistência da rocha como, por exemplo, no caso da limonitização secundária.

2.2.1.2 Modificação dos parâmetros de deformabilidade

A deformabilidade de uma rocha se dá pela deformação de grãos cristalinos em sua estrutura e também pela deformação do sistema constituído pelas ligações entre os grãos

(SHOA & MAE, 1966). A natureza entre estes grãos minerais e as ligações entre eles são modificadas conforme a alteração da rocha. Assim a sua deformabilidade pode ser significativamente afetada pela alteração.

2.2.2 Agentes da alteração

Os principais agentes de alteração das rochas são de ordem climática (JENNY, 1941). Ambiente climático é o conjunto de fatores que caracteriza o estado médio da atmosfera, da hidrosfera e da biosfera do meio ambiente. Neste contexto, os fatores principais são: temperatura, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica, potencial hidrogeniônico e potencial de oxido-redução, destacando-se ainda a importância das condições topográficas.

2.3 Processos de alteração das rochas carbonáticas ornamentais

2.3.1 Fatores intrínsecos

2.3.1.1 Composição mineral

O conhecimento da composição mineral da rocha é decisivo no entendimento dos padrões de alteração que aparentemente não estão relacionados com condições ambientais singenéticas (AIRES-BARROS, 2001). A substituição de calcita por dolomita ou vice-versa é importante considerando as mudanças na porosidade que estes processos de substituição ocasionam. A depleção em rochas carbonáticas pode estar na origem da formação de óxidos/hidróxidos de Fe, ou de carbonatos de Fe não-singenéticos, ou a partir de sulfetos de Fe (pirita), em consequência de fatores climáticos ou da ação de agentes externos.

2.3.1.2 Porosidade

A porosidade de uma rocha consiste na razão entre o volume de vazios (V_p) em relação ao seu volume total (V_t), na amostragem representativa (AIRES-BARROS, 2001). Esta porosidade resulta de cavidades internas na rocha que, segundo a suas formas e origem, são classificadas como poros e fissuras. Os poros são cavidades de forma irregular, aproximadamente equidimensionais. Podem ser meros interstícios entre cristais ou grupos de cristais. Estas cavidades, comunicando-se entre si, desempenham papel relevante na

permeabilidade da rocha. Suas origens podem advir de espaços provocados por dissolução parcial do mosaico cristalino ou por fluidos ascendentes, hipogênicos, ou ainda por águas meteóricas. Portanto, habitualmente, rochas carbonáticas apresentam porosidade secundária.

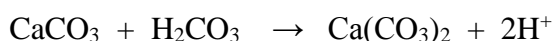
As fissuras são descontinuidades com duas dimensões desenvolvidas, que ocupam espaços inter ou intragranulares, resultantes de transferências de energia no interior da rocha, em razão de variações térmicas ambientais (dilatações e contrações) ou do desenvolvimento de tensões internas (causas estruturais).

2.3.2 Fatores extrínsecos

2.3.2.1 Condições ambientais

Os processos de alteração incluem agentes como a ação química atmosférica, chuvas ácidas e a ação mecânica da água, onde quer que as rochas se encontrem expostas ambientalmente, resultando em alterações, formação de novos produtos ou desintegração da rocha em fragmentos (FRASCÁ, 2003). A poluição do ar resulta de uma transferência de qualidade nociva de materiais sintéticos e naturais na atmosfera, como consequência direta ou indireta da atividade humana. Elevadas concentrações de poluentes advindos de atividade industriais, dos processos de combustão de derivados do petróleo, partículas sólidas em suspensão, gotículas de óleo expelidas pelos motores, altas concentrações de CO, CO₂, SO₂, são algumas das causas da baixa qualidade do ar. Estes poluentes provêm de várias fontes, algumas emitidas diretamente a partir de veículos automotores e atividades industriais, outras formadas indiretamente por meio de reações fotoquímicas no ar (BECERRA-BECERRA, 2009).

As rochas carbonáticas são essencialmente compostas por (CaCO₃) e/ou dolomita [CaMg(CO₃)₂]. Usualmente, estes minerais são dissolvidos por chuvas ácidas, ricas em ácido carbônico (H₂CO₃) ou em ácido sulfúrico (H₂SO₄), nelas diluídos (KRAUSKOPF & BIRD, 1995):

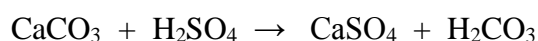


Sob forma de bicarbonatos, sais fortemente solúveis em meios líquidos, os íons Ca²⁺ e Mg²⁺ são lixiviados, causando uma depleção superficial da rocha, denominada de erosão cárstica. O sistema cristalino das calcitas é mais vulnerável ao ataque de soluções ácidas que o da dolomita, razão pela qual a “mobilidade” do Ca⁺⁺ é maior que a do Mg⁺⁺ (MASON, 1974).

A partir da segunda metade do século XIX, quando começou a era da industrialização, e especialmente depois da II Guerra Mundial, os mecanismos de deterioração das rochas carbonáticas têm aumentado de forma muito acelerada em razão de significativo crescimento de emissões em SO₂ para a atmosfera (GAURY & BANDYOPADHYAY, 1999; DEL MONTE, 2006), gerando chuvas mais ácidas (com H₂SO₄ diluído). Isto resultou do incremento do uso de combustíveis fósseis como o carvão e os derivados do petróleo, que liberam H₂S e NO₂ para a atmosfera. Como resultado das reações de SO₂ e NO₂, os monumentos e edificações, construídos em rochas carbonáticas que sobreviveram por milênios expostos ao meio ambiente, têm experimentado processos intensos de deterioração nos últimos 100 anos. Porém, o CO₂ só pode reagir com as rochas quando está dissolvido na água pois, reagindo com H₂O forma H₂CO₃, que é o ácido carbônico. Então, quando o material pétreo está ao abrigo de chuva e da umidade, o CO₂ exerce um efeito mínimo do ponto de vista da alteração.

Atmosferas poluídas ocasionam dois efeitos distintos nas rochas ornamentais. O primeiro é o enegrecimento da superfície, que pode se transformar com o tempo em crostas negras, normalmente por acumulação de micro-organismos em colônias ou por acumulação de particulados de origem antrópica (ex. fuligem). O segundo efeito é a corrosão superficial da rocha por desagregação ou arenização (DEL MONTE, 2006).

Crostas brancas são basicamente constituídas por sulfato de cálcio:



Crostas modernas podem apresentar nitro-calcita (Ca (NO₃)₂.4 H₂O) associada ao sulfato de cálcio, cuja formação é imputada à presença de nitrogênio reativo na atmosfera (DEL MONTE, *op. cit.*).

A degradação de rochas ornamentais envolve extensa literatura, com abordagens particularizadas, ao longo das últimas décadas. Dentre os trabalhos voltados para a alteração acelerada, estática ou contínua, podem ser citados: Aires-Barros (1999), Figueiredo *et al.* (2001), Mesquita (2002), Rivas *et al.* (2003), Cardell *et al.* (2003); Frascá (2003), Simão (2003), Becerra-Becerra & Lima (2009). De uma forma geral, as pesquisas seguem três importantes rotas de investigação:

i) indiretas, relacionadas com características petrofísicas das rochas, para avaliar sua durabilidade, levando-se em consideração fatores intrínsecos destas frente a intervenções

antrópicas. Estes métodos, sob certos aspectos, ainda se encontram em estágios de caráter experimental;

ii) comparativas, que correlacionam efeitos e processos de alterações entre materiais pétreos distintos, cujas características possam apresentar similaridades ou não, de modo a minimizar alterações e projetar futuras aplicações para estes produtos;

iii) experimentais, relacionadas a simulações de processos de alteração em meio ambiente, através de análises laboratoriais. Em síntese, estes são ensaios de envelhecimento artificial acelerado, estático ou contínuo, por meio de ataques químicos.

Ensaio de alteração acelerada funciona como apoio aos diagnósticos de durabilidade de materiais pétreos, avaliando seus desempenhos quando empregados como revestimento em edificações. Neste sentido, Aires-Bairros (1991a, 1991b) realizou testes de percolação forçada em rochas em circuito fechado, com acompanhamento de análises químicas sistemáticas dos líquidos de percolação, para previsão das respectivas alterabilidades. Aires-Barros (1972, 1991) realizou ainda ensaios com extrator de Soxhlet simulando situações que ocorrem na Natureza em presença de águas pluviais aquecidas (60 °C) em atmosfera impregnada de umidade (próxima da saturação); zona de flutuação do nível hidrostático, periódica e alternadamente emersa e imersa; zona de depósito, de acumulação de grande parte dos produtos; percolação na rocha e lixiviação da mesma; ciclo hidrológico (precipitação, infiltração, drenagem, acumulação e evaporação); ciclo geoquímico, dando origem a produtos eluviais (minerais de neoformação das rochas no extrator).

Figueiredo *et al.* (2001) determinaram um índice de alterabilidade para o granito Rosa Iracema, baseado em ensaios cíclicos constituídos por um período de 10 minutos de insolação, seguido de arrefecimento/imersão em água por 5 minutos. Os ensaios foram executados utilizando-se água do mar e água deionizada, evidenciando ao final o papel destrutivo das sucessivas ações alternadas de secagem e molhagem. Os controles analíticos foram, entre outros: refletância, variação do peso, composição química e pH da água de imersão. O índice de alterabilidade (K), calculado com base nas perdas de peso e lixiviação química, indicou, ao final dos ensaios, a sequência:

$$K_{\text{água do mar}} > K_{\text{água deionizada}} > K_{\text{seco}}$$

Mesquita (2002) avaliou a alterabilidade dos granitos Branco Ceará, através de ensaios de lixiviação contínua com extrator Soxhlet e através de resistência a ataques químicos. As quatro variedades deste granito foram atacadas por soluções de ácido clorídrico e ácido cítrico. Nos ensaios de lixiviação contínua foram tomados como base os resultados dos índices físicos que mostraram deteriorações em todas as amostras estudadas sendo, no entanto, o Granito Clássico aquele que sofreu maior degradação. Por fim, concluiu que o comportamento das rochas estudadas foi controlado diretamente pela conjugação dos seus aspectos composicionais, texturais e estruturais.

Rivas *et al.* (2003) estudaram o comportamento de cinco granitos do NW da Espanha sob exposição em câmara de névoa salina e atmosfera controlada. Foram utilizadas como soluções o cloreto de sódio e a água do mar, resultando em diferentes resultados de alteração. Em ambos os testes, os íons mais abundantemente encontrados foram Cl^- e Na^+ . Obviamente nas amostras ensaiadas com água do mar outros íons estavam presentes, modificando a solubilidade do NaCl e, por conseguinte, sua mobilidade e efeitos deteriorantes.

Em mapas obtidos com SEMEDAX (Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Analyses X-Ray), as análises de sais solúveis revelaram níveis mais altos dos íons Cl^- e Na^+ em maior profundidade para as amostras expostas à água do mar e em menor profundidade para aquelas expostas à solução de NaCl. Isto se deveu à diminuição da solubilidade do NaCl na presença de outros íons, reduzindo a mobilidade do cloro e do sódio e, conseqüentemente, dificultando o acesso dos mesmos de volta à superfície, o que explica o aumento inicial de peso nas amostras. Estes autores verificaram, também, que as amostras expostas ao NaCl apresentaram preferencialmente alteração por desagregação granular, enquanto as expostas à água do mar apresentaram desagregação granular vinculada à formação de pequenas lascas ou destacamentos, semelhantes aos observados em ambientes naturais de zonas costeiras (RIVAS, 2003).

Cardell *et al.* (2003) também realizaram testes de envelhecimento artificial com névoa salina (água do mar) procurando simular os efeitos produzidos em granitos e rochas sedimentares sob condições ambientais costeiras. A análise microestrutural e o estudo de seções delgadas revelaram que os destacamentos de massa foram causados exclusivamente por processos físicos de cristalização e dissolução de sais. Esses sais se cristalizaram em fissuras pré-existentes exercendo pressões maiores do que a resistência do material lítico, provocando o surgimento de novas fissuras e aumento na porosidade. Por fim, constataram que a

susceptibilidade dessas amostras de granitos à alteração foi determinada por três fatores: a porosidade, a dimensão dos grãos e o sistema de porosidade.

Frasca (2003) realizou estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas comumente empregadas na construção civil, demonstrando que os processos mais eficientes foram os de exposição à névoa ácida e salina, além da imersão parcial em ácido sulfúrico. Os resultados obtidos mostraram diferentes susceptibilidades das rochas estudadas, com formas e intensidades variáveis conforme diferentes tipos litológicos: oxidação de minerais, eflorescências, escamações, diretamente dependentes de propriedades intrínsecas das rochas testadas e em conformidade com o tipo de experimentação laboratorial escolhida.

Simão (2003) avaliou 04 granitos de diferentes origens e composições semelhantes, um gabro e um sienito nefelínico, concluindo que mesmo as rochas graníticas, consideradas resistentes à alteração, apresentam aspectos de degradação quando submetidas a ambientes e atmosferas ácidas. A durabilidade destes tipos de rocha depende do estado de alteração dos seus feldspatos antes da exposição naqueles ambientes ácidos, bem como da presença e quantidade de minerais susceptíveis à alteração, nomeadamente minerais máficos como a biotita.

Becerra-Becerra (2009) avaliou seis diferentes granitos de grande aceitação no mercado brasileiro, por meio de vários ensaios simulando condições ambientais em seus locais de aplicação. Mais tarde, o autor estudou a susceptibilidade à alteração de rochas carbonáticas da formação La Tampa (Eoceno Médio), aflorante na região Caribe Colombiana, e que são utilizadas em prédios importantes na arquitetura recente da cidade de Medellín.

Lima (2006) avaliou o comportamento dos gnaisses Casa Blanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia do Ceará, em atmosfera salina. Concluiu que os processos de degradação física foram mais perceptíveis; que as amostras já intempericamente alteradas responderam mais rapidamente aos ataques de degradação; que a susceptibilidade dos gnaisses à alteração foi determinada por três fatores: a porosidade (que tem influência sobre a forma de penetração da solução salina e quantidade de sal que migra para o interior da rocha), a dimensão dos grãos (que aumenta a susceptibilidade à degradação na presença de sal), e o sistema de poros, que determina em grande parte a pressão de cristalização exercida pelo sal e, conseqüentemente, a deterioração produzida.

2.4 Rochas sedimentares carbonáticas

Carbonatos são complexos aniônicos de $(\text{CO}_3)^{2-}$ e cátions metálicos bivalentes, tais como: Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Ba, Sr e Cu, juntamente com alguns outros elementos químicos menos comuns (AHR, 2008). A ligação entre o cátion metálico e o radical carbonato não é tão forte como as ligações internas da estrutura CO_3 que, por sua vez, não são tão fortes como a ligação covalente em dióxido de carbono (CO_2).

Consideram-se como rochas carbonáticas aquelas formadas principalmente de minerais carbonáticos. As principais classificações de rochas carbonáticas existentes na literatura, tais como as propostas por Folk (1959), Dunham (1962), Embry & Klovan (1971) e Ahr (2008), foram realizadas para classificar rochas carbonáticas sedimentares detríticas. Elas se diferenciam das demais por apresentarem em sua composição grãos aloquímicos, sendo compostas por arcabouço, matriz e cimento. O arcabouço pode ser formado por grãos aloquímicos e por componentes de origem não carbonática, além de diferentes tipos de material em sua matriz. Os espaços porosos originais são geralmente ocupados com fluidos (águas salinas, óleo e gás), assim como por sedimentos finos (materiais sílticos e argilosos), ou ainda serem reduzidos e obliterados por minerais quimicamente precipitados durante a diagênese (agentes cimentantes).

Rochas carbonáticas orgânicas (reef rocks) são depósitos calcários *in situ* formados por organismos sésseis, formando estruturas complexas e diversificadas ao longo da histórica geológica (RIDING, 2002). A classificação destas rochas depende da matriz, esqueletos e cimento. Nela estão incluídos os travertinos, que são formados por processos de precipitação química e bioquímica de carbonatos em ambientes terrestres, associando-se muitas vezes à presença de coquinas.

2.4.1 Calcrete

Segundo Chen (2002), vários termos têm sido utilizados na literatura de carbonatos antigênicos terrestres, tais como “nitrato de sódio”, “kankar”, “kunkar” e travertino, (por exemplo: ARISTARAIN 1971; GOUDIE 1972a, 1973, 1983; MILNES & HUTTON, 1983). O termo calcrete possui diferentes concepções para diferentes autores.

Lamplugh (1902) introduziu o termo para descrever calcrete cascalhoso de cimento carbonático, juntamente com os termos silcrete e ferricrete, para materiais cimentados por sílica e óxido de ferro, respectivamente. De acordo com esse uso inicial, ou seja, “Creta” como cimentação, um calcrete deve ter um grau de endurecimento. No entanto, posteriormente, o termo calcrete passou a representar uma gama muito maior de carbonato antigênicos, incluindo também materiais friáveis, como calcrete em pó (e.g., NETTERBERG, 1967; GOUDIE, 1973, 1983).

Segundo Goudie (1973) calcretes são “acumulações, principalmente de carbonato de cálcio, próximas à superfície do terreno e restritos a ambientes continentais, tendo origem em zonas vadasas, a partir da cimentação e/ou substituição por carbonatos, em proporção variável, de constituintes de solos e rochas. Esta definição refere-se apenas a calcretes de origem pedogênica ou de ambiente vadoso raso.

Posteriormente, Wright & Tucker (1991) definiram em ambientes semiáridos a áridos extensas acumulações de carbonatos de origem freática, devido ao deslocamento subterrâneo de águas saturadas em carbonato de cálcio.

Netterberg (1967) observou acumulações de carbonatos não-pedogênicos na África do Sul, cuja origem associou à cimentação da rocha hospedeira em sistemas aquíferos rasos. Mann & Horwitz (1979) e Semeniuk & Meagher (1981) desenvolveram estudos sobre a formação de calcretes de água subterrânea na região oeste da Austrália.

Segundo Semeniuk & Meagher (1981) calcretes não pedogênicos se formam em subsuperfície e logo acima do nível freático como resposta ao regime de evapotranspiração regional. O termo calcrete de água subterrânea (groundwater calcrete) é sinônimo de calcrete não pedogênico, freático, de canal ou de vale (WRIGHT, 2007).

Na acepção de Alonso-Zarza (2003), somente as acumulações de carbonatos terrestres em depósitos clásticos com influência pedogenética e/ou de águas subterrâneas são calcretes stricto sensu.

2.4.1.1 Classificação de Calcretes

Tratados inicialmente como rochas sedimentares, calcretes não são depositados, mas formados por processos que tendem a transformar a matriz e o arcabouço carbonático em cimento. Nas últimas décadas a classificação de calcretes vem evoluindo, uma vez que vários critérios podem ser adotados. Netterberg (1980) a partir da composição química dos calcretes, baseou-se na proporção entre magnésio e cálcio para definir quatro tipos: calcretes, calcretes magnesianos, calcretes dolomíticos e dolocrete. Gile *et al.* (1966) propuseram quatro estágios de desenvolvimento de solos cálcicos: estágios 1, 2, 3 e 4. Para Machette (1985) solos cálcicos são aqueles que possuem acumulações secundárias de carbonato de cálcio com diferentes estágios de desenvolvimento. Neste sentido definiu seis estágios com base na evolução do grau de cimentação dos solos cálcicos e na proposta inicial de Gile *et al.* (1966). Os três primeiros estágios correspondem aos de Gile *et al.* (1966):

- Estágio 1 – tênue cobertura micrítica sobre pedrs;
- Estágio 2 – pequenos nódulos com diâmetro entre 5 e 40 mm;
- Estágio 3 – surgimento de nódulos coalescentes;
- Estágio 4 – formação de lâminas carbonáticas com espessura inferior a 10 mm;
- Estágio 5 – desenvolvimento de espessas vênulas carbonáticas e de pisólitos e
- Estágio 6 – é o mais avançado e corresponde a múltiplas fases de brechação, formação de pisólitos e recristalização.

Os calcretes são diferenciados em dois grupos: pedogênico e freático. Calcretes pedogênicos formam-se em perfis de solo acima do nível freático, onde a umidade oriunda de evaporação passa a dissolver e permitir reprecipitação do material carbonático disperso no solo e os calcretes freáticos formam-se da cimentação dos estratos carbonáticos em contato com a interface freático/vadosa, sendo suscetível à dissolução e reprecipitações mais intensas que o tipo pedogênico. Isso ocorre porque é percolado pelas águas do lençol freático e não apenas pelo vapor proveniente do mesmo (WRIGHT; TUCKER, 1991; ALONSO-ZARZA, 2003).

A formação de calcretes é dependente dos processos de evaporação, sendo mais comuns em áreas áridas e semiáridas, onde a evaporação é maior do que a precipitação (WHIGHT; TUCKER, 1991; ALONSO-ZARZA, 2003; ALONSO-ZARZA *et al.*, 2009c).

2.4.2 Travertinos

O termo travertino é derivado do italiano “travertine”, constituindo uma derivação de *lapis tiburtinus*, cuja tradução do Latim significa "pedra de Tibur", nome antigo da atual cidade de Tivoli, também conhecida como Bagni de Tivoli ("Termas de Tivoli"), situada a 30 km a leste de Roma (VILES & GOUDIE, 1990). Por mais de 2000 anos os depósitos de *bagni de Tivoli* têm sido explorados e desde então vêm sendo utilizados para construções de monumentos e edifícios, sendo um clássico exemplo o Coliseu de Roma, onde foram utilizados cerca de 200 mil blocos de travertino.

Os depósitos de *Bagni de Tivoli* foram investigados por Chafetz & Folk (1984), Petecost & Tortora (1989) Viles & Goudie (1990), e Pentecost (2005), que mencionam que a maioria destes depósitos possui características termais, provavelmente relacionadas com a história recente de vulcanismos na Itália. Travertinos tipicamente sedimentares são depósitos carbonáticos originados em águas continentais em CNTP, predominantemente lacustres, tendo como característica distintiva a presença de remanescentes de macrófitas, invertebrados e bactérias. Os mesmos autores distinguem outros depósitos travertínicos de origem termal ou hidrotermal, por serem constituídos por precipitados físico-químicos e microbiais carbonáticos, sem a presença de macrófitas e restos orgânicos.

Riding (2002) propôs uma classificação de rochas carbonáticas de origem orgânica, na qual incluiu os travertinos na categoria “*Cement Organics Reefs*”, definindo “travertino” como sendo depósitos carbonáticos formados pela cimentação de organismos sem esqueletos, com textura laminada frequentemente cristalina e "arbustiva".

Segundo Pentecost (2005) o travertino é um calcário precipitado quimicamente formado em torno de infiltrações, nascentes, e ao longo de córregos e rios e, ocasionalmente, em lagos. Habitualmente, é constituído de calcita ou aragonita, de baixa a moderada porosidade intercrystalina e muitas vezes alta porosidade do tipo móldica, do tipo framework. A precipitação resulta principalmente por meio de transferência (evasão ou invasão) de dióxido de carbono que conduz a supersaturação de carbono de cálcio, com nucleação e crescimento de cristais. Assim são processos inorgânicos com participação de anidridos de carbono e solução de bicarbonato de cálcio, levando à precipitação de carbonato de cálcio em ambiente não marinho.

A formação de travertinos ocorre em encostas íngremes e camadas no interior de leitos carbonáticos. Os formados *in situ* raramente se dispõem em camadas horizontais.

Laminações em escala milimétrica a centimétrica são comuns, geralmente como resultado de ritmos de crescimento diários. Assim, as características principais deste tipo de travertino são a falta das camadas horizontais e a formação através da precipitação química, com participação microbiana e bacteriana, e briófitas, que ajudam a precipitação do carbonato de cálcio.

2.4.2.1 Classificações de Travertinos

Três critérios têm sido usados para classificação de travertinos: geoquímico, petrografia (*fabric*) e morfológico (PENTECOST *et al.*, 1994).

2.4.2.1.1 Critério Geoquímico

Pentecost (1993) distingue travertinos conforme a origem do CO₂ transportado: os travertinos meteógenos e os travertinos termais ou termógenos. No primeiro caso, o CO₂ se origina no solo e em ambientes epígeos, formando depósitos principalmente em terrenos carbonáticos. Estes travertinos são amplamente distribuídos e costumam apresentar arranjo (*fabric*) característico. Seus isótopos estáveis de carbono variam de 0 a -11‰, refletindo o esgotamento de ¹³C no solo (DEINES, 1980). No segundo, as águas responsáveis pelos depósitos são normalmente quentes e o CO₂ transportado é resultante da interação de rochas e fluidos ricos em carbono (MOTO & RYE, 1979). Este CO₂ possui várias origens incluindo hidrólise, oxidação e redução do carbono, decarbonatação do calcário, ou origens diretamente do manto superior em áreas com atividade vulcânica. Suas altas concentrações são capazes de dissolver grandes volumes de carbonatos. Taxas de degaseificação e de deposição destas águas quentes tendem a ser rápidas, fornecendo diferentes arranjos texturais. As análises isotópicas de δ ¹³C variam entre -4 a 8‰. Este enriquecimento em ¹³C reflete o carbono liberado pela decomposição de calcários marinhos, porém contribuições significativas de CO₂ provenientes do manto podem resultar na deposição de travertino deplecionado em ¹³C. Estes travertinos apresentam uma distribuição mais restrita, sendo localizados principalmente em regiões com atividades vulcânicas recentes (PENTECOST & VILAS, 1994).

2.4.2.2.2 Critério petrotrama (*fabric*)

O termo *fabric* refere-se ao arranjo dos grãos e/ou cristais na rocha segundo seus tamanhos, formas e orientações (SCHOLLE & ULMER-SCHOLLE, 2003). As bactérias e as plantas podem influenciar no *fabric* dos travertinos, além da taxa de deposição, da mineralogia e da extensão da diagênese (VILES & GOUDIE, 1990). Os arranjos texturais dos travertinos são base de vários esquemas de classificação, a maioria dos quais enfatizam a influência das plantas.

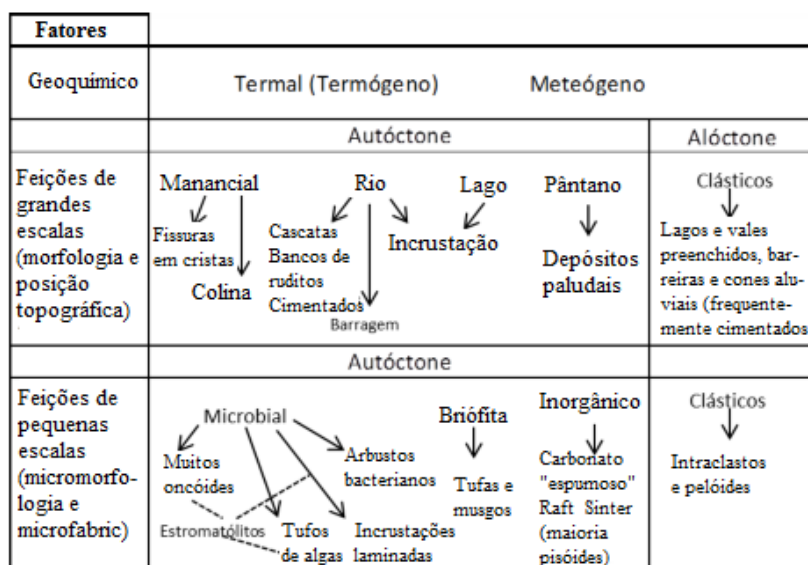
Petrotramas influenciados por bactérias são pouco comuns, e podem ser difíceis de serem reconhecidos. As cianobactérias são frequentemente encontradas em depósitos travertínicos de todos os tipos e produzem uma série de pequenas estruturas de irradiação. Em alguns casos, podem produzir laminação diária ou sazonal (PENTECOST, 1990). Plantas maiores também deixam vestígios: a deterioração de suas folhas e galhos pode produzir porosidade móldica (VILES, 1994).

2.4.2.2.3 Critério morfológico

Os depósitos de travertinos são extremamente variáveis e refletem processos acrescionais ao invés de erosivos (PENTECOST & VILES, 1994). Dependendo do grau de coesão entre os cristais, podem apresentar litologias brandas a densas, e apresentar morfologias variadas. Neste caso, é importante considerar a escala, na diferenciação das principais formas. Chafetz & Folk (1984) descreveram a morfologia de vários travertinos de origens termais, reconhecendo cinco formas básicas: cachoeiras/cascatas, lagos, montes (inclinados ou em terraços) e fissuras de crista.

Tipos de travertino, classificados de acordo com o ambiente de formação, foram propostos por Pedley (1990), sendo: tipos cascata, fluvial, lacustre e palustre. Esta classificação foi aperfeiçoada por Ford & Pedley (1992), que propuseram três categorias: travertinos de água fria, travertinos salinos e travertinos termais. Pentecost & Viles (1994) apresentaram uma classificação unificada (Figura 2.1), em nove categorias subdivididas em dois grupos. O primeiro contém os depósitos autóctones associados a nascentes, riachos, rios, lagos e pântanos. O segundo é formado por travertinos alóctones (cársticos).

Figura 2.1 Esquema de classificação unificada de travertinos



Fonte: Modificado de Pentecost & Viles (1994)

Esta classificação dividiu os travertinos em nove categorias, subdivididos em dois grupos. O primeiro grupo contém todos os depósitos autóctones associados a nascentes, riachos, rios e pântanos. O segundo grupo é formado por travertinos alóctones (clásticos).

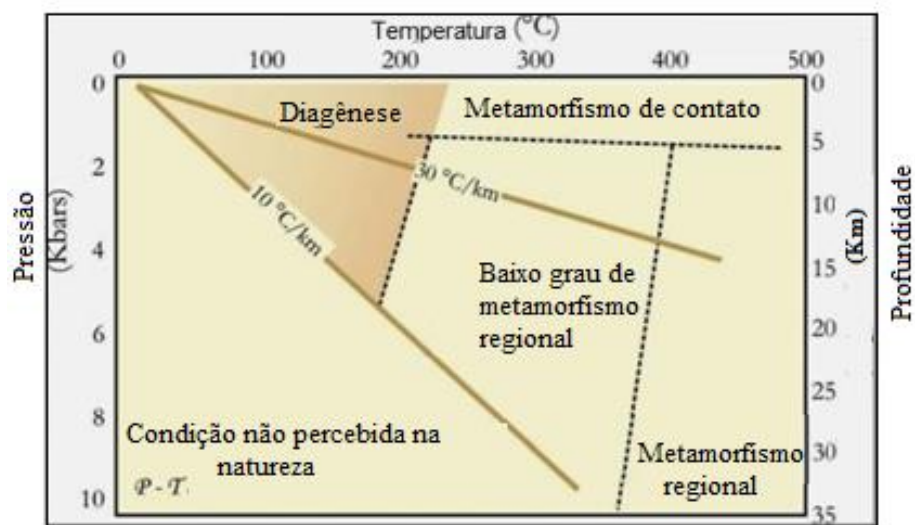
2.4.3 Processos de formação: sedimentação e diagênese

Em rochas carbonáticas, porosidade e permeabilidade podem se originar a partir de diversos processos (AHR, 2008). Elas se caracterizam por estruturas e distribuição espacial complexas, grande variedade de tipos de porosidade e alta heterogeneidade, rápida instabilidade de seus componentes com o soterramento, tipos de organismos presentes, e variedades dos processos diagenéticos. Estas rochas se formam tanto em ambientes marinhos quanto continentais.

Após a sedimentação os grãos passam a sofrer processos de litificação ou diagênese, envolvendo uma ampla gama de processos físicos, químicos e biológicos, nos quais os sedimentos e a água que satura os poros intersticiais reagem entre si, procurando um equilíbrio geoquímico e textural com o ambiente. Disto resultam mudanças mineralógicas, geoquímicas, texturais e estruturais, em mecanismos de diagênese que podem ser mecânicos, biológicos, químicos ou a combinação entre eles (AHR, 2008).

A diagênese pode ocorrer em condições de temperaturas relativamente baixas dependendo da reatividade do material, sob baixas pressões e em ambiente que evoluem em soluções aquosas cujas salinidades que variam desde águas pluviométricas até salmouras muito concentradas (Figura 2.2), que podem modificar significativamente a permeabilidade e o espaço entre os poros (AKBAR *et al.*, 1995). Processos como a compactação, cimentação, dissolução, recristalização e dolomitização são os principais dentre os mecanismos digenéticos sofridos por estas rochas.

Figura 2.2 Diagrama de P-T e regimes de diagênese.



Fonte: (Adaptado de Worden *et al.*, 2003)

2.4.3.1 Compactação

Este processo abrange a reorganização mecânica ou química dos elementos constitutivos pelo aumento de pressão de cargas, gerando uma redução na porosidade pela variação de volume. A compactação mecânica começa ao final da sedimentação, e nela os bioclastos são alargados e outros elementos carbonáticos tendem a orientar-se paralelamente à estratificação podendo, *a posteriori*, serem produzidas fraturas e deformações (AKBAR *et al.*, 1995).

2.4.3.2 Cimentação

Processo de crescimento de cristais em espaços entre partículas pré-existentes ou não, pela precipitação de soluções saturadas. No caso das rochas carbonáticas, os tipos de cimentação mais frequentes são as calcitas, as aragonitas e, eventualmente, dolomitas. Este processo causa litificação dos sedimentos carbonáticos e seu resultado depende principalmente do ambiente diagenético e da cimentação (AKBAR *et al.*, 1995).

2.4.3.3 Dissolução

Processos de interação da composição da água dos poros e a mineralogia das partículas. Este processo é responsável pela porosidade secundária dos carbonatos (vugular, caverna, etc.), segundo Alonso *et al.* (2010). Os grãos podem ser dissolvidos para formar um espaço de poros novos e a dissolução ao longo de fraturas e planos de estratificação pode produzir grandes cavidades (AKBAR *et al.*, 1995).

A pressão hidrostática influencia os processos de dissolução dos carbonatos. Um aumento de pressão hidrostática favorece a dissolução dos sedimentos. A partir dos 100m até os 4000m de soterramento é gerado um ligeiro aumento da dissolução. Abaixo dos 4000m a dissolução de carbonatos é incrementada até um ponto de inflexão (AKBAR *et al.*, 1995).

2.4.3.4 Recristalização

Folk (1965) define a recristalização como um processo que compreende transformações de minerais e texturas dando como resultado novos cristais com morfologia e dimensões diferentes. No caso da lama micrítica dos sedimentos carbonáticos tropicais, que é formada por uma mistura complexa de pequenos cristais, a maioria de agulhas de aragonita e calcita magnesianas, são transformadas em calcita (FOLK, 1965). O processo de formação de micrita tem sido considerada tradicionalmente como uma recristalização agradativa. Uma vez formada a micrita (4 μ m), esta pode recristalizar gerando microesparita ou pseudoesparita, dependendo do conteúdo em magnésio existente no meio ambiente.

Ahr (2008) explica a recristalização como processo capaz de alterar a morfologia dos cristais sem grandes repercussões na composição mineral e, segundo Zimbres (2012), a recristalização é um dos principais fenômenos diagenéticos podendo ser dividida em três tipos:

- (i) Modificação da forma e/ou do tamanho de um mineral, que passa por um rearranjo mantendo a mesma estrutura cristalina;
- (ii) Rearranjo da estrutura cristalina do mineral originando outra espécie mineral polimorfa, que acontece na transformação de aragonita em calcita no metamorfismo inicial dos calcários, e da transformação do quartzo para polimorfos de alta pressão no metamorfismo de impacto; e
- (iii) Reação entre os minerais ou entre estes e a fase fluida, dando origem a neoformações adaptadas ao novo ambiente termodinâmico e novas condições de P-T.

Nos três tipos de recristalização, os minerais também sofrem modificação em seu arranjo, originando texturas orientadas.

2.4.3.5 Dolomitização

A diagênese de carbonatos geralmente envolve a substituição de calcita e aragonita originais por dolomita, processo denominado de dolomitização (AKBAR *et al.*, 1995). Este é um processo geoquímico em que íons Mg^{++} substituem íons de Ca^{++} de calcitas, originando dolomita: $CaMg(CO_3)_2$ (ZIMBRES, 2012) em presença de águas carregadas em sais magnesianos, ou inclusive a água do mar. Como o volume dos cristais de dolomita é menor do que o da calcita, o processo de dolomitização é acompanhado por um aumento da porosidade das rochas, tornando-a suficientemente cavernosa para perder os traços de estratificação primitiva e, em certos casos, os registros fósseis. A dolomitização pode ocorrer em uma grande variedade de ambientes diagenéticos e a partir de águas de composição muito variada. As novas características mineralógicas e texturais dependem, entre outros fatores, da salinidade do meio e da relação Mg^{2+} / Ca^{2+} .

2.4.4 Rochas carbonáticas e seus usos ornamentais

Frasca (2011) chama a atenção que degradações de rochas ornamentais podem ser minimizadas a partir de uma detalhada caracterização tecnológica destes produtos. A utilização dos diversos tipos de materiais líticos para revestimento externo ou interno, bancadas diversas,

etc., deve ser avaliada em função do local de aplicação, ou seja, conforme o tipo de ambiente e condições a que estarão sujeitos depois do assentamento. Com base em ensaios físico-mecânicos e também na avaliação de performance, tem sido possível estabelecer limites mínimos e máximos para emprego destes materiais em várias regiões do mundo (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Especificações para uso dos mármore, calcários e travertinos

Norma	Tipo de Rocha	Uso	ρ	α	σ_c	$\sigma_{tr f}$	σ_f
ASTM C 503	Calcita Mármore Dolomita Mármore	Exterior	≥ 2.595 ≥ 2.800	$\leq 0,20$	≥ 52	≥ 7	≥ 7
ASTM C 568	Calcário	I - Baixa densidade	≥ 1.760	≤ 12	≥ 12	$\geq 2,9$	n.e.
II- Média densidade		≥ 2.160	$\leq 7,5$	≥ 28	$\geq 3,4$		
III- Alta densidade		≥ 2.560	≤ 3	≥ 55	$\geq 6,9$		
ASTM		I - Exterior	≥ 2.305	$\leq 2,5$	≥ 52	$\geq 6,9$	$\geq 6,9$
C 1527	Travertino	II Interior		$\geq 34,5$	$\geq 4,8$	$\geq 4,8$	

Legenda: ρ = densidade aparente (kg/m^3); α = absorção d'água (%); σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); $\sigma_{tr f}$ = resistência à tração na flexão (MPa); σ_f = resistência à flexão (MPa) ; n.e. = não especificado.
Fonte: Frascá (2011)

O MIA (Marble Institute of America) chama a atenção para o fato de que os resultados dos ensaios devem ser criteriosamente estudados e comparados a condições reais de instalação, para determinar se a rocha é apropriada para a aplicação na espessura sugerida e, caso contrário, quais as mudanças necessárias para que se alcance o comportamento esperado no processo construtivo. Deve-se também realizar avaliação e/ou teste de compatibilidade com argamassas, rejuntamentos e métodos de assentamento e “ancoragem”.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e área de localização

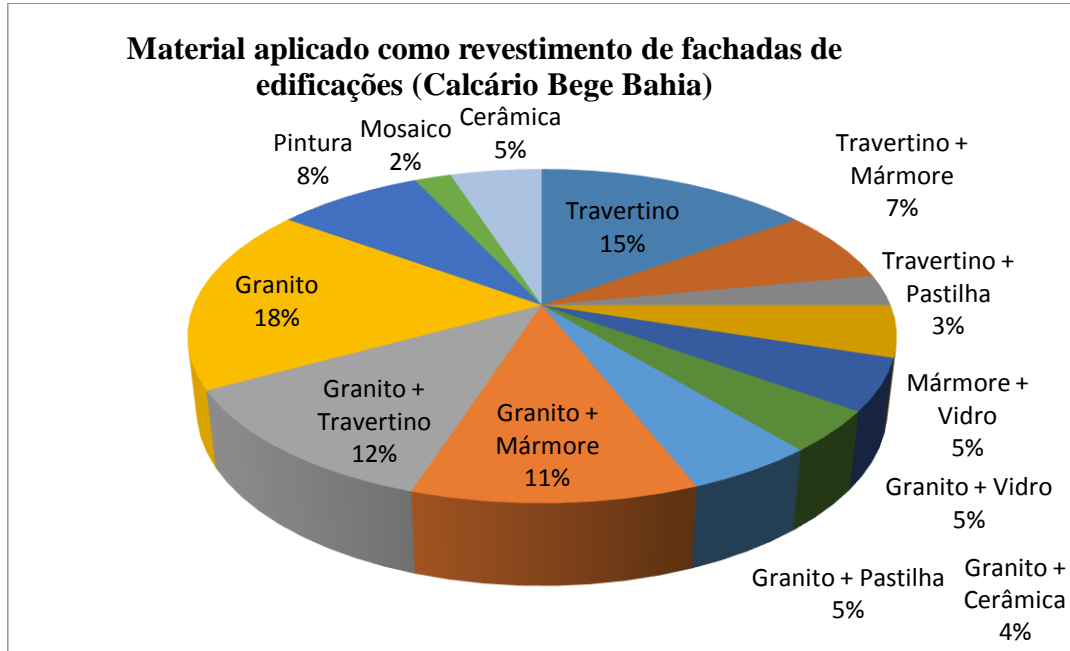
O material pesquisado corresponde a placas do calcário Bege Bahia, aplicadas em edificações da região litorânea do Recife-PE, Praia de Boa Viagem, como revestimento de fachadas desde vários anos a mais de duas décadas (Figura 3.1). Trata-se de um produto de relevante importância comercial e estética, com múltiplas aplicações na construção civil (Figura 3.2), oriundo de minerações da área de Ourolândia, no centro-norte do estado da Bahia.

Figura 3.1 Panorâmica da área de estudo, região litorânea do Recife- Pernambuco. (de onde foram retirados os corpos-de-prova e realizada a leitura de brilho).



Fonte: Google Earth, acessado em 20/03/2015.

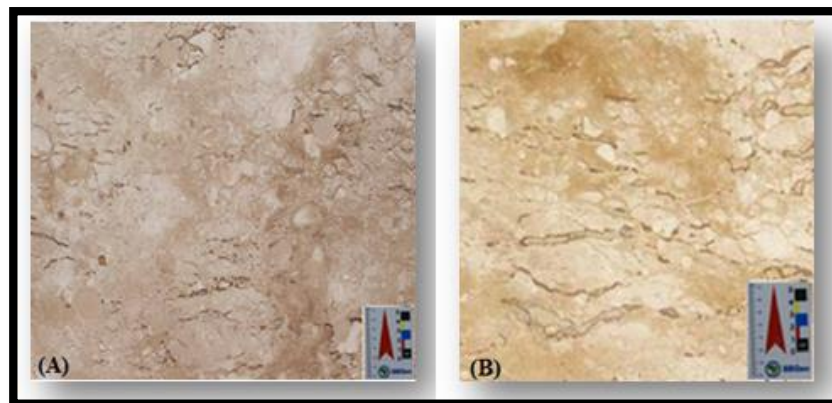
Figura 3.2 Gráfico da aplicação do Calcário Bege Bahia nas fachadas das edificações da região litorânea da cidade do Recife-PE, Praia de Boa Viagem.



Fonte: Elaborado pela autora

Para os ensaios tecnológicos foram utilizadas placas (40x40 cm) do Bege Bahia *in natura* lustradas (prontas para comercialização) e alteradas. As placas alteradas foram coletadas de revestimento externo de edificação da orla litorânea (Figura 3.3).

Figura 3.3 Placas (40x40 cm) do Calcário Bege Bahia: (A) *In natura* (recém lustrada) e (B) Alterada, material usado em revestimento.

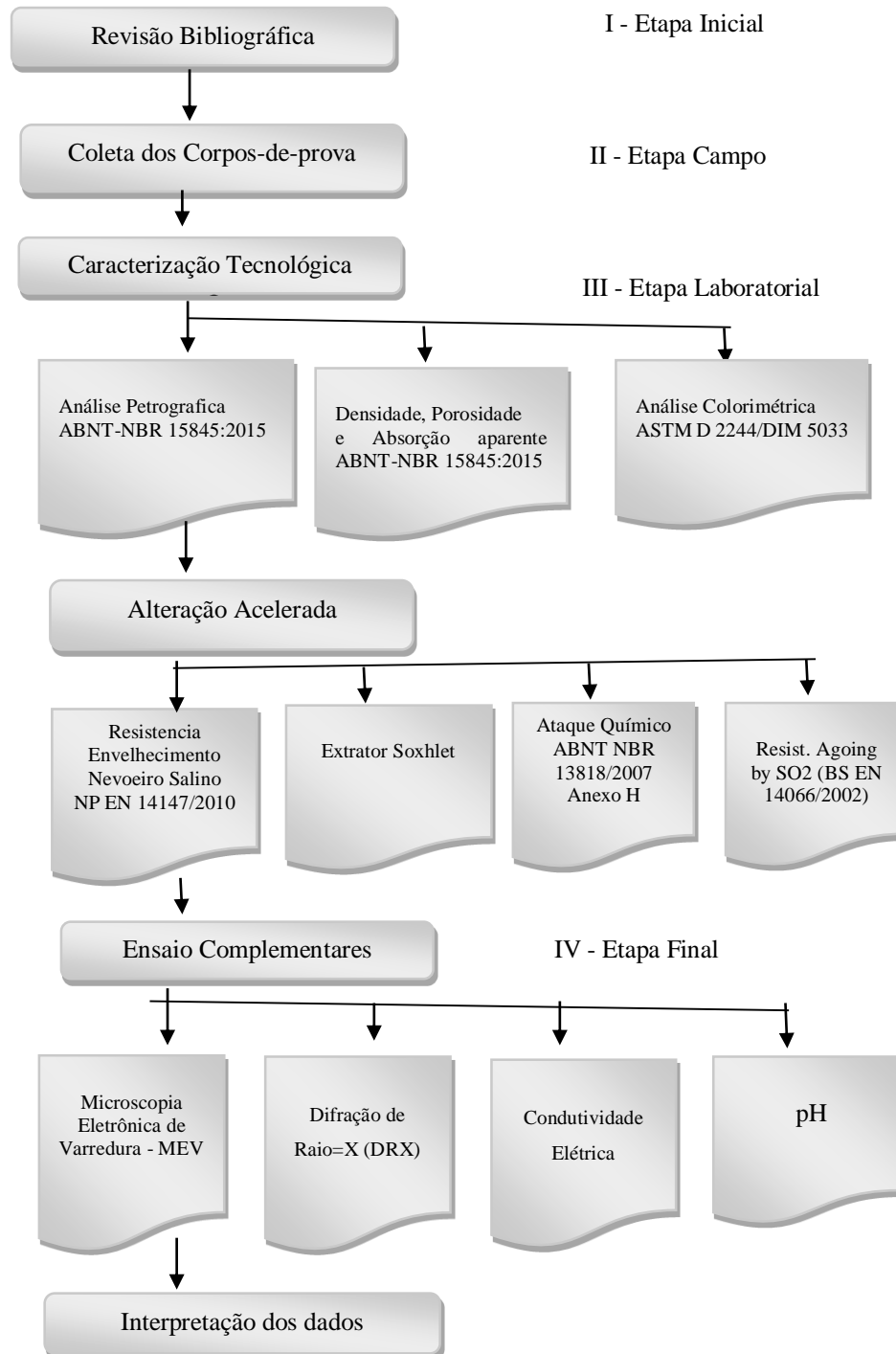


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Métodos de pesquisa

A pesquisa englobou as seguintes etapas, ilustrada no fluxograma, figura 3.4:

Figura 3.4 Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Onde:

I Etapa Inicial

Correspondeu ao levantamento bibliográfico, o qual priorizou as informações mais recentes sobre as alterações de placas carbonáticas sob a influência de aerossóis salinos, envolvendo periódicos técnico-científicos, teses, e normas técnicas para ensaios tecnológicos. Sua finalidade foi a de expor a evolução de alterações provocadas por aerossóis salinos em revestimentos de edificações localizadas em domínios litorâneos.

II Etapa de Amostragem

Nesta etapa foram reconhecidas as edificações mais afetadas pelo *spray* salino da orla litorânea do Recife, em geral aquelas em que o calcário Bege Bahia constituía revestimento, principalmente as aplicações antigas (mais de duas décadas). As placas *in natura* (lustradas) foram adquiridas em loja especializada em produtos pétreos, e a alterada *in loco*.

III Etapa laboratorial

Esta etapa constou de diversos procedimentos, iniciando com a confecção de 45 corpos-de-prova no tamanho 5 x 5 x 2 cm, 7 x 7 x 2 cm e 7 x 15 x 2 cm, de acordo com normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A maioria das análises foram desenvolvidas nos laboratórios da Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa, no Departamento do Centro da Terra (DCT) e no Instituto Superior Técnico em Lisboa, Portugal (ilustrado na prancha 3.1).

IV Etapa Final

Esta etapa correspondeu à integração, tratamento e interpretação dos dados obtidos nas etapas procedentes (descrição na Prancha 3.1) e, por fim, ultimando com a confecção de documento final que corresponde à tese de doutorado.

Tabela 3.1 Demonstrativo dos laboratórios onde foram realizados os ensaios tecnológicos, alterabilidade aceleradas e as análises complementares.

LABORATÓRIOS	ENSAIOS
<p>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE Laboratório de Rochas Ornamentais-PPGMinas</p> <p>Laboratório de Petrografia</p>	<p>Densidade Aparente, Porosidade e Absorção de água (ABNT NBR 15845/2010; Ensaio Colorimétrico (M D 2244 - DIN 5033); Ensaio de Brilho (ASTM D 523); Confecção de Lâminas. (ABNT NBR 15845/2010).</p>
<p>Universidade Federal do Ceará – UFC Laboratório de Laminação do Deptº.de Geologia Laboratório Microscopia Eletrônica - MEV Laboratório Geoquímica Ambiental</p>	<p>Confecção de lâminas delgadas Análise através da Lâminas delgadas (MEV) Difração de Raio-X Análise de condutividade e pH</p>
<p>Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa –Departamento Centro da Terra (DCT) Laboratório Rochas Industriais e Sedimentologia; Laboratório de Corte e Polimento e Nevoeiro Salino</p>	<p>Ensaio de ataque químico; Ensaio com Extrator de Soxhlet; Ataques químicos (lixiviados) Ensaio de Spray Salinos (NP- EN 14147/2007); Corte dos corpos de prova</p>
<p>Instituto Superior Técnico (IST) Laboratório do Centro de Petrografia e Geoquímica - CEPGIST Laboratório de Absorção Atômica</p>	<p>Ensaio de SO₂ (EN 13919/2002 –Natural Stone test methods – Determ. Resistência ao ataque de SO₂) Análises de condutividade e de pH Absorção atômica (lixiviados)</p>
<p>Norma de Desempenho - Edificações Habitacionais</p>	<p>ABNT NBR 15575/2013 – (vigente desde 19 de julho de 2013)</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

A realização deste conjunto de ensaios e análises laboratoriais visou o conhecimento do calcário Bege Bahia em seus parâmetros físicos, mineralógicos, e aspectos condicionantes da alterabilidade, determináveis em condições quimicamente agressivas. Igualmente, visou a observação de suas feições estéticas, cor, dureza, densidade, grau de alterabilidade, etc., que estão diretamente ligadas aos seus minerais constituintes e estruturas e padrões texturais, susceptíveis de modificações quando este produto lítico é exposto às condições ambientais.

3.3 Descrição dos ensaios tecnológicos realizados

Os ensaios realizados foram produzidos segundo normas da ABNT – NBR, ASTM, DIN, AFANOR, NP e EM (ilustrados na tabela 3.2).

Tabela 3.2 Ensaio tecnológicos realizados nesta pesquisa com base nas Normas: ABNT – NBR, ASTM, DIN, AFANOR, NP e EN.

Ensaio	Normas Brasileira	Normas de Origem
Análise Petrográfica	ABNT-NBR 15845/2010 (Anexo A) Normativo.	ASTM C-295 AFNOR B-10301 NP-EM 14147
Análise Densidade, porosidade e absorção aparente	ABNT-NBR 15845/2010 (Anexo B) Normativo.	ASTM C-97 DIN 5102 e DIN 52103 AFNOR B-10503 e 10504
Análise colorimétrica		ASTM D-224 DIN 5033
Análise de Intensidade de Brilho		ASTM D-224
Desempenho da Construção Civil	ABNT-NBR 15575/2013, vigorar (19/07/2013)	

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.1 Confeção e análise de seções delgadas (Petrografia): ABNT/NBR 15845/2010 - Anexo A (normativa).

Foram confeccionadas 17 seções delgadas (norma ABNT/NBR 15845/2010), sem lamínulas, no Laboratório de Laminação do DEGEO/UFC, posteriormente descritas com utilização de microscópio binocular OLYMPUS BX41 acoplado a uma câmara OLYMPUS UC30, no Laboratório de Microscopia do DEGEO/UFC.

A análise petrográfica possibilitou uma leitura sobre a textura, componentes da rocha carbonática, grau de microfissuramento, contato de grãos, nível de alteração dos constituintes minerais, levando à classificação do litotipo. Também fornece subsídios para previsões sobre seu comportamento tecnológico.

3.3.2 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água: ABNT/NBR 15845/2010.

Estes ensaios possibilitam a determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água, que refletem várias características das rochas. Os valores de porosidade representam o volume de espaços “vazios” de um litotipo, enquanto a absorção de água corresponde à sua capacidade para absorver e reter a água em seus poros e discontinuidades (Tabela 3.3). Adicionalmente, fornece indicações sobre fissuras, fator determinante para a resistência e durabilidade do produto, permitindo avaliação comparativa de um conjunto de rochas.

Tabela 3.3. Ensaios de caracterização tecnológica: ABNT/NBR 15845/2015.

Ensaio		Valores	Unidade	Anexo
Análise Petrográfica		-	-	A
Índice Físicos	Absorção d'água	$\leq 1,01$	%	B
	Densidade aparente	$\geq 2,606$	Kg/m ³	
	Porosidade aparente	$\leq 2,62$	%	

Fonte: Elaborado pela autora

Corpos de prova do Bege Bahia (5x5x2 cm) foram testados em condições *in natura* e também sob condições de alteração por mais de 15 anos após aplicação. Os procedimentos para análises da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água seguiram a norma

ABNT NBR 15845/2010. Os ensaios consistiram em definir as relações massa e volume dos corpos de prova, através de suas propriedades de massa específica aparente (densidade) seca e saturada, porosidade e absorção d'água, tanto para amostras *in natura* quanto para amostras alteradas.

Inicialmente, os corpos de prova são lavados em água corrente e escovados, e depois mantidos na estufa à temperatura de $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, até condições de massa constante nas leituras (quando a diferença entre duas pesagens sucessivas, num intervalo de $24\text{h} \pm 2\text{h}$ é $< 0,1\%$), utilizando-se para isto uma balança de precisão ($\pm 0,01\text{g}$).

Em seguida, os corpos de prova foram separados em bandejas plásticas identificadas: Bege Bahia *in natura* lustrado e "alterado", adicionando-se água destilada até alcançar 1/3 da altura da amostragem e, após 4h, até 2/3 desta altura e, finalmente, após mais 4h, completando-se sua submersão. Após estes procedimentos eles permanecem submersos por mais 40h ou, opcionalmente, sob vácuo por no mínimo 2h.

3.3.3 Intensidade de Brilho

O método usado para medições da intensidade de brilho foi o de medições diretas da reflectância das placas (colorimetria) com auxílio de espectrofotômetro MINOLTA e da Color-Guide da BYK. Sendo o sistema visual humano de natureza não-linear, fez-se necessário relacionar os instrumentos com a percepção humana, transformando as informações de campo linear para o não-linear, conforme sugerido por Leão (2005), figura 3.5.

Figura 3.5. (A) Espectrofotômetro Color-Guide BYK (PPGMinas/UFPE, Recife, Pernambuco) e (B) Espectrofotômetro MINOLTA, modelo CM-508i 99 (CEPGIST)/ IST, Lisboa, Portugal.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Descrição dos ensaios de envelhecimento acelerado

Foram realizadas medições da cor e brilho antes e após ataques químicos, envelhecimento por *spray* salino e em câmara de SO₂, além daqueles após ataques com soluções acidificadas e ensaios em soxhlet, com a finalidade de quantificar as alterações de cor causadas por poluentes atmosféricos, através dos parâmetros colorimétricos de variação L*a*b*, variação da cor (ΔE^*) e variação do brilho. Estes ensaios simulam condições meteóricas que afetam rochas de revestimento expostas ao meio ambiente, tais como: choque térmico, processos de depleção por influência de atmosferas ácidas agressivas e por *sprays* salinos. Entretanto, uma reprodução perfeita das condições naturais não é exequível em laboratório, porque os parâmetros que interferem na Natureza são múltiplos, variam em suas convergências, intensidades, tempos de interferência, e inclusive em diferentes escalas diurnas e sazonais.

Os ensaios tecnológicos foram conduzidos segundo normas específicas, tais como: a EN 13919/2002 para avaliar a resistência aos vapores de ácido sulfuroso; NP-EN14147/2007 para determinação da resistência ao envelhecimento sob *spray* salino; e ABNT/NBR 13818/2007 para determinação da resistência ao ataque químico (como ilustrado na tabela 3.4).

Tabela 3.4. Demonstrativo dos ensaios de alteração acelerada realizados na pesquisa

Ensaio	Norma brasileira	Norma de origem
Determinação da resistência a ataques químicos	ABNT/NBR 13818/2007	-
Determinação da resistência ao envelhecimento por <i>spray</i> salino	-	NP - EN 14147/2007
<i>Natural stone test methods</i> : Determinação de resistência ao ataque por atmosfera enriquecida em SO ₂	-	EN 13919/2002
Extrator Soxhlet	-	

Fonte: Elaborado pela autora

3.4.1 Determinação da resistência ao envelhecimento por spray salino: NP - EN 14147/2007

Este tipo de ensaio (Figura 3.6) simula condições naturais de ambientes litorâneos, onde o principal fator de degradação é a ação de *spray* salino. Os corpos de prova são submetidos a ciclos de secagem/umedecimento por nevoeiro salino, produzido com solução de NaCl conforme a norma NP-EN 14147, em câmara ASCOTT S120T. O ensaio é feito com nebulização de uma solução salina de NaCl 10% durante 4 horas, seguida de nebulização de água destilada por 8 horas, ao fim da qual se procede uma secagem a $35\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas. Este ensaio é composto de 60 ciclos, fazendo-se inspeção visual dos corpos de prova a cada 15 ciclos para completa remoção de sais cristalizados. Nesta operação o volume de água destilada deverá ser de 2-3x o volume total dos corpos de prova em imersão. A água deve ser substituída diariamente até que a condutividade da água de imersão apresente-se $< 2x$ o seu valor original. Em seguida, os corpos de prova são secos a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante, e resfriados em CNTP.

Figura 3.6 Câmara ASCOTT S120T



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao fim de cada ciclo, é feito o monitoramento, através de inspeção visual, registro fotográfico macroscopicamente e microscopicamente com lupa binocular, escaneamento, e análise das massas dos corpos-de-prova através de pesagens em intervalo de tempo de 24h, sendo necessário que a diferença entre elas (P_1 e P_2) não seja $> 0,1\%$ do valor inicial, além de aferição da intensidade colorimétrica e de brilho.

$$(\Delta M\%) = M_o - M_n / M_o \times 100$$

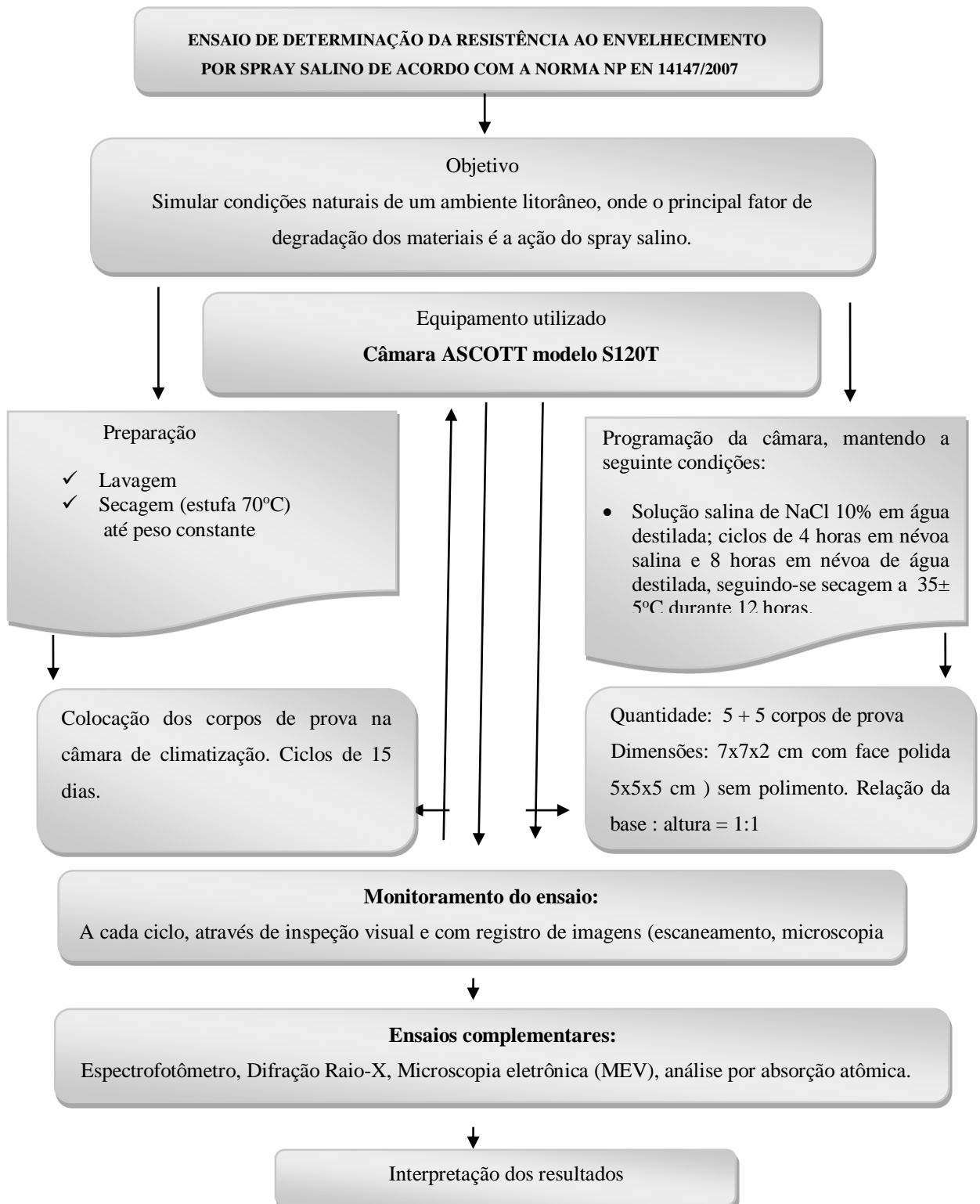
Onde:

$\Delta M\%$ Perda de massa, em percentagem

M_o Massa do corpo de prova seco, em gramas

M_n Massa do corpo de prova seco após os ciclos de ensaio, em gramas

Figura 3.7 Fluxograma da metodologia do ensaio por envelhecimento por spray salino



Fonte: Elaborado pela autora.

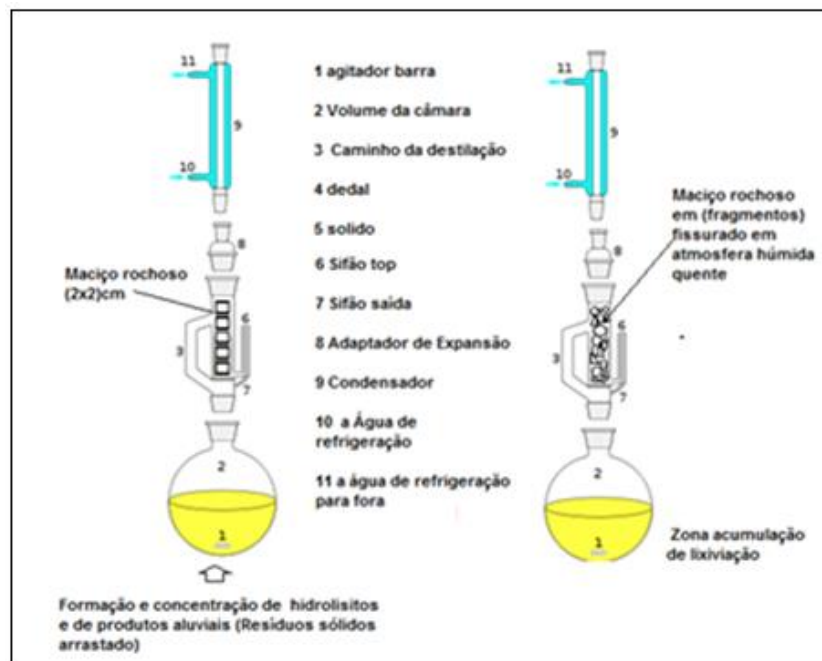
Nas inspeções visuais, foram realizados: registros das observações com lupa binocular em fotomicrografias, escaneamento dos corpos de prova para documentar indícios de alterabilidade, e aferição de leituras calorimetria dos mesmos.

3.4.2 Ensaios com o Extrator de Soxhlet

Nos ensaios com o Extrator de Soxhlet são simuladas condições naturais de alteração produzidas por águas deionizadas, porém adotando-se uma temperatura de elevada (60°C) e atmosfera impregnada de umidade (próxima da saturação). O ambiente simulado corresponde a um clima hipertropical quente e úmido, com chuvas abundantes na estação úmida, e períodos secos com temperaturas variando entre 20-25°C.

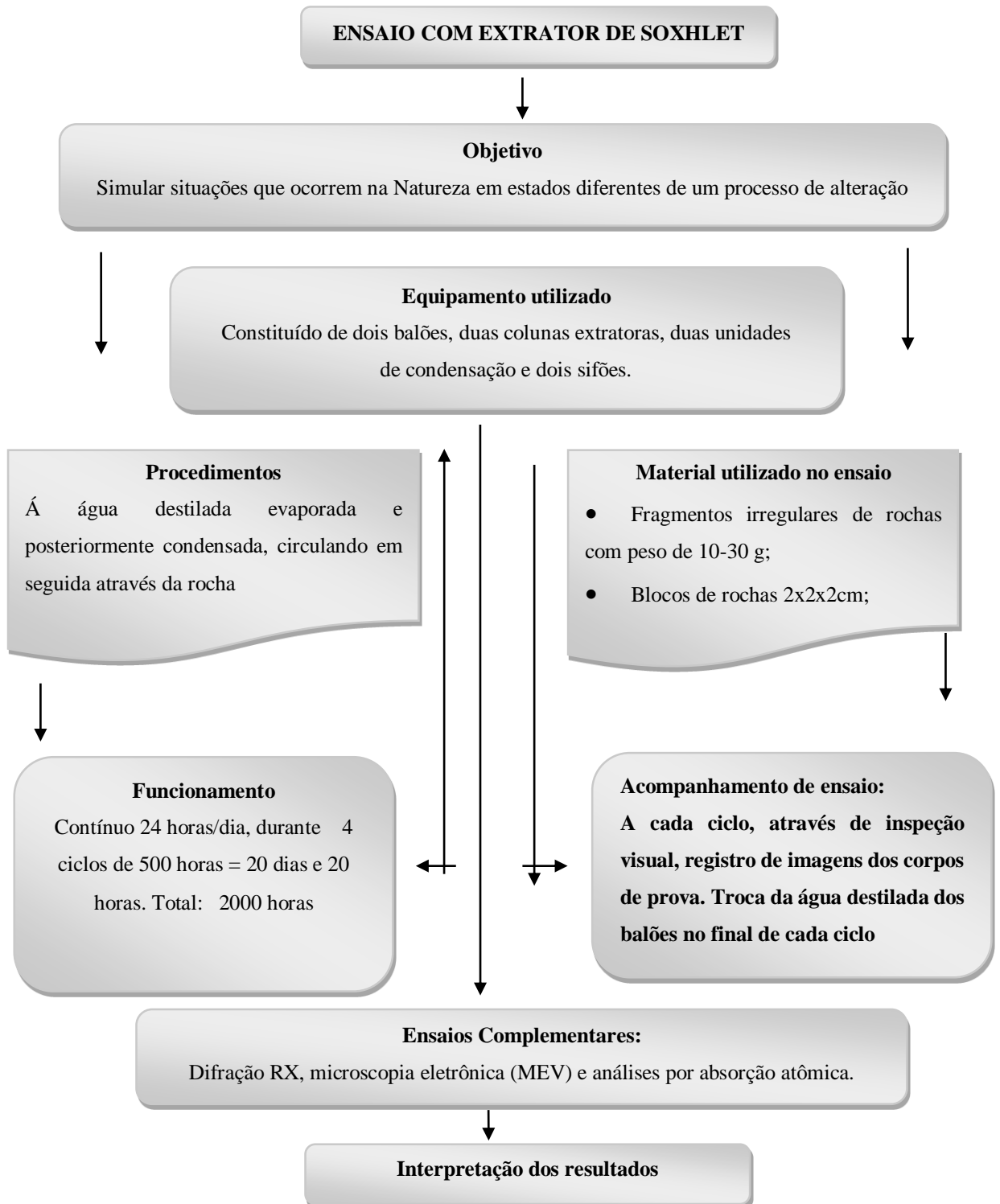
O fluxograma metodológico (AIRES-BARROS, 1972, 1991; SIMÃO 2003) inicia-se com a utilização de água deionizada aquecida até evaporação, cujo vapor é condensado em circuito fechado, e utilizado para circular novamente através da amostragem (Figura 3.8). O dispositivo é essencialmente constituído de um balão de destilação, uma coluna extratora, uma unidade de condensação e um sifão. Fluxograma da metodologia do Ensaio de Soxhlet (Figura 3.9).

Figura 3.8 Esquema do Extrator Soxhlet (Laboratório de Rochas Industriais e de Sedimentologia/FCT). Adaptado por Simão (2003).



Fonte: Elaborado pela autora .

Figura 3.9 Fluxograma da metodologia do Ensaio de Soxhlet



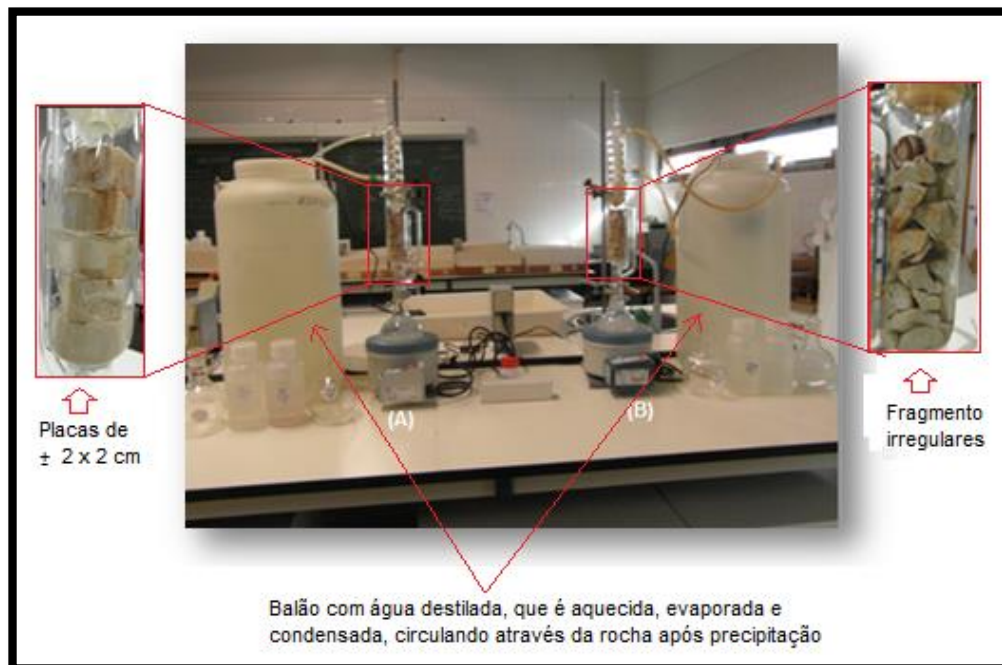
Fonte: Elaborado pela autora.

Nos ensaios foram aplicados os procedimentos adotados no Laboratório de Rochas Industriais e de Sedimentologia da FCT/Universidade Nova Lisboa. Foram produzidos fragmentos irregulares do Bege Bahia com peso médio de 25g ($\varnothing=25\text{mm}$), preenchendo-se o extrator com estes fragmentos (A) e de placas de 2x2x2 cm do mesmo material (B), arranjados de forma a permitir um gotejamento, contínuo, da água bidestilada (fraco percolação) no circuito (Figura 3.10). Foram feitos 4 ciclos de 500 horas (= 2000 horas), cada ciclo durando, portanto, 20 dias e 20 horas.

Então, no ambiente do extrator as condições são as seguintes:

- (i) Atmosfera fortemente impregnada de umidade com menos oxigênio e CO_2 que a atmosfera normal;
- (ii) Água de percolação mais pura do que a normal (menos N, O, CO_2) porém mais ionizada ou seja: ácida (menor pH), e mais quente do que as águas pluviais normais.

Figura 3.10 Realização do ensaio de lixiviação contínua do Calcário Bege Bahia no Laboratório de Rochas Industriais e de Sedimentologia (FCT) /Universidade Nova de Lisboa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Simão (2003), por questões de segurança e para evitar perdas de vapor ou descontinuidades no sistema de aquecimento, assim como avarias no sistema de refrigeração, equipou-se o sistema com um circuito fechado de bombeamento d'água e um sensor eletrônico de proteção, tal como sugerido por HUERTAS *et al.* (1995).

3.4.3 Ensaios em câmara com atmosfera saturada com dióxido de enxofre (SO₂): EN 13919/2002

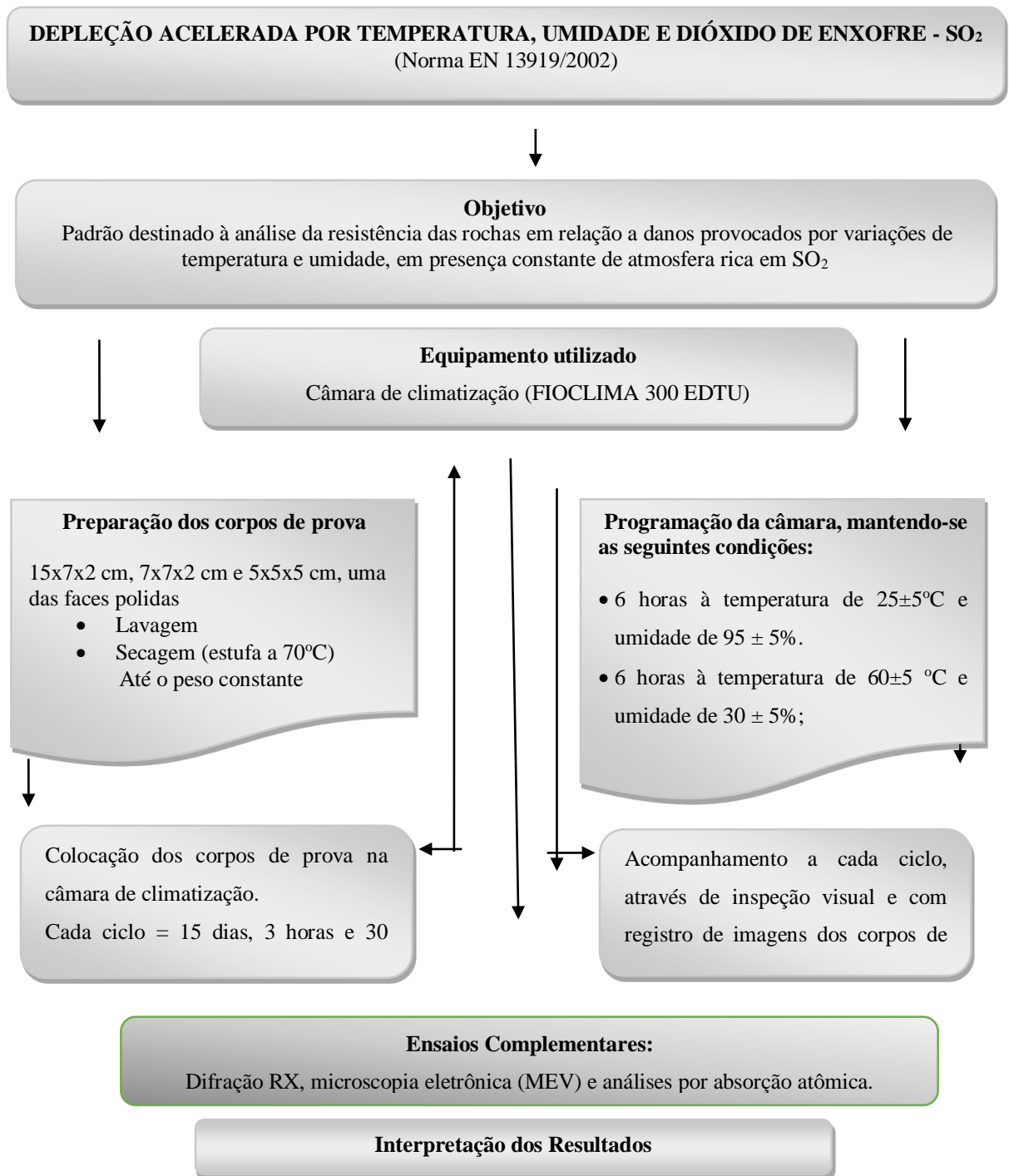
Na execução dos ensaios foram confeccionados 12 corpos de prova com 15x7x2cm e 7x7x2cm sendo uma das faces polida, e 5x5x5cm sem polimento, que foram testados em câmara climática FITOCLIMA 300 EDTU, em temperaturas estabilizadas entre 20 ± 5 °C até 70 ± 5 °C, permitindo o controle da umidade entre 30 ± 5 % e 95 ± 5 %. A metodologia foi desenvolvida no Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico (CEPGIST/Lisboa) para avaliação da resistência da superfície de placas líticas. Os ensaios do BB consistiram de ciclos com tempo total de 15 dias, 3 horas e 30 minutos. Cada ensaio teve 12 horas de duração, mantendo-se temperaturas de 25 ± 5 °C e umidade relativa de 95 ± 5 % durante 6 horas, seguindo-se 6 horas em temperatura de 60 ± 5 °C e umidade relativa de 30 ± 5 %. No ambiente interno da câmara é mantida uma condição atmosférica com 10 ppm de SO₂. O procedimento original sugere 100 ciclos, contudo concede liberdade de definição do número de ciclos e tempos de duração, a depender do material lítico em exame (ilustrações na figura 3.11).

Figura 3.40 Câmara de climatização (FITOCLIMA 300 EDTU) usada no ensaio



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 3.11 Fluxograma da metodologia dos ensaios de envelhecimento em câmara climática com atmosfera contendo 10 ppm de SO₂.



Fonte: Elaborado pela autora

Após a saída da câmara, os corpos de prova foram pesados antes (M_0) e após o ensaio (M_n), de modo a permitir a obtenção do percentual de perda de massa ($\Delta p\%$). As medidas intermediárias feitas durante o ensaio servem apenas para controle.

$$\Delta_p = \frac{M_n - M_o}{M_o} \times 100 \quad (\%)$$

onde:

Δp = perda de massa, em percentual

M_o = peso inicial da amostra;

M_n = peso da amostra ao fim do ensaio;

Considerando-se que as variações de densidade observadas para ensaios desta natureza são pouco relevantes (especialmente no caso de rochas carbonáticas) e que as observações visuais nem sempre são suficientes e capazes de permitir a distinção de pequenas variações cromáticas ou texturais, optou-se por se avaliar, além da evolução de massa (prevista na norma), os efeitos causados pela depleção do Bege Bahia em razão das condições impostas na câmara. Neste sentido, foram realizadas algumas técnicas complementares como difratometria RX e documentação de imagens por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3.4.4 Ensaio com soluções acidificadas: ABNT/NBR 13818/2007 – Anexo H

Os ensaios de resistência a ataques químicos (ABNT/NBR 13818/2007- Anexo H) consistem na aplicação de soluções ácidas (Tabela 3.5) diretamente na superfície das placas, para simular as consequências de sua exposição em ambientes atmosféricos agressivos. Desta forma, também se objetiva tecer sugestões para manutenção/limpeza das mesmas, quando aplicadas em fachadas externas. Foram utilizados 11 corpos-de-prova 13x13x2 cm, a partir de uma mesma placa comercial, dando-se sequência a corpos-de-provas com as substâncias acidificadas (Figura 3.12) e fluxograma operacional expresso na figura 3.13.

Tabela 3.5. Soluções ácidas (ABNT/NBR 13818/2007- Anexo H) e outras soluções (naturais) utilizáveis em ensaios de alterabilidade de materiais pétreos.

Reagentes Químicos	Concentração	Tempo de Ataque
Ácido Clorídrico (HCl)	3%	1080 h
Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	3%	1080 h
Ácido Nítrico (HNO ₃)	3%	1080 h
Água do Mar	-	1080h
Água de Chuva	-	1080 h

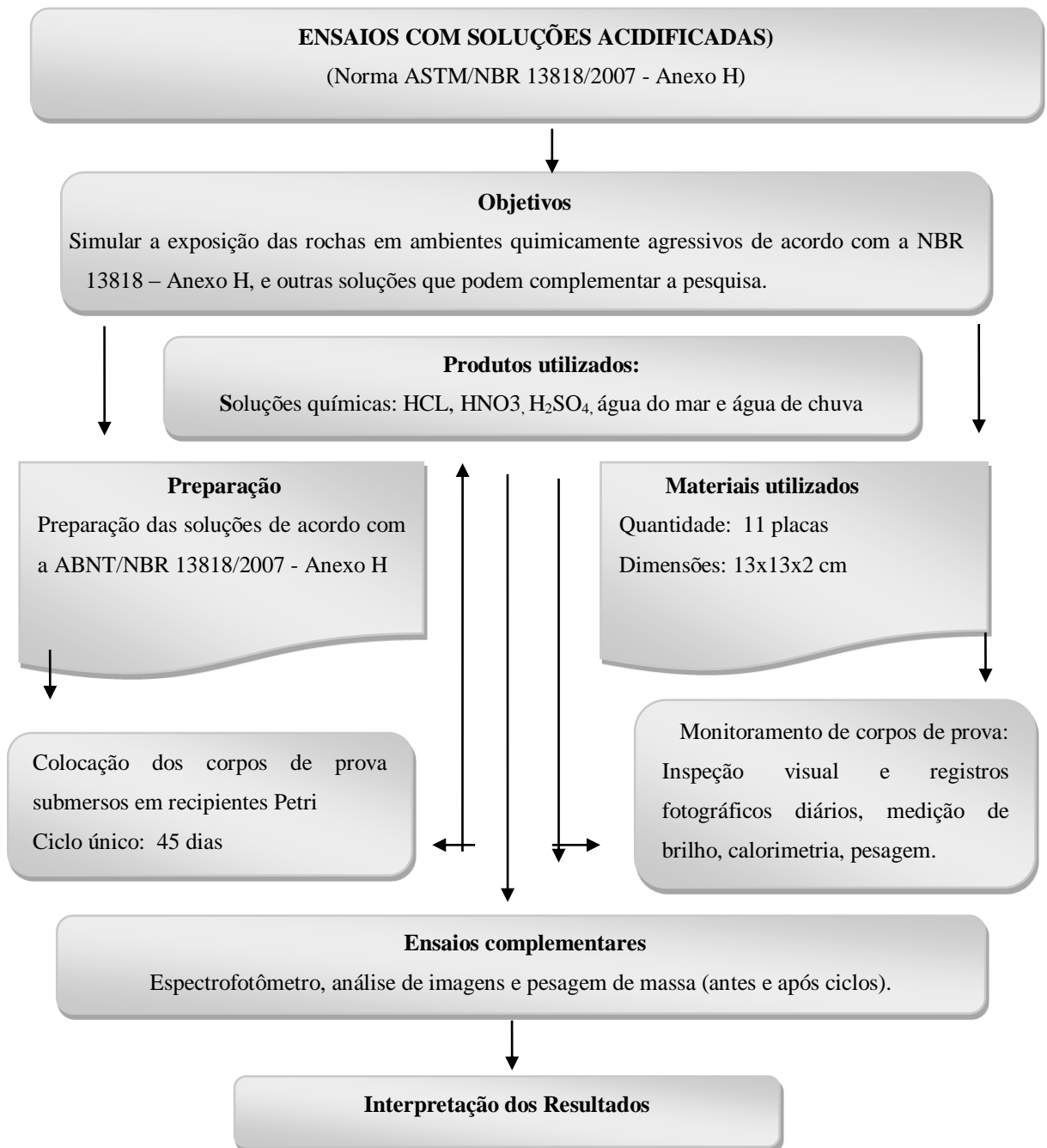
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.12 Corpos-de-prova do Bege Bahia com as substâncias acidificadas



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.13 Fluxograma da metodologia do ensaio com substâncias acidificadas.



Fonte: Elaborado pela autora

As alterações causadas por chuvas ácidas ou pela ação de soluções ácidas em rochas carbonáticas são muito discutidas na literatura. Aires-Barros (1991, 2001) mostra que seus principais mecanismos são: dissolução da calcita seguida por desagregação mecânica, com recristalização de sais solúveis em espaços porosos da rocha.

3.5 Análises complementares

3.5.1 Difractometria de raios-X (DRX)

As análises mineralógicas por difração de raios-X, foram realizadas no Laboratório do Instituto Técnico Superior (IST) do CEPGIST/Lisboa, envolvendo 12 amostras do Bege Bahia. Cada mineral apresenta um conjunto de reflexões próprias da sua estrutura cristalina e composição, tabuladas em uma base de dados padrões (*Pattern Diffraction Files – PDF files*). O equipamento utilizado foi um difratômetro PANALYTICAL X' PERT PRO (Figura 3.14), operando com varredura a $1 \Theta/\text{min}$ de 5 a 45Θ , com emissão $\text{KCu}\alpha$, voltagem de 40KV e corrente de 40 amperes. Os difratogramas foram produzidos sobre pó randomicamente distribuído no porta-amostra, com granulometria < 100 mesh.

Figura 3.14 Difratômetro RX PANALYTICAL X' PERT PRO utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.2 Fluxograma de Cálculos por estequiometria visando a composição mineralógica RT

Hematita = Fe_2O_3

Palygorskita = por ajuste simulativo

MgO Palygorskita = % Palygorskita / 6,8

$\text{MgO}_{\text{Anal.}} (\text{MgO}_{\text{Palyg.}} + \text{MgO}_{\text{Calc.}} (\text{diadócico})) = \Delta\text{MgO}$

$\Delta\text{MgO} \times 4,57 = \% \text{ Dolomita}$

$\text{CaO}_{\text{dol.}} = \Delta\text{MgO} \times 1,39$

$\text{CaO}_{\text{Anal.}} - \text{CaO}_{\text{dol.}} = \Delta\text{CaO} \times 1,786 = \% \text{ Calcita}$

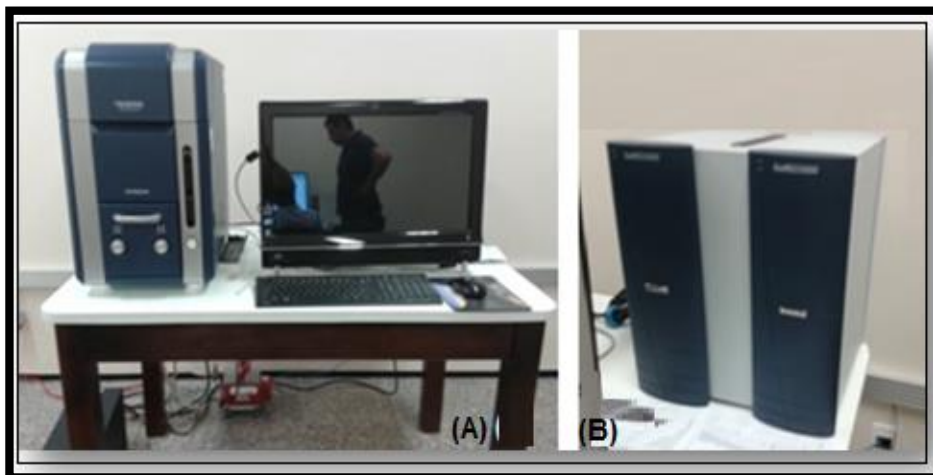
Quartzo = % RI - (Hematita + Palygorskita)

3.5.2 Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) / EDS.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento utilizado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos e suas composições químicas. Seu princípio é análogo ao de um microscópio óptico tradicional porém, neste caso, a luz e as lentes de vidro são substituídas por feixe de elétrons e lentes eletromagnéticas. Sua alta resolução assegura boa visualização em dimensões de 2 a 5nm, podendo chegar a resoluções < 1nm em equipamentos de pesquisa avançada (NAGATANI *et al.*, 1987).

Foram analisadas 4 amostras (placas lustradas) do BB, em equipamento HITACHI TM-3000 no DEGEO/UFC. O equipamento é controlado por um computador acoplado e dotado de um *software* que permite a visualização das imagens e o manuseio dos dados obtidos. O equipamento também está acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva - EDS, SWIFT ED-3000, da Oxford Instruments (Figura 3.14), responsável pelas análises semi-quantitativas produzidas em conjunto com o Mev.

Figura 3.15 Microscópio eletrônico de varredura (MEV/EDS) HITACHI TM-300 (A) e EDS SWIFT ED3000 (B), utilizados nesta pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.4 Aferição de pH

O pH é uma medida da intensidade do caráter ácido/básico de uma solução, expressando sua concentração em íons H^+ . O método utiliza um equipamento denominado peagômetro (ou medidor de pH), constituído basicamente de um potenciômetro e um eletrodo de hidrogênio (= eletrodo de pH).

3.5.5 Aferição de condutividade elétrica

As determinações de condutividade elétrica foram realizadas pelo método condutivimétrico, utilizando-se um equipamento CONDUTIV 7 para aferição.

3.5.6 Análises de Absorção atômica (chama)

O método consiste na atomização da amostra em chama, sendo geradas radiações com comprimentos de onda característicos de cada elemento a analisar (fonte- lâmpada de cátodo oco). A amostra lançada na chama atinge temperaturas que variam entre 2100-2300 °C. A quantidade de radiação absorvida é uma medida quantitativa da concentração do elemento em análise.

Durante a combustão, os átomos da amostra são reduzidos ao estado atômico. Um feixe de radiação é emitido por uma lâmpada cujo cátodo é feito do elemento a ser determinado. A radiação após atravessar a chama passa por um monocromador e atinge o detector. Os átomos livres, no estado fundamental, absorvem radiação por comprimentos de onda característicos de cada elemento. A redução de energia de radiação no comprimento de onda característico do analítico é a medida da quantidade desse elemento na amostra.

Todas as amostras foram aciduladas previamente com ácido nítrico a $\text{pH} < 2$ para preservação ao longo do tempo. O branco e todas as soluções-amostra contém água deionizada ($< 15 \mu\text{S}/\text{cm}$) e agente supressor de interferências:

Ca, Mg: nitrato de estrôncio: 5000 mg Sr/L

Na e K: cloreto céσιο: 1000 mg Cs/L

As amostras foram analisadas por espectrofotometria atômica num espectrofotômetro VARIAN, modelo AA 280FS (Figura 3.16). O Ca e Mg foram analisados por espectrofotometria de absorção atômica e o K e Na por emissão ótica.

Figura 3.16 Espectrofotômetro VARIAN, modelo AA 280FS



Fonte: Elaborado pela autora.

CAPÍTULO IV

ASPECTOS PETROGRÁFICOS

4.1 Generalidades:

A análise e caracterização petrográfica no âmbito das rochas ornamentais e de revestimento segue a norma ABNT, NBR 15845/2010, e representa um importante componente previsional no que se refere ao comportamento físico-mecânico e de alterabilidade das mesmas.

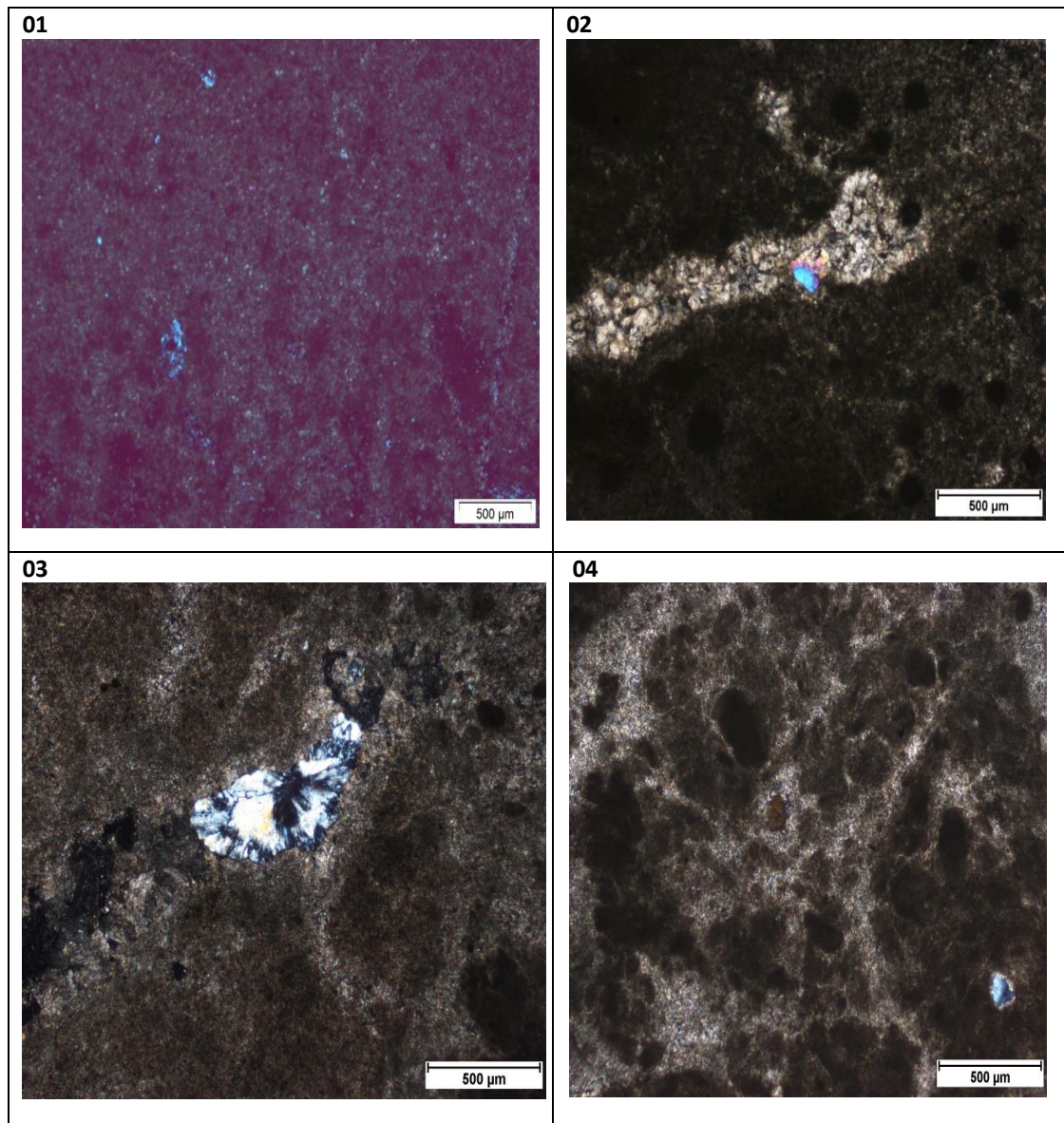
Foram descritas cinco seções as quais representaram o “travertino Bege Bahia” no estado “natural” (SAS 01 e SAS 02), com cinco anos de exposição (SAS-03) e com dez anos exposição (SAS-04).

Todas as seções apresentam uma densa matriz micrítica (<5 μ m) (Fotomicrografia 01), constituída preferencialmente por calcita, a qual suporta elementos diversos que por vezes atingem dimensões microesparíticas (5 μ m- 30 μ m) e esparíticas (>30 μ m) (Fotomicrografia 02). A matriz micrítica é composta por cristais de calcita ligeiramente escuros (alaranjado-amarronzados). O percentual micrítico compõe cerca de 70-75%, chegando a 90% na lâmina SAS 02, ocorrendo de maneira disseminada sem seguir estruturas predispostas (por ex., estratificação). Frações microespáticas e espáticas seguem presentes em bolsões, veios e circunscrevendo elementos diversos.

Quanto ao arcabouço, embora em pequenos percentuais, chegam a compor entre 5% a 10% das seções em geral, constituído por grãos de quartzo e outros minerais menos frequentes (ex. pontuações de barita).

As seções SAS 01 e SAS 02, exibem porosidade preferencialmente intercrystalina, entretanto, outros tipos como *vugular* e canais são também reconhecidas. Nas seções SAS 03- (5 anos) e SAS 04 (10 anos) acentuam-se as porosidades do tipo cavernosa e canais (Fotomicrografia 03), nestas duas últimas situações provavelmente o estado de alteração intempérica, ao longo do tempo, levou a uma deterioração dos elementos do arcabouço original da rocha, expondo de forma mais visível tais porosidades. O conjunto apresenta praticamente todos os tipos de porosidade não seletiva proposta por (CHORQUETTE & PRAY, 1970).

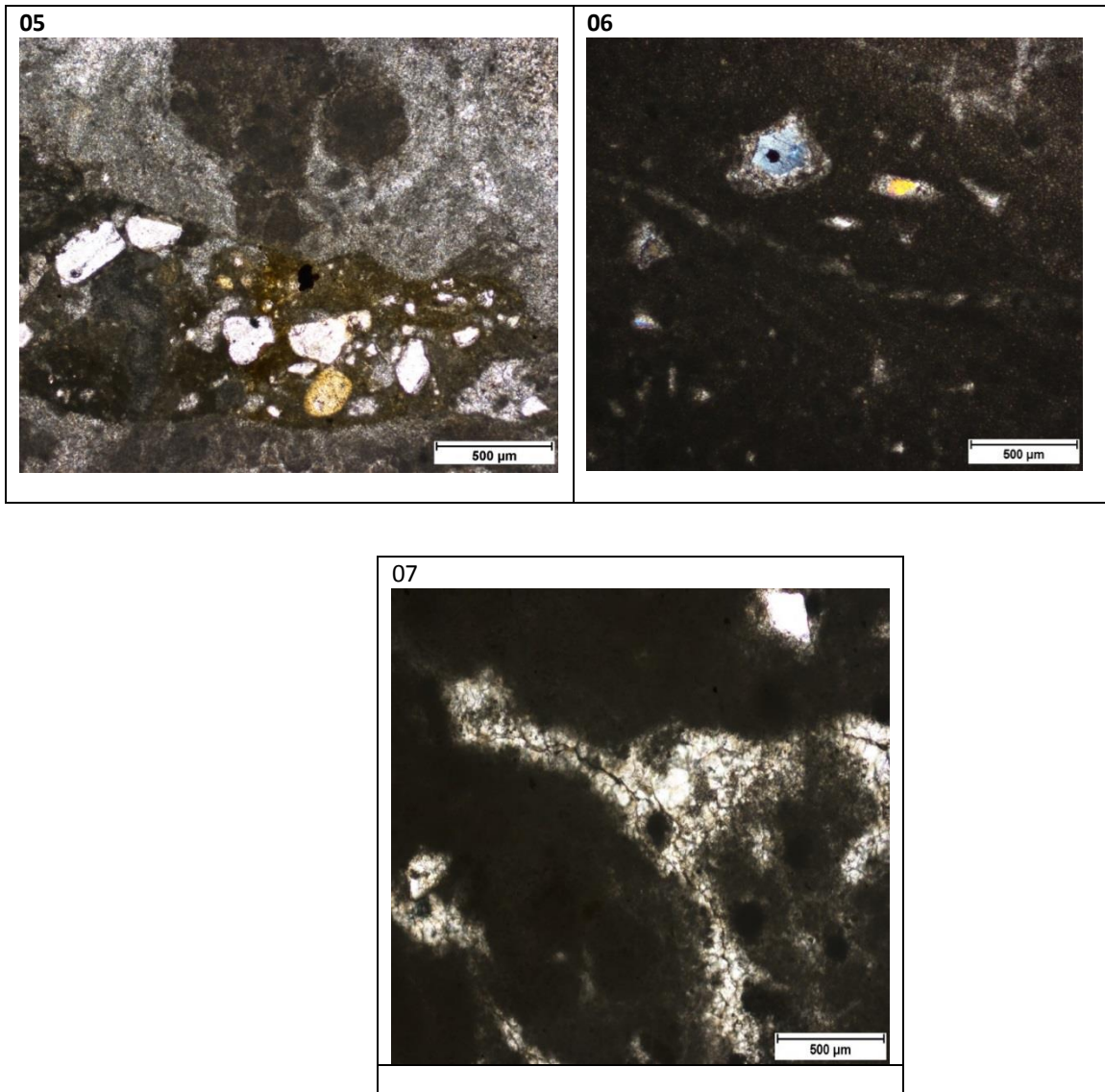
Prancha 4.1 Fotomicrografia 01 – Seção SAS 01 exibindo densa matriz micrítica composta por calcita. Luz Ortoscópica (LO); Fotomicrografia 02 – Seção SAS 02 exibe um “veio” de calcita espática e ao centro da seção de cor azul um grão de quartzo circundado por calcita, e todo o conjunto suportado pela matriz micrítica (LO); Fotomicrografia 03 – Seção SAS 03- (5 anos) com porosidade do tipo cavernosa e preenchimento parcial de calcita em lamelas similares a drusas (LO); Fotomicrografia 04 – Seção SAS 03- (5 anos): feições similares a elementos aloquímicos oncolíticos (LO); Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando os elementos aloquímicos, algumas feições similares a oncólitos circundados por calcita espática a microespática e litoclastos/intraclastos podem ser observadas (Fotomicrografias 04 e 05).

Prancha 4.2 Fotomicrografia 05 – Seção SAS 03- (5 anos) exibindo feições similares a elementos aloquímicos: intraclastos/litoclastos (LO); Fotomicrografia 06 – Seção SAS 01 apresentando grãos de quartzo com molduras de calcita microespática, cujas feições são típicas em calcretes/tufos (LO); Fotomicrografia 07 – Seção SAS 01 apresentando relíquia de filamentos vegetais parcialmente envoltos por calcita microespática na porção central mais escurecida da seção, representando feições encontradas em calcretes/tufos (LO); Fotomicrografia 08 – Seção SAS 02 exibindo “filões/veios” de calcita espática similares a canais. Luz Natural Polarizada (LNP).



Fonte: Elaborado pela autora.

Cabe ressaltar que em todas as seções estudadas, feições indicativas de origem tufácia e ou calcrete, são reconhecidas. Neste sentido, quartzo circundado por calcita espática ou microespática equidimensional formando moldura (Fotomicrografia 06), e veios preenchidos por calcita espática em direções diversas, similares a porosidade em canal (Fotomicrografia 07), associados a processos de dissolução e neoformação.

As ausências de indicativos do envolvimento destas rochas com processos de hidrotermalismo, como nos travertinos italianos e turcos, e adicionalmente a associação de elementos reconhecidos como de tufo e/ou de cunho pedogenético, descarta a possibilidade, pelo menos *stricto sensu*, de serem chamadas de travertinos, embora comercialmente recebam tal designação.

CAPÍTULO V

CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA ORLA LITORÂNEA DO RECIFE

A orla litorânea na região metropolitana do Recife (RMR) tem características similares às das dos municípios costeiros vicinais, formando uma metrópole densamente urbanizada. Neste domínio antropicamente vulnerável, onde ocorreu uma quase total erradicação de seus biomas originais, habitam mais de 500.000 pessoas. Outra característica óbvia e marcante é a incidência de *sprays* marinhos que degradam os revestimentos pétreos de edificações.

A formação de aerossóis (*sprays*) marinhos resulta da agitação da superfície do mar causada pelo vento (FITZGERALD, 1991; MORCILLO *et al.*, 2000), formando em seguida gotículas e até espumas (FITZGERALD, 1991; TAYLOR & WU, 1992). Na zona de quebraimento das ondas estas bolhas são mais numerosas, resultando do aprisionamento do ar na superfície da água. Sobretudo em domínios tropicais, o alto calor específico destas águas é um catalisador na formação de aerossóis, produzindo *sprays* enriquecidos em ácidos carbônico e sulfúrico, a partir de CO₂ e SO₂ contidos na atmosfera, e que terminam propiciando espécies químicas iônicas e fortemente reativas.



Morcillo *et al.* (2000) descrevem que estas partículas suspensas no ar, sob forma sólida ou líquida, têm dimensões que variam de 0,1 a 400 µm. Usualmente, elas estão agrupadas em dois grandes grupos, denominados de partículas depositáveis ($\varnothing \geq 10 \mu\text{m}$) ou partículas flutuantes ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$).

- (i) $\varnothing > 20 \mu\text{m} \rightarrow$ jorro/gotículas, formando espuma;
- (ii) $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ a $\varnothing < 20 \mu\text{m} \rightarrow$ jorro de gotículas, formando película;
- (iii) $\varnothing > 2 \mu\text{m}$ a $\varnothing = 10 \mu\text{m} \rightarrow$ gotículas em forma de película;

5.1. Mecanismos atmosféricos atuantes

A atmosfera é uma camada relativamente fina de gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra (AIRES BARROS, 1991). Ela é essencial à vida e ao funcionamento ordenado dos processos físicos e biológicos sobre o planeta. Os agentes atmosféricos que atuam diretamente nas rochas são: umidade; insolação e resfriamento noturno; vento e energia cinética; constituintes do ar e poluentes atmosféricos gasosos e aerossóis

- i. Umidade: na forma de chuva, névoa ou como a própria umidade relativa do ar; Temperatura do ar, que pode acelerar as reações químicas;
- ii. Insolação e resfriamento noturno: que podem provocar a condensação do vapor d'água existente na superfície das rochas, afetar taxas de precipitação de espécies químicas, ou acentuar a evaporação;
- iii. Vento e energia cinética: que promovem ação abrasiva sobre a superfície das rochas;
- iv. Constituintes do ar e poluentes atmosféricos (gasosos e aerossóis), que funcionam como agentes catalizadores de ataques químicos.

Além desses fatores, podem-se acrescentar outros como a temperatura da superfície lítica exposta, e o tempo de molhamento.

Conforme Aires Bairros (1991) a atmosfera e seus componentes sólidos, líquidos e gasosos, atuam sobre as rochas por meio de mecanismos físicos (umedecimento, cristalização de sais, etc.) provocados por variações higrométricas, por meio de reações químicas (desde sulfatação de rochas carbonáticas, a fenômenos de hidrólise em rochas silicáticas), e por intervenções biológicas promovidas por microrganismos diversos: bactérias, algas, fungos, líquens, musgos. Do conjunto destes mecanismos dependem os tipos de alterações que ocorrem na superfície de placas líticas. Nas intervenções úmidas a atmosfera afeta as edificações através de chuva e *sprays*, enquanto nas deposições secas os componentes da atmosfera normal ou contaminada atingem as edificações sob a forma de particulados (aerossóis, tais como fuligens transportadas por ação eólica).

A poluição atmosférica é importante e complexa, pois os poluentes podem advir de diversas substâncias químicas, existentes na forma de gases (aproximadamente 90%, em peso), líquidos ou particulados. Podem ser lançados diretamente na atmosfera (poluentes primários) ou podem ser nela criados (poluentes secundários, sob a influência da radiação eletromagnética

do sol). Os particulados e *sprays* integram a lista dos elementos poluentes mais prejudiciais para as rochas de revestimento. Podem ser definidos como uma mistura de partículas suficientemente pequenas ($0,005\ \mu\text{m}$ até cerca de $100\ \mu\text{m}$) para serem dispersadas na atmosfera, sob a forma de sólidos (poeiras naturais ou industriais) ou de líquidos em gotículas. Estas partículas podem ser transportadas em suspensão até dezenas ou centenas de quilômetros de seus locais de origem.

Muitas vezes são os fluxos de calor entre o ambiente atmosférico e as rochas que favorecem ou minimizam o depósito de líquidos e partículas na superfície das rochas, promovendo o ingresso de vapores em seus espaços porosos, facilitando migrações de sais, formação de eflorescências, microfissuramentos supergênicos, e condições adequadas ao desenvolvimento de organismos.

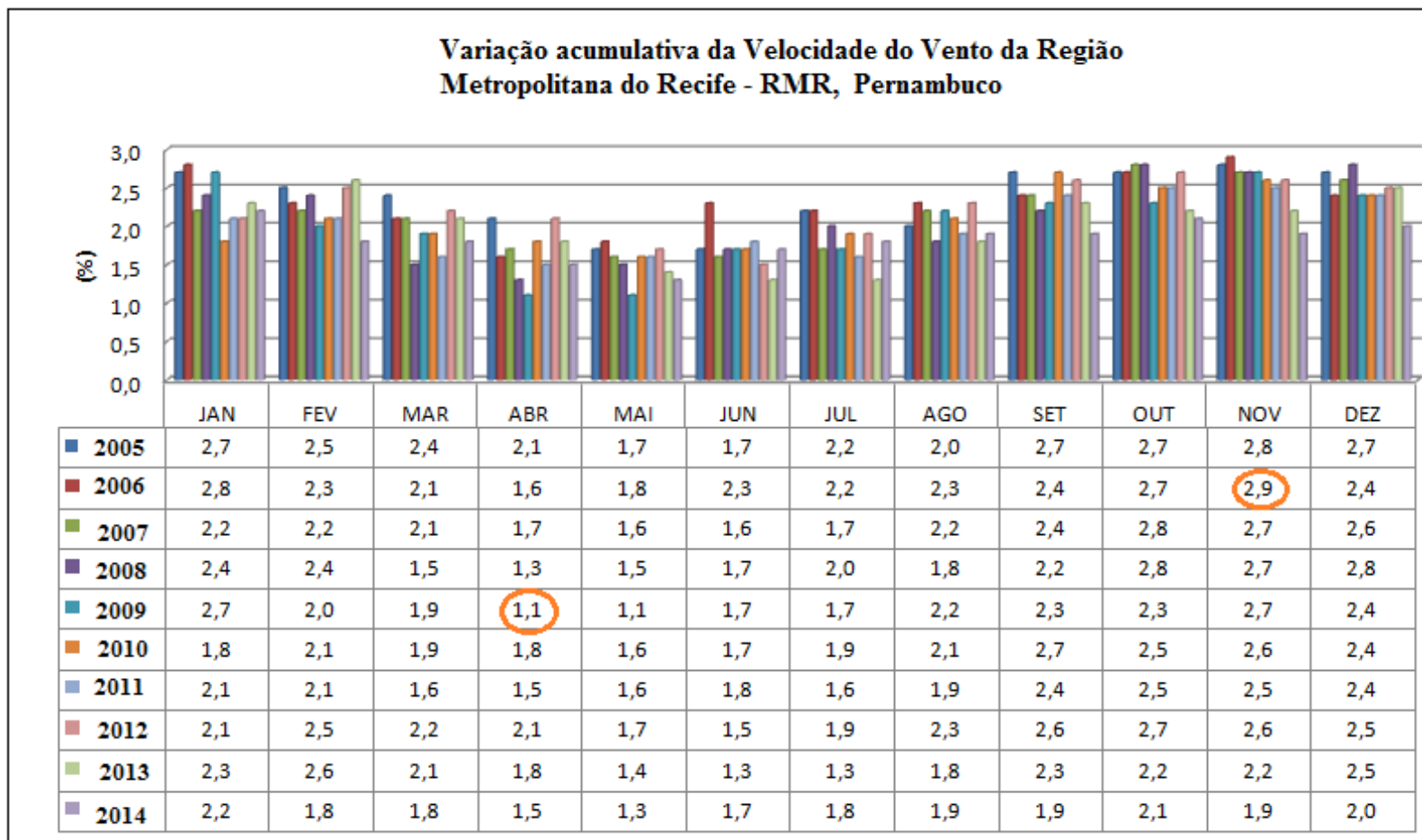
Na prática, o tempo de molhamento pode ser determinado a partir dos dados meteorológicos de temperatura e umidade relativa. Este tempo seria o período em que a umidade relativa é maior em temperaturas superiores a 0°C . O valor, assim determinado, pode ser utilizado para estimar o período de tempo cineticamente decisivo durante o qual a degradação por atmosfera salina ocorre em ambientes externos.

5.2. Parâmetros atmosféricos condicionantes na orla litorânea do Recife:

5.2.1. *Influência da velocidade dos ventos*

O vento tem grande influência no transporte de *sprays* para o interior do continente (MORCÍLIO, 2000). Na RMR a velocidade média dos ventos atinge valores máximos (2,9 m/seg) no segundo semestre anual e valores mínimos (1,1 m/seg) durante o primeiro semestre anual. (Figura 5.1).

Figura 5.1. Registros de velocidades dos ventos na RMR (2005 a 2014).

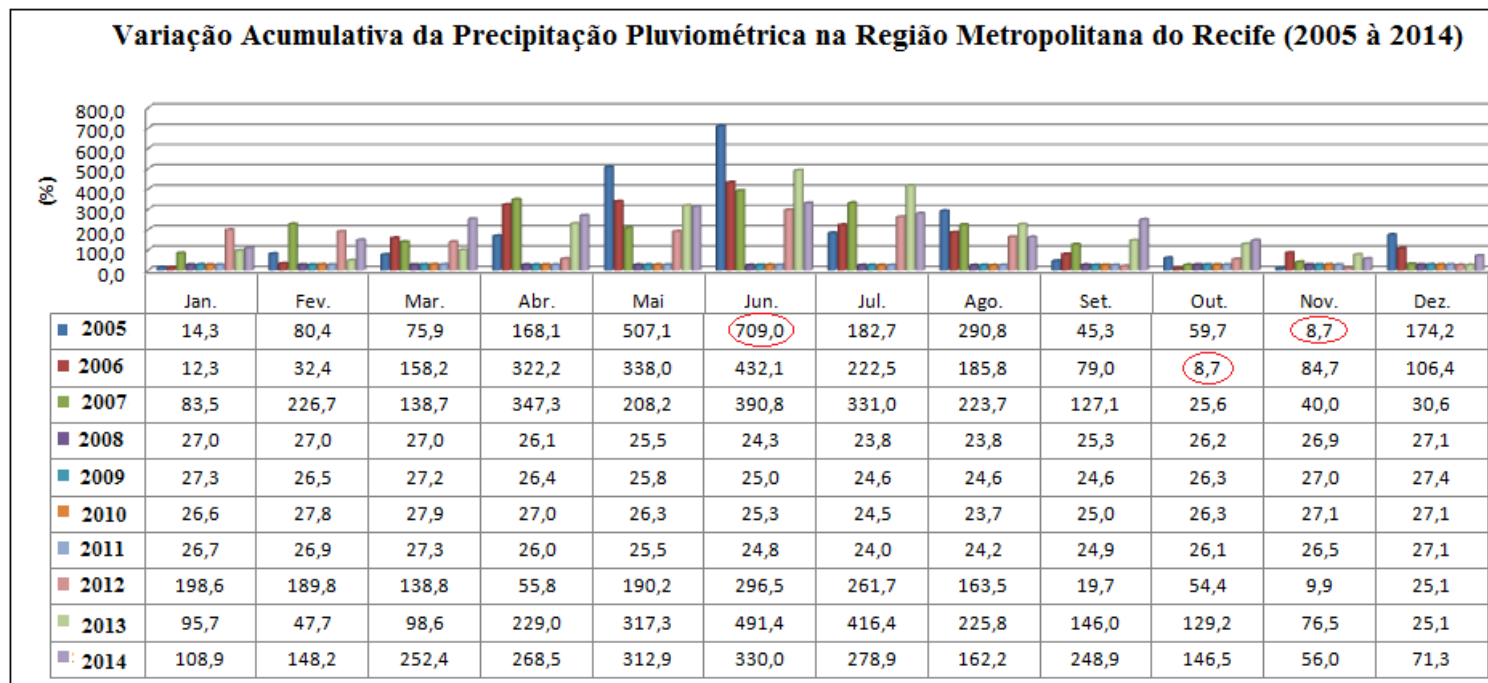


Fonte: Laboratório de Meteorologia de PE (SEOMA/INMET).

5.2.2. Pluviometria

Na RMR o clima é tropical, com variações de temperatura e umidade diretamente ligadas ao regime pluviométrico, com amplitude média da temperatura diária em torno de 8°C. Os índices de precipitação pluviométrica média ao longo do ano (Figura 5.2) colocam em evidência uma sazonalidade compreendendo um período de baixa pluviometria (novembro/2005 e outubro 2006) e um período mais chuvoso (Junho/2005).

Figura 5.2. Precipitação pluviométrica na RMR, de 2005 a 2014.



Fonte: Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (SEOMA/INMET).

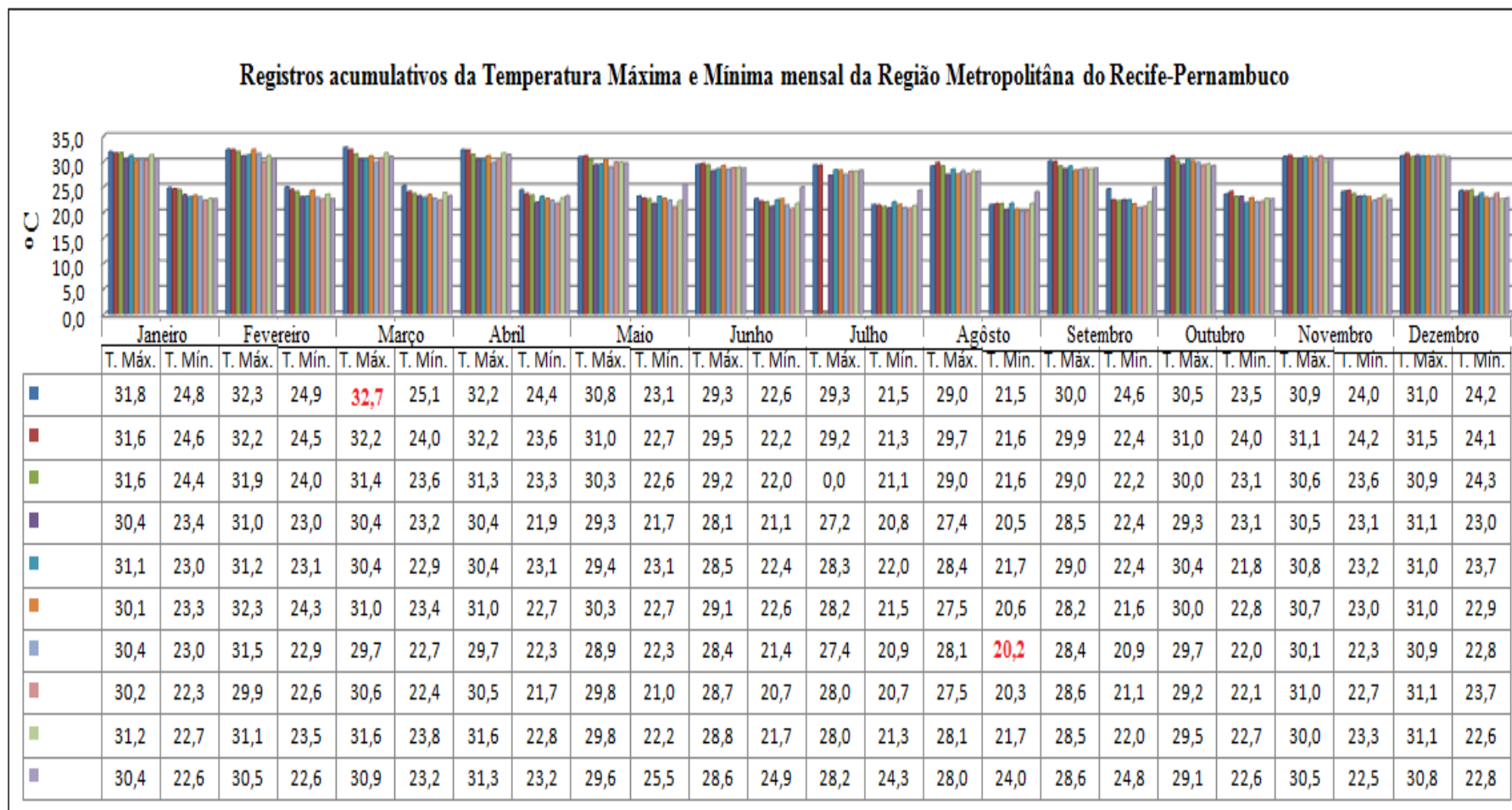
A ocorrência de tempestades na RMR é relativamente rara e com intensidades menores do que aquelas que ocorrem no Sul do Brasil, porém podendo se repetir algumas vezes durante o dia. O elevado calor específico da água e as grandes taxas regionais de evaporação deixam sempre a possibilidade de choques térmicos, vinculáveis à deflagração de ionização, hidrólise, acidificação das águas, corrosão e salinização.

5.2.3. Temperatura

A temperatura mínima anual na área litorânea da RMR varia entre 20°C a 24°C, com máximas entre 27°C e 32°C (Figura 5.3). Entretanto, de toda forma, os revestimentos pétreos se expandem quando aquecidos e se contraem quando resfriados. Esta variação térmica é considerada como um fator importante na alteração de placas pétreas nas edificações.

A cor e a refletância do material alteram a capacidade de absorção de calor, responsável pelo aumento da temperatura. Os materiais pétreos escuros absorvem mais calor que os claros. O incremento de temperatura relativo ao aquecimento solar é função do ângulo superfície receptora.

Figura 5.3. Registros de temperaturas máximas e mínimas na RMR (2005 a 2014).



Fonte: Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (SEOMA/INMET).

Segundo Frascá *apud* Feilden (2002), a tensão induzida nos materiais de construção pelas mudanças de temperatura é dependente dos seguintes fatores:

- (i) Magnitude das mudanças dimensionais absolutas do material, que é produto das suas dimensões multiplicadas pelo coeficiente de dilatação térmica decorrentes dos gradientes de temperatura e de efeitos das mudanças relativas de umidade;
- (ii) Módulo de elasticidade do material ou sua susceptibilidade para quebra ou deformação sob pressão;
- (iii) Variações de umidade devida à evaporação; e
- (iv) Movimento do revestimento, por sua conexão com outros elementos da estrutura do edifício.

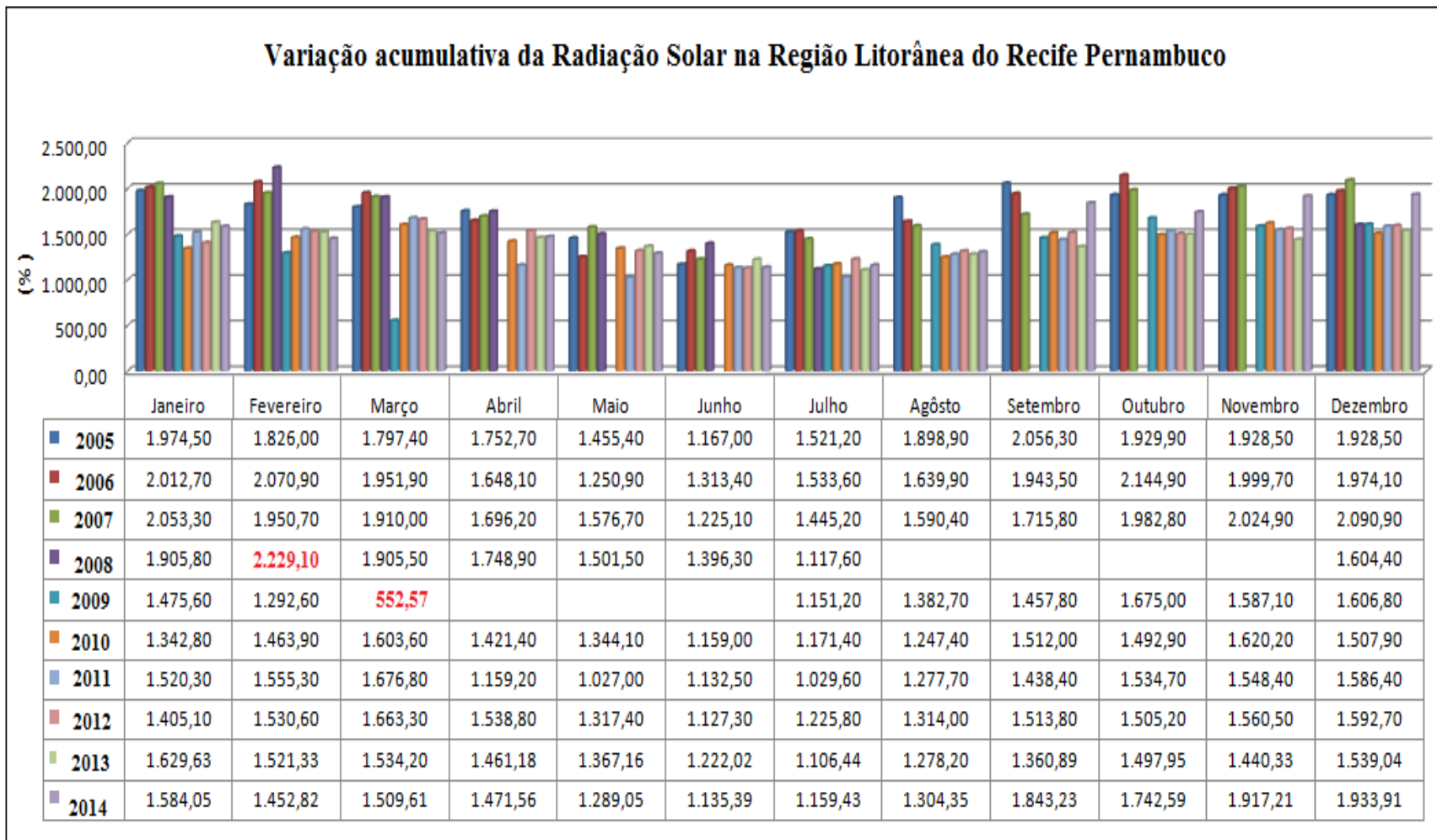
Os ventos exercem pressões variáveis sobre os revestimentos de uma fachada em função de sua intensidade e duração e em relação à superfície lítica exposta ao agente atmosférico. Os esforços a que são submetidos os obstáculos ao curso dos ventos são calculados pelas normas NBR 6118 e 6123 (ABNT, 1980) considerando-se, sobretudo, as esteiras de sucção que se desenvolvem nos cantos das edificações e nas fachadas de sotavento. Este parâmetro é fundamental na determinação dos esforços de flexão, e prioritários no dimensionamento do tamanho máximo de placas aplicadas em um sistema de fachadas aeradas.

Outras características predominantes no panorama climático da RMR, com exceção das áreas topograficamente mais elevadas, são: baixos índices de nebulosidade, ventos alísios que sopram do quadrante sudeste, forte insolação e altas taxas de evaporação.

5.2.4. Radiação solar e umidade relativa do ar

A elevada taxa de insolação mensal na RMR é consequência do seu posicionamento sub-equatorial, sendo mais intensa no mês de fevereiro (2008) e menos intensa no mês março (2009), como ilustrado na Figura 5.4.

Figura 5.4. Registros da radiação solar na RMR (2005 a 2014).

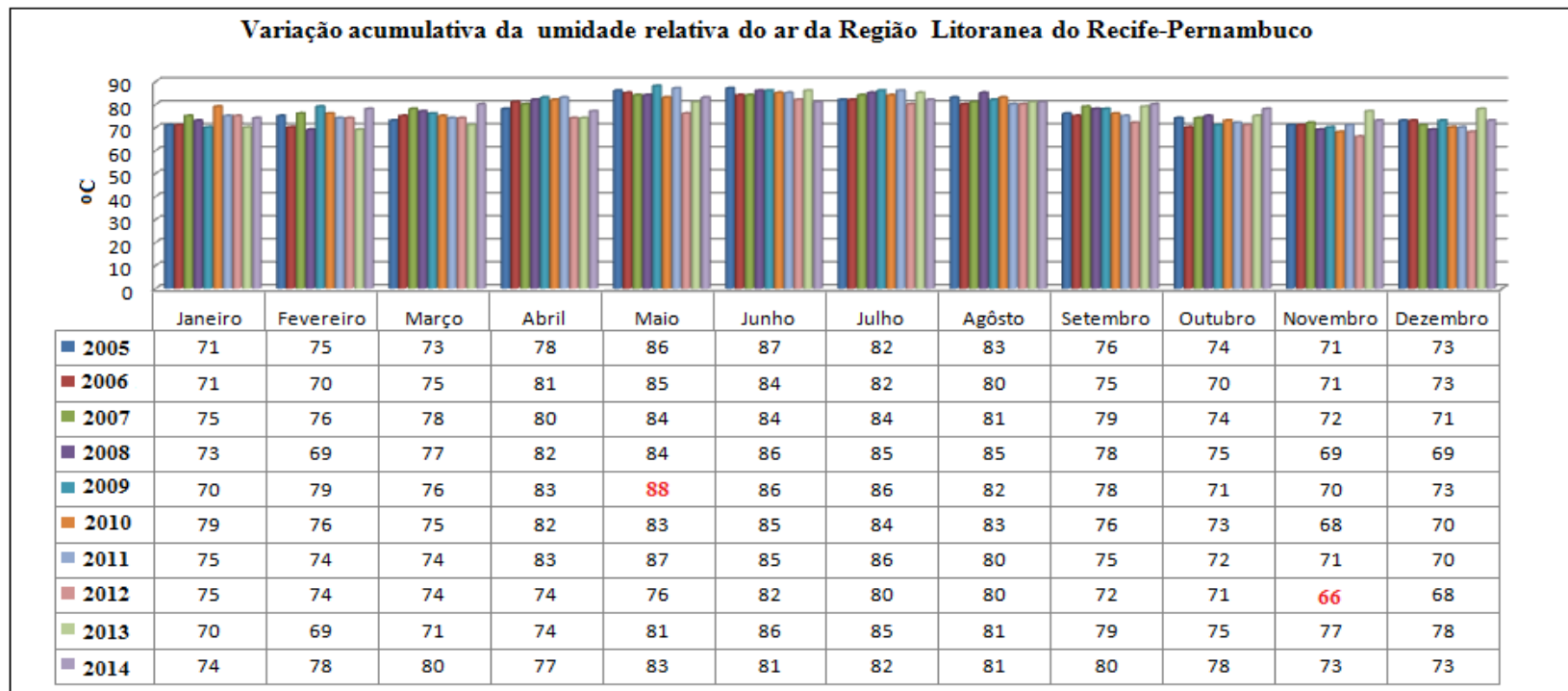


Fonte: Laboratório de Meteorologia de PE (SEOMA/INMET).

5.2.5 Umidade Relativa do ar

Umidade do ar é alta na RMR, com média anual de 88%, ocorrendo a máxima anual no mês de maio/2009 e a mínima anual em novembro/2012 (Figura 5.5).

Figura 5.5. Registros da umidade relativa do ar na RMR (2005 a 2014).



Fonte: Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (SEOMA/INMET).

Segundo Aires-Barros (1991) o ciclo térmico diurno, associado à variação da umidade específica do ambiente, provoca ciclos de condensação/evaporação sobre revestimentos pétreos. De acordo com a rapidez com que as construções são executadas explica a grande quantidade de umidade residual no interior das vedações verticais, a qual evapora pouco a pouco para o exterior e/ou para o interior (Flain & Cavani, 1994). Além disto, a ocupação das edificações e o aquecimento interior das mesmas geram abundante quantidade de vapor d'água que migra parcialmente para o exterior (Flain & Cavani, *op. cit*). A água pode ainda penetrar através das vedações verticais exteriores por capilaridade. Portanto, os efeitos da umidade e da chuva sobre revestimentos externos costumam estar diretamente ligados ao aparecimento de patologias como os manchamentos, comprometendo a estética predial.

CAPÍTULO VI

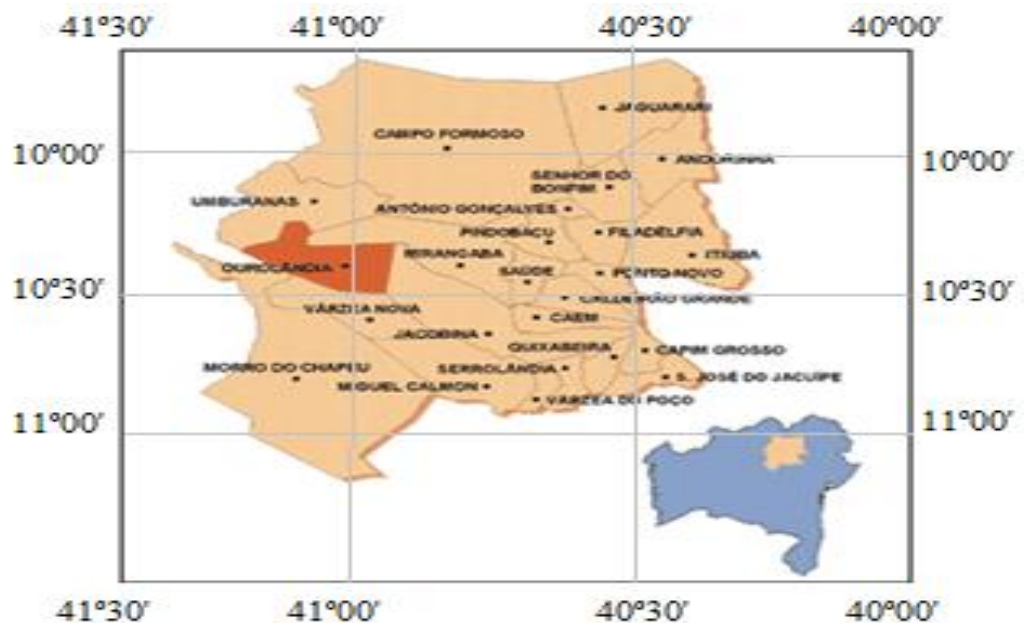
CONTEXTO GEOLÓGICO DO CALCÁRIO BEGE BAHIA

6.1 Generalidades:

Branner (1910), que publicou as primeiras informações sobre a caracterização geológica da unidade lítica por ele denominada de Calcário Caatinga, não imaginava que, décadas mais tarde, essa litologia fosse a fonte de uma das rochas ornamentais de maior aceitação no mercado brasileiro – o Bege Bahia –, com grande possibilidade de inserção a curto prazo no mercado norte-americano.

O “Mármore” Bege Bahia é uma variedade de calcário secundário do tipo calcarete/travertino, com ampla aceitação no mercado de rochas ornamentais do Brasil e do exterior (RIBEIRO *et al.*, 2002), sendo muito utilizado na construção civil, sobretudo em revestimentos externos e acabamentos internos. Seus principais polos de exploração, em ordem crescente de importância, são os de Curral Velho (Campo Formoso), Mirangaba e Ourolândia, todos situados no estado da Bahia (Figura 6.1).

Figura 6.1 Mapa da área de afloramentos do Calcário Bege Bahia em Ourolândia-BA



Fonte: Elaborado pela autora.

Desde sua exploração no início dos anos 50 do século XX, o Bege Bahia (BB), hoje também conhecido como Travertino Nacional, iniciou-se a partir da utilização da rocha como pedra portuguesa para calçamento. Porém, no final desta mesma década passou a ser extraído em blocos para recorte de chapas e utilização como mármore. Em sua trajetória de quase cinquenta anos de comercialização, conquistou o mercado brasileiro e internacional, por se tratar de uma rocha ornamental com padrão cromático de fácil aceitação, que transmite leveza e sua aplicação confere elegância e sofisticação aos ambientes.

Desde sua inserção no mercado, o BB recebeu diversos cognomes, a começar pela denominação de Mármore Marta Rocha, numa analogia entre a beleza da rocha e da então Miss Bahia cuja fama, à época, corria o mundo. No entanto, veio a ser consagrado, anos mais tarde, pelo nome que reúne a sua cor ao nome do seu estado produtor Mármore Bege Bahia. (BRAZ & MAGALHÃES, 2002).

6.2 Geologia Regional e Local

Almeida (1977) e Ribeiro *et al.* (2002) descreveram o Craton do São Francisco, uma das maiores unidades geotectônicas da Plataforma Sul-Americana, consolidada no ciclo Brasileiro. Sobre este craton, depressões de grande amplitude foram preenchidas por litologias decorrentes de sedimentação química com contribuição terrígena subordinada. Nelas se desenvolveram as bacias sedimentares proterozóicas de Irecê, Utinga e Salitre. As rochas dobradas destas sequências carbonático-pelíticas sedimentadas em mares epicontinentais, de natureza anquimetamórfica, constituem a maior parte do Grupo Una do Super-Grupo São Francisco.

Localizada no NW do estado da Bahia, a parte da Bacia do Salitre compreendida entre as coordenadas 9°52'30"- 11°15'00"S e 40°22'30"- 41°15'00" W, se situa a NE da bacia sedimentar de Irecê e a oeste da região da Serra de Jacobina. Segundo Barbosa & Dominguez (1994; 1996) e Ribeiro *et al.* (2002) a geologia desta área (cerca de 14.440 Km²) é constituída por rochas do Arqueano ao Proterozóico Superior.

A cobertura sedimentar do Terciário/Quaternário compreende eluviões terrígenas e sedimentos da Formação Caatinga, a unidade hospedeira do Bege Bahia (Figura 6.2). As fácies mais comuns desta formação são os calcários branco-rosados a cinza-esbranquiçados, por vezes

beges a amarelados, fragmentários a compactos, cujos afloramentos costumam apresentar morfologias de escarpas rochosas.

Na Formação Salitre são ainda citadas fácies de calcários argilosos, calcários pulverulentos e brechas calcárias de cor creme, estas contendo seixos heterogêneos com dimensões e formas variadas, oriundas de fontes ígneas ou metamórficas da Formação Bebedouro. Fósseis de algas, gastrópodes e moluscos (lamelibrânquios), íntegros, podem ser esparsamente encontrados nas fácies carbonáticas da Formação Salitre.

Figura 6.2 Escarpa formada por Calcários Bege Bahia, município de Ourolândia-BA.



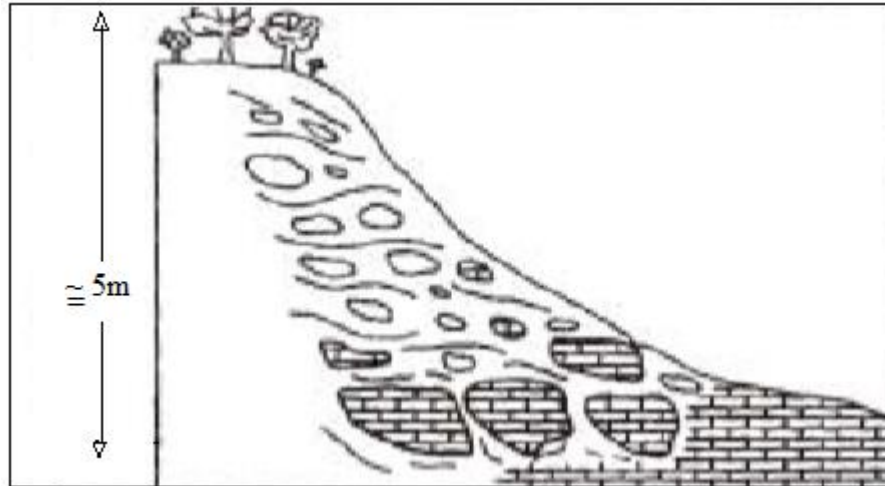
Fonte: Ribeiro et al. (2002).

As espessuras (*lato sensu*) da Formação Caatinga variam entre 20 a 30 metros, dependendo da paleotopografia do substrato de calcários da Formação Salitre, adelgaçando-se nos domínios de seus contatos discordantes entre si.

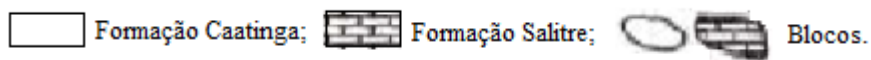
O processo de formação dos calcários Bege Bahia, gerando tonalidades mais claras a mais escuras, se desenvolveu a partir da alteração de rochas carbonáticas proterozóicas, cuja alteração supergênica gerou soluções enriquecidas em bicarbonato de cálcio, precipitando-se o carbonato de cálcio *a posteriori*, ao longo do período Tércio-Quaternário. Estes depósitos, em parte pedogênicos, parecem ter sido formados próximos a morfologias com ressaltos topográficos tabulares (platôs), em condições coluvionares, passando a possivelmente lacustres (alimentadas por ressurgência das águas bicarbonatadas) em depressões periféricas que costumam acompanhar este tipo de relevo topográfico. As variações laterais de fácies, desde a Formação

Salitre aos carbonatos da Formação Caatinga (Figura 6.3), como sugeridas por Ribeiro *et al.* (2002), permitem estas inferências. Figura 6.4.

Figura 6.3 Relação espacial entre as Formação Salitre e Caatinga



Legenda:



Fonte: Ribeiro et al. (2002).

Figura 6.4 Calcário Salitre ao canto inferior direito da foto, contornando por fragmentos do calcário Caatinga, Perto da cidade de Ourolândia.



Fonte: Ribeiro et al. (2002).

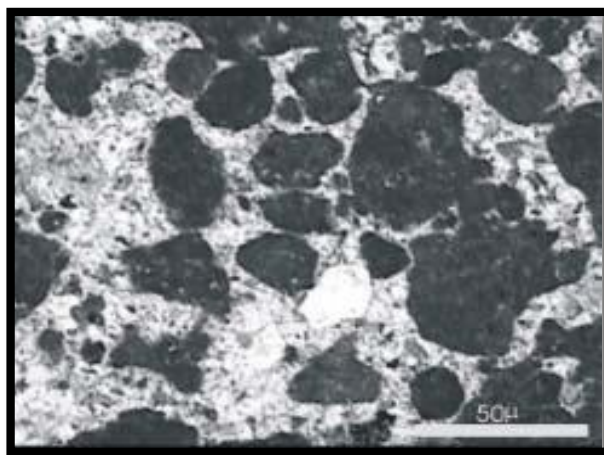
Wright & Tucker (1991) definem calcretes como rochas continentais formadas pela precipitação supergênica de carbonato de cálcio, formando depósitos nodulares, friáveis a litificados. São denominados de calcrete pedogênico ou pedogenético quando formados dentro ou logo abaixo da zona vadosa ou capilar, a poucas ou algumas dezenas de metros abaixo da superfície. De uma forma geral, Penha (1994) e Ribeiro *et al.* (2002) indicam que os calcretes da Formação Caatinga são constituídos de cimento micrítico, com neomorfização parcial para microespato ou pseudo-espato, às vezes associados a dolomita e/ou sílica. Sob erosão cárstica, podem apresentar cavidades internas, vazias (Figura 6.5) ou preenchidas por solos residuais. São relativamente frequentes texturas micro-brechadas, constituídas de litoclastos carbonáticos subangulosos, que indicam o transporte a curtas distâncias destes elementos, e sedimentação em ambientes pelíticos (Figura 6.5).

Figura 6.5 Cavidades vazias por dissolução cárstica do Calcário Bege Bahia.



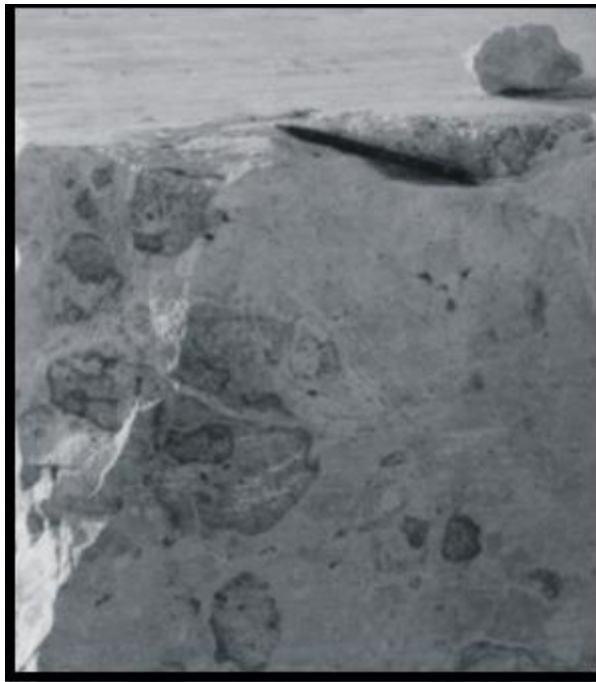
Fonte: Ribeiro et al. (2002).

Figura 6.6 Textura microbrechada em calcrete da Formação Caatinga, ao norte de Ourorândia-BA.



Fonte: Ribeiro et al. (2002).

Figura 6.7 Nódulos de sílex em calcrete da Formação Caatinga



Fonte: Ribeiro et al. (2002).

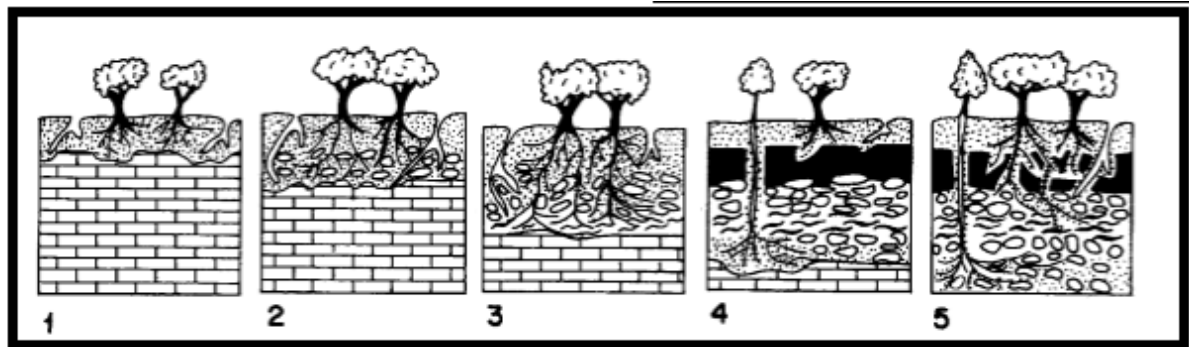
6.3 Formação de um perfil calcrete

Ribeiro et al (2002) o perfil de um solo residual forma-se a partir do intemperismo *in situ* da rocha-mãe. Para o calcrete o mecanismo é idêntico, mas com um particular: a rocha preexistente tem que ser um calcário. Com a sua desintegração mecânica e intemperização químico-biológica, forma-se o rigolito numa proporção que supera, em intensidade, os processos ou mecanismos de transporte.

Penha (1994) discorre sobre algumas condições necessárias à formação de um perfil calcrete, assim resumidas:

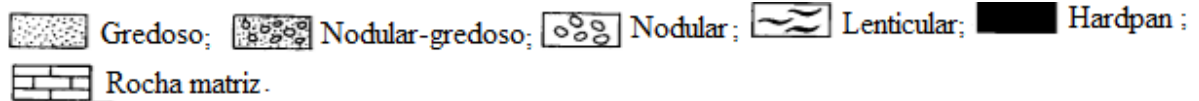
- (i) Clima árido a semi-árido;
- (ii) Pluviosidade de cem a quinhentos milímetros anuais;
- (iii) Zona vadosa, sua área ou próxima à superfície;
- (iv) Terreno plano, horizontal ou quase horizontal;
- (v) Substrato estável e espesso, que permita o desenvolvimento de processos diagenéticos;
- (vi) Tempo suficiente para permitir a ação de processos pedogenéticos.

Figura 6.8 Evolução de um perfil de calcrete.



Legênda:

Horizontes



Fonte: Penha (1994)

Onde:

Estágio 1 – horizonte gredoso - intemperismos físico, químico e biológico atuam sobre o calcário de Formação Salitre. Migrações descendentes de águas meteóricas e ascendentes de águas do lençol freático acarretam dissolução parcial e faturamento da rocha preexistente. A taxa de sedimentação in situ é superior à de material transportado, condição que leva ao desenvolvimento do solo carbonático no seu horizonte gredoso;

Estágio 2 - horizonte nodular-gredoso – proliferação de vegetais e microorganismos no solo gredoso formenta a ação de processos pedogenéticos, com conseqüente aumento da porosidade da rocha original. Com a maior percolação das águas, forma-se um material frável e pulverulento, com seixos e matações de calcário. O horizonte de porosidade e permeabilidade mais alta é caracterizado como nodular-gredoso;

Estágio 3 – nodular-gredoso-lentícular ~há o incremento dos processos de dissolução e retrabalhamento da rocha-mãe. Há reprecipitação e acúmulo de carbonato de cálcio, com conseqüente espessamento dos horizontes gredoso e nodular-gredoso, já formados. É nesta fase que o movimento lateral das raízes dá início à formação do horizonte lenticular. Dá-se então o amadurecimento do perfil, que possa a apresentar horizontes gredoso, nodular-gredoso, nodular e lenticular;

Estágio 4 – gredoso-hardpan-nodular-lenticular – dá-se a cimentação dos horizontes, com a consequente formação do horizonte hardpan, que pode ser maciço, no nível gredoso, ou nodular, no nível nodular (ou nodular-gredoso). Recristalização, dolomitização e silicificação sucessivas contribuem para fossilização do perfil, fase em que a matriz já estaria recristalizada para microespato ou substituída em parte por sílica;

Estágio 5 – calcrete – uma vez litificado, o perfil carbonático já é um calcrete. Retrabalhamento in situ, na presença de água e sob ação de atividade orgânica, e novos processos de dissolução tornam o horizonte hardpan brechado. Este retrabalhamento do perfil conduz à formação de um perfil composto (PENHA. 1994).

6.4 Caracterização comercial

A designação “Mármore Bege Bahia” corresponde a uma variedade de calcretes da Formação Caatinga, quando seu grau de consolidação lítica é elevado e a rocha apresenta propriedades físico-mecânicas de um mármore (Tabela 6.1).

Tabela 6.1. Características físico-mecânicas do Calcário Bege Bahia.

Caracterização Físico-Mecânicas	Valores de referencia
Massa específica aparente	2.606 kg/m ³
Porosidade aparente	2,62%
Absorção d'água	1,01%
Desgaste Amsler	1,31%
Resistência à compressão uniaxial simples	137,3 Mpa
Resistência à compressão uniaxial após gelo /degelo	101,6 Mpa
Resistência ao impacto	0,41 m
Modulo de deformabilidade estático	67,87 GPa
Coefficiente de dilatação térmica linear	13,8 mm/ m x 10 ⁻³
Resistência à flexão	16,65 MPa

Fonte: Secretária da Indústria Comércio e Mineração da Bahia - Superintendência de Indústria e Mineração

CAPÍTULO VII

ASPECTOS DESCRITIVOS DE ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DETECTADOS EM REVESTIMENTOS DE EDIFICAÇÕES ANALISADOS (ORLA DO RECIFE)

7.1 Formas de Alterações de Rochas Carbonáticas:

As alterações encontradas nas fachadas das edificações da Região litorânea do Recife, Pernambuco, Brasil foram: manchamentos, eflorescências, arenização, alveolização, lascagem, fissuras, fraturas, oxidações, e depósitos superficiais de sujeiras.

7.1.1 Formação de manchas:

Este tipo de alteração é frequente quando os calcários possuem disseminação de minerais ricos em ferro (pirita, óxidos/hidróxidos Fe). Sua formação é facilitada pelo processo de migração de soluções com Fe em estado iônico, seguida de sua reprecipitação como hidróxidos (goethita) ou de produtos amorfos féricos (Figura BV 7.1). Manchamentos costumam estar dispostos irregularmente em superfícies de placas de BB, representando uma deterioração estética inoportuna, apesar de não interferir nas suas propriedades mecânicas. Considera-se que esta patologia decorre da ação combinada de umidade e chuvas, em conjunto com materiais inadequados para o assentamento da placa (restos orgânicos na argamassa, produtos de limpeza, poluição).

Figura BV 7.1 - Manchamentos em revestimento de coluna de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife-PE, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

7.1.2 Eflorescências

As eflorescências decorrem da cristalização de sais na superfície dos materiais pétreos, por evaporação de soluções salinas. Dentre estas, as mais comumente reconhecidas são os cloretos (NaCl, KCl), sulfatos (NaSO₄, MgSO₄, CaSO₄), ou carbonatos [(CaCO₃, Ca,Mg (CO₃)₂]. A formação de eflorescências está diretamente relacionada com a ascensão capilar de soluções (Becerra-Becerra, 2009).

As eflorescências mostram-se como manchas de cor branca acinzentada, ocupando geralmente o sopé do revestimento de prédios (Figura BV 7.2). Aparecem somente quando a cristalização de sais ocorre na superfície das placas, quando o fornecimento de sal por absorção capilar é maior que a evaporação (DEL MONTE, 2006). Podem ser encontradas em vários tipos litológicos, mas são bem mais frequentes em rochas porosas com rápido fluxo capilar.

Figura BV 7.2 - Eflorescências em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife, Pernambuco, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

7.1.3 Arenização

A arenização, também conhecida como desintegração granular, é o estado avançado de perda de coesão textural, caracterizada pelo destacamento de grânulos ou de cristais sob influência intempérica. Ela se faz acompanhar por uma sensível deterioração das características mecânicas originais da rocha e de um notável aumento em sua porosidade. Ocorre, sobretudo,

em climas de baixa pluviosidade, onde os sais solúveis residuais não são totalmente lixiviados, podendo se cristalizar nas reentrâncias ou fissuras da superfície do produto, provocando desagregação lítica (Figura BV 7.3).

Figura BV 7.3 - Arenização (desintegração granular) revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife-PE, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

7.1.4 Alveolização

É um caso específico de desagregação granular que ocorre quando a erosão dos grãos é diferenciada na superfície da rocha, formando alvéolos que são nucleados por zonas de fraqueza. Uma vez formados, os alvéolos induzem condições localizadas e diferenciadas de evaporação e de depleção lítica. Pode também provocar esfoliações, que se caracterizam pela formação de finas camadas superficiais, em folhas *grosso modo* paralelas entre si, milimétricas a sub-milimétricas, com diferentes graus de alteração (Figura BV 7.4).

Figura BV 7.4 - Alveolização em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife-PE, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

7.1.5 Lascagem

A lascagem se manifesta pelo destacamento total ou parcial de partes ou lascas dos revestimentos (Figura BV 7.5), frequentemente em decorrência de discontinuidades texturais ou mineralógicas no material original. As lascas têm formas, espessuras e dimensões irregulares, apresentando preferencialmente texturas mais maciças e compactas ao longo das bordas das peças. Por baixo destas lascas podem ocorrer eflorescências e desenvolvimento de colônias de microrganismos.

Figura BV 7.5 - Lascagem em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife, Pernambuco, Brasil.

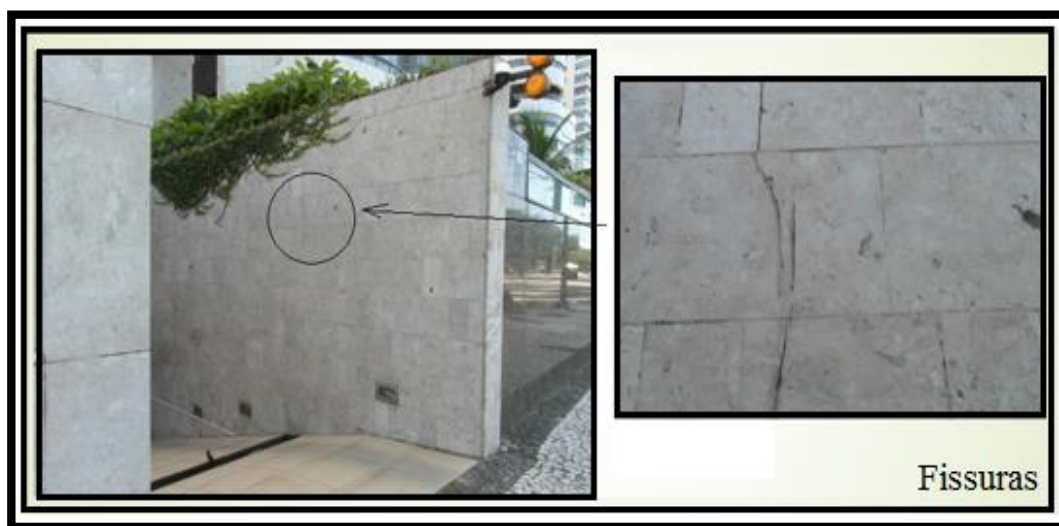


Fonte: Elaborado pela autora.

7.1.6 Fissuras

A fissura é a degradação que se manifesta pela formação de aberturas na rocha, com espaçamento reduzido, e com descontinuidade por vezes aleatória (Figura BV 7.6).

Figura BV 7.6 - Fissuras em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife, Pernambuco, Brasil.

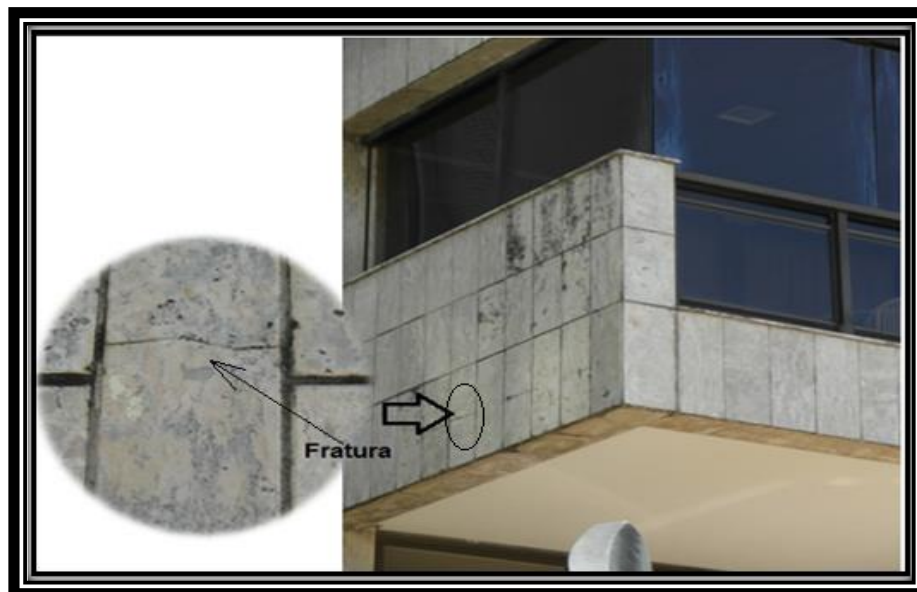


Fonte: Elaborado pela autora.

7.1.7 Fraturas

A fratura é uma ruptura na continuidade da rocha (Figura BV 7.7), com aberturas maiores do que aquelas designadas como fissuras. Os dois tipos de descontinuidade são frequentemente provocados por tensões superficiais nas placas de revestimento, podendo ocorrer associados.

Figura BV 7.7 Fratura em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário Bege Bahia, litoral do Recife, Pernambuco, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora.

7.1.8 Oxidação

É um fenômeno (Figura BV 7.8) que envolve perda de elétrons, ou ainda aumento da reatividade, não necessariamente em presença de oxigênio (quando um elemento perde elétrons o seu estado de oxidação aumenta; exemplo: $Al^0 \rightarrow Al^{+3} + 3 e^-$).

Figura BV 7.8 - Presença de manchas ou nódulos acastanhados, marrons ou avermelhados no revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário BB, litoral do Recife-PE, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora.

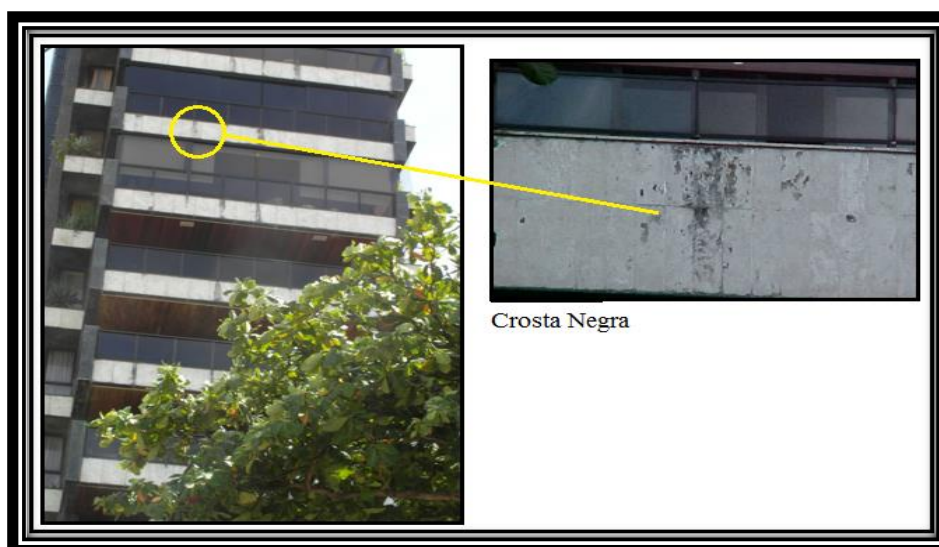
7.1.9 Depósitos superficiais ou sujeiras

7.1.9.1 Crostas negras

Crostas negras correspondem a uma patologia frequente em revestimentos de Bege Bahia (Becerra-Becerra, 2009) e, sobretudo, ocorrem em domínios urbanos sob climas tropicais. São bem discerníveis e depreciativos para a estética decorativa de revestimentos externos, ocorrendo em qualquer nível das fachadas e não necessariamente de forma generalizada (Figura BV 7.9). A espessura destas crostas pode alcançar até 3 mm, sendo constituídas essencialmente de gipsita com inclusão de pigmentação negra de origens urbana ou industriais: cinzas, fuligens, *hollín* (Becerra-Becerra, *op. cit.* 2009).

A cristalização do gesso causa danificações à superfície da placa, criando uma interface fragilizada entre a patologia e a parte ainda estável da placa carbonática que, por sua vez passa a ter uma descontinuidade física. E esta descontinuidade é responsável pelo destacamento futuro de lascas superficiais deste produto.

Figura BV 7.9 - Crostas negras em revestimento de fachadas de edifício com placas de Calcário BB, litoral do Recife-PE, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

7.2 Causas de degradação das rochas

As rochas são naturalmente alteradas a partir de seus próprios afloramentos na superfície terrestre onde, em contato com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera, sofrem

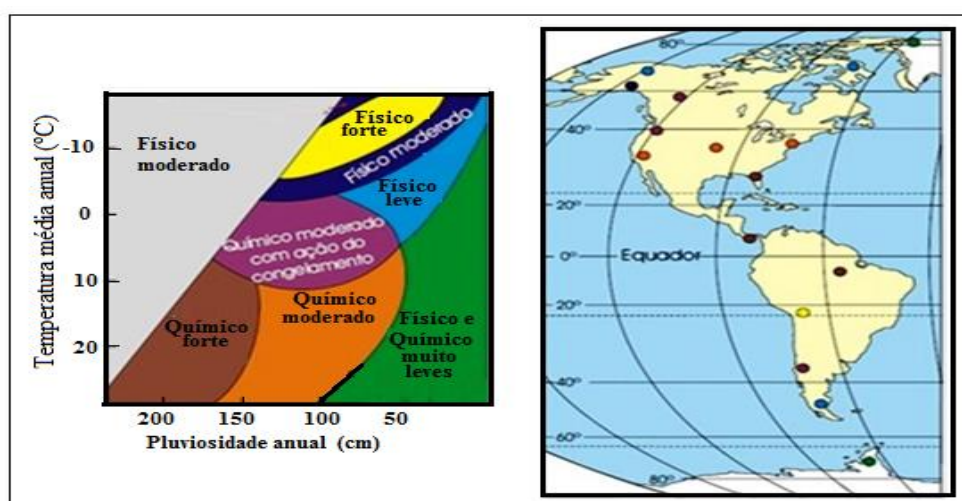
modificações de ordem física e química denominadas genericamente como intemperismo. A através de seus agentes físicos e químicos, este fenômeno fragiliza a condição natural pretérita das rochas, de modo que, a rigor, não temos rochas sãs e sim *in natura*, com diferentes graus de intervenção intempérica, mesmo quando de pequena monta.

Todos os processos que causam desagregação das rochas, provocando a perda de minerais dantes coesos e, com esta fragmentação, transformando-as em materiais descontínuos e friáveis, constituem o intemperismo físico (TEIXEIRA, 2001). A água da chuva, que se infiltra e percola no interior das rochas, a presença de oxigênio que leva à oxidação, da umidade que conduz à hidratação ou à dissolução, provocam reajustes texturais e/ou mineralógicos nos produtos líticos.

Os intemperismos físicos e químicos, mesmo distintos, atuam em conjunto, cada um sendo catalisador para o outro, provocando um fenômeno ininterrupto ao longo do tempo. O clima é determinante nas definições de tipo e eficácia do intemperismo. O de caráter físico predomina em áreas onde a temperatura e a pluviosidade são baixas e, quando estas são altas, é o intemperismo químico que predomina (TEIXEIRA, 2001).

Os tipos de intemperismo dominantes nas diversas combinações de pluviosidade e temperatura ambiental modulam e determinam a intensidade de suas intervenções (Figura 7.10), servindo para previsibilidade acerca do desempenho dos materiais pétreos utilizados em revestimentos externos de edificações.

Figura 7.10 Variação do intemperismo e o clima



Fonte: Teixeira (2001)

Rochas ornamentais, embora conhecidas pela durabilidade e boa resistência à agressão do meio ambiente, experimentam com maior intensidade os processos de deterioração

quando aplicadas em revestimentos externos. A perda de brilho e alteração da cor original são as formas mais comuns de deterioração que afetam a estética das rochas, e hoje estão regulamentadas pela ABNT NBR 15575/2013 (Norma de Desempenho da Construção Civil). Processos de alteração mais intensos geram redução da sua resistência mecânica e durabilidade, ocasionando grandes perdas para os construtores, produtores e comerciantes destes produtos. Esta preocupação, sobretudo, incita investigar detidamente as rochas carbonáticas: mármore e calcários em geral (Tabela 7.1) que, embora não possuam a mesma resistência dos granitos, são produtos historicamente tradicionais e de longa preferência pelos seres humanos em suas diversas aplicações, mesmo como revestimentos externos de edificações.

Tabela 7.1. Simulações de condições ambientais degradantes para rochas carbonáticas em geral.

Situação	Ensaio	Objetivos
Ação de poluentes	Exposição de placas polidas a atmosferas ácidas em câmaras climáticas.	Simulação de ambientes litorâneos poluidores (umidade e H ₂ SO ₄), e de degradação para materiais líticos.
	Exposição das placas polidas em câmaras climáticas.	Simulação de ambientes matinhos (névoa salina) degradantes.
	Exposição em câmara com saturação em dióxido de Enxofre (SO ₂).	Análise da resistência aos desgastes provocados por variações de temperatura e umidade, na presença constante de atmosfera rica em SO ₂ .
	Experimentações em extrator de Soxhlet.	Simulação de condições ambientais de intemperismo químico.
Varição térmica	Exposição de placas polidas e amostras in natura a choques térmicos.	Verificar resistência da rocha, após ciclos de aquecimento e resfriamento imediato em água.
Permeabilidade	Exposição de placas polidas em permeâmetro	Avaliação do comportamento da rocha neste tipo de experimentação.

Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO VIII

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E ALTERAÇÃO/ALTERABILIDADE DO BEGE BAHIA

O mármore Bege Bahia (BB), definido como um calcrete, é a litologia que define a Formação Caatinga (Tércio-Quartenário), e que aflora como uma crosta de grande extensão (dezenas de quilômetros) associada aos calcários neoproterozóicos da Formação Salitre do Grupo Una.

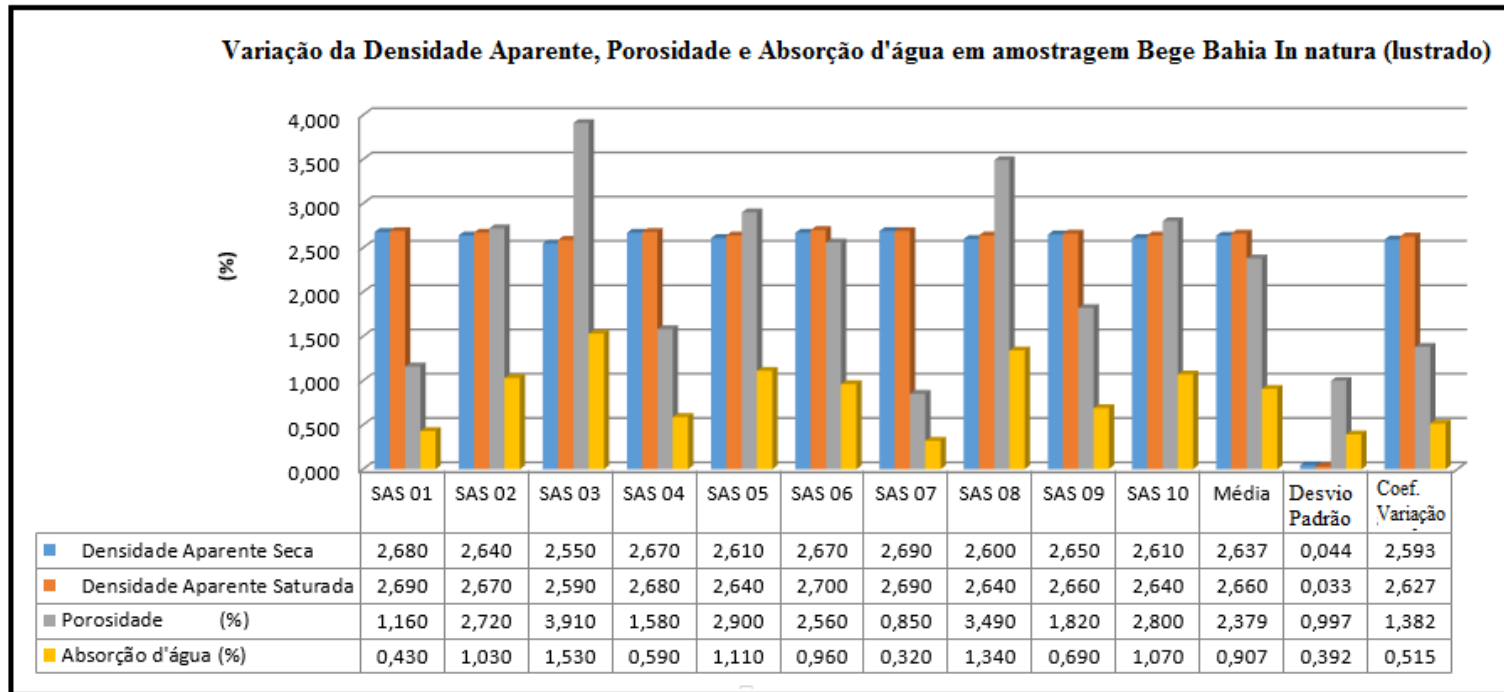
A tonalidade dos BB varia em torno de tons de bege, condicionando comercialmente as designações informais de “BB claro” e “BB escuro”. Sua textura é fina (micrítica), com nuances nas tonalidades predominantes do bege, exibindo por vezes fácies brechóides. Vênulas e grãos diminutos de quartzo ocorrem em proporção de 2 a 4% da rocha total (RT). O quartzo se apresenta como grãos exógenos sintaxiais ou como material detrítico sub-anguloso a sub-arredondado. Dada a predominância de minerais carbonáticos ($96 \pm 2\%$), esta rocha supergênica secundária, que apresenta comportamento mecânico de mármore, é admitida como “mármore” nos meios mercadológicos.

8.1 Densidade aparente, porosidade e absorção aparente

Os valores de média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados obtidos para os índices físicos de corpos de prova de BB *in natura* (Figura 8.1) lustrados, utilizados nesta pesquisa, revelam o comportamento físico deste produto.

Do ponto de vista das densidades aparentes seca e saturada, os resultados podem ser considerados normativos em relação aos padrões SGM oficialmente reconhecidos para este produto: 2,606 e 2,62 kg/m³, respectivamente. Os valores médios de densidade aparente seca e de densidade aparente saturada, respectivamente 2,637 e 2,66, podem ser considerados como perfeitamente inclusos no desvio médio previsível dos padrões SGM. Estes valores são normais em calcários de alta densidade, segundo padrões ASTM: $\geq 2,569$ kg/m³, conforme dados de Frascá (2002), e estariam dentro das expectativas em função da textura micrítica dos BB.

Prancha 8.1 – Variações das médias de leituras (n = 10) da densidade aparente, densidade aparente saturada, porosidade e absorção d'água de corpos de prova de BB *in natura*, confeccionados a partir de uma mesma placa lustrada deste produto e utilizados nesta pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados referentes à porosidade são variáveis (de 1 a 3,9%) e, em geral, elevados para os padrões genéricos (> 1%) de rochas ornamentais graníticas. Correspondentemente, estes valores apresentados pela amostragem estudada são proporcionalmente acompanhados pelos índices de absorção d'água. O caráter micrítico dos BB, oferecendo uma elevada superfície de contatos microcristalinos com trama mineral de baixa dureza (carbonatos), possibilita uma significativa disseminação de micro-cavidades durante o lustre e, nelas, a possibilidade de retenção d'água.

8.2 Análises químicas por efluorescência de RX/estequiometria (BB *in natura*)

As análises químicas realizadas sobre amostragem de BB *in natura*, comparadas com o mesmo produto alterado ao longo de 15 anos em revestimento (Tabela 8.1), mostram que o BB é um calcrete magnesiano, podendo se apresentar com mais de 30% de dolomita em RT. Os carbonatos (calcita e dolomita) perfazem, nas análises químicas consideradas, 97% desta rocha. Quartzo, palygorskita e hematita, na qualidade de resíduos insolúveis (RI) compõem sua fração acessória. Os cálculos estequiométricos, que consideram frações minerais possuindo composição ideal, colocam em evidência uma hierarquia reativa, indicando que a paragênese se diferencia na medida do tempo de exposição do BB em revestimentos. Esta diferenciação é de caráter relativo, qualquer que seja a fácies desta rocha (clara ou escura), como resultado do intemperismo que consome mais intensamente a calcita (mais reativa ante os processos de alteração) que a dolomita, sendo estas últimas, por sua vez, mais degradáveis que a fração acessória silicática (quartzo, palygorskita).

Tabela 8.1 Análises químicas (efluorescência RX) de BB *in natura* e intemperizado (placa com mais de 15 anos de aplicação) e suas respectivas composições RT por estequiometria.

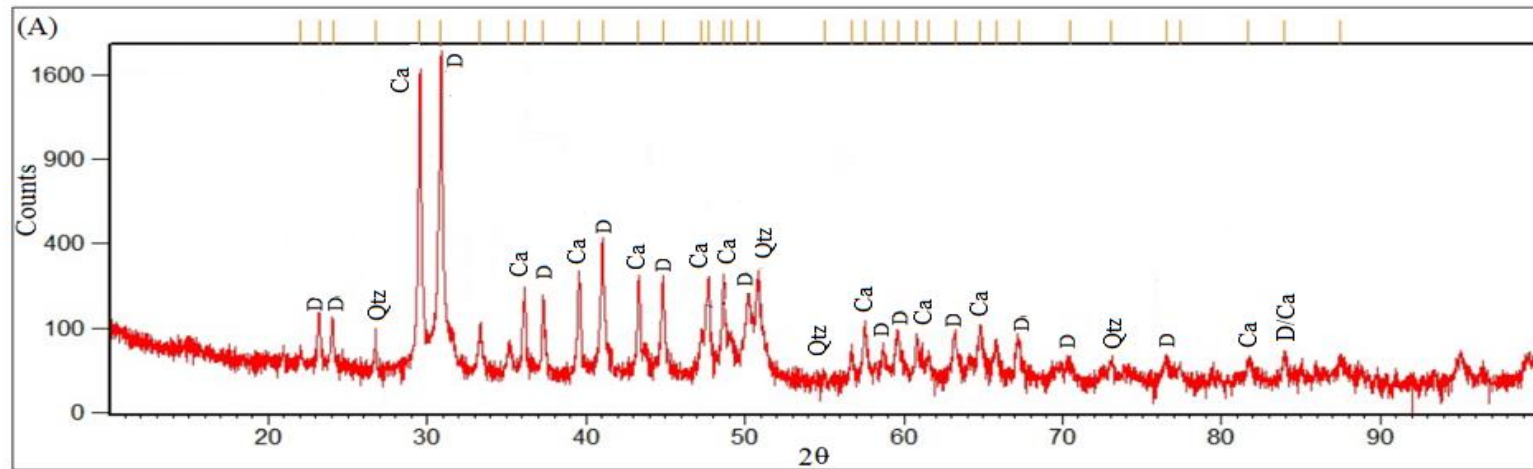
Resultados analíticos/ composição mineral	BB <i>in natura</i>	BB alterado
RI (Resíduos Insolúveis)	2,95	12,02
SiO ₂	2,55	10,06
CaO	46,78	38,01
MgO	8,07	9,98
Fe ₂ O ₃	0,20	1,07
Perda ao Fogo	42,01	39,73
Calcita	64,5	44,2
Dolomita	32,5	43,6
Quartzo	0,2	7,9
Palygorskita	2,6	3,0
Hematita	0,2	1,1
Σ	100,0	99,8

Fonte: Elaborado pela autora.

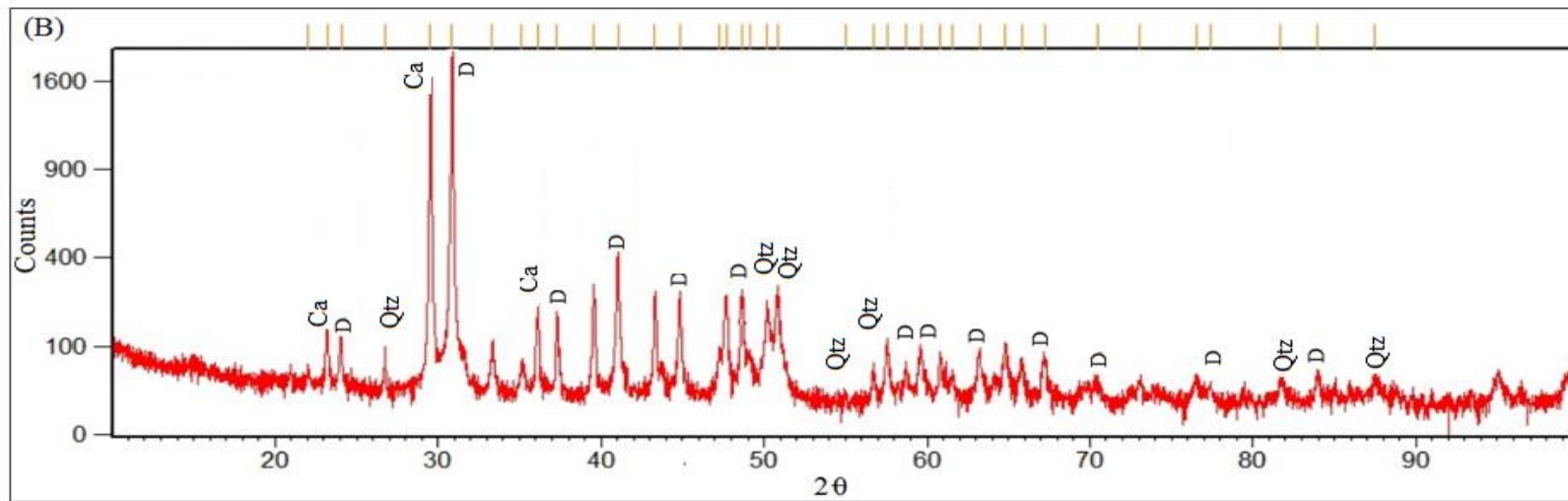
8.3 Análises por Difração de RX (DRX)

Os resultados difratométricos sobre RT de placas com 5, 10 e 15 anos de exposição (Figuras 8.1a, b e c, respectivamente), mostram a predominância de dolomita e de calcita, com pequenas quantidades de quartzo. O pico de principal definição da dolomita ($I=100$ em $2,88 \text{ \AA}$) rivaliza, em termos de *counts*, com o de calcita ($I=100$ em $3,035 \text{ \AA}$), ratificando o caráter magnésiano do BB, e inclusive chega a ultrapassá-lo no caso da placa com 15 anos de exposição intempérica (Figura 8.1c). A palygorskita, como outros argilominerais, pode não ser detectada em difratogramas do tipo pó desorientado (MILLOT, 1970), da mesma forma que acessórios (no caso: hematita) com baixo percentual em RT ($< 2\%$) podem passar despercebidos por esta metodologia.

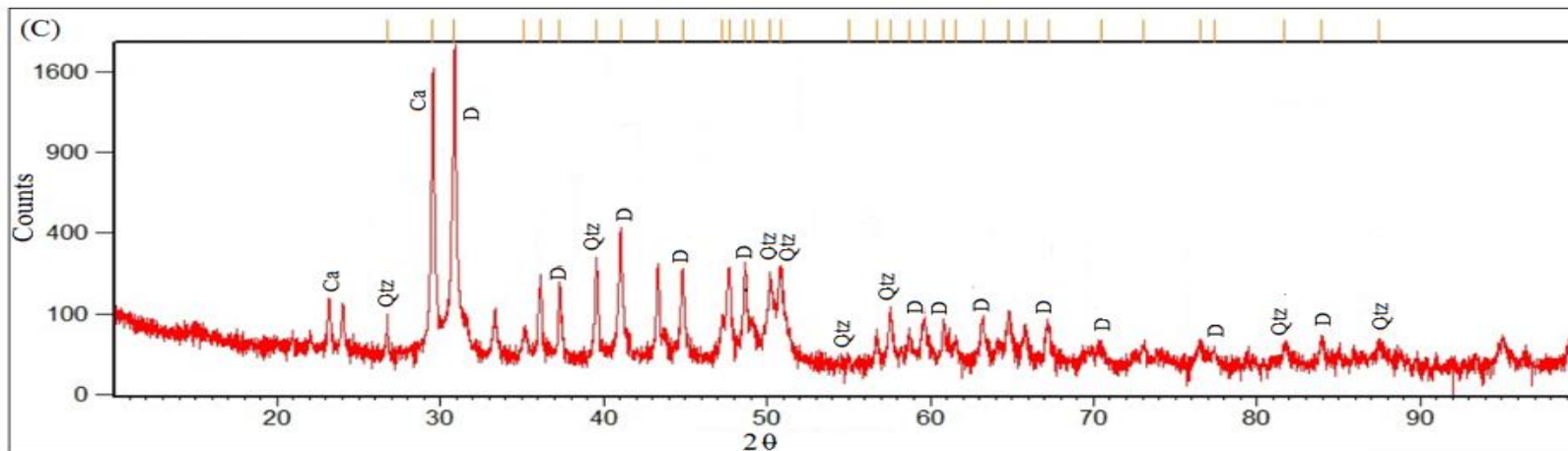
Figuras 8.2 A, B, C. DRX de pó de BB oriundo de placas deste produto aplicadas como revestimento há 5 anos (A), 10 anos (B) e 15 anos (C).



Legenda: D - Dolomita; Qtz.- Quartzo; Ca – Calcita.
Fonte: Elaborado pela autora.



Legenda: D - Dolomita; Qtz.- Quartzo; Ca – Calcita.



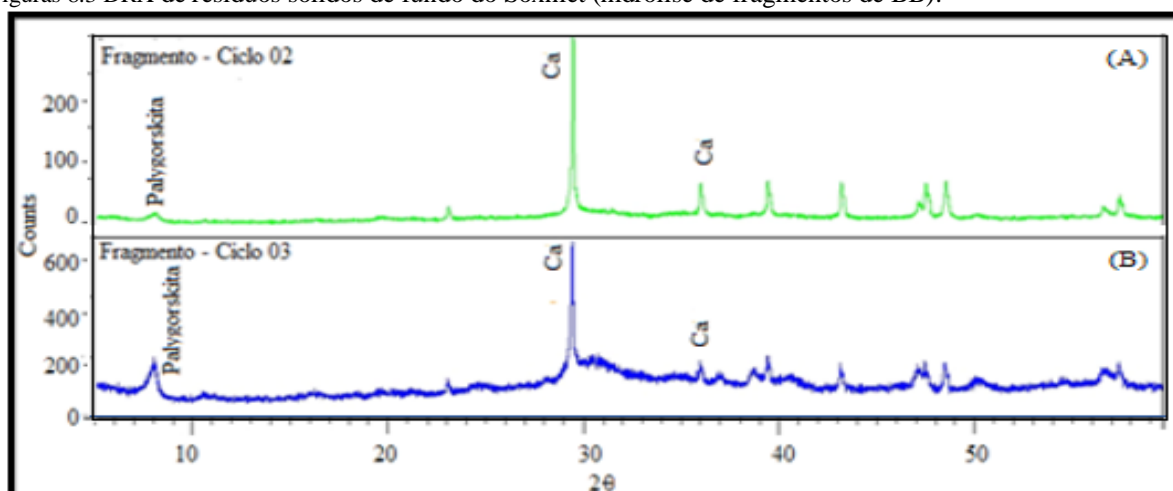
Legenda: D - Dolomita; Qtz.- Quartzo; Ca – Calcita.

Fonte: Elaborado pela autora.

8.3.1 DRX de resíduos sólidos sedimentados em Soxhlet

Os DRX produzidos sobre materiais residuais de fundo, recolhidos no extrator de Soxhlet (Figura 8.3) como resultado de hidrólise de fragmentos assim como de placas de BB, revelam semelhanças entre si. Em todos os casos a fração dominante é de calcita com presença acessória de palygorskita, ocorrendo inobservância de dolomita e quartzo (Figura 8.4). A presença destas frações, no material residual de fundo, corresponde à perda de massa, por desagregação a partir da textura do corpo de prova. A ausência, ou inobservância, de quartzo e dolomita correspondem à maior resistência relativa destes minerais ao processo de hidrólise, no tempo adotado de ensaio.

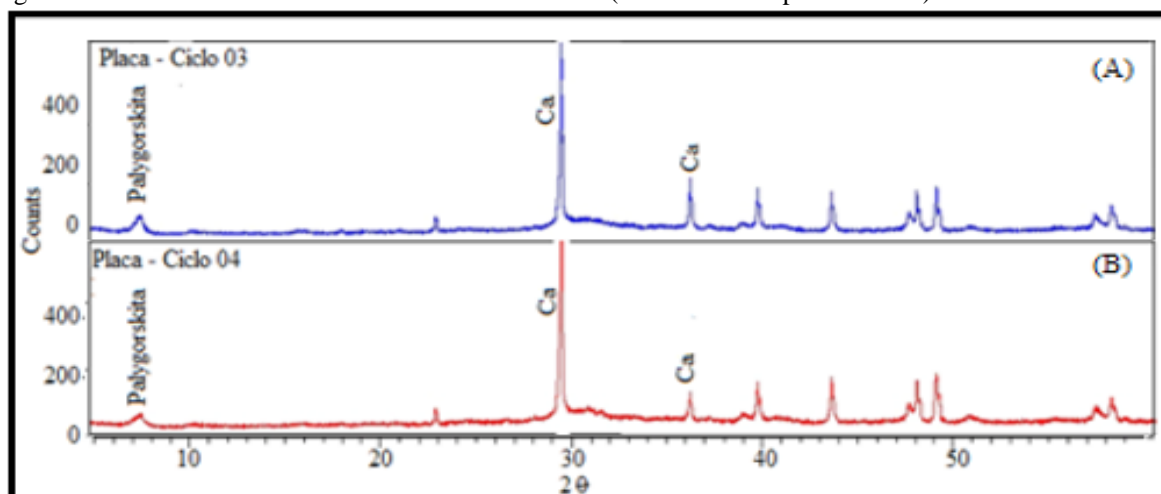
Figuras 8.3 DRX de resíduos sólidos de fundo do Soxhlet (hidrólise de fragmentos de BB).



Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Palygorskita; Ca – Calcita.

Figura 8.4 DRX de resíduos sólidos de fundo do Soxhlet (hidrólise sobre placas de BB).

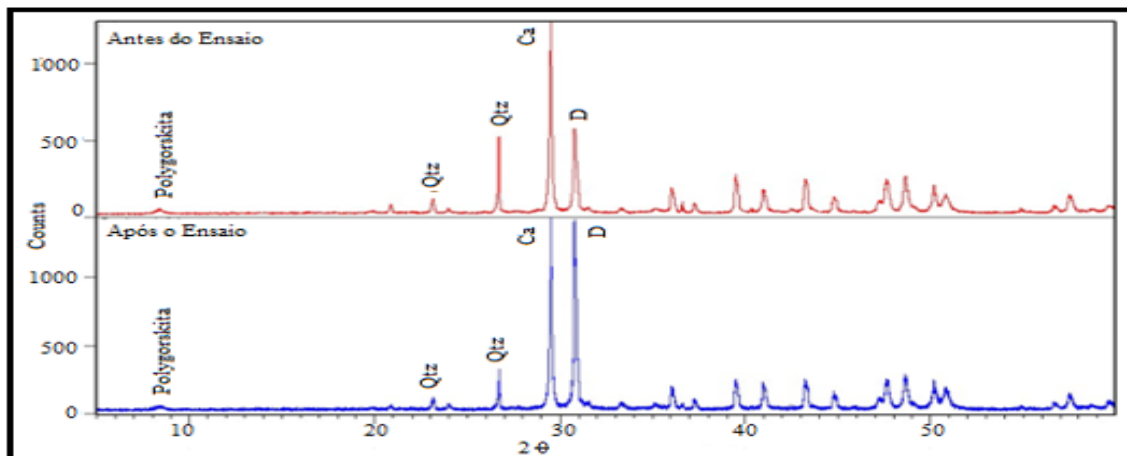


Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Palygorskita; Ca – Calcita.

Os resultados em DRX sobre frações minerais da superfície de BB, após ensaios com *spray* salino (Figura 8.5), câmara de SO₂ (Figura 8.6) e ataques ácidos (Figura 8.7), confirmam a paragénese de calcita e dolomita como minerais dominantes, com quantidades muito subordinadas de quartzo e, eventualmente, presença acessória de polygorskita.

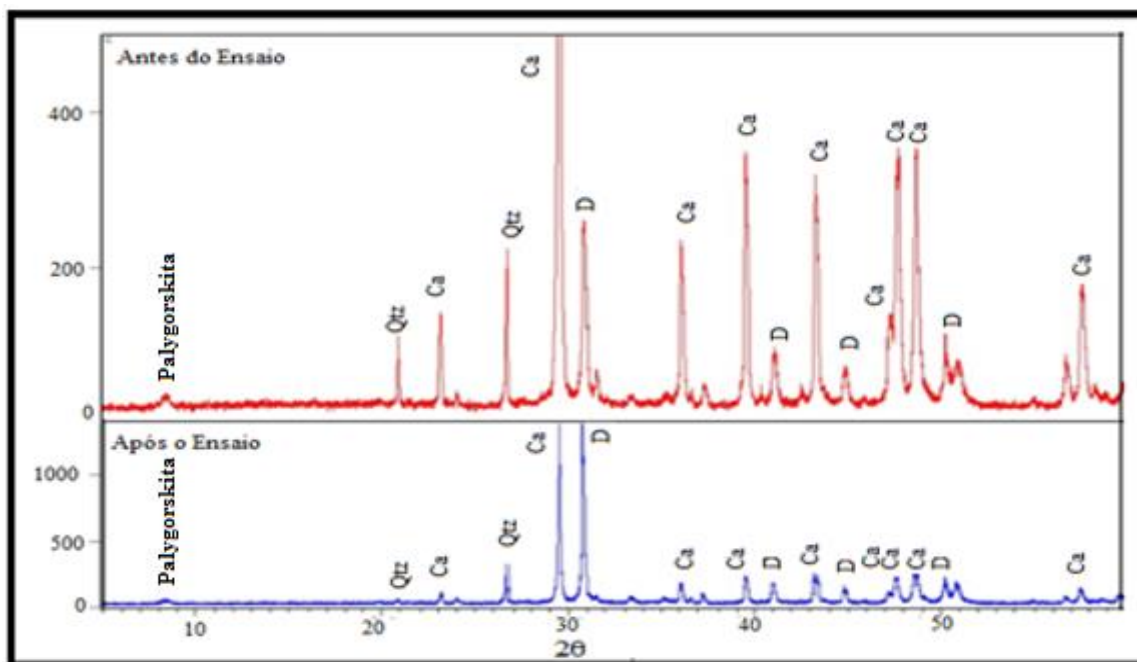
Figura 8.5 DRX de resíduos sólidos resultantes do ensaio com Spray Salino sobre placa de BB.



Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Palygorskita; Qtz – Quartzo; Ca – Calcita.

Figura 8.6 DRX de resíduos sólidos resultantes do ensaio em câmara de SO₂ sobre placa de BB.

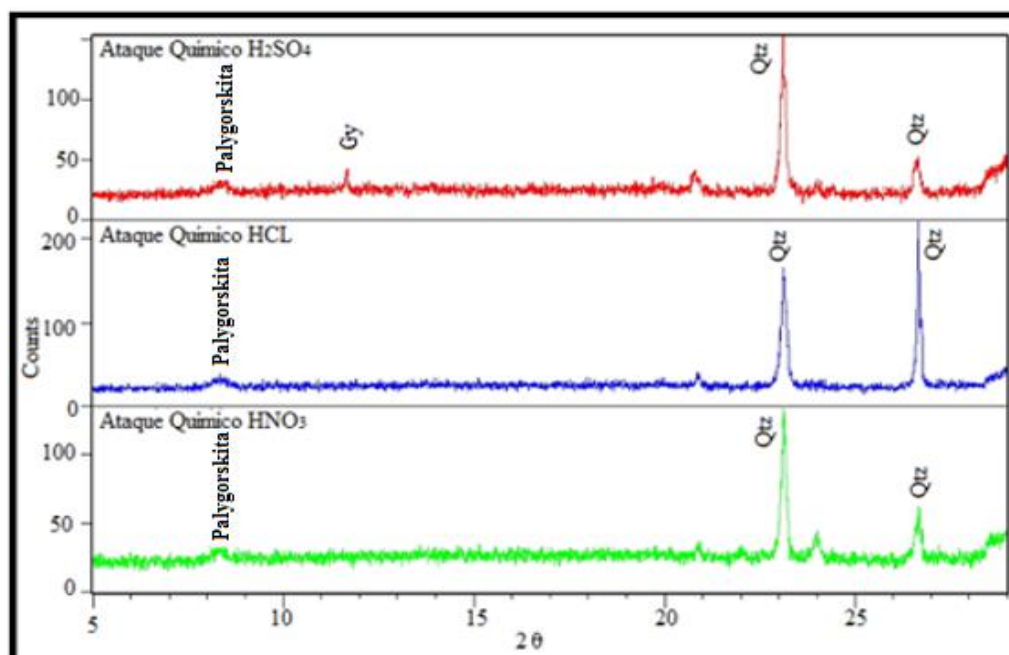


Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Palygorskita; Qtz – Quartzo; Ca – Calcita; D-Dolomita.

Mesmo sendo análises essencialmente qualitativas, percebe-se nestes DRX (rever figuras 8.7 e 8.8) o crescimento da fração dolomita em RT após os diferentes ensaios de alterabilidade, devido ao caráter generalizadamente mais resistente da dolomita em relação ao da calcita. Considerando-se os resultados dos ataques ácidos conduzidos em Soxhlet, os resíduos de fundo mostraram resultados previsíveis: presença de silicatos (quartzo, palygorskita) e inobservância de minerais carbonáticos (Figura 8.9).

Figura 8.7 DRX de resíduos sólidos de fundo de Soxhlet a partir de ataques ácidos sobre corpos de prova de BB.



Fonte:

Elaborado pela autora.

Legenda: Palygorskita; Qtz – Quartzo; Gy - Gipsita.

No caso específico do ataque com H₂SO₄ ocorreu neoformação de crosta pelicular branca sobre a placa de BB (Figura 8.8) e, no DRX, o aparecimento do mineral neoformado (rever figura 8.7): gipsita (CaSO₄.2H₂O). Esta neoformação resulta da reação de H₂SO₄ sobre a superfície carbonática do corpo de prova, conforme a seguinte equação inicial:

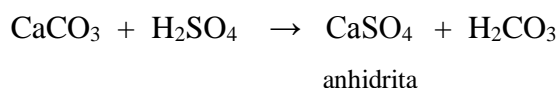
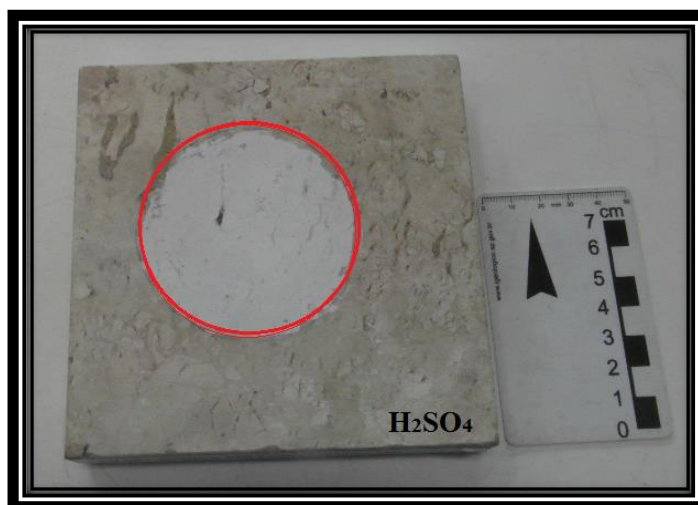


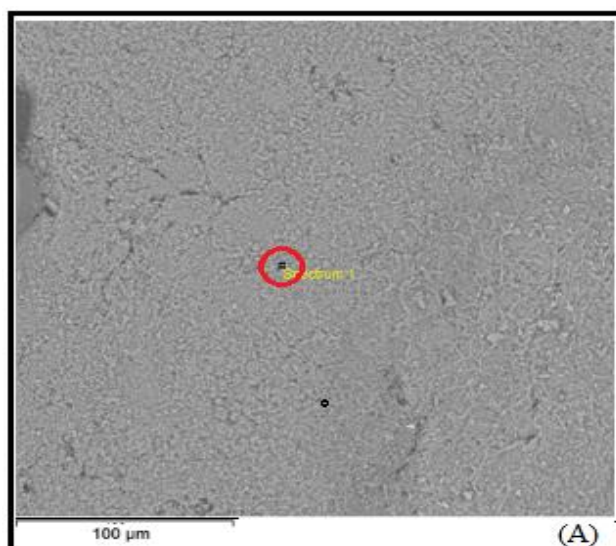
Figura 8.8 Crosta pelicular branca formada sobre a placa de BB após reação com H_2SO_4



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme dados de Warren (2006), em meio aquoso, em condições CNTP abaixo de 42 °C, a precipitação de sulfato de cálcio prioriza a formação de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), indicando um processo preferencial de hidratação. Análise em MEV confirmou a presença de sulfato como gipsita: presença das raias de S e Ca, e perda ao fogo representada analiticamente por CO_2 (Figuras 8.9 A1 e A2).

Figura 8.9 (A1) - Aspecto em MEV da crosta branca sobre superfície de placa de BB (A2) - Análise composicional pontual desta superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.


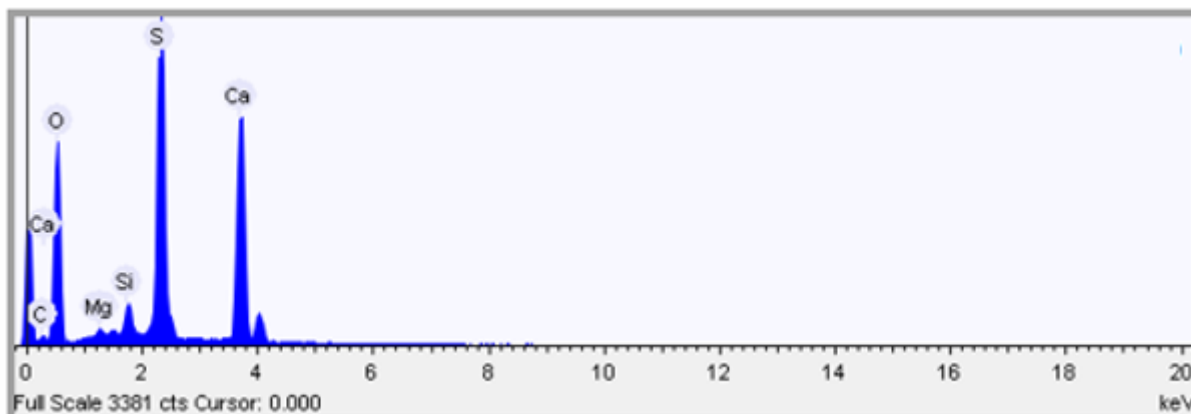
Legenda:  Domínio analisado

Figura 8.9 (A2) - Aspecto em MEV da crosta branca sobre superfície de placa de BB (A2) - Análise composicional pontual desta superfície.



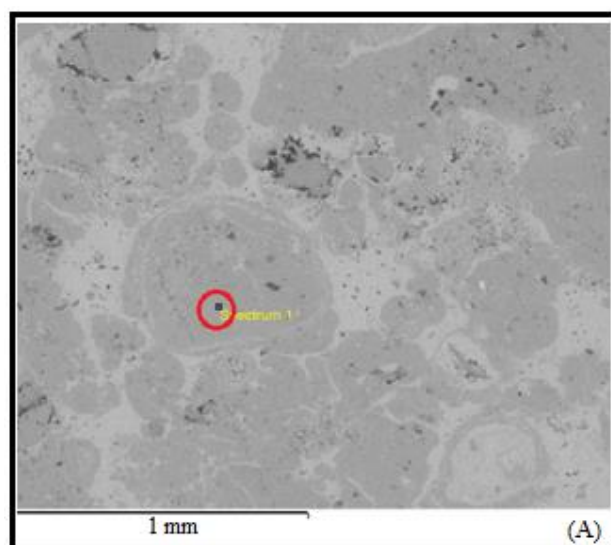
Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Ca – Calcita; C – Carbono; O – Oxigênio; Mg – Magnésio; Si – Silício; S – Enxofre.


8.4 Observações em Microscopia Eletrônica com Varredura – MEV

Os aspectos texturais do BB *in natura* em MEV exibem concentrações maiores ou menores de grumos com tonalidades cinzentas, anastomosados ou não entre si, imersos em “matriz” cinza-clara (Figura 8.10 A1 e A2). Na maior parte dos casos estas feições grumosas são sub-milimétricas e a matriz é francamente micrítica. A dominância de feições em grumos determina o que comercialmente se convencionou denominar de “BB escuro”.

Figura 8.10 (A1) - Aspecto grumoso de BB tipo escuro, e ponto de análise composicional



Fonte: Elaborado pela autora

Legenda:  Domínio analisado.

O espectro analítico por MEV (Figura 8.10 (A2)) indica uma composição essencialmente carbonática, calcítica, com presença significativa de dolomita (raia bem definida de Mg), para as feições em grumos. A presença de quartzo ou de outros silicatos é meramente acessória. Estequiometricamente, para o teor indicado de MgO, o grumo-alvo (rever Figura 10(A1) apresenta como composição total:

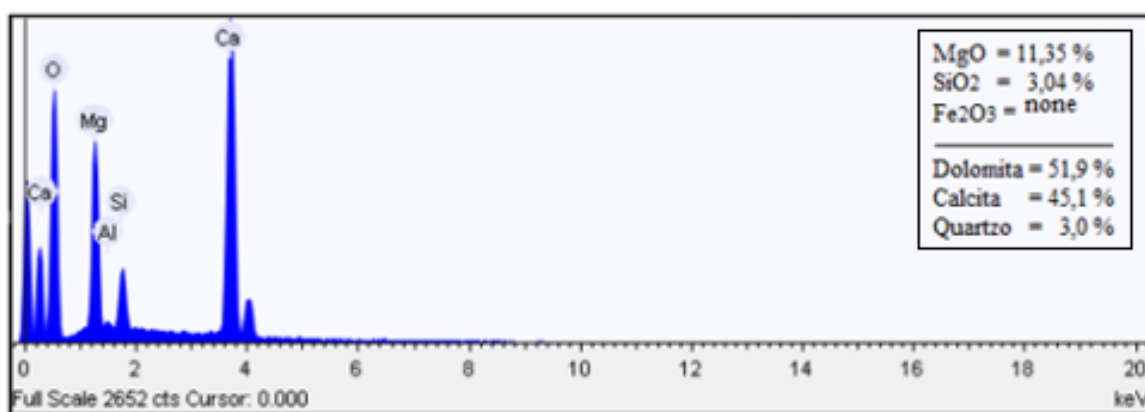
52 % -- dolomita

45 % -- calcita

3 % -- silicatos

A não detecção de raias identificadoras de Fe descarta a interpretação de presença de siderita (FeCO_3) ou de ankerita (Ca,Fe CO_3), ou de óxidos/hidróxidos de Fe no grumo-alvo. Concordantemente, nenhum destes compostos contendo Fe foi identificado em análises DRX.

Figura 8.10 (A2) - Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular

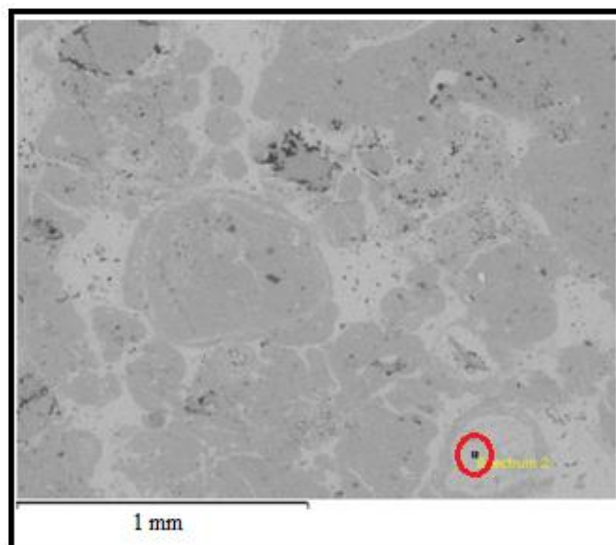


Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: C – Carbono; Ca – Calcita; O – Oxigênio; Mg – Magnésio; Si – Silício; S – Enxofre.

A mesma investigação, focando um outro grumo de tonalidade cinza mais clara (Figura 8.11 A1 e A2) confirma o caráter dolomítico deste elemento figurado.

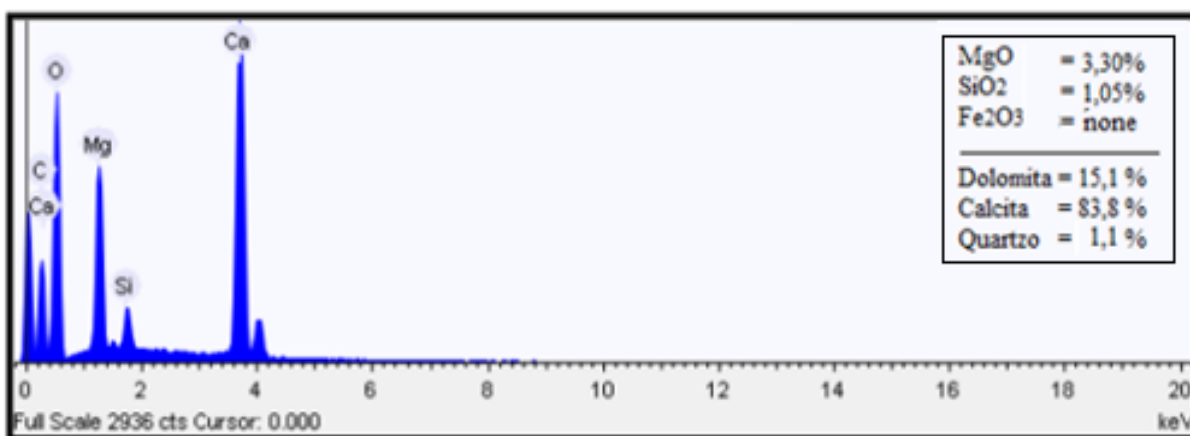
Figura 8.11 (A1) - Aspecto grumoso (cinza claro) de BB tipo escuro, com ponto de análise composicional



Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: ○ Domínio analisado

Figura 8.11 (A2) - Espectro analítico pontual por MEV de grumo nodular (rever a Figura 11(A1))

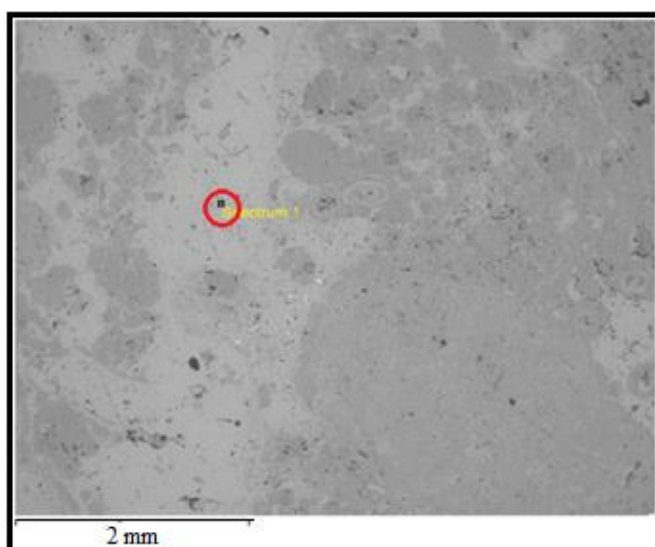


Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: C – Carbono; Ca – Cálcio; O – Oxigênio; Mg- Magnésio; Si – Silício.

A análise composicional do domínio da matriz mostrou forte predominância de calcita, com dolomita em proporção muito subordinada (< 4% em RT), e presença apenas acessória de silicatos (Figuras 12 A1 e A2).

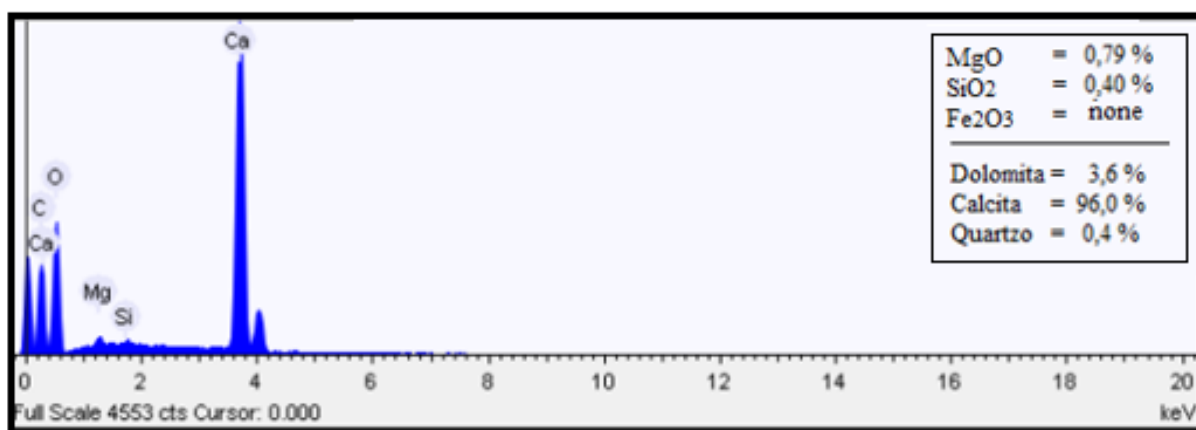
Figura 8.12 A1-Visualização de matriz de BB, com marcação de ponto de espectro analítico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: ○ Domínio analisado

Figura 8.12 (A2) Espectro analítico pontual de matriz de BB (tipo escuro)

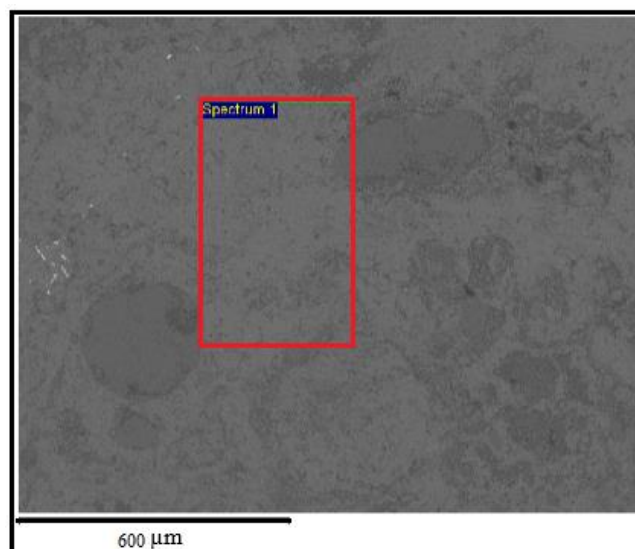


Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Ca – Cálcio; C – Carbono; O – Oxigênio; Mg- Magnésio; Si – Silício.

Considerando-se uma análise espectral por área (Figuras 8.13 (A1) /8.15(A1) e 8.16 (A1) / 8.17(A1), os resultados parecem depender muito mais da frequência de elementos figurados grumosos do que de aspectos cinzentos mais escuros ou mais claros dos BB. Resta, todavia, a evidência que os BB possuem uma participação não negligenciável de fração dolomítica em RT.

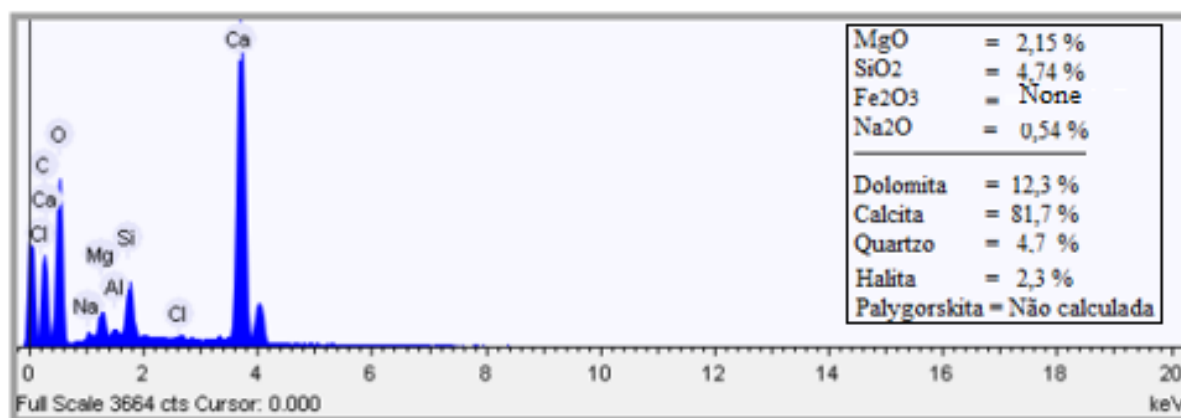
Figura 8.13 (A1) Visualização de área analítica de BB tipo escuro e seu aspecto petrografico grumoso



Fonte: Elaborado pela autora

Legenda: ○ Domínio analisado

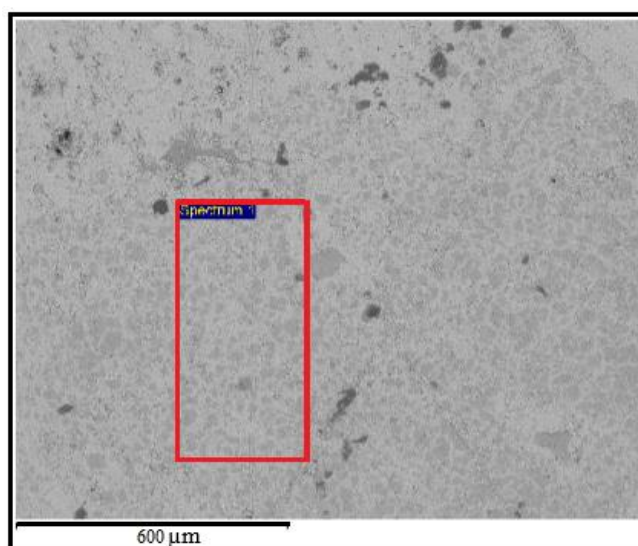
Figura 8.13(A2) espectro analítico de área em BB (tipo escuro) da Figura 8.11 (A1)



Fonte: Elaborado pela autora

Legenda: Cl-Cloro; Ca - Cálcio; C - Carbono; O - Oxigênio; Na - Sódio; Mg- Magnésio; Si - Silício; Al- Alumínio.

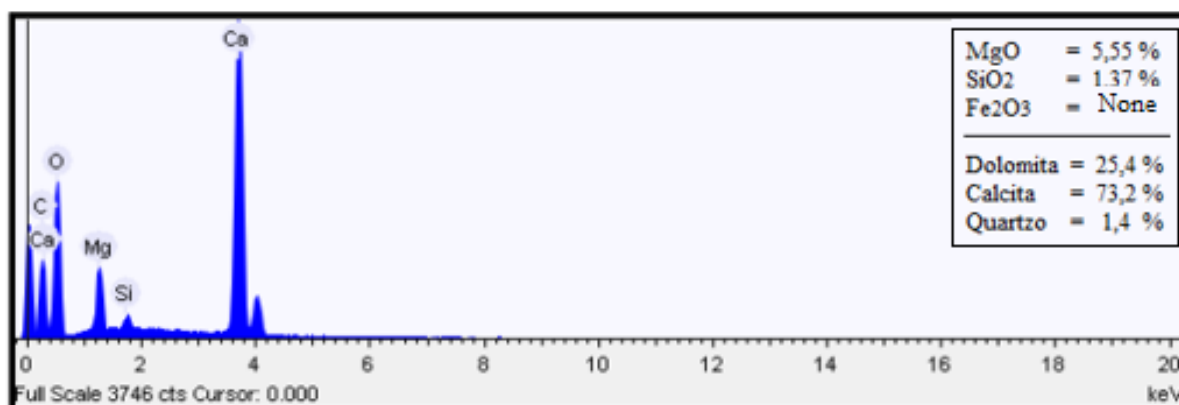
Figura 8.14 (A1) Visualização de área analítica de BB tipo claro e seu aspecto petrográfico micro-grumoso



Fonte: Elaborado pela autora

Legenda: ◻ Domínio analisado

Figura 8.14 (A2) Espectro analítico de área em BB (tipo escuro) da figura 8.14 (A1).



Fonte: Elaborado pela autora

Legenda: Ca – Calcita. C - Carbono; O – Oxigênio; Mg- Magnésio; Si – Silício.

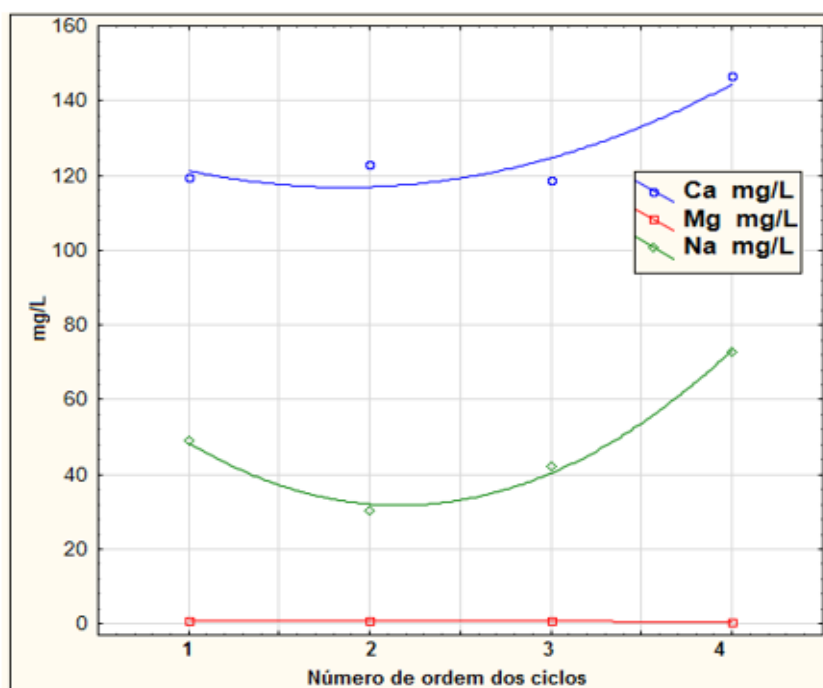
8.5 Análises químicas de soluções residuais em Soxhlet

8.5.1 Soluções a partir de fragmentos de BB após hidrólise

Ao longo de um ensaio de quatro ciclos o processo hidrolítico mobilizou essencialmente Ca^{++} e Na^+ , permanecendo inercial com relação à mobilização de Mg^{++} , e com uma dinâmica mais acentuada para Ca^{++} do que para o Na^+ (Figura 8.15). Estatisticamente, esta dinâmica mostrou-se polinomial do tipo exponencial positiva, a partir do terceiro/quarto ciclo. Este comportamento revela-se coerente com o comportamento físico-químico da calcita, mais

vulnerável à degradação em seu estado cristalino que a dolomita, que permaneceu estável considerando-se como insuficiente o tempo para desencadear sua hidrólise durante o ensaio. Chama a atenção, entretanto, a presença de Na^+ . Considerando-se que sua presença não tenha sido detectada em análise do “branco” da água deionizada empregada no ensaio, restam duas possibilidades sempre discutidas na geoquímica de rochas carbonáticas:

Figura 8.15 Evolução da lixiviação de cátions por hidrólise de fragmentos de BB em Soxhlet, em tempo limitado de ciclos.

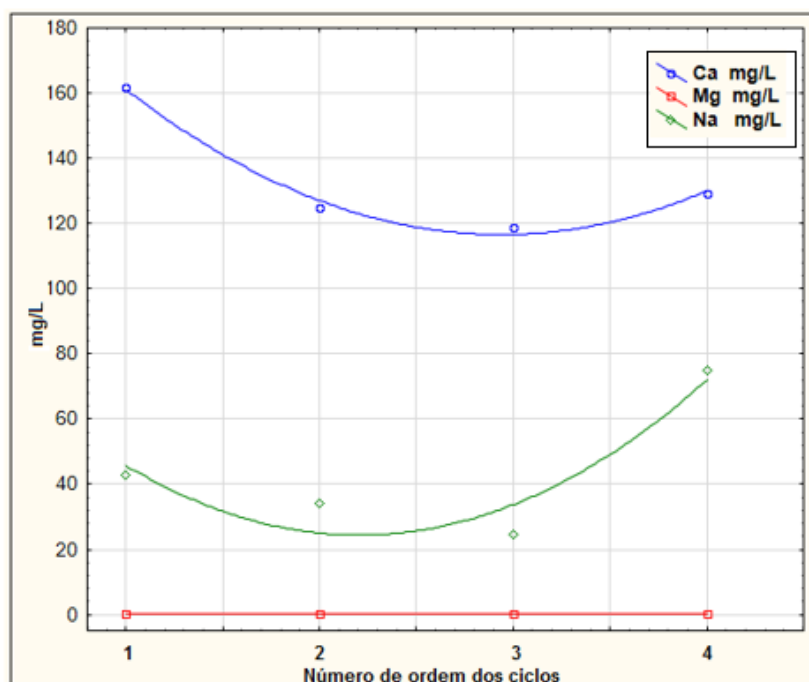


Fonte: Elaborado pela autora

Do ponto de vista físico-químico, a estabilidade para formação de calcita nas CNTP em meios aquosos exige $\text{pH} \geq 7,8$ embora as condições de Eh possam variar desde valores positivos aos negativos (TUCKER & WRIGHT, 1990). Nestes ambientes, já alcalinos, e precursores de condições de alcalinidade que podem atingir estágios evaporíticos, a presença de ions Na^+ , sobretudo como cloretos (NaCl), pode permitir sua diadocia substituindo o Ca^{++} na cristalização de calcita. Dentre vários autores que advogam esta possibilidade, Busenberg & Plummer (1985) apresentaram as condições cinéticas e termodinâmicas permitindo a incorporação de Na^+ na estrutura cristalina de carbonatos. Por outro lado, microinclusões fluidas hipersalinas (5 a 9x a salinidade da água do mar), enriquecidas em cloretos, já foram relatadas por vários autores (e.g. MOORE, 1985).

Observações similares, por hidrólise de placa de BB em Soxhlet (Figura 8.16), demonstra a presença e comportamento geral dos cátions lixiviados Ca^{++} e Na^+ , e a inobservância de cátions de Mg^{++} , atestando a condição “resistente” da dolomita considerado o tempo adotado para os ensaios.

Figura 8.16. Evolução da lixiviação de cátions por hidrólise de placa de BB em Soxhlet, durante um número limitado de ciclos e de tempo por ciclo.



Fonte: Elaborado pela autora

8.6 Intensidade de Brilho

A intensidade de brilho é uma propriedade transcendental que, ao lado do padrão estético de um produto lítico, rege sua apreciação e a escolha por parte do usuário. O padrão estético passa não somente por critérios pessoais, como ainda por tendências particularizadas de cada população, mas a intensidade e persistência do brilho, qualquer que tenha sido a escolha, é algo comum a todos os clientes e a todos os povos.

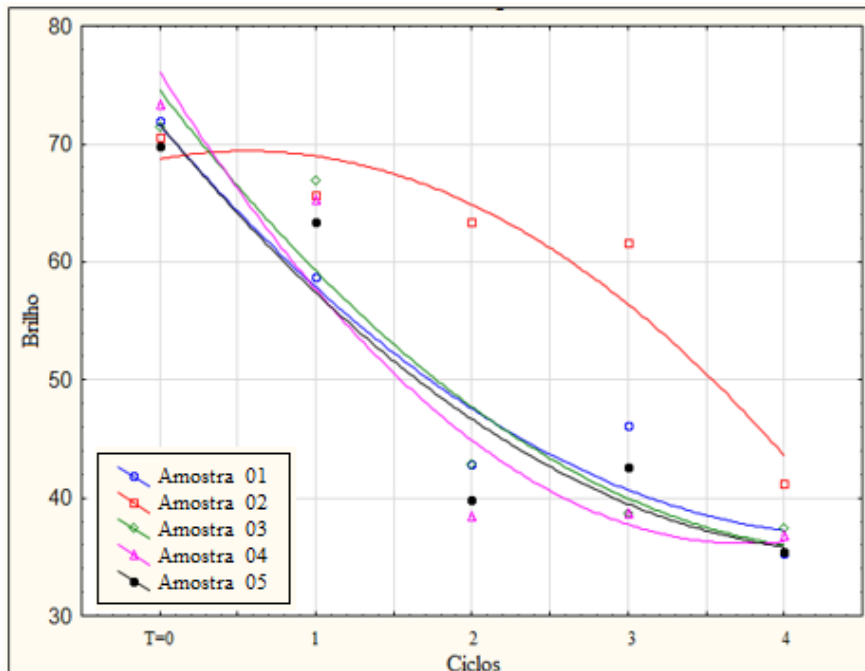
A ocorrência de patologias e a perda do brilho são problemas indesejáveis que são geralmente causados por agentes exógenos tais como o intemperismo, mas também por interferências que podem ser exclusivamente antrópicas. Dentre os agentes relacionados com o intemperismo, que afetam sobremaneira os revestimentos pétreos, os mais atuantes são: *spray*

salino, e as diversas variantes que caracterizam as chamadas chuvas ácidas. Convencionalmente, é aqui considerado como aceitável um brilho inicial ($T = 0$), ou de aquisição no mercado, exibindo padrão de intensidade de brilho ≥ 60 ; e o de nível crítico de brilho, ou necessidade imperiosa de revitalização do produto, o padrão de intensidade de brilho ≤ 40 .

8.6.1. Intensidade de brilho do BB versus Spray Salino

Os resultados referentes à influência do *spray* salino, após ciclos de testes em câmara salina (Figura 8.17), mostram um comportamento regressivo de 2º grau, tipo exponencial negativo, para os 5 corpos de prova de BB *in natura* lustrados. Exceto no caso da amostragem mais dolomítica (amostra 2), o comportamento é previsível e aproximadamente coincidente ponto de vista da morfologia da regressão linear (primeiro grau). A situação de intensidade de brilho crítica (valor arbitrado em 40), de um modo geral, foi atingida no 3º ciclo.

Figura 8.17 Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio com Spray Salinof

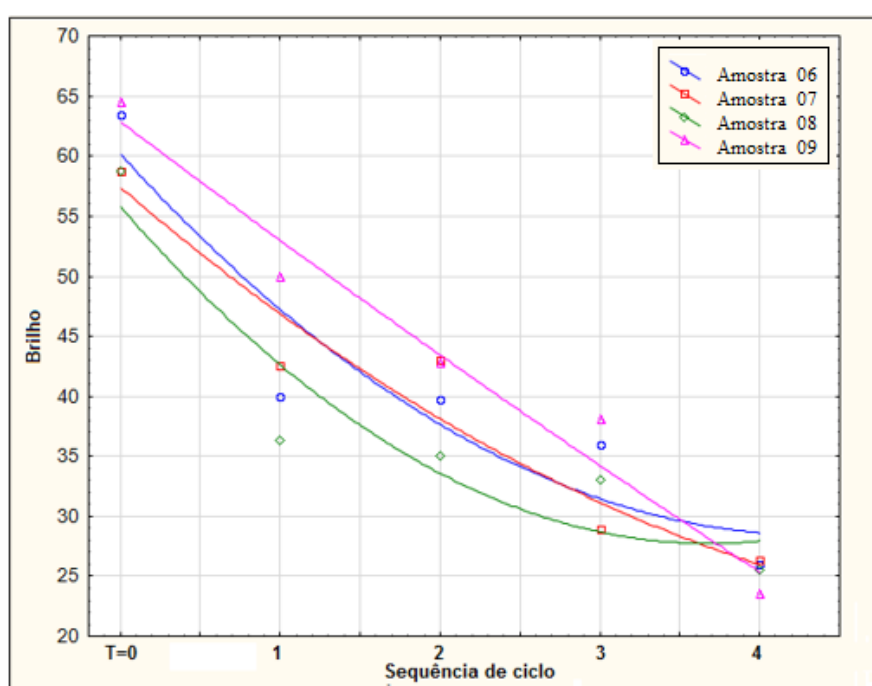


Fonte: Elaborado pela autora.

8.6.2 Intensidade de brilho do BB versus SO_2

Os resultados dos ensaios em câmara com atmosfera impregnada com SO_2 , também se mostraram em regressão linear de 2º grau, tipo exponencial negativo, ou mesmo de 1º grau negativo (Amostra 04), para os corpos de prova de BB lustrado, *in natura*. A morfologia das regressões lineares é, *grosso modo*, também coincidente. Com lustro inicial mais baixo (intensidade de brilho entre 55 a 65), o limiar de brilho crítico foi atingido, de uma forma geral, no 2º ciclo dos ensaios (Figura 8.18).

Figura 8.18 Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio em câmara enriquecida em SO_2 .



Fonte: Elaborado pela autora

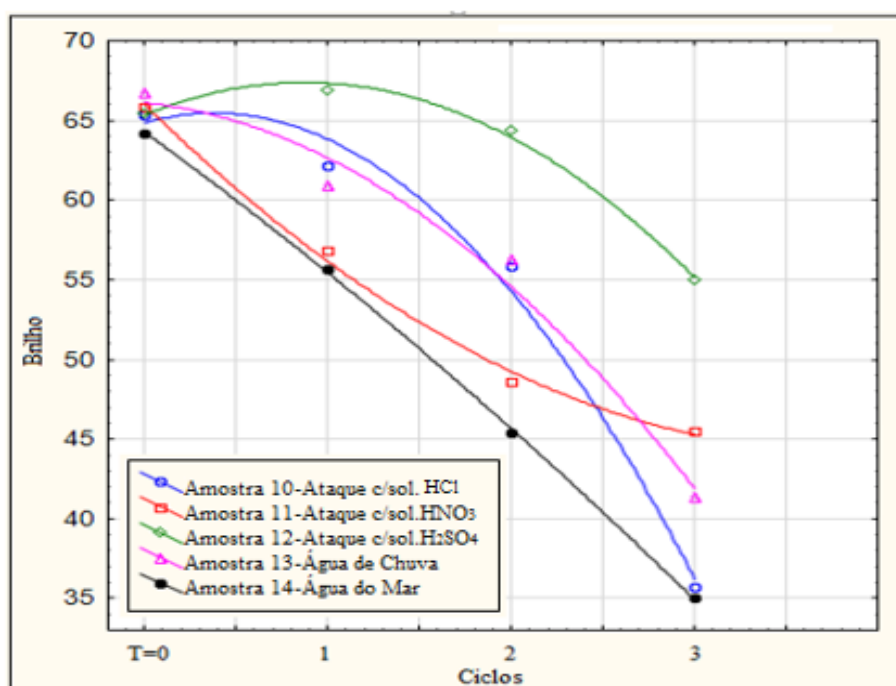
8.6.3 Intensidade de brilho do BB versus ataques por soluções acidificadas e solução NaCl

Os diversos tipos de ataques ácidos, e inclusive a atuação de solução salina (NaCl), sobre corpos de prova do BB, produziram resultados diferenciados e comportamentos distintos. Partindo de intensidades de brilho muito próximas (≈ 65 em $T = 0$), a morfologia das regressões lineares produziu tanto feições de 1º grau (solução salina) quanto diferentes tipos de regressão

de 2º grau, expressando formas distintas de atuações das soluções reagentes empregadas (Figura 8.19).

Consideradas diferentes concentrações ácidas adotadas e distintos tipos de soluções reagentes, e desconsiderada alguma diferença composicional entre um ou outro corpo de prova do BB, a solução salina mostrou-se como o mais agressivo dos agentes de alteração, resultando em se atingir a intensidade crítica de brilho (= 40) na altura do ciclo 2,5. Em contraposição, o ataque com solução de HNO_3 apresentou-se como a de menor agressividade de alteração, não tendo atingido a intensidade de brilho crítico ao termo do 3º ciclo, além de mostrar tendência assintótica na evolução dos ensaios, o que sugere a necessidade de pelo mais dois ciclos (atingindo-se assim o 5º ciclo) para que o corpo de prova venha a exibir a intensidade crítica de brilho.

Figura 8.19 Análise regressiva da evolução do brilho de placas de BB durante ciclos de ensaio com diferentes tipos de soluções ácidas e solução salina (água do mar).



Fonte: Elaborado pela autora

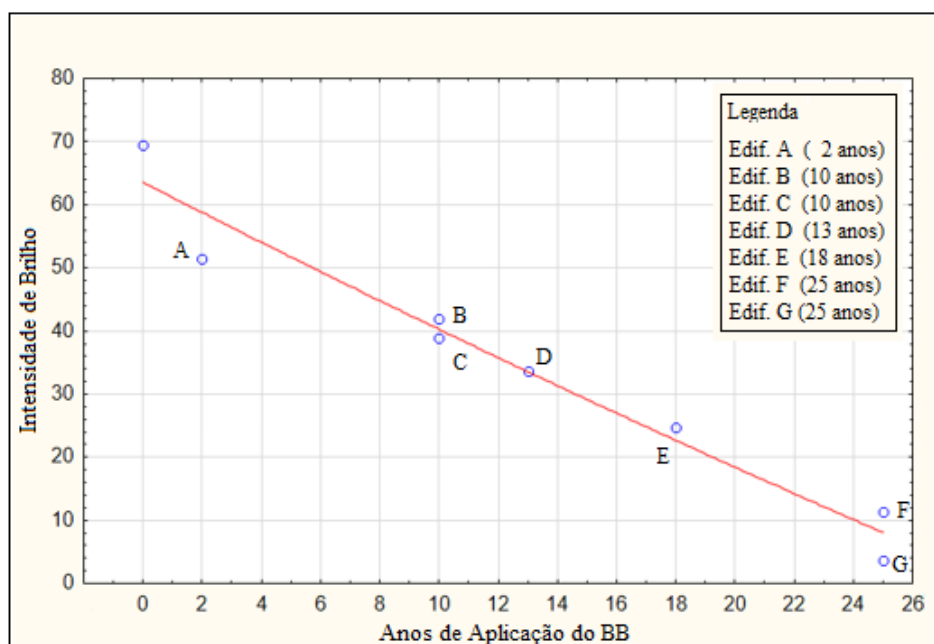
O comportamento morfológico da regressão linear referente aos ensaios com soluções de HCl e da água de chuva mostraram-se similares, do tipo exponencial negativo, atingindo a intensidade crítica de brilho no 3º ciclo. O comportamento diferenciado da regressão linear referente aos resultados do ataque com solução de H_2SO_4 , em que pese o fato de ser um

ácido reconhecidamente forte, foi prejudicado pelo fato da formação ---já anteriormente demonstrada nesta pesquisa --- de crosta branca refletiva, de tal modo que as leituras foram por esta razão falseadas. No caso específico de rochas carbonáticas, este tipo de ensaio, portanto, não é válido, e está representado no diagrama (rever figura 19) apenas para objetivos didáticos.

8.7. Intensidade de brilho de placas de revestimento de BB *in situ*

O número suficiente de fachadas com revestimento em BB na orla litorânea do Recife, assim como a disponibilidade de dados históricos confiáveis sobre estas edificações, permitiu um trabalho sistemático de medidas de intensidade de brilho em suas faces de barlavento. Em cada caso foram considerados os valores médios de 30 (trinta) leituras, distribuídas em pontos diversos de cada fachada, sempre em condições de iluminação plena e ao longo de uma mesma altura (3 metros) em relação ao piso (nível inferior) destes revestimentos. Os resultados, considerados em tratamento estatístico, mostraram consistente comportamento da perda de brilho como de uma regressão linear de primeiro grau (Figura 8.20).

Figura 8.20. Análise regressiva da intensidade de brilho de edifícios revestidos com BB, na orla litorânea do Recife-PE, em faces de barlavento, e situação geográfica até 150m da orla litorânea.



Fonte: Elaborado pela autora

Estes resultados permitem confiavelmente a transposição de testes de bancada com influência no parâmetro de intensidade de brilho resultante, para predições de perda de brilho em aplicações do BB em fachadas, guardadas as premissas de condições de fachadas de barlavento em orla litorânea (até 150 metros da franja praial) de áreas urbanas metropolitanas, sob clima tropical úmido. Neste caso, a revitalização de fachadas visivelmente alteradas (intensidade de brilho ≤ 40) se impõe em até 10 anos. Dentro desta previsibilidade os desvios absolutos de leitura, em termos de intensidades de brilho, são pequenos, exceto na fase inicial dos processos de alteração. Aparentemente, a perda relativa para um padrão inicial de intensidade de brilho = 65 parece ser mais acelerada nos dois primeiros anos, situando-se entre 10 a 25%, suavizando-se nos anos subsequentes.

Comparando-se os resultados obtidos de alteração efetiva do BB em fachadas da orla litorânea do Recife, provocados por causas diversas convergentes, e estabelecido um padrão de degradação “a ser revitalizado” no limiar da intensidade de brilho = 40, as transposições possíveis de serem estabelecidas, a partir de ensaios de bancada realizados seguindo-se normas de ensaio da ABNT, são as seguintes:

- (i) Solução ácida HNO_3 ≈ 5 ciclos
- (ii) Solução ácida HCl 3 ciclos
- (iii) Água da chuva 3 ciclos
- (iv) Solução ácida H_2SO_4 não adequada para avaliações
- (v) Spray salino 3 ciclos
- (vi) Água do mar 2,5 ciclos
- (vii) Atmosfera saturada SO_2 ≈ 5 ciclos

Guardadas as devidas salvaguardas que BB mais dolomíticos poderão oferecer performances algo menos desfavoráveis ante o intemperismo, e que as soluções ácidas aqui consideradas estão diluídas conforme normas ABNT, estes resultados apontam que a água marinha (*spray*) e atmosferas saturadas em SO_2 figuram entre os mais fortes agentes de alteração de revestimentos em BB.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Designado de várias formas, o chamado “mármore” Bege Bahia (BB) deve ser considerado genericamente como um calcrete, derivado da alteração supergênica de calcários dolomíticos proterozóicos da Formação Salitre. Detalhado estudo estratigráfico conduzido por Spohr (2014) explicitou diversas fácies dolomíticas desta formação, onde feições grumosas e microgrumosas são frequentes. Por este vínculo genético, o BB é uma rocha carbonática onde a participação da fração dolomítica está sempre presente, podendo ser significativa em RT. Estas concentrações dolomíticas estão sobretudo localizadas em elementos figurados grumosos, aparentemente uma herança petrogenética da litologia proterozóica. Em contraposição, a matriz dos BB é de natureza essencialmente calcítica. Quartzo (<5%) e paligorskita são acessórios. Minerais férricos não foram detectados em DRX ou MEV, embora detectados em poucas análises químicas disponíveis na literatura.

As condições de alterabilidade do BB, quando utilizado em revestimentos de edificações, tanto observadas *in situ* quanto em simulações de intemperismo conduzidas em bancada, foram analisadas e interpretadas com o concurso de várias técnicas de investigação científica. Os resultados permitem estabelecer um critério de “intensidade crítica de brilho” (valor de leitura = 40) para o caso do BB que, em condições “*in situ*”, consideradas fachadas de barlavento próximas a orlas marinhas e sob clima tropical úmido, é atingida em até 10 anos após a aplicação desta rocha ornamental. Nos diversos ensaios de alterabilidade acelerada sob critérios reguladores da ABNT, utilizando-se diversas soluções ácidas, solução salina com NaCl, e produtos naturais como a água de chuva e água do mar, é possível se estabelecer, para cada caso, o estágio de ciclo que corresponde ao tempo em que o revestimento de BB atingirá *in situ* a “intensidade crítica de brilho”.

Análises químicas RT com apoio de análises DRX, imagens e análises em MEV, análises a partir de ensaios em Soxhlet e em câmaras de vapor, envolvendo corpos de prova de BB lustrado “*in natura*” e o mesmo produto após cada tipo de ensaio de alterabilidade acelerada, esclareceram os principais mecanismos de alteração desta litologia carbonática. Dentre os principais agentes de alteração mostraram-se mais agressivos a câmara de gás com saturação de SO₂ e a água do mar (inferindo-se, neste caso, o *spray* marinho), que levam a se atingir a intensidade crítica de brilho em estágio $\leq 2,5$ ciclos. Na maior parte dos ensaios a

intensidade crítica de brilho foi atingida em torno do equivalente ao terceiro ciclo dos testes. Assim sendo, confirma-se a não adequação de uso de BB em fachadas, notadamente em situações de exposição a *spray* marinho e em concentrações urbanas com incidência forte de emissões de SO₂.

A reação da solução ácida de H₂SO₄ com a superfície do BB, resultando em neoformação de persistente crosta branca de gipsita (CaSO₄.2H₂O), invalida a utilização deste método de aceleração acelerada nos casos de rochas ornamentais tipo mármore. Em nenhuma das metodologias empregadas foi detectada a presença de minerais de Fe, de modo que a patologia de manchamentos férricos poderá não ser oriunda da natureza composicional dos BB, mas provavelmente a partir da composição de rejantes ou de grampos de fixação das placas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES-BARROS, L. A. Alteração e Alterabilidade de Rochas. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica. 1991. 384 p.

_____, Os monumentos e a doença da pedra Colóquio/Ciências, Fundação Calouste Gulbenkian,, nº 9, Lisboa. 1991b. p. 59-74.

_____, Análise Laboratorial da influência da granularidade na alterabilidade das rochas. Técnicas, n. 417. 1972, p. 65-70.

_____, As Rochas dos Monumentos Portugueses. Tipologias e Patologias. Lisboa: Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico. Coleção “Cadernos”, n.º 3, 2 vols.(1).2001a. 536 p.

AHR, W.M. Geology of Carbonate Reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008. 277 p.

AKBAR, M.; PETRICOLA, M.; WATTA, M.; BOYD, A. Classic interpretation problems: evaluating carbonates. *Oilfield Review*, 7(1). 1995. p. 38-57.

ALONSO-ZARZA, A. M. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews*, 60(3-4), 2003. p. 261-298.

ALONSO-ZARZA, A. M.; WRIGHT, V.P. Calcretes. In: ALONSO-ZARZA, A.M.; TANNER, L.H. (Ed.) *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. Amsterdam: Elsevier, 2009, v.61. p. 225-267. (Developments in Sedimentology).

ALONSO-ZARZA, A. M.; MARTÍN, P. A.; MARTÍN, G. R. Petrología Sedimentaria. Notas de Teoría. 9. Rocas carbonáticas: Diagénesis. REDUCA (Geología) Madrid, v. 2, n. 3, 19 jan. 2010. Acesso em: 16 out. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (1997) B 117/97; standard practice for operating salt spray; fog; apparatus. Philadelphia.

_____, ASTM (2010). C568 - Standard Specification for Limestone Dimension Stone.

ARISTARAIN, L.F. On the definition of caliche deposits. Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Bd. 15, Heft 3: 1971. p. 275-289.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8094/83: Material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição à nevoa salina. Rio de Janeiro. 1983. 5 p.

_____, NBR 13818. Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaio. ANEXO H. (normativo) Determinação da resistência ao ataque químico. 1997. 5p.

_____, NBR 8094/83: Material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro. 1983. 5p.

_____, NBR 15845/2010. Petrografia. Anexo A, Normativo. Rio de Janeiro. 2010. 5 p.

_____, NBR 15845/2010. Densidade Aparente, Porosidade e Absorção de água. Anexo B, Normativo. Rio de Janeiro. 2010. 5 p.

AZEVEDO, H. C. A.; COSTA, P. H. O. (Coord.). Catálogo de rochas ornamentais da Bahia-Brasil. Salvador: SGM, il. color. Texto em português e inglês. 1994. 146 p.

BARBOSA, J.S.F & DOMINGUEZ, J. M. L. Geologia da Bahia: Texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Salvador: SICM/SGM, il. Convênio SICM/SGM/UFA/PPPG/FAPEX. 1996. 382 p.

BATHURST, R.G. Carbonate sediments and their diagenesis. *Developments in Sedimentology*, 12. Elsevier, Amsterdam. 1975. 658 p.

BECERRA-BECERRA, J.E. Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental: procedimentos analíticos para sua avaliação. Dissertação de Mestrado em Geologia econômica e aplicada. IGC-UFMG. 2004. 117 p.

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

BECK, K. Etude des propriétés hydriques et des mecanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. 2006. 226 p.

BERTOLINI, C. Sistema para Medição de Cores Utilizando Espectrofotômetro, TCC Ciências da Computação da Universidade Regional de Blumenau, 2010. 120 p.

BRANNER, J.C, Aggraded limestone plains of the inferior of Bahia and the climatic changes suggested by them. *Bull. Geol. Soc. America*, v.22, 1911. p. 187-206.

BRAZ, E. & MAGALHÃES, A.C.F. Plano estratégico para o desenvolvimento sustentado do mármore bege Bahia na região de Ouroândia, Jacobina e Mirangaba: avaliação econômica, direitos minerários e reservas oficiais, Salvador: CBPM, 2002, 26 p. Convênio SICM/ COMIN/CBPM.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Natural stone test methods. Determination of resistance to ageing by SO₂ action in the presence of humidity. BS EN 13919:2003. Withdrawn Published: December 2002. 9 p.

BUSENBERG E. & PLUMMER L.N. Kinetic and thermodynamic factors controlling the distribution of SO_4^{2-} and Na^+ in calcites and selected aragonites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 1985. p. 713-725.

CARDELL, C.; RIVAS, T.; MOSQUEIRA, M.J.; BIRGINE, J.M.; MOROPOULOU, A.; PRIETO, B.; VAN GRIEKEN, R. Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*. N. 28, 2003, p. 1-14,

CIELAB - Commission International de Eclairage (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15. Colorimetry Bureau Central de la CIE. Paris. 1976. 30 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION - CEN EN 14147/03: Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by salt mist. Brussels.

COSTA, A.P.L.; NETO, J.A.N.; GALEMBECK, T.M.B.; SILVA, Z.C.G.; SIMÃO, J.A. Rochas ornamentais: alterabilidade dos gnaisses enderbíticos de lixiviação contínua através do extrator soxhlet. *Holos*, 3: 2010. p. 3-12.

CHAFETZ, H.S. & FOLK, R.L. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentology Petrology*, v.54. 1984. p. 289-316.

CHEN, X.Y.; SPOONER, N.A.; OLLEY, J.M. Addition of Aeolian dusts to soils in southern Australia: red silty clay trapped in dunes bordering Murrumbidgee River in the Wagga Wagga region. *Catena*, 47: 2002. p. 1-27.

CHORQUETTE, P.W. & PRAY, I. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: American Association of Petroleum Geologists Bulletin. V. 54. 1970. p. 207-250.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. (2003) EN 14147/03: Natural stone test methods – Determination of resistance to ageing by salt mist. Brussels.

DEER, W., HOWIE, R., ZUSSMAN, J. *Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução*. 3ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 2008. 707 p.

DEINES, P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz, P.; Fontes, J. Ch. Ed. *Handbook of environmental isotope geochemistry*, vol. I: The terrestrial environment. Amsterdam, Elsevier Publ., 1980. p. 329-406.

DEL MONTE, M. La durevolezza dell pietre messein opera. *Il Geologo dell Emilia-Romagna*, Bolletino Ufficiale d' Informazione dell'Ordine dei geologi Regione Emilia-Romagna. Anno VI. No 23. Bologna. 2006. p. 7-32.

DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.) *Classification of Carbonate Rocks*. Am. Assoc. Geol. Mem, 1. 1962., p. 108-121.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - UFBA.

Desenvolvimento Tecnológico Integrado do Mármore Bege Bahia – DETIMBA. Salvador:

EMBRY, A.F. & KLOVAN, J.E. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, v. 19. 1971. p. 730-781.

EMIG, W.H. The travertine deposits of the Arbuckle Mountains Oklahoma, with references to the plant agencies concerned in their formation, *Bull. Okla. Geol. Surv.*, 29, 1917, p. 9-75.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION CEN. *Nature Stone Test Methods*. Determination fo resistance to ageing by SO₂ action in the presence of humidity. Final Draft. Normal EN 13919. 2002, 7 p.

FIGUEIREDO, P.M.S.L.R. Estudo tecnológico de rochas calcárias da região de Lisboa (Jurássico e Cretácico); Tese Dout. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 1997. 179 p.

FIGUEIREDO, P.; BARROS, LUÍS AIRES; TORQUATO, J.; BESSA, F. ; LIMA, M. A.; FERNANDES, H. Determinação laboratorial de um índice de alterabilidade para granito Rosa Iracema, Ceará, Brasil, VI Congresso Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 6., SEMANA DE GEOQUÍMICA, 12., 2001, Faro. Actas ... Faro, Portugal: Universidade de Algarve. 2001, p. 384-387.

FITZGERALD, J. W. Marine aerosols: a review. *Atmospheric Environment*, v. 25A, n. 3/4, 1991. p. 533- 545.

FORD, T.D. & PEDLEY, H.M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, v. 41, 1996. p. 117-175.

FORD, T.D.; PEDLEY, H.M. Tufa deposits of the world. *Journal of the Speleological Society of Japan*. v. 17, 1992. p. 46-63.

FOLK, R.L., Pratical petrographic classification of limestones. *Bull AM Assoc. Petrol. Geol.* 43, 1959. p. 1-38.

FOLK, R.L., *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Co. Austin, Texas. (1965). 310 p.

FRASCÁ M.H.B.O. Caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento: estudo por meio de ensaios e análises e das patologias associadas ao uso. SBG, Anais III Simp. Rochas Ornam. do Nordeste, Recife-PE, 2002. p. 35-47.

_____. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo. 2003. 264 p.

_____. Rochas ornamentais - definições e características; São Paulo. 2011. 62 p.

GALHANO C. & SIMÃO, J.A.R. Efeitos do nevoeiro salino em argilas para cerâmica estrutural (nota preliminar). Revista Electrónica de Ciências da Terra. Vol. 20 VIII Congresso Nacional de Geologia, 2010. 20 p.

GAURI, K.L & BANDYOPADHYAY, J.K. Carbonate Stone. Chemical Behavior, Durability and Conservation. Univ. of Louisville. Wiley-Interscience publ., 1999. 284 p.

GEOEXPLORE CONSULTORIA E SERVIÇOS LTDA. Investigação geológica e ambiental dos depósitos e áreas de ocorrência do mármore Bege Bahia, na região situada entre os municípios de Ouro-lândia e Jacobina, a S de Campo Famoso, a N Salvador. CBPM/COMIN, 2002. 135 p.

GILE, L.H., PETERSON, F.F.; GROSSMAN, R.B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. Soil Science, n. 101, 1966. p. 347-360.

GOUDIE, A.S. Duricrust in Tropical and subtropical landscapes. Oxford. Clarendon Press, 1973. 174 p.

GROSSI, C.M. & MURRAY, M. Characteristics of carbonate building stones that influence the dry deposition of acidic gases. Construction and Building Materials, v.1, 1999. p. 101-108.

_____ Calcrete. In Goudie, A.S. & Pye, K. (eds) Chemical Sediments and Geomorphology. London: Academic Press, 1983. p. 93-131.

GROSSI, C.M., ESBERT R.M., DIAZ-PACHE F. Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos. Materiales de Construcción, 252 (48), 1998. p. 5-25.

GROSSI, C.M. & MURRAY, M. Characteristics of carbonate building stones that influence the dry deposition of acidic gases. *Construction and Building Materials*, v.1. 1999. p. 101-108.

GROSSI, C.M., BRIMBLECOMBE P., ESBERT, R.M., ALONSO, F.J. Color Changes in Architectural Limestones from Pollution and Application, *32 (4)*, 2007. p. 320-331.

GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. *Atmospheric Environment*, v. 30, n. 6, 1996. p. 977-989.

HUERTAS, F.J. Fiore, S., *Pedologia Sperimentale: Idrolisi Delle Rocce e Sintesi dei Minerali Argillosi*. In *Incontri Scientifici*, Vol.1, S.Fiore (Ed.), Instituto di Ricerca sulle Argille, 1995, p. 3-22.

Instituto Brasileira de Geografia e Estatística - IBGE. Disponível em [HTTP://www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) Acesso em 10 fevereiro de 2013.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Seção de Observação e Meteorologia Aplicada SEOMA - 3º Dime - Recife - PE < seoma.pe@inmet.gov.br > acessado 02 de fevereiro de 2015.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Especial. (2013). Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br>> Acesso em 08 de abril 2013.

JENNY, H. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York, 1941. 281 p.

JULIA, R. Travertines. In: SCHOLLE, P.A.; BEBOUT. D.G. & MOORE, C.H. *Carbonate Depositional Environments*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1983. p. 64-72.

KRAUSKOPF, K. B. *Introdução à geoquímica*. Editora USP, 1972. 170 p.

KRAUSKOPF, K. B. & BIRD, D.K. Introduction to Geochemistry. McGraw – Hill, New York. 1995. 180 p.

KLAPPA, C.F. A process-response model for the formation of pedogenic calcretes. In: Wilson, R.C.L. (ed.); Residual deposits: Surface Related Weathering processes and Materials. Geol. Soc., Spec. Public., Blackwell Scientific Public., Oxford, n.11, 1983. p. 211-220.

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

LAMPLUSGH G.W. Calcrete. Geological Magazine, 39, 1902. 575 p.

LEÃO, A.C. – Gerenciamento de Cores para Imagens Digitais, Belo Horizonte, UFMG - Dissertação (Mestrado em Artes Visuais), 2005. 170 p.

LEEUEW, G. Sea Spray Aerosol Production Form Waves Breaking in the Surf Zone. J. Aerosol Sci. Vol. 30.1999.p. 63-64.

DE LEEUEW, G., Aerosols near the air-sea interface, Trends Geophys. Res., 2, 55–70, 1993.

LEEUEW G. & VIGNATI, E. Aerosol Particle Size Distributions at a Rural Coastal Site. J. Aerosol Sci., Vol. 29. 1998, p. 695-696

LIMA, M. A. B. Estudo do comportamento dos gnaises Casa Blanca, Juparaná delicato e giallo falésia (Ceará-Brasil) em atmosfera salina. Tese Dout., Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006. 182 p.

MACHETTE, M.N. Calcic soils of the southwestern United States. Geological Society of America Bulletin, Special Paper, n. 203, 1985. p. 1-21.

MANN, A.W. & HORWITZ, R.C. Groundwater calcrete deposits in Australia: some observations from Western Australia. *Journal of Geological Society of Australia*, 1979. 26: p. 293-303.

MASON, B. *Princípios de Geoquímica*. Ed. Polígono, São Paulo, 1974. 180 p.

MASON, B. & MOORE, C.B. 1982. *Principles of Geochemistry*. 4th ed. John Wiley & Sons. New York, 1982. 344pp.

MESQUITA, M.P.S. *Composição, estruturas, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CEE)*. Tese Dout., Inst. Geoc. e Ciên. Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002. 169 p.

MILLOT, G. *Geology of Clays. Weathering, Sedimentology, Geochemistry*. Springer Verlag, Berlin, 1970, 429 p.

MOORE C.H. Upper Jurassic cements; a case history. In: *Carbonate cements*; N. Schneidermann & P.M. Harris (eds.), *Spec. Publ. SEPM*, 36, 1985. p. 291-308

_____. *Carbonate diagenesis and porosity*. Elsevier Ed., *Developments in Sedimentology* 46, 1989. 338 p.

MORAES, A. L. A. *Granulitos de Chorozinho: Caracterização Petrográfica e Geoquímica*. Dissertação Mestrado em Geologia, Univ. Fed. Ceará – UFC. Fortaleza/CE, 1999. 110 p.

MILNES, A. R. & HUTTON, J. T. Calcretes in Australia. In: *Soils: an Australian Viewpoint*. CSIRO Division of Soils. Academic Press, London, 1983. p. 119-162

MORCILLO, M.; CHICO, B.; OTERO, E.; MARIACA, L. Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion materials performance, v.38. 1999. p. 72-77.

NETTERBERG, F. Some road making properties of South African calcretes. Proc. 4th Reg.Conf.African Soil Mech. Fndn. Eng., Cape Town, 1:1967. p. 77-81.

_____. The interpretation of some basin calcretes types. South Africa. Archaeology Bulletin. N.24. 1969. p. 117-122.

_____. Geology of Southern African calcretes. I: Terminology, description, macrofeatures and classification. Transaction of the Geological Society of South Africa, n. 83, 1980. p. 255-283.

NEVES, R.A. Usos de rochas na arquitetura - contribuição ao processo de especificação. Recife. Tese Dout. - UFPE, 2012. 188 p.

OHMOTO, H. & RYE, R.O. Isotopes of Sulfur and Carbon. In Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits; H. Barnes (Ed.). John Willey and Sons, NewYork, 1979, p. 509-567.

PEDLEY, H.M. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. Sedimentary Geology, v. 68, 1990. p. 143-154.

PENHA, A.E.P.P. O Calcário Caatinga de Ourolândia, Bahia: feições diagnósticas, gênese e evolução de um perfil calcrete. 1994. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 1994.180 p.

PETECOST, A.; TORTORA, P. Bagni di Tivoli, Lazio: a modern travertine-depositing site and its associated microorganisms. Bollettino Della Società Geologica Italiana, v. 108, 1989. p. 315-324.

PETECOST, A. The formation of travertine shrubs: Mammoth Hot Springs, Wyoming. Geol. Mag., 127, 1990. p. 159-168.

_____. British travertines: a review. *Proceedings of the Geologists Association*, v. 104, 1993. p. 23-39.

_____. *Travertine*. Berlin, Springer Verlag, 2005. 445 p..

PETECOST, A.; VILES, H. A Review and Reassessment of Travertine Classification. *Geographie physique et Quaternaire*, v. 48. n. 3, 1994. p. 305-314.

RIDING, R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. *Earth–Science Reviews*, 58, 2002. p. 163–231.

RIBEIRO, A.F. *Mármore Bege Bahia em Ourolandia, Mirangaba – Jacobina, Bahia: geologia, potencialidade de desenvolvimento sustentável – Salvador: CBPM, 2002. 52 p.: il. Mapa – (Série Arquivos Abertos; 17).*

RIVAS, T.; PRIETO, B.; BIRGINIE, J.M.; Weathering of granitic rocks by chlorides: effect of the nature of the solution on weathering morphology . *Earth Surface Processes and Landforms*. N. 28, 2003. p. 425-436.

SEMENIUK, V. & MEAGHER, T.D. Calcrete in Quaternary coastal dunes in southwestern Australia: a capillary-rise phenomenon associated with plants. *Journal of sedimentary Petrology*, 51, 1981. p. 47-68.

SILVA, S.A. Estado da arte na alterabilidade de placas pétreas: estudo de casos na região litorânea do Recife – PE. Diss.Mestrado, PPGMINAS – Univ. Fed. Pernambuco (UFPE), 2008. 215 p.

SILVA, S.A.; OLIVEIRA, F.M.C.; MENOR, E.A.; MELO, E.B.; NOGUEIRA, J.A.N. Efeitos dos Poluentes atmosféricos sobre placas de rochas carbonáticas nos revestimentos de edificações na Região Litorânea do Recife, PE. DOI: 10.15628/ ISSN 1807-1600. *Natal. HOLOS*, Vol. 6, 2014. p. 45-55.

SIMÃO, J.A.R.S. Rochas ígneas como pedra ornamental, causas, condicionantes e mecanismos de alteração implicação tecnológicas. Tese (Doutorado) Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, Portugal, 2003. 202 p.

SUGUIO, K. Rochas Sedimentares. Propriedades, Gênese, Importância econômica. São Paulo: Edgar Blucher, Ed. USP, 1990. 500 p.

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

SPOHR A.P., 2014. Estratigrafia em alta resolução aplicada a calcários microbiais: exemplo da Formação Salitre, Supergrupo São Francisco-BA. Porto Alegre, UFRGS, Rel. Grad., 77 p.

TAYLOR, N.J. & WU, J. Simultaneous measurements of spray and sea salt, J. Geophys. Res., 97 (C5), 1992. p. 7355-7360.

TERRAZA, R. Metodología para la descripción y análisis de rocas sedimentarias siliciclásticas y calcareas em sección delgada. INGEOMINAS, Documento técnico. Bogotá, 1999. 53 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Guia de Normalização de Trabalhos Acadêmicos, Biblioteca Universitária. Fortaleza, 2013. 173 p.

VILES, H. A.; GOUDIE, A. S. Reconnaissance studies of the tufa deposits of the Napier Range, N.W. Australia. Earth Surface Processes and Landforms, v. 15, 1990. p. 425–443.

WARREN J.K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons. Berlin, Springer Verlag, 2006. 944 p.

WRIGHT, P.V.; TUCKER, M.E. Calcretes: na introduction In: Wright,.P.V.; Tucker, ME. (Ed) Calcretes. Reprint series of the International Association of Sedimentologists, Blackwell Scientific Publication Oxford. London, V. 2, 1991. p. 1-22.

WRIGHT, P.V. Calcrete. In: Nash, D.J., McLaren, S.J. (Eds.), Geochemical Sediments and Landscapes. Blackwell Publishing, Oxford, 2007. p. 10–45

_____. Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and Microbial processes on carbonate deposition. Geological Society. London, Special Publications, 2012. 370p.

WRIGHT, P.V.; TUCKER, M.E. Calcretes. Oxford, Blackwell Publishing, 1991. 352 p.

ZIMBRES, E. Dicionário Enciclopédico Livre de Geociências. [http://www.dicionario.pro.br/wiki/Recristalizaçã](http://www.dicionario.pro.br/wiki/Recristaliza%C3%A7%C3%A3o), Disponível em: <<http://www.dicionario.pro.br>>. Acesso em: 01 nov. 2012.


ZEZZA F. & MACRI F. Marine aerosol and stone decay. Sci Total Environ. Vol. 167, 1995. p. 123-43.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. Acidic attack of cement based materiais; a review; part. 1: principle of acidic attack. Construction and Building Materials, v.5, 2001. p.331-340

APÊNDICE A

Tabelas Diversas

1. Tabelas de Intensidade de brilho dos ensaios:

	Projeto de Tese:	Suely Andrade da Silva
	ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS	

INTENSIDADE DE BRILHO DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO COM SPRAY SALINO

Leitura	CICLO I					CICLO II					CICLO III					CICLO IV					
	Natural	SAS-01	SAS-02	SAS-03	SAS-04	SAS-05	SAS-01	SAS-02	SAS-03	SAS-04	SAS-05	SAS-01	SAS-02	SAS-03	SAS-04	SAS-05	SAS-01	SAS-02	SAS-03	SAS-04	SAS-05
1	74,80	63,70	65,20	58,20	64,20	62,90	59,30	57,70	56,30	55,70	55,00	49,80	52,00	46,10	40,20	48,60	33,00	35,80	32,60	35,70	35,00
2	58,10	76,20	56,70	61,30	67,50	81,20	38,60	60,20	22,90	23,80	35,00	51,60	69,00	39,20	28,10	50,40	38,90	36,70	32,60	59,30	38,90
3	84,00	62,40	50,40	47,00	73,30	53,10	47,10	51,90	38,60	27,90	40,20	33,10	69,80	55,00	26,30	44,90	53,80	37,10	35,50	43,50	29,90
4	78,70	58,80	73,40	79,00	65,80	63,20	42,10	54,00	43,50	23,10	28,10	48,00	67,60	35,00	60,50	38,70	44,40	48,50	28,80	31,40	41,00
5	69,00	54,30	60,80	76,40	58,10	72,80	35,70	55,10	31,40	25,10	40,20	43,80	73,20	40,20	21,90	38,80	22,70	40,60	27,80	51,40	36,10
6	68,80	54,40	50,50	70,10	74,40	57,70	43,50	53,10	51,40	23,30	28,10	65,80	68,00	28,10	35,20	40,20	33,00	39,10	33,50	56,30	39,00
7	72,30	54,30	47,60	79,30	58,60	57,50	31,40	57,50	47,10	28,60	26,30	57,40	72,10	26,30	46,10	46,40	20,90	38,80	44,30	22,90	42,80
8	75,30	59,00	55,10	47,10	60,10	65,00	51,40	55,00	48,00	38,40	60,50	29,90	72,80	60,50	39,20	49,10	30,70	42,10	49,10	38,60	35,50
9	75,30	53,10	47,50	82,90	61,40	61,60	56,30	51,00	35,70	51,30	46,10	35,90	75,90	21,90	55,00	45,40	52,80	53,70	48,10	47,10	19,00
10	78,00	50,70	52,40	68,50	69,30	51,90	22,90	50,30	59,30	37,20	39,20	46,40	70,30	35,20	35,00	23,10	22,70	39,90	42,10	42,10	37,30
Média	73,43	58,69	55,96	66,98	65,27	62,69	42,83	54,58	43,42	33,44	39,87	46,17	69,07	38,75	38,75	42,56	35,29	41,23	37,44	42,83	35,45
Desvio Padrão	6,683	7,054	7,932	12,467	5,551	8,437	10,686	3,019	10,792	11,312	10,858	10,508	6,193	11,715	11,715	7,631	11,406	5,374	7,430	10,686	6,440
Coef. Variação	10,988	8,320	7,055	5,373	11,759	7,430	4,008	18,080	4,023	2,956	3,672	4,394	11,153	3,308	3,308	5,577	3,094	7,672	5,039	4,008	5,504

Fonte: Elaborado pela autora.

INTENSIDADE DE BRILHO DOS CORPOS-DE-PROVA DO ENSAIO DE SO₂

Corpos de provas	Gloss (<i>In Natura</i>)				Gloss (Ciclo I)				Gloss (Ciclo II)				Gloss (Ciclo III)				Gloss (Ciclo IV)			
	SAS 06	SAS 07	SAS 08	SAS 09	SAS 06	SAS 07	SAS 08	SAS 09	SAS 06	SAS 07	SAS 08	SAS 09	SAS 06	SAS 07	SAS 08	SAS 09	SAS 06	SAS 07	SAS 08	SAS 09
Leitura 01	63,2	63,7	64,2	63,8	53,8	45,4	51,3	51,1	41,5	43,9	43,7	41,3	38,6	38,7	38,9	38,2	26,4	20,9	19,5	24,2
Leitura 02	53,1	76,2	67,5	76,2	44,4	48,6	37,2	29,7	22,4	52,2	26,4	28,3	31,4	31,8	53,8	53,2	21,4	30,7	24,2	28,3
Leitura 03	81,2	62,4	73,3	62,5	43,1	50,4	55,7	24,2	31,5	63,4	19,4	31,4	35,7	43,5	44,4	50,7	32,2	19,5	22,9	25,6
Leitura 04	72,4	58,8	65,8	58,8	33,0	44,9	23,8	36,4	45,7	45,1	36,3	23,5	59,3	31,0	37,2	34,7	19,3	24,2	29,7	23,5
Leitura 05	61,6	54,3	58,1	54,3	43,1	38,7	27,9	20,9	48,3	32,1	24,7	36,0	22,9	35,9	22,7	46,2	15,3	22,9	30,6	23,1
Leitura 06	51,9	54,4	74,4	54,5	38,9	38,8	23,1	44,1	62,7	30,5	23,8	38,5	38,6	29,7	33,0	37,8	35,4	30,5	25,7	29,6
Leitura 07	62,9	54,3	58,6	54,3	38,9	23,1	25,1	45,8	27,5	35,7	37,0	42,3	47,1	30,6	20,9	35,3	29,7	27,5	22,4	22,7
Leitura 08	72,8	59,0	60,1	59	20,9	40,2	23,3	20,9	33,4	39,7	28,8	27,4	42,1	25,7	30,7	11,9	32,6	33,4	31,4	27,4
Leitura 09	57,7	53,1	61,4	53,1	30,7	46,4	28,6	44,1	40,2	46,8	13,4	42,9	51,4	32,2	52,8	44,9	25,7	22,4	27,5	20,9
Leitura 10	57,5	50,7	69,3	50,7	52,8	49,1	38,4	45,8	44,1	40,5	21,4	38,6	56,3	41,1	43,1	36,4	22,4	31,4	31,8	29,7
Média	63,43	58,7	65,27	58,7	40	42,6	33,44	36,3	39,7	43	27,49	35,02	42,3	34	37,8	38,93	26,04	26,3	26,6	25,5
Desvio Padrão	9,401	7,44	5,851	7,44	9,98	8,04	11,92	11,5	11,6	9,81	9,166	6,908	11,3	5,6	11,3	11,55	6,479	4,96	4,28	3,098
Coef. Variação	54,03	51,3	59,42	51,3	30	34,5	21,52	24,8	28,1	33,2	18,32	28,11	31	28,4	26,5	27,38	19,56	21,4	22,3	22,4


Fonte: Elaborado pela autora

INTENSIDADE DE BRILHO DOS CORPOS-DE-PROVA DO ENSAIO DE ATAQUE POR SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS /OUTROS

Leituras	Natural	CICLO I					CICLO II					CICLO III				
		SAS 10 HCL	SAS 11 HNO ₃	SAS 12 H ₂ SO ₄	SAS 13 A.Chuva	SAS 14 A.Mar	SAS 10 HCL	SAS 11 HNO ₃	SAS 12 H ₂ SO ₄	SAS 13 A.Chuva	SAS 14 A.Mar	SAS 10 HCL	SAS 11 HNO ₃	SAS 12 H ₂ SO ₄	SAS 13 A.Chuva	SAS 14 A.Mar
1	74,80	77,10	64,20	65,20	62,30	65,90	55,00	45,40	45,80	50,30	61,20	41,50	35,00	40,90	42,80	50,00
2	78,10	79,80	67,50	56,70	59,00	51,60	49,60	48,60	46,50	55,10	50,80	22,40	38,90	46,30	53,20	43,40
3	74,20	76,00	73,30	50,40	55,00	60,20	55,00	50,40	39,10	48,70	55,00	31,50	29,90	45,00	45,20	44,00
4	78,70	70,00	65,80	73,40	55,00	68,20	35,00	44,90	37,20	50,10	62,90	45,70	41,00	34,20	45,00	55,90
5	69,00	70,20	58,10	60,80	55,20	55,90	40,20	38,70	51,10	50,00	50,10	48,30	36,10	31,50	46,20	44,90
6	68,80	76,00	74,40	50,50	58,10	65,80	55,00	38,80	29,70	51,80	60,00	62,70	39,00	40,20	47,10	56,00
7	72,30	75,30	58,60	47,60	51,10	57,40	50,00	23,10	24,20	42,30	54,30	27,50	42,80	42,50	35,30	44,30
8	75,30	78,00	60,10	49,40	60,50	50,30	60,50	40,20	36,40	54,00	48,70	33,40	35,50	32,20	50,00	44,00
9	75,30	79,90	61,40	47,50	55,40	55,00	50,00	46,40	20,90	51,90	50,10	40,20	19,00	33,50	44,90	42,40
10	78,00	78,70	69,30	52,40	60,20	50,00	55,00	49,10	44,10	55,00	49,30	44,10	37,30	43,10	50,10	46,90
Média	74,45	76,10	65,27	55,39	57,18	58,03	50,53	42,56	37,50	50,92	54,24	39,73	35,45	38,94	45,98	47,18
Desvio Padrão	3,345	3,349	5,551	8,174	3,226	6,404	7,271	7,631	9,463	3,556	5,083	11,031	6,440	5,283	4,620	4,824
Coef. Variação	22,260	22,721	11,759	6,776	17,724	9,061	6,950	5,577	3,963	14,318	10,670	3,602	5,504	7,370	9,952	9,780

Fonte: Elaborado pela autora.

2. Tabelas de Evolução de Massa dos ensaios:

 FCT FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA	Projeto: ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS	Suely Andrade da Silva
--	---	------------------------

EVOLUÇÃO DA MASSA TOTAL NOS CORPOS-DE-PROVA DO ENSAIO POR EXPOSIÇÃO SPRAY SALINOS

Corpos-de-provas: (7 x7 x2)	Ciclos: I - II - III - IV
Tipo de Ensaio: Evolução de Massa	Duração do ciclo: 15 dias, 3 horas e 15 minutos (para cada ciclo)
Equipamento: Balança Eletrônica	Período Inicial: 09/09/2013
Marca RADWG	Período Final: 23/12/2013
Laboratório: Rochas Industriais e Sedimentologia	

Corpos de provas	CICLO 01 (23/09 à 08/10/2013)				CICLO 02 (17/10 à 04/11/2013)				CICLO 03 (08/11 à 23/11/2013)				CICLO 04 (26/11 à 09/12/2013)			
	M1	M2	< 0,1%	< 0,1%	M1	M2	< 0,1%	< 0,1%	M1	M2	< 0,1%	< 0,1%	M1	M2	< 0,1%	< 0,1%
SAS-01 (7x7x2)	268,11	267,79	0,32	0,12	264,87	264,84	0,03	0,01	263,84	263,56	0,28	0,11	267,57	267,24	0,33	0,12
SAS-02	267,08	266,71	0,37	0,14	264,66	264,45	0,21	0,08	262,63	262,24	0,39	0,15	266,49	266,13	0,36	0,14
SAS-03	269,07	268,74	0,33	0,12	266,33	266,00	0,33	0,12	265,30	265,01	0,29	0,11	267,22	266,91	0,31	0,12
SAS-04	259,73	259,39	0,34	0,13	254,88	254,50	0,38	0,15	254,83	254,76	0,07	0,03	256,39	256,04	0,35	0,14
SAS-05	261,02	260,76	0,26	0,10	256,74	256,71	0,03	0,01	254,71	254,38	0,33	0,13	258,79	258,46	0,33	0,13

Fonte: Elaborado pela autora.

EVOLUÇÃO DA MASSA TOTAL DO ENSAIO COM SOLUCÕES ACIDIFICADAS

Corpo-de-prova: SAS- 01/03 (7 X7 X 2)	Ciclo Nº: I – II – III
Tipo de Ensaio: Evolução de Massa	Duração de cada ciclo: 15 dias
Equipamento utilizado: Balança Eletrônica	Data Inicio: 07/11/2013 15h00
Marca:	Data Final: 23/12/2013 15h00
Laboratório: Laboratório de Rochas Industriais e Sedimentares	

	HCL (07/10 a 22/11/2013) SAS-10				HNO ₃ (23/11 a 05/12/2013) SAS 11				H ₂ SO ₄ (06/12 a 21/12/2013) SAS 12			
	M1	M2	< 0,1 %	< 0,1 %	HNO ₃ (M1)	HNO ₃ (M2)	< 0,1 %	< 0,1 %	H ₂ SO ₄ (M1)	H ₂ SO ₄ (M2)	< 0,1 %	< 0,1 %
Leitura Inicial	302,31	301,89	0,42	0,14	285,52	285,12	0,40	0,14	282,62	282,34	0,28	0,099
CICLO 01	304,36	303,98	0,38	0,12	287,34	286,98	0,36	0,13	285,35	284,96	0,39	0,137
CICLO 02	302,11	302,01	0,10	0,03	287,00	286,76	0,24	0,08	282,77	282,66	0,11	0,039
CICLO 03	298,15	297,98	0,17	0,06	283,47	283,31	0,16	0,06	281,72	281,65	0,07	0,025

	Água de Chuva SAS 13				Água do Mar SAS 14			
	M1	M2	< 0,1 %	< 0,1 %	HNO ₃ (M1)	HNO ₃ (M2)	< 0,1 %	< 0,1 %
Leitura Inicial	302,31	301,89	0,42	0,14	285,52	285,12	0,40	0,14
CICLO 01	304,36	303,98	0,38	0,12	287,34	286,98	0,36	0,13
CICLO 02	302,11	302,01	0,10	0,03	287,00	286,76	0,24	0,08
CICLO 03	298,15	297,98	0,17	0,06	283,47	283,31	0,16	0,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Projeto:

ALTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA:
UM ENSAIO DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SUA
INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB
CONDIÇÕES TROPICAIS METROPOLITANAS, EM
ORLAS LITORÂNEAS

Suely Andrade da Silva

EVOLUÇÃO DE MASSA TOTAL DOS CORPOS-DE-PROVA DO ENSAIO SOXHLET

Corpo-de-prova: SAS- 02 (Placas 2x2) e Fragmentos	Ciclo: Único
Tipo de Ensaio: Evolução de Massa Total	Duração de cada ciclo: 20 dias
Equipamento: Balança Eletrônica	Data Inicio: 01/10/2013 10h00
Marca: RADWAG Modelo: OS 1200/200/C/2	Data Final : 30/12/2013 10h00
Laboratório: Rochas Industriais e Sedimentologia - FCT	

Corpos-de-provas	Massa Inicial (Mi)	Massa Final (Mf)	Perda de Massa	Ganho de Massa
SAS 01 (Fragmentos)	211,10	199,98	11,12	0,00
SAS 02 (Placas)	208,67	200,23	8,44	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.



Projeto:

AUTERAÇÃO ACELERADA DO CALCÁRIO BEGE BAHIA: UM ENSAIO DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SUA INTENSIDADE DE BRILHO EM FACHADAS SOB CONDIÇÕES TROPICAIS METROPOLITANAS, EM ORLAS LITORÂNEAS

Suely Andrade da Silva

EVOLUÇÃO DA CONDUTIVIDADE e pH DO ENSAIO SOXHLET

Tipo de Ensaio: Soxhlet	Duração dos ciclos: 60 dias
Equipamento: Condutivímetro e pH-gametro	Data Início dos Ciclos: 01/10/2013 11h00
Marca e Modelo: CONSORT C3931	Data Final dos Ciclos: 30/12/2013 11h00
Laboratório: Centro de Petrografia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico - CEPGIST	

	LEITURA INICIAL (01/10/2013)		CICLO I (01/10 à 28/10/2013)		CICLO II (28/10 à 19/11/2013)		CICLO III (19/11 à 09/12/2013)		CICLO IV (09/12 à 30/12/2013)	
	Condutividade	pH	Condutividade	pH	Condutividade	pH	Condutividade	pH	Condutividade	pH
Balão 01 - Fragmentos	5,90	7,50	4,38	9,53	3,55	9,57	3,29	9,50	5,39	9,68
Balão 02 - Placas	5,90	7,50	4,02	9,63	5,41	9,58	4,02	9,05	5,46	9,74

Fonte: Elaborado pela autora.