



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – UFBA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

PAULO GERMANO TOSCANO MOURA

**REABILITAÇÃO COM ARGAMASSA PROJETADA EM
CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS DE PEDRA NO LITORAL
PARAIBANO**

Salvador

2013

PAULO GERMANO TOSCANO MOURA

**REABILITAÇÃO COM ARGAMASSA PROJETADA EM
CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS DE PEDRA NO LITORAL
PARAIBANO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Doutorado Interinstitucional – DINTER promovido pelas Universidades Federal da Bahia – UFBA e Federal da Paraíba – UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador da Instituição Promotora: Prof.
Dr. Mário Mendonça de Oliveira

Orientador da Instituição Receptora: Prof.
Dr. Normando Perazzo Barbosa

Salvador

2013

M929r Moura, Paulo Germano Toscano.
Reabilitação com argamassa projetada em construções históricas de pedra no litoral paraibano / Paulo Germano Toscano Moura.-- Salvador, 2013.
157f.
Orientadores: Mário Mendonça de Oliveira, Normando Perazzo Barbosa
Tese (Doutorado) – UFBA-UFPB/DINTER
1. Arquitetura e urbanismo. 2. Construções históricas.
3. Alvenaria - pedra calcária. 4. Patologia do edifício.
5. Argamassa projetada.

UFPB/BC

CDU: 72+711(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

ATA DA SESSÃO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ARQUITETURA E URBANISMO DO
DOUTORANDO
PAULO GERMANO TOSCANO MOURA

Aos dez dias do mês de dezembro de dois mil e treze, reuniu-se por convocação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, a comissão composta pelos Professores Doutores Mário Mendonça de Oliveira, Normando Perazzo Barbosa, Cybele Celestino Santiago, Rosana Muñoz e Tatiana Bittencourt Dumêt, sob a presidência do primeiro, na qualidade de orientador da tese, para proceder ao exame do trabalho apresentado pelo doutorando Paulo Germano Toscano Moura, intitulado "Reabilitação com Argamassa Projetada em Construções Históricas de Pedra no Litoral Paraibano".

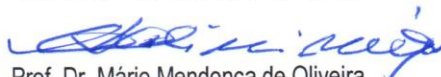
O ato teve início às 09:00 horas, tendo sido concedido ao doutorando cinquenta (50) minutos para exposição resumida dos conteúdos do seu trabalho. De acordo com as normas que regulam a matéria, cada examinador fez suas observações e levantou questões, que foram respondidas pelo candidato.

Concluído o exame, os professores atribuíram as seguintes indicações:

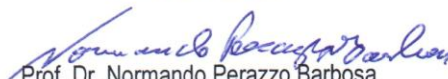
Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira	APROVADO
Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa	APROVADO
Profa. Dra. Cybele Celestino Santiago	APROVADO
Profa. Dra. Rosana Muñoz	APROVADO
Profa. Dra. Tatiana Bittencourt Dumêt	APROVADO

Com o que se julgou o doutorando APROVADO, sendo recomendado ao Colegiado de Curso deste Programa de Pós-Graduação que seja concedido a **PAULO GERMANO TOSCANO MOURA** o grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 10 de dezembro de 2013.



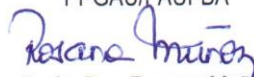
Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira
Orientador e Presidente da Banca Examinadora
PPGAU/FAUFBA



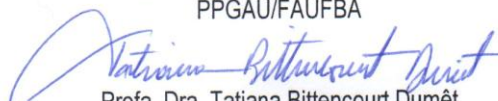
Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
Coorientador e Membro da Banca Examinadora
Dept. de Engenharia Civil/UFPB



Profa. Dra. Cybele Celestino Santiago
Membro da Banca Examinadora
PPGAU/FAUFBA



Profa. Dra. Rosana Muñoz
Membro da Banca Examinadora
PPGAU/FAUFBA



Profa. Dra. Tatiana Bittencourt Dumêt
Membro da Banca Examinadora
Escola Politécnica/UFBA

A meus pais, Antônio de Oliveira Moura e Maria Consuelo Toscano Moura (*in memoriam*), edificadores da minha formação educacional cujos esforços não tiveram medidas para o incentivo em busca do aprimoramento da engenharia.

A minha irmã Celme Toscano Moura Domingues, pela preocupação com minha saúde, acolhida e pelo carinho.

A Ana Emília Uchôa, companheira e namorada, compreensiva nos momentos difíceis, que me permitiu a serenidade necessária para o término do projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus de Israel, único e verdadeiro, que nos prova, em todas as horas, suas promessas na realização dos objetivos daqueles que o amam.

A meu orientador pela Instituição Promotora, Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira, pela valiosa contribuição durante todas as fases deste trabalho.

À equipe do NTPR – Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração da Universidade Federal da Bahia, meu reconhecimento pela ajuda nas correções textuais e nos ensaios de laboratório: Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira (coordenador); Prof^a. Dra. Cybele Celestino Santiago; Prof^a. Dra. Rosana Muñoz; Prof^a. Dra. Larissa Corrêia Acatauassu Nunes Santos; Prof^a. Dra. Tatiana Bittencourt Dumêt e Eng. Químico Allard Monteiro do Amaral.

À Prof^a. Dra. Amalvina Costa Barbosa, do Departamento de Geociências da Universidade Federal da Bahia, pela contribuição nas interpretações das análises petrográficas.

A meu Orientador da Instituição Receptora, Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa, minha gratidão pelas horas dedicadas na interpretação de dados obtidos dos ensaios feitos no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba.

Ao Prof. Dr. Sandro Marden Torres, pelos esclarecimentos da química e análises microestruturais conduzidas neste trabalho.

À equipe do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio nas preparações de amostras e ensaios: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa (coordenador); Eng. Civil Cláudio Matias da Silva; técnicos de laboratório Delby Fernandes Medeiros Filho, Ricardo Luiz de Carvalho e Sebastião Leandro Filho; e Auxiliar Técnico João da Silva Messias.

Ele deixou, às mentes brilhantes, o equilíbrio do universo como portal, e, para as outras pessoas, simplesmente a fé. Seu nome, **JESUS**.

(Paulo Germano Toscano Moura)

RESUMO

A alvenaria de pedra calcária foi muito usada no litoral paraibano quando da chegada dos portugueses. Ali se encontram inúmeras igrejas, fortificações e outras construções coloniais feitas com esse material local. Algumas dessas construções históricas apresentam-se em processo de degradação. É necessário que intervenções sejam feitas para sua reabilitação, e, para isso, está sendo proposta a utilização de argamassa projetada, utilizando cal misturada com metacaulim e, como carga, a areia calcária. A proporção entre esses materiais foi obtida por experimentação. Tais argamassas foram caracterizadas no que diz respeito às propriedades físicas, químicas e mecânicas. Foram estudados, através de técnicas analíticas e de análises microeletrônicas, os compostos químicos finais, formados no processo do jateamento, através de ensaios de difratometria de raios X e de termogravimetria. Esses ensaios foram realizados em corpos de prova extraídos da argamassa projetada, bem como da mesma argamassa moldada em laboratório. No campo, os ensaios foram realizados sobre paredes construídas do mesmo feitio dos edifícios históricos, em pedra calcária, com 1,50 m de altura, 1,20m de largura e 0,50m de espessura. Para se conhecer o comportamento quando lançadas pelo equipamento de projeção, foram moldados corpos de prova, conforme a NBR 13.070: Moldagem de placas para ensaios de argamassa e concreto projetado (1994). Apresenta-se revisão bibliográfica relativa às alvenarias de pedra e sobre patologias que comumente se manifestam nesse tipo de construção. Neste particular, são apresentadas técnicas convencionais de tratamento das pedras das construções antigas. É feita uma descrição historiográfica de cada monumento e mostradas, com fotografias, as patologias que os vêm degradando. Embora necessitando de maiores aprimoramentos, os resultados apontam para a viabilidade de aplicação desse tipo de técnica na reintegração das pedras calcárias das alvenarias de monumentos históricos.

Palavras-chave: Construções históricas. Alvenaria de pedra calcária. Patologia do edifício. Argamassa projetada.

ABSTRACT

The masonry of limestone was used extensively in coastal Brazil when the Portuguese arrived. There are numerous churches, fortifications and other colonial buildings made with this material. Some of these historical buildings are in the process of degradation. Interventions must be made for his rehabilitation, and is being proposed the use of mortar designed, using lime mixed with metakaolin and, as cargo, the calcareous sand. The ratio of these materials was obtained by experimentation. Such mortars were characterized with regard to physical, chemical and mechanical properties. Were studied through analytical techniques and microelectronic analysis, the final chemical compounds formed in the process of blasting through tests of x-ray diffractometry and Thermogravimetry. These tests were performed on specimens taken from the mortar designed, as well as the same mortar cast in lab. In the field, the tests were conducted on walls built of the same temper of the historic buildings, in limestone, with 1.50 m in height, 1, 20 m wide and 0, 50 m thick. To know the behavior when thrown by the projection equipment, were shaped bodies of evidence, according to NBR 13,070: castings, plates for testing of mortar and shotcrete (1994). Presents literature review concerning masonry and stone about pathologies that commonly manifest themselves in this type of construction. In particular, conventional treatment techniques are presented of the stones of the old buildings. There is a description of each historical monument and shown, with photographs, the pathologies that are degrading. Although requiring further improvements, the results point to the feasibility of application of this type of technique on reintegration of limestones of the masonry of historic monuments.

Key-words: Historical buildings. Limestone masonry. Building pathology. Mortar designed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trecho de alvenaria bruta, entre cunhais, com perda considerável da argamassa de assentamento das pedras (Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB).....	22
Figura 2 – Desmoronamento do coroamento da parede (Fortaleza de Santa Catarina. Cabedelo-PB).....	22
Figura 3 – Rotação de muros (Igreja do Almagre, Praia do Poço, Cabedelo-PB).....	23
Figura 4 – Tipos de arranjos de pedras empregadas nas alvenarias históricas...	30
Figura 5 – Junção da alvenaria de pano único com pedras irregulares, com alvenaria trabalhada e cantaria (Igreja da Guia, Lucena-PB).....	31
Figura 6 – Elementos construtivos da arquitetura colonial brasileira com uso da cantaria.....	36
Figura 7 – Efeitos destrutivos de plantas e expansão corrosiva de metais em fachada de pedra. Edifício na Rua Duque de Caxias, João Pessoa-PB.....	42
Figura 8 – Alteração cromática.....	44
Figura 9 – Erosão alveolar.....	45
Figura 10 – Crosta negra	45
Figura 11 – Degradação diferenciada.....	46
Figura 12 – Desagregação.....	46
Figura 13 – Desagregação. Pilar da Igreja do Almagre. Cabedelo-PB.....	46
Figura 14 – Desagregação. Sobrado na Rua Duque de Caxias, João Pessoa-PB.....	47
Figura 15 – Esfoliação. Base de pilar da Igreja do Almagre, Cabedelo-PB.....	47
Figura 16 – Perda. Imposta do lado direito da fachada da Igreja da Guia, LucenaPB.....	48
Figura 17 – <i>Pitting</i>	48
Figura 18 – Dilapidação.....	49
Figura 19 – Desestabilização de alvenarias. Base de parede da Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB.....	50

Figura 20 – Alteração na textura.....	50
Figura 21– Limpeza com produtos químicos.....	52
Figura 22 – Microabrasador para limpeza de pedras.....	53
Figura 23 – Pistola a raios <i>laser</i>	54
Figura 24 – Bombas injetoras de alta e baixa pressão.....	56
Figura 25 – Ciclo da cal.....	63
Figura 26 – Metodologia LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal) utilizada na caracterização de argamassas antigas.....	66
Figura 27 – O invento de Akeley. A <i>Plastergun</i>	69
Figura 28 – Esquema em corte dos três tipos de máquinas de projeção de argamassas e concretos.....	70
Figura 29 – Máquina de projetar <i>Double-chamber</i> , ou de Câmera dupla, em 1914.....	71
Figura 30 – Máquina de projetar <i>screw system</i> , ou de parafuso, em 1950.....	72
Figura 31 – Máquina de projetar <i>rotating-barrel system</i> , ou de cilindro giratório..	72
Figura 32 – Máquina de projetar <i>rotating-barrel system</i> , na versão mais atualizada. CYCLONE CY – 61.....	73
Figura 33 – Aplicação da tecnologia de argamassa projetada Via Seca na recuperação do concreto armado.....	73
Figura 34 – Projetora de argamassa e concreto por Via Seca ou úmida – CP10 SU.....	75
Figura 35 – Projetora de argamassa e concreto por Via Seca ou Úmida – CP15 SU.....	76
Figura 36 – Igreja da Guia (Lucena-PB).....	77
Figura 37 – Fortaleza de Santa Catarina: foto pitoresca da construção inicial em taipa de pilão, século XVI.....	81
Figura 38 – Fortaleza de Santa Catarina: reconstrução com alvenaria de pedras, século XVII.....	81
Figura 39 – Convento do Almagre: ruína da fachada principal.....	85

Figura 40 – Convento do Almagre: ruína do arco cruzeiro.....	85
Figura 41– Convento do Almagre: ruína da fachada oeste.....	85
Figura 42 – Localização geográfica da Igreja da Guia.....	87
Figura 43 – Alteração cromática: parte inferior de uma janela superior da fachada.....	87
Figura 44 – Alveolização: base da parede, fachada sul.....	87
Figura 45 – Alveolização: portal da fachada posterior à fachada principal.....	87
Figura 46 – Biofilme: fachada posterior à fachada principal, lado direito.....	88
Figura 47 – Biofilme: imposta do canto esquerdo da fachada principal.....	88
Figura 48 – Esfoliação: base da coluna do lado esquerdo da fachada principal..	88
Figura 49 – Esfoliação: fachada sul, base da parede.....	88
Figura 50 – Perdas: parte superior do capitel da cercadura na fachada principal.....	88
Figura 51 – Perdas: parte anterior da imposta do lado direito da fachada principal.....	88
Figura 52– Penetração de raízes: lado posterior direito à fachada principal.....	89
Figura 53 – Penetração de raízes: lado posterior esquerdo à fachada principal..	89
Figura 54 – Dilapidação provocada por inscrições: fachada norte, base da parede.....	89
Figura 55 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada leste...	89
Figura 56 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada oeste..	89
Figura 57 – Expansão volumétrica diferenciada: imposta central da fachada principal.....	90
Figura 58 – Recuperação com materiais inadequados: parte frontal da imposta central.....	90
Figura 59 – Localização geográfica da Igreja do Almagre.....	91
Figura 60 – Alteração cromática: fachada leste.....	91
Figura 61 – Alteração cromática: pilar esquerdo do arco cruzeiro.....	91

Figura 62 – Alveolização: ruínas da parte posterior da construção.....	92
Figura 63 – Biofilme: arco cruzeiro.....	92
Figura 64 – Biofilme: fachada principal.....	92
Figura 65 – Degradação diferencial: portal superior da fachada principal.....	92
Figura 66 – Degradação diferencial: portal de entrada da fachada principal.....	92
Figura 67 – Desagregação: pilar da fachada oeste.....	93
Figura 68 – Perdas: imposta do lado direito da fachada principal.....	93
Figura 69 – Penetração de raízes: fachada oeste.....	93
Figura 70 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada oeste.....	94
Figura 71 – Recuperação com materiais inadequados: parede da fachada oeste.....	94
Figura 72 – Localização geográfica da Fortaleza de Santa Catarina.....	95
Figura 73 – Alveolização: cunhal da fachada leste.....	95
Figura 74 – Biofilme: cortina leste.....	96
Figura 75 – Biofilme: encontro entre as cortinas leste e norte.....	96
Figura 76 – Desagregação: cortina norte.....	96
Figura 77 – Desagregação: cunhal da cortina norte.....	96
Figura 78 – <i>Pitting</i> : galeria de entrada da fortificação.....	96
Figura 79 – Penetração de raízes: coroamento da cortina leste.....	97
Figura 80 – Penetração de raízes: base da cortina norte.....	97
Figura 81 – Desestabilização de alvenarias: cortina norte.....	97
Figura 82 – Recuperação com materiais inadequados: fissuras de retração do reparo.....	97
Figura 83: Recuperação com materiais inadequados: descolamento do reparo.....	97
Figura 84 – Curva granulométrica do pó calcário.....	101

Figura 85 – Curva granulométrica da areia calcária.....	102
Figura 86 – Extração de amostras de pedra calcária.....	104
Figura 87 – Retificação das faces de amostras de pedra.....	104
Figura 88 – Equipamento de projeção.....	106
Figura 89 – Painéis de paredes em pedra calcária para testes.....	107
Figura 90 – Limpeza das pedras para aplicação da argamassa projetada.....	108
Figura 91 – Moldes para jateamento e extração de corpos de prova.....	108
Figura 92 – Moldagem de placas.....	110
Figura 93 – Extração de corpos de prova.....	111
Figura 94 – Corpos de prova extraídos.....	111
Figura 95 – Jateamento sobre a parede.....	111
Figura 96 – Parede jateada.....	111
Figura 97 – Pedras para teste de aderência.....	112
Figura 98 – Pedras jateadas.....	112
Figura 99 – Preparação de pedras para a realização do teste de aderência (<i>Pull-off</i>).....	112
Figura 100 – Ensaio de arranchamento ou de <i>Pull-Off</i>	112
Figura 101– Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do topo do corpo de prova.....	123
Figura 102 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do meio do corpo de prova.....	124
Figura 103 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do fundo do corpo de prova.....	124
Figura 104 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do topo do corpo de prova.....	125
Figura 105 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do meio do corpo de prova.....	125
Figura 106 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do fundo do corpo de prova.....	126

Figura 107 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa jateada no campo e extraída após endurecimento.....	126
Figura 108 – Curva termogravimétrica de amostras de argamassas moldadas em laboratório aos 28 dias.....	128
Figura 109 – Curva termogravimétrica de amostras de argamassas moldadas e aplicadas <i>in situ</i> curadas em campo aos 28 dias.....	129
Figura 110 – Curva termogravimétrica de amostra de argamassa jateada no campo e extraída de moldes trapezoidais após endurecimento aos 28 dias.....	129
Figura 111 – Teores percentuais relativos às perdas de massa das amostras testadas.....	130
Figura 112 – Pedra calcária jateada na face frontal.....	132
Figura 113 – Corte transversal na extremidade da pedra.....	132
Figura 114 – Corte longitudinal em uma das faces da pedra.....	133
Figura 115 – Pedra cortada longitudinalmente.....	133
Figura 116 – Vista superior do bloco de pedra cortado longitudinalmente.....	134
Figura 117 – Análise da interface da argamassa projetada com a pedra calcária em 03 (três) escalas de visualização.....	135
Figura 118 – Efeitos do ácido carbônico sobre o calcário.....	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Tipos de rochas encontradas no Brasil.....	27
Quadro 2 – Consolidantes de pedras.....	57
Quadro 3 – Produtos protetores da pedra.....	58
Quadro 4 – Índice de hidraulicidade.....	64
Quadro 5 – Análise de tamanho de partícula e propriedades de dois tipos de metacaulim.....	99
Quadro 6 – Análise química de dois tipos de metacaulim – Valores médios. Não representam uma especificação.....	99
Quadro 7– Características físicas e químicas da cal CH I.....	99
Quadro 8 – Massa unitária do pó calcário.....	100
Quadro 9 – Massa específica do pó calcário.....	100
Quadro 10 – Granulometria do pó calcário.....	101
Quadro 11 – Massa unitária da areia calcária.....	102
Quadro 12 – Massa específica da areia calcária.....	102
Quadro 13 – Granulometria da areia calcária.....	103
Quadro 14 – Moldes para extração de corpos de prova de argamassas e concretos projetados.....	109
Quadro 15 – Preparação das amostras.....	110
Quadro 16 – Comparativo de percentagens de finos, grossos, resíduo solúvel e cor (segundo “ <i>Munsell soil color-charts</i> ”) do calcário dos monumentos selecionados e amostra de jazida.....	141
Quadro 17 – Caracterização petrográfica do calcário de jazida.....	142
Quadro 18– Caracterização petrográfica do calcário da Igreja da Guia.....	143
Quadro 19 – Caracterização petrográfica do calcário da Fortaleza de Santa Catarina.....	143
Quadro 20 – Caracterização petrográfica do calcário da Igreja do Almagre	144
Quadro 21 – Resumo das análises petrográficas.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Traços em massa ensaiados.....	105
Tabela 2 – Resistência à compressão das argamassas testadas em laboratório.	114
Tabela 3 – Percentuais de incremento, entre 7 e 28, dias para as argamassas experimentadas.....	116
Tabela 4 – Índices físicos da argamassa projetada no traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água)	117
Tabela 5 – Valores das resistências obtidas para a argamassa projetada traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água).....	118
Tabela 6 – Análise estatística dos valores das resistências obtidas para a argamassa projetada traço 1:1:5:2,30.....	119
Tabela 7 – Valores das tensões de arrancamento.....	120
Tabela 8 – Análise estatística das tensões de aderência (<i>Pull-off</i>).....	121
Tabela 9 – Sumário de fases nas amostras contendo argamassas à base de Cal: Metacaulim: Calcário.....	122
Tabela 10 – Sumário da perda de massa percentual nas amostras de argamassas à base de Cal: Metacaulim: areia Calcária:água.....	127
Tabela 11– Resistência à compressão de amostras em pedras calcárias.....	136
Tabela 12 – Análise estatística dos valores das resistências à compressão das pedras calcárias.....	136
Tabela 13 – Calcário de jazida local, Cabedelo-PB.....	137
Tabela 14 – Calcário da Igreja da Guia, Lucena-PB.....	138
Tabela 15 – Calcário da Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB.....	139
Tabela 16 – Calcário da Igreja do Almagre, Cabedelo-PB.....	139

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo Geral.....	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 PEDRAS UTILIZADAS NAS EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS NO BRASIL.....	27
2.1.1 Construções com Pedras.....	29
2.1.2 Arranjos com Pedras no Feitio das Alvenarias.....	30
2.1.3 A Cantaria na Arquitetura Brasileira.....	31
2.1.4 Elementos Construtivos da Arquitetura Colonial Brasileira onde se Empregava a Pedra.....	32
2.2 ESTADOS PATOLÓGICOS OBSERVADOS EM OBRAS ANTIGAS.....	36
2.2.1 Fatores Desencadeantes de Danos nos Edifícios.....	36
2.3 AGENTES CAUSADORES DE DANOS NOS EDIFÍCIOS.....	38
2.3.1 Caracterização de Danos Estruturais, Tensões sobre os Materiais, Causa x Efeito.....	42
2.3.2 Mapeamento de Danos.....	43
2.3.3 Características das Ações Deletérias sobre a Pedra por Agentes de Danos.....	44
2.3.4 Metodologia de Tratamento das Pedras Danificadas.....	51
2.3.4.1 <i>Limpeza de cantarias</i>	51
2.3.4.2 <i>Restauração das pedras</i>	54
2.3.4.3 <i>Proteção das pedras</i>	57
2.4 ARGAMASSAS HISTÓRICAS.....	59
2.4.1 A Cal como Aglomerante nas Argamassas Históricas.....	60
2.4.2 Hidratação.....	62
2.4.3 Cal Dolomítica ou Magnesiana.....	63
2.4.4 Cal Hidráulica Natural ou Artificial.....	63

2.5 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS E ARGAMASSAS ANTIGAS.....	65
2.6 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS ARGAMASSAS PROJETADAS.....	68
2.6.1 Processo por Via Seca.....	69
2.6.2 Propriedades das Argamassas Projetadas por Via Seca.....	74
2.6.3 Processo por Via Úmida.....	75
3 CARACTERIZAÇÃO DOS MONUMENTOS DO ESTUDO.....	77
3.1 PATOLOGIAS EXISTENTES NAS OBRAS HISTÓRICAS.....	86
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	98
4.1 MATERIAIS.....	98
4.1.1 Metacaulim.....	98
4.1.2 Cal.....	99
4.1.3 Agregados Miúdos de Calcário.....	100
4.1.4 Pedra Ccalcária.....	104
4.2 PROCESSOS METODOLÓGICOS DE MISTURA.....	105
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	114
5.1 EXPERIMENTAÇÕES DAS ARGAMASSAS TESTADAS EM LABORATÓRIO.....	114
5.1.1 Resultados da Resistência à Compressão.....	114
5.1.2 Particularidades dos Traços Testados em Laboratório.....	115
5.1.3 Percentuais de Incremento entre as Resistências Medidas aos 7 (sete) e 28 (vinte e oito) Dias das Argamassas Experimentadas em Laboratório	116
5.1.4 Índices Físicos da Argamassa Projetada e Endurecida no Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária:água).....	117
5.1.5 Resistência à Compressão da Argamassa Projetada: Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água).....	118
5.1.6 Análise Estatística dos Valores das Resistências à Compressão da Argamassa Projetada: Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água).....	119
5.1.7 Ensaios de Aderência (<i>Pull-off</i>) da Argamassa Projetada no traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água).....	120
5.1.8 Análise Estatística das Tensões de Aderência (<i>Pull-off</i>) entre a Argamassa Projetada no Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária; água) e a pedra calcária.....	120

5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA ARGAMASSA DE TESTE NO TRAÇO 1:1:5:2,30.....	121
5.2.1 Detecção de Fases Cristalinas por Difração de Raios X.....	121
5.2.2 Detecção de Fases Hidratadas e Carbonáticas por Termogravimetria.....	127
5.3 A REINTEGRAÇÃO DE PEDRAS CALCÁRIAS COM ARGAMASSA PROJETADA NO TRAÇO 1:1:5,0:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água.....	131
5.4 EXPERIMENTAÇÕES DO CALCÁRIO COMPONENTE DAS PEDRAS UTILIZADAS NOS MONUMENTOS SELECIONADOS.....	135
5.4.1 Valores da Resistência Mecânica à Compressão de Amostras de Pedras Calcárias.....	135
5.4.2 Análise Estatística dos Valores das Resistências à Compressão das Amostras em Pedras Calcárias.....	136
5.4.3 Composição das Pedras Calcárias dos Monumentos Seleccionados com relação às Porcentagens de Material Solúvel, de Areia e Finos (argila e/ou silte) e Classificação Internacional pela Cor segundo <i>Munsell Soil Color-Charts (Manual de classificação de solos pela cor, de Munsell)</i>	137
5.4.4 Análises Petrográficas das Amostras do Calcário dos Monumentos seleccionados.....	141
5.5 EFEITOS DO ÁCIDO CARBÔNICO SOBRE AS CANTARIAS EM PEDRAS CALCÁRIAS.....	145
5.6 REAÇÕES DA CAL COM O METACAUÍM NA ARGAMASSA DE TESTE E POSSIBILIDADES DE FORMAÇÃO DE COMPOSTOS.....	146
5.7 RECOMENDAÇÕES.....	147
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS AOS 28 DIAS DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO OBTIDAS DA ARGAMASSA (TRAÇO 1:1:5:2,30) EM LABORATÓRIO, NO CAMPO, COMPARATIVAMENTE EM RELAÇÃO AOS VALORES OBTIDOS DA PEDRA CALCÁRIA.....	150
6.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS E DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	151
REFERÊNCIAS.....	153

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O litoral paraibano repousa sobre imensa jazida de calcário. Quando os portugueses lá chegaram, já disso tomaram consciência e as pedras calcárias foram extraídas para erguer inúmeras igrejas e fortificações.

Algumas delas, hoje, apresentam muitas patologias, devido ao ambiente agressivo, decorrente das proximidades do mar, que deteriora as construções, inclusive com desgaste considerável da própria pedra calcária.

As argamassas projetadas, efetivamente utilizadas a partir de meados do século XX, trouxeram para a engenharia e para a arquitetura, grandes avanços na arte de construir e reparar. As construções feitas com essa tecnologia enquadram-se num setor de obras especiais, que estão sendo realizadas com bom desempenho e qualidade comprovada.

A opção por essa nova forma de lançar argamassa sobre determinado objeto, tem sido feita quando a obra apresenta, principalmente, dificuldades com a colocação de fôrmas, como é o caso da construção de túneis. Outras obras que estão sempre requerendo esse processo são aquelas de natureza emergencial, como: consolidação de terraplenos; estabilização de taludes em barragens; reforço estrutural para corrigir erros de cálculo; estruturas danificadas pelo fogo e abalos sísmicos; acréscimos de carga em pilares, vigas e fundações.

É interessante notar que, além dessas aplicações, a tecnologia de projeção de argamassas está sendo utilizada para transportar cimentos em obras de difícil acesso, acréscimos e/ou reparos de tubulações de sistemas de abastecimento de água, coleta de esgotos, construção de obras de desvio hidráulico, em projetos de represamento, estruturas especiais, reforço de estruturas em alvenaria e esculturas de grande porte, entre outras aplicações.

Outro campo de aplicação, de grande alcance, compreende obras em estruturas de concreto armado danificadas pela corrosão. Neste particular, a deterioração antecipada do concreto armado no mundo é, hoje, uma das maiores preocupações da construção civil. Argamassas projetadas oferecem propriedades

que se encaixam dentro de requisitos técnicos necessários à recuperação também de pedras ou alvenarias.

É com foco nas propriedades e na tecnologia das argamassas projetadas que se está propondo seu uso inovador na recuperação de alvenarias em pedras calcárias utilizadas nos monumentos históricos construídos no Brasil, a partir do século XVI.

1.2 JUSTIFICATIVA

A conservação dos monumentos históricos de um país passa pela necessidade de conhecimento dos mecanismos de degradação dos materiais com que foram construídos. No litoral paraibano, há inúmeras obras com necessidade de recuperação. Para a elaboração deste trabalho, três delas foram visitadas e nelas foram detectados os processos patológicos que estão em ação. Uma das construções (Igreja do Almagre) já apresenta grande parte das alvenarias de pedras calcárias em ruínas, constituindo-se num laboratório para estudos das patologias nos monumentos históricos e de suas consequências.

Embora a tecnologia de argamassas projetadas com cimento Portland esteja consolidada e bastante difundida no mundo, sua utilização com outros tipos de aglomerantes é bastante escassa. Neste sentido, este trabalho pretende dar uma contribuição para os serviços de restauro das edificações construídas com pedra calcária, valendo-se da argamassa composta por areia carbonática dosada com metacaulim e cal, como materiais a serem projetados nas estruturas danificadas. O metacaulim, sendo constituído de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativos, combina-se com a cal [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], resultando em silicatos e aluminatos de cálcio, que são compostos resistentes. Já a areia calcária foi idealizada na mistura como forma de se recompor as alvenarias com seu próprio material.

A ideia para essa empreitada surgiu após muitos anos de experiência com trabalhos de restauração, em que se verificou a ausência de processos adequados para reintegrar as alvenarias de calcário deterioradas nas edificações históricas. Quanto a esse aspecto, apontam-se como requisitos de adequabilidade para o

restauro: tipo de material mais propício e produtividade nos trabalhos a serem executados.

Naturalmente, o próprio material constituinte das pedras deveria ser o mais indicado para essa tarefa. É por isso que, na argamassa testada neste trabalho, utilizou-se como agregado miúdo a areia calcária. Aplicações manuais de argamassas em restauro apresentam algumas deficiências que são minimizadas quando aplicadas pneumáticamente por Via Seca¹. Esse processo elimina o excesso de água presente nos processos manuais e faz uma compactação muito enérgica da argamassa projetada no substrato de reparação.

O outro requisito de adequabilidade reside na taxa horária de projeção das argamassas, perfeitamente controlada, em função das necessidades de maiores ou menores quantidades de material a serem lançados. Argamassas projetadas de cimento Portland são, como foi dito, uma realidade na Indústria da Construção Civil, com diversos parâmetros físicos já testados. Para regulamentar essa tecnologia, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) oferece normas para argamassas e concretos projetados, que são recentes e ainda incompletas. Para o processo Via Seca, estão em uso as normas: NBR-13044 (ABNT, 1993), NBR-13069 (ABNT, 1994), NBR-13070 (ABNT, 1994), NBR-13317 (ABNT, 1995), NBR-13354 (ABNT, 1995), NBR-13597 (ABNT, 1996), NBR-14026 (ABNT, 1996), NBR-14278 (ABNT, 1999) e NBR-14279 (ABNT, 1999).

Grande parte das obras, de valor histórico, edificadas no Brasil, a partir do século XVI, foi construída de pedras, em grande escala, a exemplo de igrejas, mosteiros e fortalezas. O abandono secular de muitas delas contribuiu, proporcionalmente, para o nível de degradação em que se observam hoje. Dessa forma, os projetos de restauro exigem quantidade de materiais muito grande para a reparação e condições de aplicações específicas. A tecnologia das argamassas projetadas favorece os processos de reintegração, principalmente pela produtividade nos serviços de lançamento da argamassa. Os custos, sempre vultosos para os projetos de reabilitação, têm desanimado os gestores públicos, mesmo tratando-se de obras de valor histórico. Nas Figuras 1 a 3 já se veem alguns fenômenos patológicos ligados às obras de alvenaria de pedra calcária.

¹ É um dos dois processos de projeção onde o material, a argamassa, é conduzido a alta velocidade no estado seco, recebendo a água necessária na saída do bico projetor.



Figura 1 – Trecho de alvenaria bruta, entre cunhais, com perda considerável da argamassa de assentamento das pedras. (Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB).
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 2 – Desmoronamento do coroamento da parede (Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB).
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 3 – Rotação de muros (Igreja do Almagre, Praia do Poço, Cabedelo-PB).
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

O processo de aplicação manual de argamassas com a utilização da colher de pedreiro, para esses serviços de restauro, não faz penetrar a argamassa nos vazios mais internos das cavernas, deixando os blocos com pouca ligação estrutural.

A tecnologia das argamassas projetadas pode suprir essas necessidades. Assim, quando aplicadas à estrutura, podem ser obtidas: penetração eficiente das argamassas nas cavernas; boa compactação da argamassa sobre as pedras e otimização do custo/benefício do processo. Essas três condições são imprescindíveis para que possam ser asseguradas a estabilidade, a durabilidade e a viabilidade econômica do restauro.

Para a consolidação dessa tecnologia, como opção nos serviços de restauro, é de suma importância que os materiais empregados tenham adequada resistência e que se tenha o conhecimento das propriedades físicas e químicas dos produtos finais formados na consolidação da argamassa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é descrever as patologias que danificam as construções seculares objeto de pesquisa, e testar um processo de reintegração das alvenarias de pedras calcárias, com a utilização da tecnologia de argamassas projetadas.

Para isso, foram definidas, como universo de estudo, as construções históricas feitas em calcário, a partir de século XVI, presentes no Brasil; e, como objetos, três edificações antigas localizadas na Paraíba: Fortaleza de Santa Catarina e o convento do Almagre na cidade de Cabedelo e a Igreja da Guia na cidade de Lucena.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram assim estabelecidos:

- a) Apresentar a historiografia de três construções escolhidas para o presente estudo;
- b) Apresentar as patologias mais comuns nessas obras;
- c) Caracterizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das pedras calcárias utilizadas nas construções de valor histórico;
- d) Desenvolver uma argamassa à base de cal, metacaulim, e areia calcária para ser utilizada na reintegração das alvenarias de pedras, através do processo de projeção.
- e) Testar, em laboratório, a reconstituição de pedras calcárias danificadas pela ação do tempo, usando a argamassa desenvolvida e aplicada através de equipamento de projeção via seca;
- f) Avaliar as propriedades físicas, químicas, e mecânicas da argamassa projetada desenvolvida.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 6 (seis) capítulos: no Capítulo 1, Introdução, apresenta-se a importância do tema, a justificativa, os objetivos da pesquisa e a estrutura do trabalho. O tema tem importância pelo fato de o litoral paraibano possuir, no seu subsolo, grande jazida de calcário, que vem sendo explorada como fonte de extração de pedras para a construção civil, desde a época da colonização até os dias atuais. Sendo o calcário uma rocha carbonática, os efeitos das intempéries sobre as obras com ele construídas apresentam muitas patologias que estão degradando-se e até mesmo arruinando-se, como é o caso da Igreja do Almagre, em Cabedelo- PB.

A justificativa para este estudo adveio da necessidade de reabilitação dessas estruturas, principalmente as de valor histórico, como igrejas, mosteiros e fortificações. Complementando o objetivo geral deste trabalho, a argamassa a ser desenvolvida não deve conter cimento Portland porque possui sais em sua composição química, nem apresentar outros constituintes químicos que também, possam causar danos às pedras calcárias. Como inovação tecnológica, experimentou-se a aplicação dessa argamassa através do processo de projeção por Via Seca.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se a pesquisa feita sobre as rochas comumente utilizadas nas construções antigas brasileiras e os tipos de alvenarias que mais foram construídas com elas. Faz-se uma descrição sobre as patologias que têm acometido as estruturas em pedra, com enfoque nos fatores desencadeantes de danos nos edifícios, nos agentes causadores de danos, na caracterização de danos estruturais, nas tensões sobre os materiais, na relação causa x efeito e no mapeamento de danos. Segue-se com a metodologia de tratamento das pedras, onde são abordadas: a limpeza, a recuperação, a consolidação e a proteção destas. É feita referência às argamassas históricas com ênfase no efeito químico da combinação de cal com *pozolanas* nela presente, e se discutem os diversos tipos das cales e suas aplicações. Apresenta-se o organograma de caracterização de argamassas e materiais pétreos diversos, através de modelo sugerido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de Portugal. É discutida, também, a evolução histórica das argamassas projetadas,

mostrando-se dois processos: por Via Seca e Via Úmida, sendo utilizado, neste trabalho, o processo por Via Seca.

No Capítulo 3 – Caracterização dos Monumentos de Estudo, está relatada grande parte da historiografia desses monumentos, com ênfase na caracterização de ações deletérias do tempo sobre essas obras e danos advindos de vandalismo.

No Capítulo 4, sobre Materiais e Métodos, apresentam-se os materiais utilizados na pesquisa, e os métodos de caracterização e aplicação. Os materiais foram: cal, metacaulim e areia calcária. Foi intenção deste trabalho produzir uma argamassa de reintegração de pedras calcárias, com o metacaulim adicionado à cal, pelo fato de se saber da grande afinidade química entre esses. A areia calcária foi uma opção para que o agregado miúdo da argamassa fosse o próprio material das pedras.

Alguns autores, a exemplo do espanhol Diego de Sagredo e de Philibert de l'Orme, ao mencionarem a fabricação da cal, disseram que o material produzido só atingiria a sua maior força, como aglomerante, se fosse feito com a mesma pedra a ser usada na construção do edifício (SANTIAGO, 2007, p. 74).

No processo metodológico de misturas, descrevem-se os traços experimentados e as etapas realizadas em campo para a execução dos ensaios.

No Capítulo 5 – Apresentação dos Resultados, segue-se com a parte experimental com as argamassas testadas: traços, índices físicos, resistência à compressão, ensaios de aderência, análise estatística desses valores, com relação à argamassa projetada no traço 1:1:5:2,30 (cal: metacaulim: areia calcária: água) e proporções em massa. Sequencialmente, mostram-se análises microestruturais de difração de raios X e termogravimetria para essa argamassa em 03 (três) situações: amostras de argamassas moldadas em laboratório, aplicadas *in situ* e curadas no campo, jateadas no campo e extraídas de moldes trapezoidais nas mesmas condições de cura da anterior.

Em seguida, é mostrada a integração da argamassa projetada com a pedra, através de cortes feitos em uma delas, que tinha sido jateada. Para melhor esclarecimento desse fato, foi analisada uma pequena amostra da interface pedra/argamassa através de imagens com uma câmera digital. Amostras de pedras calcárias dos monumentos foram obtidas para: ensaios de: resistência à compressão e respectiva análise estatística, caracterização das pedras calcárias

com relação às porcentagens de material solúvel, de areia e finos (argila e/ou silte) e classificação internacional *pela cor, segundo o Munsell Soil Color-Charts (Manual de classificação de solos pela cor, de Munsell)*, e análises petrográficas. Nesse capítulo, apresentam-se, ainda, a reação do ácido carbônico no ataque à pedra calcária e as possíveis reações da argamassa de teste na formação de subprodutos.

No Capítulo 6 – Considerações Finais, é efetuada a discussão dos resultados obtidos para a argamassa projetada, aplicada por projeção Via Seca. Recomenda-se, para futuros estudos, uma linha de pesquisa no sentido de avaliar com o tempo, as características químicas, físicas e mecânicas da argamassa, com relação à reintegração de pedras calcárias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em função do tema apresentado, foram determinados, como horizonte, na pesquisa bibliográfica: o conhecimento da natureza das pedras utilizadas nas construções históricas; as formas de seu arranjo nas alvenarias; as características físicas e químicas de agressão, intrínseca e extrínseca; as argamassas antigas aplicadas nas construções e, finalmente, a apresentação da tecnologia das argamassas projetadas.

2.1 PEDRAS UTILIZADAS NAS EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS NO BRASIL

As pedras utilizadas nas edificações históricas do Brasil tiveram sua maior aplicação nos séculos XVI e XVII, sendo substituídas posteriormente, em grande parte, por tijolos de argila, em muros, paredes e, até mesmo, em colunas e outros elementos estruturais dos edifícios. De acordo com o *Manual de Conservação de Cantarias* (IPHAN, 2000), os tipos de pedras encontradas no Brasil e utilizadas nas construções históricas são: calcário; pedra-sabão; mármore; granito; gnaisse; arenito, quartzito e rochas lateríticas. O Quadro 1 apresenta algumas características e aplicações dessas pedras.

Quadro 1 – Tipos de rochas encontradas no Brasil

TIPOS DE ROCHA	CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES
Calcário	
Classificação	Sedimentar
Cor	Varia do branco ao bege amarelado
Textura	Variada: compacta, terrosa, granulada, fosca
Dureza	Muito macia e de fácil trabalhabilidade
Porosidade	Alta
Locais onde é encontrado	Principalmente no Nordeste do Brasil: Paraíba, Sergipe e Bahia
Utilização	Cantarias esculturais, alvenarias regulares.
	A alta porosidade e a baixa dureza diminuem a resistência às intempéries
	(cont.)

Pedra-sabão	
Classificação	Sedimentar
Cor	Variada
Textura	Lisa, polida
Dureza	Macia, talcosa
Porosidade	Alta
Locais onde é encontrada	Minas Gerais e sertão nordestino
Utilização	Cantaria decorativa e esculturas
Mármore	
Classificação	Metamórfica
Cor	Branco, preto, rosa, verde, dentre outras
Textura	Lisa, polida
Dureza	Média
Porosidade	Média a alta
Locais onde é encontrado	Minas Gerais e Bahia.
Utilização	Pisos, fachadas, esculturas
	No Brasil, foi pouco utilizado como revestimento de fachadas, mas influenciou a arte decorativa – o “marmorizado”
Granito	
Classificação	Magmática
Cor	Variada
Textura	Fosca, rugosa <i>in natura</i>
Dureza	Alta
Porosidade	Baixa
Locais onde é encontrado	Minas Gerais, sul da Bahia, Espírito Santo e Paraíba.
Utilização	Alvenaria ordinária
	Constituído de quartzo e feldspato. No Nordeste, é encontrado com mica, em tons de cinza brilhante
Gnaisse	
Classificação	Metamórfica
Cor	Escura, cinza e marrom
Textura	Fosca, rugosa <i>in natura</i>
Dureza	Alta
Porosidade	Baixa
Locais onde é encontrado	Nordeste e Sudeste do Brasil
Utilização	Alvenaria ordinária, cantaria
Arenito	
Classificação	Sedimentar
Cor	Bege, cinza
Textura	Rugosa, áspera, terrosa, granulada

Dureza	Alta
Porosidade	Alta
Local onde é encontrado	Costa brasileira, principalmente no Nordeste, nos Estados de Pernambuco, Alagoas e Bahia
Utilização	Cantaria decorativa, fachada, piso
	Devido à boa resistência, substituiu o calcário na ornamentação das fachadas
Quartzito	
Classificação	Rocha metamórfica.
Cor	Branco, cinzento claro, amarelado e acastanhado
Textura	Sacaroide (granulosa com o açúcar)
Dureza	Alta
Porosidade	Baixa
Locais onde é encontrado	Minas Gerais, Bahia e Goiás
Utilização	Rocha ornamental
Laterita	
Classificação	Solo concrecionado, resultante da lixiviação pelas águas da chuva em climas quentes e úmidos
Cor	Vermelho escuro
Textura	Rugosa, terrosa, granulada, áspera
Dureza	Média
Porosidade	Baixa
Local onde é encontrada	Em quase todo o território brasileiro
Utilização	Fundações e alvenarias
	Rica em hidróxido de ferro e alumínio

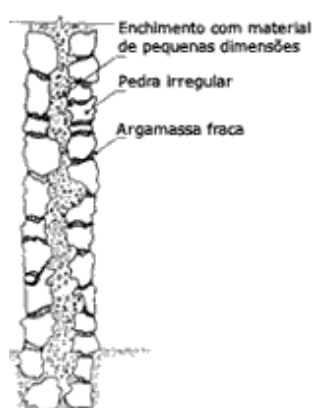
Fonte: Adaptado do *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000, p.7).

2.1.1 Construções com Pedras

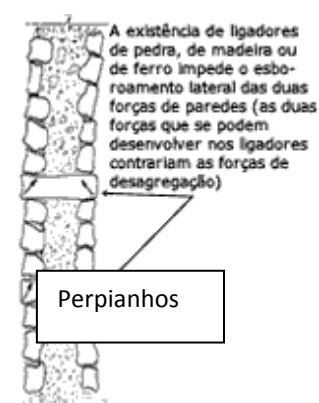
A técnica da utilização de pedras para a construção de edificações é quase tão antiga quanto o próprio homem. Desde a Pré-história, vem sendo utilizada como componente das edificações. No início, essas construções utilizavam lascas de pedras brutas apenas encaixadas umas sobre as outras. A necessidade de se proteger também das infiltrações por pancadas de chuva despertou no homem, cada vez mais, a necessidade de obturação dos vazios entre as pedras. A descoberta da cal e, posteriormente, sua mistura com areia, formando as primeiras argamassas, vieram resolver o problema, permitindo, além disso, maior estabilidade e melhor acabamento das paredes, com a utilização dos primeiros revestimentos.

2.1.2 Arranjos com Pedras no Feitio das Alvenarias

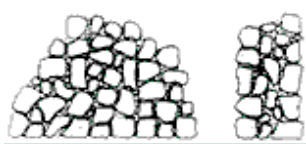
Herança deixada pelos portugueses, os arranjos de pedras no feitio das alvenarias obedeciam a critérios técnicos e socioeconômicos, normalmente em função de: natureza mineralógica da rocha mãe; distância média de transporte; capacidade financeira do empreendedor, entre outros. De acordo com essa realidade, as pedras poderiam ser trabalhadas em todas as faces, duas faces, uma face, ou aplicadas de maneira angulosa e irregularmente. Assim, as alvenarias dividiam-se em quatro grupos: a) de dois panos, um interno e outro externo, com enchimento da parte central de concreto com pequenas pedras e cascalho, e com ligante a cal; b) com o mesmo feitio, mas com ligadores contra o esboroamento (perpianhos); c) alvenaria de pano único com pedras irregulares; d) alvenaria de pano único com pedras regulares, conforme Figura 4.



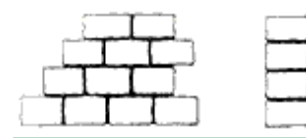
a) Alvenaria de pedra com dois panos



b) Alvenaria de pedra com dois panos e ligadores contra o esboroamento



c) Alvenaria de pano único com pedras irregulares



d) Alvenaria de pano único com pedras regulares

Figura 4 – Tipos de arranjos de pedras empregadas nas alvenarias históricas.
Fonte: Adaptado. Disponível em: <www.paulojones.com/tecnicas/pedra.htm>.

Na Figura 5, mostra-se um detalhe construtivo de alvenaria de pedras e cantaria. Vê-se a ligação de alvenaria em pedra bruta de pano único com a pilastra em cantaria.



Figura 5 – Junção da alvenaria de pano único com pedras irregulares, com alvenaria trabalhada e cantaria. (Igreja da Guia-Lucena-PB).
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

2.1.3 A Cantaria na Arquitetura Brasileira

A cantaria é a pedra trabalhada com esmero, que tem função estrutural, decorativa, ou que atende às duas necessidades. Trazida para o Brasil pelos portugueses, ornou nossas construções com riquíssimos ornatos que, até hoje, despertam a admiração da população, em especial, da comunidade técnica envolvida em projetos de preservação e/ou restauro.

Como afirma Villela (2003, p.1):

Presente em toda a sucessão de estilos da arquitetura ocidental, a técnica da cantaria chegou ao Brasil em meados do século XVI. Escolhido por Dom João III para ser o primeiro governador geral da colônia, Tomé de Souza trouxe, em 1549, Luís Dias, chamado mestre de pedraria. No período de colonização era comum, os projetos virem já prontos de Portugal para serem aqui realizados, e o mesmo sucedia com a cantaria, principalmente as peças em calcário Lioz, que confeccionadas na metrópole, vinham como lastro dos navios e então utilizadas nas construções. [...].

Durante a segunda metade do século XVI e pelos dois séculos seguintes, a pedra de cantaria foi amplamente empregada nas construções civis, militares e religiosas brasileiras. A arquitetura aqui realizada recebia grande influência dos modelos europeus, transpostos através de projetos, mestres construtores, materiais e das chamadas – Ordenações Reais – que estabeleciam regras para

as construções. Neste contexto, as pedras locais e também aquelas trazidas de Portugal eram um recurso essencial, tanto quanto, o trabalho dos mestres canteiros [...].

Com a chegada de D. João VI e a missão francesa, no fim do século XIX, viu-se esvaír a disponibilidade de mão de obra na arte da cantaria, como consequência do fim da escravidão. Tal fato foi levado em consideração previamente pela comitiva, que trouxe novos projetos, com o uso de materiais alternativos como o tijolo de argila.






[...] foram decisivos para o declínio da cantaria. A adoção do estilo neoclássico, o emprego de novos materiais, a preferência pelos tijolos na execução das alvenarias e o fim do trabalho escravo levaram o ofício às vias de extinção. Consequentemente, perdeu-se a mão-de-obra especializada em trabalhar a pedra, material agora restrito à pavimentação das ruas, pisos, degraus de escadas e revestimento de paredes, em forma de placas [...].(VILLELA, 2003, p.1).






A arquitetura colonial brasileira deixou para a posteridade riquíssimo patrimônio construtivo, expresso nos altos e baixos relevos das formas esculturais trazidas de além-mar, mas também, o traço artístico distinto da nossa mão de obra mestiça.

2.1.4 Elementos Construtivos da Arquitetura Colonial Brasileira onde se Empregava a Pedra

Muitos detalhes construtivos da arquitetura colonial no Brasil foram executados em pedra. A seguir, alguns são destacados, definidos e ilustrados nas fotos da Figura 6.

Elementos	Definição	Imagem
GALILÉ	Galeria geralmente aberta em arcos e situada na fachada de uma edificação.	
CUNHAL	Quina ou encontro de duas paredes em pedra regular, encaixadas mutuamente.	
CACHORRO	Consolos de apoio da linha de frechal, ou mesmo, apoiando sacadas dos edifícios.	
SOCO	Parte inicial de uma coluna em forma de prisma retangular ou cilíndrica lisa ou com relevo decorativo.	
ARCADA	Estrutura que cobre um vão, entre dois pilares ou pés-direitos, constituída por aduelas e pedra de fecho.	
ADUELA	Pedra talhada, em forma de cunha, que se emprega para a construção de arcos. Elemento integrante de um arco ou de uma abóbada. É chamada de pedra chave ou de fecho, quando faz o fechamento do arco.	

<p>ARCADAS OU ARCARIA</p>	<p>Sequência de arcos sobre pilares ou colunas.</p>	
<p>ARCO CRUZEIRO</p>	<p>Arco que separa a nave da capela-mor.</p>	
<p>NICHO</p>	<p>Reentrâncias construídas nos altares ou por trás deles com contornos decorativos para abrigar imagens.</p>	
<p>ALTAR-MOR</p>	<p>Altar principal de uma igreja.</p>	
<p>FRONTISPÍCIO</p>	<p>Fachada principal de uma construção.</p>	

CERCADURA	É o contorno de uma porta ou janela em pedra trabalhada ou não.	
CORNIJA	Moldura que forma saliência na parte superior de um muro ou parede.	
IMPOSTA	Moldura superior da pilastra onde começa o arco.	
ADRO	Espaço em frente da igreja, plano ou escalonado, aberto ou murado.	
CLAUSTRO	Pátio interno de uma igreja ou convento, ao ar livre, destinado às orações. Em geral, cercado por arcaria.	



PIA DE ÁGUA BENTA	Peça talhada em pedra com a parte superior côncava para acomodar água.	
PEDRA ANGULAR	Pedra angular era a pedra fundamental, a primeira a ser assentada na esquina do edifício, formando um ângulo reto entre duas paredes. Servia para definir a colocação das outras pedras e alinhar toda a construção.	

Figura 6 – Elementos construtivos da arquitetura colonial brasileira com uso da cantaria.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

2.2 ESTADOS PATOLÓGICOS OBSERVADOS EM OBRAS ANTIGAS

2.2.1 Fatores Desencadeantes de Danos nos Edifícios

Podem-se citar como principais fatores que conduzem a danos nos edifícios antigos:

- Tensão de cristalização de sais solúveis por lixiviação ou ataque químico;
- Fragilização dos materiais constituintes;
- Precariedade no sistema de coleta das águas de chuva e drenagem superficial e subterrânea;
- Recalques das fundações;
- Sobrecargas, modificações ou reformas, sem uma verificação analítica completa dos elementos estruturais com relação à resistência dos materiais;
- Abalos sísmicos;
- Ventos fortes;
- Incêndio.

A fragilização dos materiais dá-se pela ação natural do tempo, ventos, chuva, calor, frio e também por reações físico-químicas de compósitos aplicados *a posteriori* sobre a estrutura original, ou poluição do ar.

A má condução das águas de chuva sobre os telhados e tubos de quedas, ou mesmo danificações nesses elementos, quando internos às paredes, provocam a desestabilização destas, devido à natureza frágil das argamassas de união das pedras. A drenagem superficial tem uma grande importância na preservação do edifício. Alagamentos em contato com as paredes ativam reações químicas que destroem essas estruturas. Além disso, a pressão neutra de saturação do solo diminui a resistência ao suporte de carga.

Os recalques das fundações ocorrem por modificações do terreno de apoio ou do terreno em torno da obra. Alterações no sistema de drenagem e escavações próximas à obra são alguns dos fatores impactantes. Essas ações provocam pequenas movimentações nas fundações, refletindo-se nas paredes e fissurando-as. A precária determinação da tensão de ruptura do solo pode levar as fundações a recalcarem naturalmente.

Têm sido observadas intervenções em algumas obras, com alterações da planta original, para atender a novos usos, diferentes da concepção original. Isso tem levado ao aproveitamento dos espaços com construções de novas paredes, supressão de outras, muitas vezes sem verificação estrutural precisa dos elementos de apoio. Como decorrência, o excesso de carga, algumas vezes, tem provocado fissuras em paredes subjacentes por esmagamento.

Abalos sísmicos têm sido o principal fenômeno de destruição prematura dos edifícios. No Brasil, pouco se tem notícia de avarias, ou mesmo desmoronamento nas construções em consequência desse fator.

Ventanias de maiores amplitudes têm aumentado no território brasileiro, com registros de destruições preocupantes. Nos Estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, ventos com maiores velocidades vêm assolando as edificações, até mesmo, causando desabamentos.

Incêndios nos edifícios provocam grandes dilatações nos materiais constituintes, permitindo que as cargas permanentes (peso próprio) atuem como propulsor da ruína. Resinas resistentes ao fogo misturadas com vermiculita têm sido usadas como protetoras contra o calor.

2.3 AGENTES CAUSADORES DE DANOS NOS EDIFÍCIOS

Vários são os fatores que podem causar danos aos edifícios. Neste trabalho, apresentamos alguns deles, que podem deteriorar as obras e, com a incidência continuada, arruiná-las.

a) Carga

Todos os edifícios estão submetidos a tensões de várias naturezas devido ao peso próprio e às cargas impostas ao fabricado. A força de gravidade atrai os corpos uns sobre os outros, provocando tensões, depois fissuras visíveis, que, com o passar do tempo, vão sendo potencializadas, pelo meio ambiente.

b) Expansão térmica

As partes externas componentes da estrutura de um edifício estão sujeitas a incidências de fatores atmosféricos, como o calor, que altera o equilíbrio térmico das peças como um todo. A incidência solar provoca aquecimento maior nas faces externas do que nas internas. Da mesma forma, chuvas e geadas esfriam mais rapidamente o invólucro externo, em detrimento do interno. Esses gradientes de temperatura provocam tensões internas suficientes para fissurar as estruturas pétreas (TORRACA, 1982).

c) Expansão dos materiais argilosos com a água

Certas rochas que possuem argila em sua composição mineralógica, como alguns arenitos e calcários (o da Paraíba é um exemplo), absorvem água pela superfície, causando um desequilíbrio no estado de tensão da peça. A argila molhada expande-se gerando tensões que levam a ruína da peça (TORRACA, 1982).

d) Congelamento

Em países onde as temperaturas caem ao ponto de congelamento, a água existente na rede de poros da pedra tende a congelar-se. Nesse processo, o volume final da água é maior que no estado líquido, provocando tensões internas que danificam a estrutura dos materiais porosos.

e) Tensões de cristalização de sais

A cristalização de sais solúveis é um dos principais fatores que deterioram os materiais porosos. A evaporação da água desses sais solúveis provoca suas cristalizações, com expansão volumétrica, gerando tensões e, conseqüentemente, a destruição da peça estrutural. A reversibilidade de molhagem e secagem vai liquefazendo e solidificando esses sais, num contínuo processo de degradação.

f) Erosão alveolar

Quando o processo de evaporação da água nos sais solúveis dá-se por ventos e elevação da temperatura, a cristalização dos sais ocorre na superfície da cantaria, provocando pequenas lacunas. Com o passar do tempo, essas lacunas vão-se somando e criando alvéolos, que vão permitir, cada vez mais, o ingresso de correntes de ar para o interior da peça (TORRACA, 1982).

g) Eflorescências

É a cristalização de sais solúveis na superfície do material poroso. Este fenômeno se dá fora dos poros. Como consequência, os danos são menores. Identificar eflorescências é atestar a contaminação de sais na rocha (TORRACA, 1982).

h) Franja capilar

Sabe-se que os materiais porosos comportam-se como tubos capilares de minúsculos diâmetros. O contato da cantaria com umidade, seja de chuvas nas superfícies das pedras ou mesmo do subsolo, faz ascender para o interior das peças a água que, se estiver contaminada com sais, levará consigo os contaminantes para dentro da pedra.

i) Expansão de produtos de corrosão

As reações de corrosão de metais ferrosos dão-se por expansão volumétrica dos subprodutos gerados nas partes chumbadas. Grampos e chumbadores encravados nas pedras sofrem essa reação e, assim, geram tensões de tração no material poroso, suficiente para fissurá-los.

j) Condensação

A água no estado gasoso, presente no ar atmosférico, entrando em contato com uma superfície pétreia, pode condensar, ou seja, molhar o material. Com isso, as impurezas sólidas solúveis depositadas na superfície são arrastadas para dentro dos poros, possibilitando a proliferação de microrganismos e contaminando a cantaria (TORRACA, 1982).

k) Efeito da chuva

O gás carbônico existente no ar pode combinar-se quimicamente com a água da chuva, formando ácido carbônico. Nessa hipótese, os calcários, as argamassas, a cal e os mármore e outras rochas poderão ser atacados e, assim, decompostos ao longo do tempo.

l) Poluição atmosférica

Nas cidades industrializadas, paira no ar gás sulfuroso como o dióxido de enxofre (SO_2). A água da chuva combina-se com ele, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Esse processo é também chamado de “chuva ácida”. As pedras calcárias são bastante afetadas por esse fenômeno, que provoca grande desgaste, com perdas apreciáveis das seções resistentes. A impregnação de agentes poluidores, por outro lado, cria uma camada escura, chamada “crosta negra”.

m) Ações biológicas

Em climas quentes e úmidos, as algas têm maiores possibilidades de se desenvolver. Assim acontecendo, seus efeitos destrutivos são notados nas superfícies das pedras. A intensidade desses ataques é lenta, sendo mais marcantes em pinturas.

Várias bactérias (cianobactérias) e fungos utilizam a energia solar para processar o metabolismo. Nesse contexto, formações ácidas poderão ocorrer e, assim, danificar as cantarias.

Os líquens são organismos formados pela associação de fungos e algas. Alguns deles têm poder de penetração na cantaria pela elaboração de ácidos orgânicos. Outros agem na superfície da pedra. Os danos iniciam-se pela superfície, desagregando-as, com o passar do tempo.

Sementes trazidas pelo vento e através de excrementos de pássaros, quando depositadas nas fachadas dos edifícios, podem germinar, originando plantas, inclusive de grande porte. Esse tipo de agente é comum nos monumentos históricos e desencadeia grandes danos aos imóveis, com rachaduras nas paredes. Os raros serviços de conservação proporcionam tempo suficiente para que as sementes tornem-se plantas adultas (Figura 7).



Figura 7 – Efeitos destrutivos de plantas e expansão corrosiva de metais, em fachada de pedra. Edifício na Rua Duque de Caxias, João Pessoa.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

2.3.1 Caracterização de Danos Estruturais, Tensões sobre os Materiais, Causa x Efeito

A patologia das construções é um dos mais novos ramos da Engenharia Civil, e tem, por metodologia, definir as causas dos danos sobre os edifícios, a partir, das configurações geométricas observadas nos elementos deteriorados. Como decorrência, o trabalho cotidiano do engenheiro patologista é estabelecer um diagnóstico, algumas vezes de forma rápida e eficaz, baseando-se nessa realidade.

- Fissuras nas paredes;
- Movimentações de elementos estruturais em relação ao plano vertical e/ou horizontal;
- Rupturas de blocos (flexão ou esmagamento);
- Modificações nas propriedades internas de elementos estruturais.

As fissuras observadas nas paredes dos monumentos históricos apresentam, normalmente, três tipos de configurações geométricas: em escadaria, acompanhando o desenho das juntas; inclinadas, cortando o rejunte e o bloco; e verticais, rompendo também o bloco e o rejunte.

As fissuras em escadaria acontecem por recalque diferencial da fundação e quando a argamassa de rejunte é menos resistente que o bloco. Neste caso, a argamassa, apresentando-se mais fraca, permite que a natureza siga o caminho

mais fácil. As fissuras inclinadas dão-se em razão do mesmo fenômeno, quando as resistências dos blocos e as das argamassas equivalem-se.

As fissuras verticais, notadamente no encontro ortogonal entre duas paredes, indicam falta ou perda de travamento entre ambas.

Observa-se, em algumas obras, o desalinhamento de peças estruturais nas elevações das fachadas. Normalmente, quando isso ocorre, uma grande fissura já se havia desencadeado, ou por falta de travamento desses elementos com outros, ou ruptura dessas ligações. A falta ou perda de travamento no nível dos pisos e recalques da fundação pode gerar essas patologias.

Movimentações de elementos estruturais, especialmente em arcos, dão-se quando a dinâmica estrutural cria rótulas nos apoios dos arcos ou no fecho. Essa patologia está ligada à perda de rigidez do conjunto formado pelo arco e pela estrutura portante. Esse movimento relativo é observado quando há problemas de recalque nas fundações e/ou modificações estruturais de alterações nas paredes, por acréscimos de carga em projetos de reforma.

Rupturas de paredes também podem acontecer em obras antigas, as quais são formadas por dois planos paralelos, preenchidos com um material mais fino. A entrada de água aumenta as tensões laterais em contato com as paredes, provocando rachaduras.

As modificações nas propriedades internas dos elementos estruturais dão-se por transformações físico-químicas dos seus constituintes mineralógicos, e por ação mecânica (esmagamento). As ações erosivas do impacto de chuvas e ventos, assim como ciclos de molhagem e de secagem potencializam sobremaneira o dano, contribuindo para maior fragilização dos materiais.

2.3.2 Mapeamento de Danos

Antes de qualquer trabalho de restauração, é preciso identificar todos os danos e, de preferência, dispô-los em mapas, que expressem, com clareza, sua descrição. É necessário fazer uma análise do tipo de rocha que deu origem às pedras da construção, com identificação da composição mineralógica e determinação de indicadores físicos como: dureza; porosidade; peso específico; textura e cor. Ensaio de absorção d'água, medição da ascensão capilar e das propriedades mecânicas – resistência à compressão, à tração, à flexão, o coeficiente

de Poisson, o grau de elasticidade – são necessários na caracterização mais profunda do material analisado.

O impacto ambiental sobre a obra é outro fator que deve ser considerado. Neste caso, variações de temperatura e umidade, verificação da qualidade do ar, salinidade do solo, regime de chuvas e ventos precisam ser conhecidos, pois têm influência em grande número de patologias, que atacam e destroem as pedras ao longo do tempo.

Patologias decorrentes das ações isoladas ou combinadas de algas, bactérias, fungos, plantas, necessitam estudo pormenorizado para o reconhecimento dos subprodutos oriundos desses organismos, que atacam diretamente as pedras.

2.3.3 Características das Ações Deletérias sobre a Pedra por Agentes de Danos

As ações deletérias físicas e químicas, do meio ambiente e/ou intervenções sem o conhecimento técnico necessário têm provocado, nas pedras de construção, dos monumentos antigos, mudanças na coloração e outras características, desde pequenas alterações na textura até modificações estruturais em nível de desagregação total do material poroso. Apresentam-se a seguir algumas dessas características deletérias.

a) Alteração cromática

A pedra, na medida em que apresenta alteração de cor, está indicando a ocorrência de agentes causadores de danos. Essa mudança de tonalidade é o resultado de reações, que pode torná-la escura ou mesmo esbranquiçada (Figura 8).



Figura 8 – Alteração cromática.

Fonte: *Manual de conservação de cantaria* (IPHAN, 2000, p. 23).

b) Erosão alveolar

Alteração da textura da pedra apresentando cavidades, de dimensões variadas, semelhantes ao favo de uma colmeia (Figura 9).

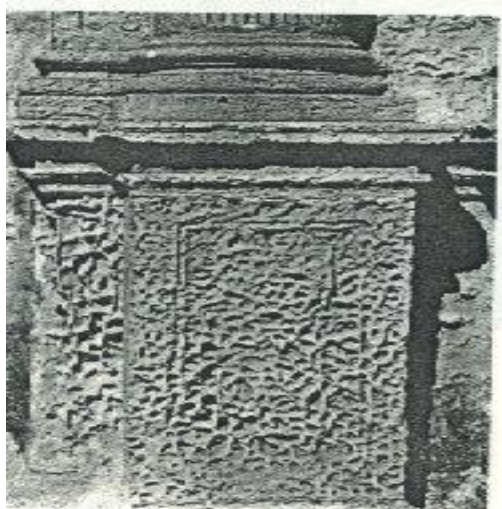


Figura 9 – Erosão alveolar.

Fonte: *Manual de conservação de cantaria* (IPHAN, 2000, p.24).

c) Crosta negra

Espessa camada de impurezas trazidas pelos ventos e/ou formadas no material, que ficam impregnadas nas pedras e reagem com o material pétreo, provocando sua destruição (Figura 10).



Figura 10 – Crosta negra.

Fonte: *Manual de conservação de cantaria* (IPHAN, 2000, p.24).

d) Degradação diferenciada

Destruição diferenciada profunda entre áreas vizinhas de uma cantaria, provocada pela heterogeneidade mineralógica das suas partes (Figura 11).



Figura 11 – Degradação diferenciada.

Fonte: *Manual de conservação de cantaria* (IPHAN, 2000, p.24).

e) Desagregação

Perda de coesão do material pétreo. A superfície trabalhada perde os relevos, diminuindo suas dimensões e transformando-se em pó (Figuras 12, 13 e 14).

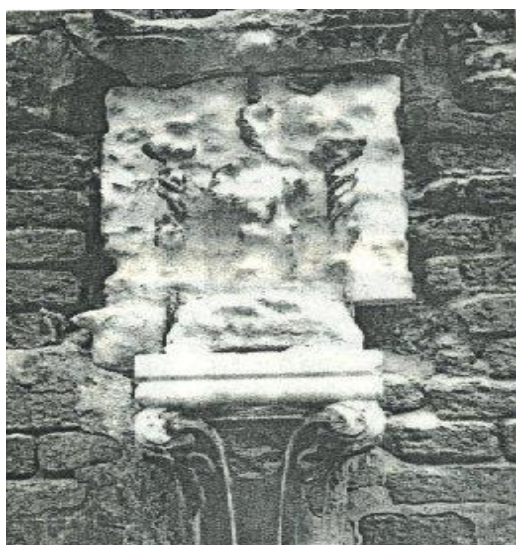


Figura 12 – Desagregação.

Fonte: *Manual de conservação de cantaria* (IPHAN, 2000, p.25).



Figura 13 – Desagregação. Pilar da Igreja do Almagre. Cabedelo-PB.

Fonte: Paulo G. Toscano Moura (2011).



Figura 14 – Desagregação. Sobrado na Rua Duque de Caxias, João Pessoa-PB.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

f) Esfoliação

Destacamento espesso de uma ou várias camadas do substrato pétreo (Figura 15).



Figura 15 – Esfoliação. Base de pilar da Igreja do Almagre, Cabedelo-PB.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

g) Perdas

Lacunas deixadas nas pedras com a supressão de alguma parte. Podem acontecer naturalmente ou através de choques, atos de vandalismo ou acidentes (Figura 16).



Figura 16 – Perda. Imposta do lado direito da fachada da Igreja da Guia, Lucena-PB.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

h) *Pitting*

Enfraquecimento da pedra com o aparecimento de grande número de furos de pequeno diâmetro (CANEVA; NUGARI; SALVATORI, 1991) (Figura 17).

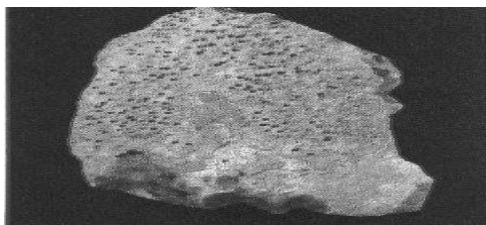


Figura 17 – *Pitting*.
Fonte: *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000, p.26).

i) Biofilme

Muito parecido com a crosta negra, diferencia-se pela natureza física e química de composição. Enquanto a crosta negra é composta por cargas minerais, o biofilme é formado pela proliferação de organismos vivos.

j) Dilapidação provocada por inscrições

As pessoas de pouca consciência, ao visitarem os monumentos históricos, querem deixar registradas suas presenças e, de forma destrutiva, escrevem com instrumentos cortantes sobre as pedras (Figura 18). Além de destruir os relevos artísticos, provocam ranhuras que dão lugar à penetração de agentes desencadeadores de danos.



Figura 18 – Dilapidação.
Fonte: <www.portalcdp.com.br>.

k) Desestabilização de alvenarias de pedra provocada pela perda do rejunte

Os materiais utilizados para assentamento das pedras são, normalmente, argamassas de cal e saibro, incrustadas, às vezes, com pedras menores para dar sustentação. Essas alvenarias são desprotegidas de revestimento e, portanto, ficam expostas a diversos agentes degradadores. Entre tantos fatores que podem desencadear patologias, cita-se a ação erosiva das chuvas. O efeito combinado do impacto da chuva com a lixiviação das partículas finas da argamassa provoca a degradação do rejunte (Figura 19) e, como consequência, a desestabilização da alvenaria.



Figura 19 – Desestabilização de alvenarias. Base de parede da Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

l) Recuperação com materiais inadequados

A falta de conhecimentos de materiais pétreos e também de argamassas empregadas nos serviços de restauro tem levado as obras reparadas a novo estado patológico. Isso tem sido relatado em muitos trabalhos, inclusive nos aqui apresentados. Neste caso, surgem patologias tais como alteração na textura (Figura 20) e na cor do elemento pétreo, rejeição do substrato danificado à argamassa corretiva, entre outras.



Figura 20 – Alteração na textura.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2009).

2.3.4 Metodologia de Tratamento das Pedras Danificadas

As pedras que compõem grande parte dos edifícios antigos mostram sinais de fragilização, que preocupam com respeito às condições de estabilidade físico-química de seus minerais. Isso requer um conhecimento abrangente no campo da mineralogia, da engenharia, da ciência ambiental, da química e, evidentemente, da historiografia da obra a ser restaurada. As empresas ou profissionais incumbidos desses serviços devem comprovar larga experiência em obras congêneres.

As etapas de tratamento são: limpeza, restauração, consolidação e proteção. De fato, nem sempre é preciso empregar as quatro etapas para um dado componente pétreo.

2.3.4.1 *Limpeza de cantarias*

O processo de limpeza objetiva a remoção de: sais solúveis, incrustações insolúveis, reparos inadequados, vegetação e dejetos de animais, enaltecendo a cor e a textura original das pedras. Neste sentido, a opção pelos métodos de limpeza dependerá da natureza da sujidade e das características físico-químicas da pedra. Mesmo sendo bem caracterizado um determinado agente degradante sobre uma cantaria, é preciso olhar se a rocha está compacta a ponto de suportar a ação combinada dos produtos a serem utilizados. Quando existem fortes fenômenos de degradação, é necessária a consolidação prévia.

a) Limpeza com água

Sendo a água um solvente universal, ela pode ser utilizada na limpeza das cantarias. As incrustações, comumente presentes nas obras, podem ser removidas sem a aplicação direta de jato, que pode desgastar a pedra. Dessa forma, é utilizada água vaporizada para a limpeza. Outra forma mais eficaz é usar água vaporizada a temperatura controlada. Em muitos casos, a remoção das sujidades é mais rápida e impede que uma quantidade maior de água seja absorvida pela pedra. Escovas podem ser utilizadas, com cerdas compatíveis com a dureza do material.

b) Limpeza com produtos químicos

Na prática, utilizam-se formulações (emplastos) que ficam aderidas às pedras (Figura 21) e possam permitir sua ação de forma gradual, sem encharcá-las. Esses produtos, quando removidos, trazem consigo as sujidades que estavam impregnadas nelas. As formulações para as pastas são à base de: sepiolita, de bentonita (ambas argilas absorventes), de polpa de papel, de polpa de algodão ou de sílica gel; soluções ativas de bicarbonato de sódio e de amônio.

Caso as incrustações permaneçam na pedra após essas aplicações, pode-se recorrer aos sais de EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético)² (IPHAN, 2000), que podem ser utilizados na solução para melhorar o poder de remoção. Na prática, essas formulações deverão ser testadas, primeiramente em pequenas áreas, para depois serem aplicadas em toda a superfície.



Figura 21 – Limpeza com produtos químicos.

Fonte: *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000, p.29).

c) Limpeza mecânica

A utilização de equipamentos mecânicos para a limpeza das pedras faz-se necessária quando os métodos anteriores não logram sucesso. Mesmo assim, sua aplicação só deve ser indicada nos locais que permanecem com boa dureza. Os

² Os sais de EDTA são normalmente disódio EDTA e cálcio disódio EDTA. Esses sais têm a propriedade de sequestrar íons Ca^{+2} e Fe^{+3} . Uma vez os íons metálicos sendo puxados para a solução, eles permanecem com diminuta atividade.

equipamentos que geram grandes desgastes devem ser descartados, uma vez que um pequeno descuido causa perdas apreciáveis do material pétreo.

O jateamento com areia é um dos processos mais abrasivos que existem. Nas atividades industriais, usa-se principalmente para a remoção de crostas de oxidação em estruturas de aço, e, dependendo das exigências, poderá levar o metal ao “metal branco”³. Nesses processos, a pressão é da ordem de 100 psi (0,68 MPa) e vazões do fluxo ar/areia acima de 200 pcm⁴ (5,67 m³ /min). Logo, não devem ser usados na cantaria.

Na limpeza de pedras, são usadas, para o jateamento, micropartículas (microesferas de vidro, pó de mármore, gesso, pó de quartzo, etc.), e como, normalmente, os equipamentos são leves e pequenos, prestam-se ao manuseio em locais de difícil acesso.

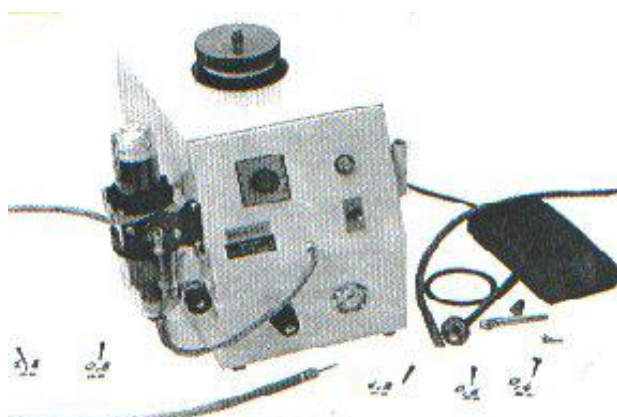


Figura 22 – Microabrasador para limpeza de pedras.
Fonte: *Manual de Conservação de Cantarias* (IPHAN, 2000, p.30).

Quando as sujidades preenchem detalhes de pequenas dimensões, como estatuetas, cavidades apertadas em cercaduras, arcos decorado, cimalkas, socos de altar, etc. e são oriundas de incrustações e recristalizações, pode-se lançar mão de equipamentos abrasivos de pequenos desgastes como microabrasadores com rotação controlada (Figura 22). Esses equipamentos, quando industriais, podem ser utilizados com baixas rotações. Os microabrasadores dentários, por exemplo, são indicados para utilização em áreas ainda menores; neste caso, são mais adequados.

³ Refere-se a uma condição máxima de limpeza na qual se remove toda a oxidação, deixando o metal no seu aspecto original, cor prata.

⁴ Pés cúbicos por minuto.

Possuindo pequenos torques de partida, permitem ao restaurador a aproximação da broca com maior delicadeza à área de trabalho.

d) Limpeza a *laser*

Em algumas ocasiões, quando as sujidades continuam, embora tenham sido aplicados os métodos anteriores, raios *laser* poderão ser utilizados como ferramenta de remoção (Figura 23). Evidentemente, a opção por esse método está diretamente ligada ao orçamento da obra e a condições específicas de aplicação.



Figura 23 – Pistola a raios *laser*.

Fonte: *Manual de Conservação de Cantarias* (IPHAN, 2000, p.31).

2.3.4.2 Restauração das pedras

O processo de restauração das pedras, nos edifícios antigos, demanda muitos cuidados, haja vista a necessidade de compatibilidade: química entre os componentes da pedra e do compósito, física quanto à resistência mecânica, elasticidade e textura e também de cor.

a) Próteses

As pedras danificadas com perdas de partes poderão ser reintegradas através de próteses, e, para isso, é necessária a mão laboriosa do escultor que, uma vez reproduzindo a parte faltosa, possa colocá-la com segurança no lugar. Neste segmento, a escolha da mesma rocha como ponto de partida é primordial. A preocupação com a textura e a cor da pedra original deve ser outro critério a ser obedecido, entre amostras de pedras selecionadas.

Uma vez esculpida, a prótese deve ser colada, e, para isso, o material adesivo deve apresentar propriedades que satisfaçam: boa adesão, grande durabilidade, baixa retração, grande elasticidade e resistência. Os adesivos comumente utilizados são: epóxis, poliuretanos, resinas acrílicas e poliésteres.

No caso de partes maiores, é recomendável a fixação através de pinos metálicos, em aço inoxidável ou latão que, introduzidos previamente na parte danificada com colas poliméricas, possam ajustar-se perfeitamente aos furos executados na face posterior da prótese.

b) Obturações

As obturações feitas nos serviços de restauração são executadas com argamassas. Devido à grande versatilidade dos produtos utilizados, elas são mais aplicadas no preenchimento de fissuras, rejuntamento de alvenarias e recomposição dos revestimentos das paredes. Quando utilizadas na forma tradicional, não deverão ter o cimento *portland* como aglomerante, pois as pedras são vulneráveis a sais solúveis que poderão advir do cimento. As argamassas mais utilizadas nas edificações históricas brasileiras tiveram como aglomerante a cal hidratada. Fungicidas devem ser convenientemente incorporados nelas, bem como, se necessário, pigmentos inorgânicos estáveis, como óxidos metálicos. Resinas de última geração, como os poliésteres, acrílicos e epóxis, estão sendo utilizadas com ganhos expressivos de qualidade nas obras restauradas.

c) Consolidação de pedras

Dependendo do tipo de dano, da sua localização e da natureza físico-química da pedra, às vezes é recomendável recompô-la *in situ*. Esse tratamento diferencia-se dos demais por conta de ser aplicado dentro da estrutura pétreia através de impregnação por produtos químicos. O material, uma vez inserido, melhora substancialmente a impermeabilidade, conferindo maior coesão, resistência mecânica e melhor capacidade para resistir aos efeitos nefastos das intempéries.

A aplicação desse processo faz-se através de pincelamento, escovação, pulverização e emplastos. Em pequenas peças, evidentemente removíveis, pode-se usar impregnação a vácuo, em autoclaves.

Recentemente, com a tecnologia de injeções, resinas epoxídicas de baixa viscosidade podem ser administradas com maior profundidade, através de bombas injetoras de alta e baixa pressão (Figura 24). Essas formulações possuem níveis de elasticidade diferenciados.

Neste caso, devem ser bem avaliados a resistência mecânica à tração da pedra e o índice de vazios, devendo-se discernir as fissuras ativas e as passivas, com vistas a alcançar bons resultados.

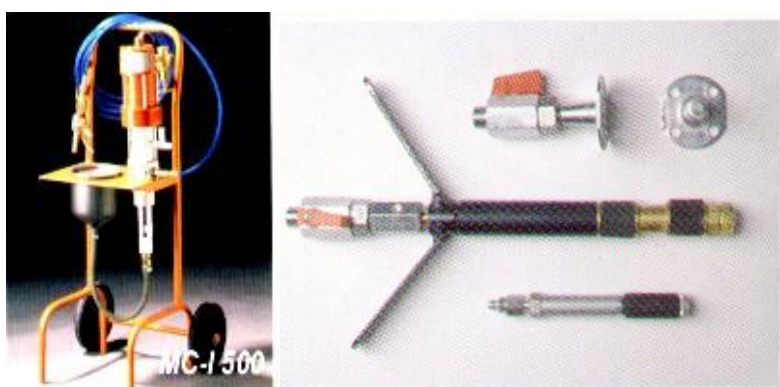


Figura 24 – Bombas injetoras de alta e baixa pressão.
Fonte: <<http://www.mc-bauchemie.com/~2011>>.

Existem bombas como a MC-I 500 da Mc Bauchemie do Brasil, que trabalham com uma grande diversidade de resinas poliméricas, aplicando-as em intervalo de pressões, que vai até 39 MPa.

Na escolha dos materiais consolidantes, é necessário observar alguns critérios para evitar efeitos colaterais danosos (McBAUCHEMIE do Brasil, 2011):

- Não devem apresentar reações nem com a pedra ou com o meio ambiente, de forma a gerar subprodutos degradantes;
- Necessitam possuir baixa viscosidade que resulte em absorção uniforme pela pedra;
- Os coeficientes de dilatação térmico-volumétricos da pedra e do consolidante devem estar o mais próximos possível;
- A penetração do consolidante precisa ser controlada, pois os produtos não podem impermeabilizar totalmente a pedra.

Os consolidantes utilizados são tanto de origem orgânica quanto inorgânica. Os produtos orgânicos são mais elásticos e possuem melhores propriedades adesivas. Já os inorgânicos são menos elásticos e mais duráveis.

Os produtos mais utilizados para a consolidação são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 – Consolidantes de pedras

CONSOLIDANTES	MELHOR APLICAÇÃO
Silicato de Etila	Arenitos, cerâmicas
Alquil-alcoxisilano	Arenitos, cerâmicas
Mistura de silicato de etila + alquil-alcoxisilano	Arenitos, cerâmicas
Alquil-aril-polisiloxano	Alvenarias, arenitos, mármore, calcários
Resina acrílica	Mármore e calcários compactos e arenitos
Hidróxido de bário/hidróxido de cálcio	Calcário com vazios entre 50 a 100 µm
Mistura de resina acrílica e silicone	Mármore, calcários e arenitos

Fonte: *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000, p.35).

2.3.4.3 Proteção das pedras

a) Proteção com agentes químicos

Após os serviços de restauração e consolidação, as cantarias precisam ser protegidas dos agentes degradadores do tempo. Essa medida visa permitir uma vida útil dos trabalhos, com alcance bem maior, justificando-se o custo/benefício de todo o serviço de restauração e proteção. Esses produtos, antes de serem aplicados, precisam apresentar um elenco de propriedades que salvaguardem a integridade dos trabalhos executados. Segundo o IPHAN (2000, p.36), as condições exigidas são:

- Durabilidade do produto;
- Ser inerte quanto à possibilidade de gerar subprodutos degradadores da pedra;
- Possuir propriedades de bloquear os raios UV;
- Permitir permeabilidade ao vapor d'água;
- Não influenciar as propriedades óticas e cromáticas da pedra.

Os produtos comumente utilizados são indicados no Quadro 3.

Quadro 3 – Produtos protetores da pedra

AGENTES PROTETORES	TIPOS DE ROCHA
Resinas acrílicas	Mármore, materiais de baixa, média e alta porosidade
Misturas de resinas acrílicas e silicones	Todos
Alquil-aryl-polisiloxano	Todos

Fonte: *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000, p.36).

b) Proteção contra a umidade

A água é o maior agente de destruição da pedra. Os edifícios históricos estão sujeitos a várias formas de agressão pela água, por isso, revisões periódicas são necessárias em todo o sistema hidráulico da obra. O sistema de coleta das águas pluviais – coberta, algerozes, tubos de queda, caixas coletoras e distribuição final – precisa estar estanque e bem dimensionado para chuvas intensas.

O sistema de drenagem externo, se pavimentado, deve apresentar boa declividade para os pontos de desague, com caixas coletoras resistentes ao tipo de tráfego, em quantidade suficiente para evitar encharcamento nos dias de chuva. Nos pátios, é imprescindível a execução de rede de drenagem subsuperficial pelo lado externo das paredes, que, além de impedir a permanência da água de chuva, atua como limitador da subida do lençol freático para não atingir as fundações. Isso se faz necessário para evitar que solos contaminados com sais solúveis possam conduzir a migração desses sais por capilaridade danificando as pedras.

2.4 ARGAMASSAS HISTÓRICAS

As argamassas históricas foram elaboradas a partir de cales aéreas e, eventualmente, materiais pozolânicos naturais (cinzas vulcânicas) ou artificiais, como pó de tijolos, misturados à cal em presença da água. A denominação de pozolanas derivou de cinzas vulcânicas encontradas em *Pozzuoli*, na Itália, que eram utilizadas para a fabricação de argamassas romanas.

Pozolana é qualquer material que contenha sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativas que, em presença da água, reagem ou se combinam quimicamente com a cal (na temperatura ambiente), formando compostos aglutinantes (silicatos e aluminatos de cálcio hidratados) resistentes à água. As pozolanas podem apresentar diversos graus de reatividade, que dependerão da quantidade de sílica reativa, da finura da pozolana e da pureza da cal (KANAN, 2008).

As argamassas utilizadas nos monumentos históricos têm importância na durabilidade dessas obras, visto que os emboços de revestimentos de paredes e os rejantes de união das pedras nas alvenarias, muitos deles, existem originalmente até hoje. O interesse científico em conhecer suas composições mineralógicas vem, há muito tempo, desafiando muitos pesquisadores, na busca de resultados que expliquem a solidez apresentada. Essa questão tem ganhado força em função da pouca durabilidade relativa do material mais utilizado nas grandes obras de engenharia, que é o concreto armado, feito com cimento Portland. Embora seja este preparado com toda tecnologia, a corrosão eletroquímica do aço, através da expansão dos subprodutos formados na reação, fatura as peças concretadas, necessitando as obras de altas cifras financeiras em serviços de recuperação.

Roy e Langton (1989) observam que argilas calcinadas moídas e misturadas com cal foram os primeiros aglomerantes hidráulicos utilizados pelo homem. Já Malinowsky (1991) cita ruínas de construções, na região da Galileia, que remontam a 7.000 anos a.C., construídas com essa pozolana.

Nessa direção, Hazra e Krishnaswamy (1987) afirmam que essas argamassas feitas à base de cal e pozolanas naturais, foram utilizadas de forma abundante na construção de pontes, aquedutos e edifícios, pela civilização romana. Bogue (1955) e também Lea (1970) citam grandes obras históricas como as pontes de Fabricus, Aemilius, Elius e Milvius, os arcos dos Imperadores Cláudio e Trajano

em Óstia, obras que estão resistindo até os dias de hoje e são atestados vivos da impressionante durabilidade dessas argamassas.

Outros pesquisadores, como Shi e Day (1993), Baronio e Binda (1997), Sabir, Wild e Bai (2001), que fizeram investigações sobre a reatividade pozolânica, frisam a extraordinária durabilidade de argamassas feitas com pozolanas e cal.

A atividade pozolânica com a cal resultou, conforme os relatos acima, em argamassas de grande durabilidade, mas não se sabe ainda com certeza o que produz essa grande longevidade. De fato, embora as pozolonas misturadas à cal resultem em silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, alguns autores não acreditam que esta seja a razão da durabilidade milenar desses aglomerantes. Torgal, Gomes e Jalali (2007) são outros autores que, tendo investigado mais profundamente essas argamassas, afirmam que elas tiveram como fator de endurecimento e durabilidade a ativação alcalina, em detrimento de reações puramente pozolânicas.

2.4.1 A Cal como Aglomerante nas Argamassas Históricas

O interesse mundial pela preservação do patrimônio histórico vem despertando a atenção de governantes, instituições de preservação do patrimônio construído e toda comunidade técnica especializada. Os trabalhos de restauração em argamassas antigas, principalmente de cal, têm exigido a retomada e o conhecimento mais aprofundado das propriedades das cales, materiais que, com o surgimento do cimento Portland, tiveram o emprego reduzido. Muito do conhecimento prático de manufatura e aplicação da cal foi esquecido e, talvez, nunca aprofundado.

Essa busca pela caracterização das cales tornou-se um imperativo, visto que muitos problemas de incompatibilidade entre o existente e o restauro têm trazido prejuízos ao patrimônio histórico. No Brasil Colonial, não eram conhecidas as jazidas de pedra, e as primeiras fontes de cal para a construção vieram de conchas marinhas (KANAN, 2008). As conchas eram aquecidas (calcinadas) a temperaturas elevadas (± 850 °C), moídas e, depois, hidratadas. O crescente consumo da cal fez com que se passasse a usar, como matéria-prima, jazidas de pedra calcária, muito abundantes no Nordeste do Brasil, conforme o *Manual de conservação de cantarias* (IPHAN, 2000).

No passado, as argamassas de cal tiveram, como agregado, a areia de rio, de jazidas, tijolos, pedras (mármore dolomíticos) e conchas (KANAN, 2008). Sua granulometria responde por parâmetros físicos de grande importância na durabilidade e aparência da argamassa, como cor, textura, porosidade e resistência. Aditivos orgânicos utilizados nas argamassas e também em pinturas à base de cal foram: polissacarídeos (mucilagem vegetal), proteínas (caseína do leite, clara de ovo), óleos animais (de peixe, etc.), vegetais (linhaça) e gorduras (sebo), e outros. Também era comum adicionar fibras vegetais (palha) e de animais (crina, estrume) (KANAN, 2008).

Quanto aos aditivos orgânicos, Santiago (1991), em sua dissertação de mestrado, fez experimentos com: óleo de baleia, açúcar e sangue de boi. Nos relatos, encontram-se muitas citações em que os aditivos pesquisados pela autora emprestavam propriedades especiais às argamassas traçadas com eles.

Quanto ao óleo de baleia, Santiago (1991, p. 45) observa:

Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que as tensões de ruptura suportadas são muito menores nos corpos de prova contendo óleo do que naqueles que não apresentam tal aditivo. Este fato pode ser explicado pelo efeito inibidor da carbonatação sobre as partículas do Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) criado pelo isolamento do óleo, dificultando a penetração do CO_2 (gás carbônico), retardando ainda mais o lento processo de carbonatação.

Vê-se daí que o conceito popularmente difundido de que o óleo de baleia empresta grande resistência à compressão em argamassas de cal, quando misturado, não corresponde exatamente à realidade.

Por outro lado, os estudos conduzidos em sua dissertação revelaram que tal aditivo tem poder de melhorar a hidrorrepelência, justificando-se assim sua contribuição na durabilidade das alvenarias históricas.

Quanto ao açúcar, Santiago (1991, p. 46) afirma:

Os ensaios de resistência ao calor e perda ao fogo demonstraram que este aditivo por si só não aumenta a resistência ao fogo nas argamassas ordinárias, mas funciona satisfatoriamente nas argamassas bastardas (cal, barro e areia).

Também a autora conclui que:

Através de ensaios de envelhecimento acelerado com Na_2SO_4 (sulfato de sódio), [...] este aditivo apresentou maior resistência às intempéries e à ação de expansão de cristalização de sais solúveis em relação aos outros. Outra descoberta feita pela a autora foi que tanto as argamassas aditivadas com açúcar quanto aquelas contendo sangue de boi, o ataque biológico é muito intenso. O sangue de boi também favorece a hidropelência quando usado em maiores dosagens (SANTIAGO, 1991, p. 46).

Rebocos, emboços, pinturas e acabamentos à base de cal, nos monumentos históricos, emprestam funções estruturais importantes às alvenarias, além de boa estabilidade.

[...] esse sistema de argamassas à base de cal funciona como uma estrutura articulada de juntas de dilatação e deformação capaz de absorver tensões e umidade e atuar como elemento de sacrifício do edifício; da mesma forma, os revestimentos formam uma membrana capaz de absorver agressões atmosféricas e proteger a estrutura interior, que é feita, muitas vezes, com alvenaria excessivamente porosa e irregular [...]. (KANAN, 2008, p.18).

Os produtos à base de cal apresentam uma rede de poros capazes de permitir que as paredes, após serem molhadas, sequem de forma relativamente rápida, impedindo, assim, os danos por sais solúveis. Isso também reduz a proliferação de agentes biológicos que precisam da água retida nos poros para sobreviver. Com a facilidade da penetração do ar em sua microestrutura, a carbonatação acontece, transformando, ao longo do tempo, o hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio.

2.4.2 Hidratação

A cal virgem (CaO), ao ser misturada com água, forma o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , liberando grande quantidade de calor. Após o resfriamento e secagem, esse produto é comercialmente chamado de cal hidratada e pode ser usado como aglomerante em argamassas e outras aplicações. Na Figura 25, apresenta-se o ciclo da cal a partir da calcinação das matérias-primas (calcário, conchas marinha), culminando com o regresso às suas formações carbonáticas de origem.



Figura 25 – Ciclo da cal.
Fonte: Kanan (2008, p. 33).

2.4.3 Cal Dolomítica ou Magnesiana

Se, na composição mineralógica do calcário, existir carbonato de magnésio, em quantidades significativas, a cal originada é chamada de dolomítica ou magnesiana. Com relação às cales cálcicas, as magnesianas apresentam reações de hidratação mais lentas, mas ambas são atacadas pelo gás SO_2 em ambientes poluídos. A cal dolomítica tem propriedades similares às da cal aérea calcítica, descrita acima, mas quimicamente é diferente e, por isso, apresenta aspectos diversos tanto na produção como nas reações de cura e resistência final. Produzem argamassas mais plásticas e retêm mais água.

2.4.4 Cal Hidráulica Natural ou Artificial

Os calcários são rochas sedimentares e, nessa condição, é comum conter impurezas. Quando a percentagem de argila excede a 25%, as cales produzidas são chamadas de hidráulicas. Essa denominação se justifica pelo fato de o endurecimento das argamassas acontecer, em parte, pela reação química com a água. Quanto maior for essa percentagem, maior é a hidráulicidade da argamassa. Isto é, a água toma maior importância nos efeitos de endurecimento da argamassa. A cal hidráulica pode ser também de natureza artificial, ou seja, preparada industrialmente, misturando-se a cal hidratada aérea com componentes hidráulicos, como o cimento Portland.

Oliveira (2011) classifica as cales hidráulicas, segundo o índice de hidraulicidade, conforme o Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Índice de hidraulicidade

Classificação	Teor de argila (%)	Índice de hidraulicidade	Tempo de pega
Fracamente hidráulicas	5 a 8	0,10 a 0,16	2 a 4 semanas
Medianamente hidráulicas	8 a 15	0,16 a 0,30	1 a 2 semanas
Francamente hidráulicas	15 a 19	0,30 a 0,40	2 a 6 dias
Eminentemente hidráulicas	19 a 22	0,40 a 0,50	≤ 1 dia

Fonte: Oliveira (2011, p. 36).

O índice de hidraulicidade é dado pela fórmula de Vicat:

$$I = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + \%MgO}$$

Fonte: Oliveira (2011, p. 36).

Dependendo da temperatura de calcinação, os compostos da argila basicamente (sílica e alumina) combinam-se com o cálcio, formando silicatos e aluminatos de cálcio, tornando-se insolúveis em água. Em geral, essa cal apresenta resistência superior às cales aéreas (KANAN, 2008).

A cal, como elemento aglomerante, tem sido utilizada em larga escala nas novas construções e, também, no restauro de obras antigas. Apresentam-se algumas aplicações:

- **Argamassas decorativas:** cornijas, estuques, decorações e pinturas;
- **Argamassas de assentamento e de reconstituição de alvenarias:** fundações, paredes, pisos. Aplicadas fluidas, podem

preencher vazios desgastados pelo tempo, e dá integridade estrutural aos elementos ligados;

- **Argamassas de revestimento:** rebocos, emboços, acabamentos, tendo como funções a estética e a proteção dos substratos.

2.5 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS E ARGAMASSAS ANTIGAS

Os monumentos históricos, construídos, em grande parte, à base de argamassa de cal, quando da necessidade de serviços de restauração devem passar por critérios técnicos que demonstrem a compatibilidade físico-química dos materiais a serem empregados nos serviços. No caso de se usar materiais semelhantes, deve-se proceder com as análises que comprovem a compatibilidade granulométrica dos agregados, bem como a identificação da cal que foi utilizada. Não obstante, podem-se utilizar materiais diferentes, desde que possuam propriedades semelhantes àqueles presentes na construção.

No passado, a falta de meios para a caracterização de uma argamassa antiga foi o grande entrave para o sucesso de serviços de restauração. Hoje, com o avanço tecnológico, as composições granulométricas, a caracterização química dos seus elementos e os parâmetros físicos podem ser avaliados através de tecnologias, como: difração de raios X (DRX); análise termogravimétrica (ATG); microscopia óptica (MO); microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de raios X por dispersão de energias (MEV-EDS); espectrofotometria de absorção atômica (EAA); potenciometria; gravimetria; absorção de água por capilaridade; resistência mecânica e porosimetria de intrusão de mercúrio, etc.

Dentro desse contexto, pode-se referir à metodologia desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LINEC, em Portugal, para à caracterização de amostras. Na Figura 26, vê-se a sequência das etapas de caracterização de amostras, começando pela estufa e submetendo-a à temperatura de 40°C. Após a secagem, uma primeira observação é feita à lupa binocular (7.5x – 120x). Em seguida, procede-se com a análise química Via Úmida, separando-se a fração solúvel do resíduo insolúvel. Para a fração solúvel, é determinado o teor de

sais solúveis e a composição química do ligante; e, para o resíduo insolúvel, é calculado o teor do agregado e procedida a análise granulométrica. Sequencialmente, realizam-se ensaios microestruturais, de absorção de água por capilaridade, de resistência mecânica e de porosidade. Em seguida, apresentam-se alguns desses ensaios, que são realizados pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

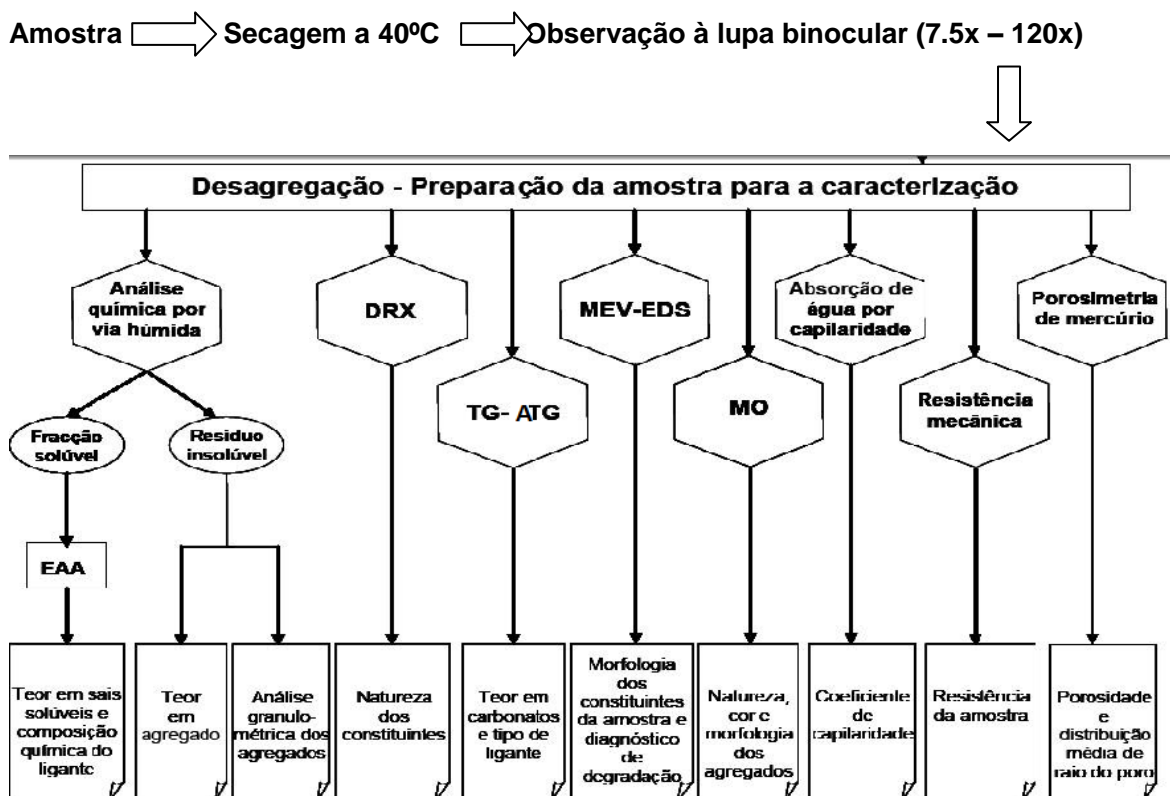


Figura 26 – Metodologia LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal) utilizada na caracterização de argamassas antigas.

Fonte: Adaptado de Veiga et al. (2001).

a) Difração de raios X

A difratometria de raios X é uma das técnicas de muita utilidade na caracterização da microestrutura de materiais cristalinos. Ciências envolvidas com esses materiais, como geologia, engenharia civil, mineralogia, metalurgia, engenharia de minas, engenharia química e outros ramos correlatos, tiveram grandes avanços através do seu uso. No caso das argamassas, consegue-se identificar os componentes do agregado e do aglomerante e, assim, rastrear a

existência de materiais pozolânicos e de alteração (CHIARI; TORRACA; SANTARELLI, 1996).

b) Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial (ATG)

Esta técnica complementa e refina a identificação mineralógica, possibilitando a determinação dos diversos teores dos minerais encontrados nas argamassas históricas. Possibilita a distinção entre os vários compostos de cálcio e magnésio, quantifica os carbonatos de cálcio e de magnésio e faz a caracterização do tipo de aglomerante.

c) Análise granulométrica e química dos agregados

A análise granulométrica dos agregados reveste-se de muita importância, principalmente quando se está trabalhando em obras de restauro com argamassas históricas. A compatibilidade percentual dos diâmetros dos grãos na distribuição analítica entre o agregado da argamassa existente e a de teste vai influir, positivamente na analogia do reparo. A análise química, por via úmida, possibilita a estimativa entre o teor de aglomerante e o de agregados de natureza não calcária.

d) Microscopia ótica com luz refletida

Essa observação em pequeno aumento possibilita a identificação de alguns minerais e rochas, ou o grupo a que pertencem, e fornece informação sobre o estado de alteração. Permite o conhecimento de texturas superficiais e subsídios para se conhecer algumas características de areias como grau de rolamento e esfericidade.

e) Microscopia ótica de transmissão

Neste processo, utiliza-se o microscópio petrográfico. Lâminas delgadas de argamassas antigas, quando observadas, permitem determinar os constituintes mineralógicos, inclusive aditivos orgânicos e inorgânicos, como materiais pozolânicos e formação de minerais secundários como sais. Fornece também as

relações texturais/espaciais entre os componentes da argamassa (porosidade, presença de fissura).

f) Microscopia eletrônica de varredura

Este recurso tecnológico de microscopia soma-se aos demais já descritos, permitindo ao observador, em análise de argamassas históricas, obter detalhes dos constituintes dos aglomerantes, dos agregados, dos compostos formados, e observar suas formas, texturas, tamanhos e distribuição na argamassa.

2.6 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS ARGAMASSAS PROJETADAS

Diante da necessidade de revestir, com gesso, a fachada do Museu do *Campus* da Columbia, nos Estados Unidos, com a maior brevidade possível para a adaptação a um evento, Carl Eathan Akeley, em 1907, inventou uma máquina que recebia o gesso em pó pela parte superior, conduzia-o através de ar comprimido à parte inferior, e, através de uma tubulação, em alta velocidade, até o ponto de saída, e no bico, onde recebia a água proveniente de outra mangueira, projetando, assim, a argamassa sobre a parede (TEICHERT, 2002).

O engenho inventado por Akeley foi batizado por ele de *Plastergun* (Figura 27). Entre 1907 e 1911, Akeley aperfeiçoou sua criação e, em 1911, a patenteou (TEICHERT, 2002). Nessa ocasião, um engenheiro civil, e também empresário da cidade de Allentown na Pensilvânia, comprou o invento e mudou o nome de sua empresa para Cement Gun Company. A partir de então, passou a utilizar a máquina com cimento e areia, projetando esta mistura para outras finalidades, inclusive na estabilização de terraplenos.



Figura 27 – O invento de Akeley. A *Plastergun*.
Fonte: Teichert (2002, p.10-12).

Com a evolução e divulgação da tecnologia pelo mundo, outras aplicações começaram ser testadas com sucesso. Há registro de que, em 1920, foi aplicada, nos Estados Unidos, esta tecnologia na construção de um túnel (TEIXEIRA, 1999). Serviços com argamassas projetadas de cimento, areia e água, por muito tempo, foram utilizados com a veiculação original do engenho de Akeley, aprimorado ao longo dos anos, para versões mais eficientes.

O processo originariamente inventado por Akeley recebeu o nome de mistura por Via Seca (*dry mix*), pelo fato de a mistura ser veiculada seca, até o momento de receber o fluxo d'água na saída do bico projetor. Posteriormente, com o desenvolvimento tecnológico e outras necessidades construtivas, foi criado o processo por Via Úmida (*wet mix*).

2.6.1 Processo por Via Seca

Existem três tipos de máquinas operando atualmente por Via Seca:

- *Double-Chamber System*; de câmara dupla, Figura 28 (a).
- *Screw System*; de parafuso, Figura 28 (b).
- *Rotating-Barrel System*; de tambor giratório, Figura 28 (c).

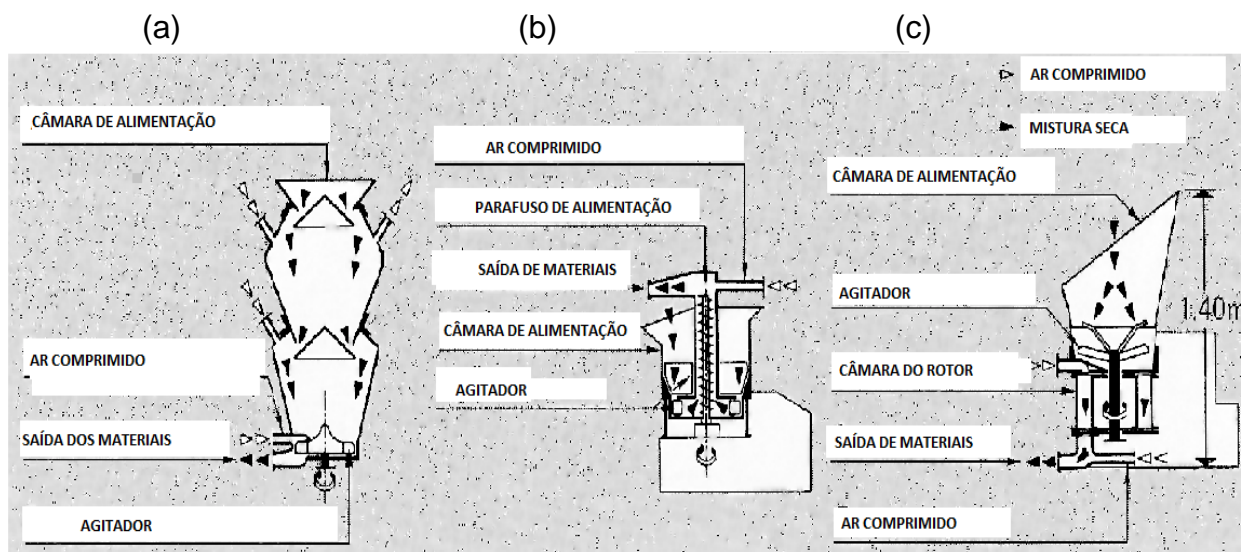


Figura 28 – Esquema em corte dos três tipos de máquinas de projeção de argamassas e concretos.

Fonte: Teichert (1996, p.11).

As máquinas *Double-Chamber System*, primeira da esquerda para a direita nas Figuras 28(a) e 29, ou de câmara dupla, foram inventadas em 1907 e aprimoradas posteriormente. Consistem em duas câmaras, uma superior e outra inferior, tendo a descarga dos materiais pela parte inferior. A alimentação com os materiais é feita pelo cone externo, onde existe uma válvula *bell-shaped* (formato de sino) na entrada superior, sendo que a conexão entre as câmaras pode ser fechada hermeticamente através de outra válvula similar, independentemente uma da outra. A câmara inferior trabalha com a mesma pressão da linha de descarga. O procedimento inicial de operação acontece com a válvula “campainha”, de conexão fechada. Neste instante, o material é alimentado pela parte superior e fechado hermeticamente, sendo, então, pressurizado. Agora, a válvula entre as duas câmaras pode ser aberta, permitindo que a mistura passe da parte superior à parte inferior. Após isso e de repente, ela é fechada para aliviar a pressão na câmara superior e permitir novamente o ingresso de materiais. Nesse instante, o ar comprimido, fornecido por um compressor, entra pela parte superior da descarga na câmara inferior, impelindo o material para a mangueira de descarga. A câmara superior, então, já pode ser reabastecida, e o ciclo recomeça (TEICHERT, 1996).



Figura 29 – Máquina de projetar *Double-chamber*, ou de Câmara dupla, em 1914.
Fonte: Teichert (1996, p.12).

As máquinas *Screw System*, ou de sistema em parafuso, foram criadas por Georg Senn (Figuras 28(b) e 30), sendo introduzidas no mercado por volta de 1940. Sua invenção veio minimizar o esforço físico de operação humana, que exigiam as máquinas de câmara dupla. O início da operação dá-se com a alimentação pelo cone superior. O material é conduzido, através de um parafuso de *Arquimedes* até o topo do canhão, onde recebe ar comprimido, e aí é descarregado pela parte posterior, na mangueira de projeção. O acionamento mecânico do sistema pode ser através de motor elétrico ou por ar comprimido. Essas máquinas permitiram, pela primeira vez, projetar o concreto convencional, com brita de diâmetro máximo de 25 mm, a uma taxa de 3,0 m³/h (TEICHERT, 1996). Na época, isso foi um feito extraordinário.



Figura 30 – Máquina de projetar *screw system*, ou de parafuso, em 1950.
Fonte: Teichert (1996, p.12).

As máquinas *Rotating-Barrel System* – Figuras 28(c), 31, 32 e 33 – ou de cilindro rotativo, quando apareceram, tomaram o lugar das *Screw System*, que desapareceram sem deixar vestígios. O sistema de tambor giratório tornou-se mais eficiente porque as máquinas anteriores eram mais lentas, dificultando a produtividade do processo. Essa máquina recebe o material pelo cone alimentador superior e o passa, diretamente, a um tambor cilíndrico giratório, logo abaixo, e daí para a descarga. Esse tambor giratório é movido através de um eixo vertical acoplado a um sistema de engrenagens que fica na base da máquina (TEICHERT, 1996).



Figura 31 – Máquina de projetar *rotating-barrel system*, ou de cilindro giratório.
Fonte: GUNITE – *Supply & Equipment* (2012).



Figura 32 – Máquina de projetar *rotating-barrel system*, na versão mais atualizada. CYCLONE CY – 61.
Fonte: GUNITE – *Supply & Equipment* (2012).



Figura 33 – Aplicação da tecnologia de argamassa projetada Via Seca na recuperação do concreto armado.
Fonte: GUNITE – *Supply & Equipment* (2012).

2.6.2 Propriedades das Argamassas Projetadas por Via Seca

Como foi relatado, no invento de Akeley, a argamassa projetada por Via Seca (*dry mix*) é previamente misturada em uma betoneira, ou manualmente, sem adição da água. Após esse processo, é colocada na máquina de projeção e, através de ar comprimido, conduzida para a mangueira de descarga, que possui, na outra extremidade, um bico cônico projetor, onde também é injetada água sob pressão, para a mistura ser molhada e projetada.

A pressão do ar e a alta vazão da projeção sobre a superfície tornam a argamassa projetada mais aderente pela alta compactação no impacto. A reflexão do material projetado é outra propriedade. O impacto do material a alta velocidade, contra a superfície a reparar, produz o ricochete, havendo considerável perda de materiais. “A quantidade média de reflexão, em aplicações corretas, varia de 5 a 15% em pisos e lajes, de 15 a 30% em paredes verticais ou inclinadas, e de 25 a 50% em tetos” (CÁNOVAS, 1988, p.353).

Já a pressão da água, na entrada do bico, tem de ser maior que a pressão do sistema neste local, sendo recomendável exceder a 1,0 kg/cm² (SILVA, 1997). A quantidade de água é outro parâmetro de grande importância nas argamassas projetadas. Se a quantidade for excessiva, a argamassa pode descolar do substrato. No caso de pouca água, o material não adere. Existe uma quantidade ótima de água para cada caso. Argamassas de cimento e areia, normalmente, apresentam bons resultados com fator água/cimento entre 0,35 a 0,50 l/kg, embora existam equipamentos que trabalham com 0,28 l/kg (CÁNOVAS, 1988).

Os problemas da tecnologia das argamassas projetadas pelo processo por Via Seca são: **oclusão**, **laminação** e **sombra**. A **oclusão** dá-se quando parte do material refletido permanece sobre a área de trabalho por falta de limpeza. Neste caso, nova camada sendo projetada sobre o local irá produzir uma região de baixa resistência com pouca aderência. A **laminação** ocorre no caso de a argamassa projetada não ser suficientemente molhada. Isso pode acontecer por interrupção momentânea do fornecimento d'água e/ou entupimento dos furos do anel de distribuição da água internamente ao bico. A **sombra** acontece quando um obstáculo irremovível dificulta a passagem do material para a parte posterior, entre o obstáculo e o substrato, provocando um vazio. Exemplo clássico é a ferragem existente nos serviços de recuperação do concreto armado.

Outros parâmetros que têm grande influência na qualidade e produtividade das argamassas projetadas são a distância do bico de projeção à superfície e o ângulo formado entre o fluxo e o substrato a reparar. Vários experimentos mostraram que as melhores condições de projeção foram obtidas com distância de 1,0 m para a distância do bico ao anteparo e perpendicularidade entre o fluxo e a superfície (CÁNOVAS, 1988).

2.6.3 Processo por Via Úmida

No processo por Via Úmida, o concreto, ou a argamassa, é colocado pronto dentro da máquina, inclusive já recebendo toda a água necessária. A partir daí, é impulsionado pelo ar e então projetado. As máquinas, para este fim, são equipamentos maiores e, conseqüentemente, mais caros. Pelo fato de o material ser projetado pronto, a geração de poeira é muito reduzida. Como toda máquina operatriz de argamassa, o processo não pode ser interrompido e, após certo tempo de paralisação, o material terá de ser descarregado fora da área de trabalho. A reflexão é reduzida, e a homogeneidade da argamassa se faz com melhor qualidade.

Esses equipamentos trabalham com vazões mais altas e, portanto, tornam-se pouco práticos para serviços menores e que necessitam de esmero. Nos serviços de recuperação, propostos neste trabalho, o processo Via Seca é o mais aconselhável e permite o melhor controle da limpeza das cercanias do objeto em processo restaurativo. Nas Figuras 34 e 35, apresentam-se dois equipamentos de projeção via úmida.



Figura 34 – Projeto de argamassa e concreto por Via Seca ou Úmida – CP10 SU.

Fonte: ESTE – Industrial e Comercial (2011).



Figura 35 – Projetora de argamassa e concreto por Via Seca ou Úmida – CP15 SU.

Fonte: ESTE – Industrial e Comercial (2011).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MONUMENTOS DO ESTUDO

As obras históricas pesquisadas neste trabalho foram: a Igreja da Guia em Lucena-PB, a ruína do convento do Almagre e o forte de Santa Catarina, em Cabedelo-PB.

a) Igreja da Guia



Figura 36 – Igreja da Guia (Lucena-PB).
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

Essa igreja é um dos mais belos exemplares da arquitetura religiosa no Brasil (MACHADO, 1977), principalmente pela excelência dos trabalhos de cantaria. Ela foi tombada, em 16 de maio de 1949, pelo IPHAN. É uma igreja de nave única, dotada de galilé, capela-mor um pouco mais estreita que a nave, e um compartimento por trás da capela-mor de largura igual a esta última. Deve ter possuído galerias laterais por onde se teria acesso ao corpo e às tribunas (hoje não existem mais ou nunca foram construídas). Edificada em alvenaria de pedra e coberta com estrutura de madeira e telhas cerâmicas, tipo canal, é uma igreja riquíssima em trabalho de cantaria, destacando-se os da fachada principal, da galilé, do altar-mor, das tribunas, do arco cruzeiro e dos nichos existentes na parede que contém o arco cruzeiro, voltados para a nave.

Em estilo “barroco tropical”, a fachada principal mostra desenhos extravagantes, como é o caso das figuras popularmente conhecidas como “anjos deformados”. Há também em profusão, nessa fachada, frutos tropicais, coroas, cetros, armas do império português, entre outros. Fundada pelos carmelitas, não há descrição de como teria sido no início, e isso pode indicar que se tratava de uma construção que não valesse a pena descrever por nada ter de marcante, o que se pode deduzir analisando outras notícias históricas referentes à Igreja da Guia, como segue:

[...] em 1591 os religiosos carmelitas deram começo ao convento da Paraíba, empenhando-se depois na catequese dos índios. Na margem setentrional da foz do rio Paraíba sobre terreno acidentado, estabeleceram seu primeiro aldeamento com a capela dedicada a virgem santa, sob a invocação de Nossa Senhora da Guia [...]. (MACHADO, 1977, p.126).

Em 20 de dezembro de 1634, o comandante do forte de Santo Antônio, capitão Luís de Magalhães, manda comunicar ao capitão-mor que se achava na ermida de N. S. da Guia, que os artilheiros ingleses e hamburgueses haviam desertado e que, no aludido forte, só existiam seis barris de pólvora e, portanto, achava-se em perigo a defesa (FERREIRA, 1977). Em 1º de junho de 1637, “[...] os índios da aldeia de Jacuípe e Pontal que se achavam na Guia, a pedido, voltam as suas velhas aldeias” (FERREIRA, 1977, p.55). Em descrição de 1639, é feito o registro de um pequeno rio chamado de N. S. da Guia, que vem do Norte, a uma pequena légua do interior e, junto dele, sobre um monte, a igrejinha do mesmo nome (HERCKMAN, 1639, p.25).

A segunda década do século XVIII deve ter presenciado a ampliação do estabelecimento dos Carmelitas, mas a descrição das obras que nele se fizeram, não foi localizada.

[...] assim divididos trataram os reformados de melhorar seus conventos e igrejas. O da Paraíba além de pequeno achava-se arruinado. Começaram a fundá-lo de novo, em maiores proporções, e só depois de concluído tal como se acha hoje, deram princípio a atual igreja [...]. (MACHADO, 1977, p.424).

Atribuem-se a Frei Manoel de Santa Tereza as referidas obras e, pelo texto citado, pode-se chegar à conclusão de que, realmente, trata-se do convento carmelita de João Pessoa:

Com efeito bela igreja, que o padre Santa Tereza, possuído de um fervoroso zelo, faz surgir das ruínas em que se achava, ela é hoje apontada naquela província como um dos seus magníficos templos, tornando-se recomendável e tendo preferência aos demais, pela sua moderna inauguração [...] (MACHADO, 1977, p. 426).

A referência aos demais indica que os paraibanos tinham escolha, isto é, poderiam ter preferido outra igreja, mas não há nenhum indício da existência, na proximidade da Guia, de outro templo que possa confirmar a hipótese aventada de tratar-se, de fato, do convento carmelita de João Pessoa, onde havia, na mesma época, igrejas de outras ordens religiosas.

Germain Bazin (1956), em sua admirável análise sobre a igreja de N. S. da Guia, levanta a mesma dúvida sobre a atribuição ao Frei Manoel de Santa Tereza de autoria da orientação das obras. A análise que o referido estudioso fez é bastante arguta, pois usa a notícia histórica com uma visão crítica e estética que, sem paixão, contesta a interpretação do historiador Maximiano Lopes Machado.

Esta é uma realidade onipresente na historiografia da arte brasileira. O monumento é o documento que pode, inclusive, pôr em dúvida o que está escrito em papéis, e se apresenta para o estudioso como se o desafiasse a decifrar aquele. Somente a análise do monumento é capaz de ser conclusiva embora se pretenda sempre, providenciar um escudo documental escrito para avalizar as teorias estéticas emitidas.

Tudo indica que, pelo menos, as obras da capela-mor da Igreja Nossa Senhora da Guia sejam contemporâneas das que se realizaram na igreja da mesma ordem, em João Pessoa, de 1763 a 1778. Germain Bazin (1956) conclui que a atual Igreja da Guia teria sido reconstruída em duas fases, como descreve:

La reconstruction d'une église a donc D'u commencer vers 1730 par La facada facada et La nef, tandis qu'on conservait La vieille capela mor por La celebration Du culte, selon uh usage fréquent. L' arco cruzeiro orné, la capela mor et l'altar mor 'ete' eux-mêmes exécute's en pierre, dans le style rocaille, 1760 – 1770 (BAZIN, 1956, p.38)⁵.

⁵ “A reconstrução de uma igreja começou pela fachada e pela nave por volta de 1730, enquanto se manteve a velha capela-mor para a celebração do culto, de acordo com o uso frequente. O arco cruzeiro ornamentado, a capela-mor e o altar-mor, foram executados em pedra, em estilo *rocaille*, 1760-1770”.

No entanto, pesquisas levadas a efeito pelo historiador José Antonio Gonsalves de Mello revelaram um fato intrigante. Transcrevem-se, na íntegra, as notas fornecidas por aquele autor:

Reunião capitular aos 11 dias do mês de novembro de 1868 ao triplicado som da “campa” mandada tocar pelo Revmo. Mestre Provincial Frei Eurico de Sant’ Anna e reunida à comunidade no lugar do capítulo para participar que tendo-se a levantar de novo o convento da Guia e que estando o convento em estado de receber a cobertura e o frontispício da igreja abaixo e tendo parado a obra porque o padre prior da Paraíba não podia administrar a dita obra.

Reunião capitular aos 20 dias do mês de janeiro de 1869, ao triplicado som da campã mandada tocar pelo Revmo. Padre provincial, reunida à comunidade do lugar do capítulo, o Revmo. Padre Provincial declarou que tinha mandado tocar o dito capítulo para dar conta de sua missão no convento da Guia e passou logo a expor que tinha feito o “frontispício” da igreja todo de pedra e cal com cornijas e mais uns reparos na dita igreja e que cobrira a casa de moradia e que toda esta obra gastara a quantia de 5.8161400 réis. [...]. (TRANSLADOS E CORRESPONDÊNCIAS OFICIAL DO CONVENTO DO CARMO DO RECIFE. 1819 a 1874).

O conteúdo dessa informação refere-se à reconstrução do frontispício da igreja no século XIX, o que leva à consideração de duas hipóteses: a reforma da fachada da igreja, sem modificação, daquela que havia ruído, o que confirma a tese de Bazin; e a da modificação do mesmo frontispício em outro estilo diferente do antigo que, neste caso, derruba a tese do conservador francês. São duas hipóteses extremas, sendo mais provável que o termo frontispício seja aí empregado para referir-se ao frontão, pois há referência clara e textual a cornijas. Por outro lado, os motivos de decoração da fachada continuam mantendo um “grau de parentesco” muito íntimo com aqueles utilizados na execução das tribunas da nave, de cuja ruína não se tem notícia.

b) Fortaleza de Santa Catarina

A fortaleza de Santa Catarina (Figuras 37 e 38) teve sua origem no século XVI. Seu traço inicial, de cerca de 1585, foi feito pelo engenheiro Cristóvão Lins, colono alemão (naturalizado português, ou apelidado), fixado em Pernambuco, a serviços dos portugueses, quando:

[...] se marcou o forte de cento e cinquenta palmos de “vão em quadra”, com duas guaritas [...] uma a revés da outra, alicerçado de pedra e cal, para cujo princípio se fez de ostras e pedra [...] barro e taipa de pilão de quatro palmos de largo, para o que mandou fazer oito “taipais” (MELLO; PERNAMBUCO, 1974).

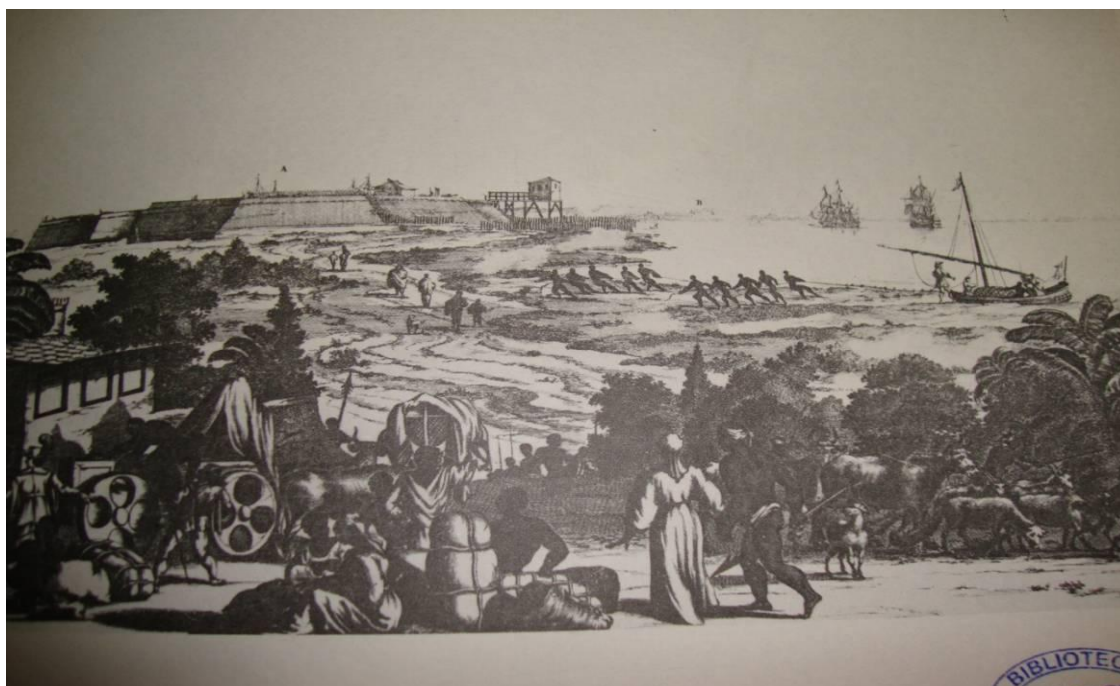


Figura 37 – Fortaleza de Santa Catarina: foto pitoresca da construção inicial em taipa de pilão, século XVI.

Fonte: Mello e Pernambuco (1974).



Figura 38 – Fortaleza de Santa Catarina: reconstrução com alvenaria de pedras, século XVII.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

Iniciada pelos colonizadores, em fins do século XVI, para cumprir funções protetoras, sobre extensa faixa de terra, constantemente atacada pelos índios e visada pelos estrangeiros que vinham pelo mar, ocupou uma posição destacável, tanto do ponto de vista tático quanto estratégico.

Foi construída no governo do capitão-mor Frutuoso Barbosa, sendo-lhe dado o nome de Santa Catarina, provável homenagem à Duquesa D. Catarina de Bragança, neta de D. Manoel I, que possuía grande prestígio junto aos portugueses e que significava a oportunidade de resgatar a independência perdida, em favor da Espanha.

Em 1587, a fortaleza resistiu heroicamente a uma forte ofensiva dos franceses, constituindo-se esta vitória em um dos marcos positivos do desenvolvimento da colônia, pois determinou novos rumos da conquista da Região Norte.

Em 1601, possuía a fortaleza o armamento de três peças de bronze e onze peças de ferro, com um capitão, um alferes, um sargento, um tambor, um Condestável, e vinte mosqueteiros (IPHAN – 3ª DIRETORIA REGIONAL).

Em breve descrição da capitania, em 1612, o forte de Santa Catarina tinha onze peças, dois camelos, quatro “falcões de dado pedreiro”, todos de bronze. As forças davam ao alardo trezentos arcabuzeiros e duas companhias e mais de trinta cavalos (MONTEIRO, 1972).

Felipe II, em carta de 18 de julho de 1617, recomenda, com brevidade, reformulação do forte da capitania da Paraíba, em face da precariedade da construção. No ano seguinte, em 6 de julho, o rei envia instruções e ordem de pagamento para a nova construção. É estabelecido o tributo de 3.000 cruzados aos oficiais da Câmara de Olinda para a complementação das despesas, o que resultou na exposição de Olinda, em 1618, transcrita em documento de autoria de Francisco Frias da Mesquita, engenheiro-mor do Estado do Brasil, nomeado por provisão régia de Lisboa, a 24 de janeiro de 1603.

Em 23 de novembro de 1618, com a vinda do Governador Geral D. Luís de Souza, a Paraíba foi escolhida para a reconstrução do forte, com nova planta, elaborada pelo Eng. Francisco Frias da Mesquita, em vista de a antiga estrutura estar condenada e inaproveitável. Foi feita a bênção, e a fortaleza deveria chamar-se de São Luís, em homenagem ao Governador Geral. Entretanto, esse nome jamais entrou em uso.

Com a ocupação holandesa na Paraíba, em 1634, o forte em poder dos batavos sofreu modificações importantes. O Governador Herckman (1639) disse: “[...] o rio Paraíba tem na entrada, sobre a margem meridional ou à mão esquerda, uma ponta chamada Cabedelo, onde existia no tempo do rei, um fortim com o nome de Santa Catarina, mas, depois da nossa conquista, fez-se dele um grande forte”.

As modificações são comprovadas, hoje, pela existência de centenas de tijolos holandeses da “Frísia”, amarelos, pequenos, extremamente resistentes e que se podem ver associados à alvenaria das paredes, em vários locais e como piso na abóboda do trânsito.

Barleus (1647) confirma tal ordem dizendo: “[...] fez Maurício restaurar o forte arruinado do Cabedelo ou Santa Catarina e guarnecê-lo com um fosso mais largo e mais fundo e por cima, com uma couraça”.

Em 1654, o forte de Cabedelo é abandonado pelo seu comandante, coronel Hautjin, quando foi assinado termo de rendição dos flamengos (23 de janeiro), sendo então restaurado no governo do domínio português. Depois do episódio da dominação holandesa, manifesta-se, da parte de Portugal, especial interesse na proteção da colônia, especialmente no Nordeste. Ocorreu o que se poderia chamar de febre de defesa. As construções militares sofrem modificações e é no último quartel do século XVII que se vê a taipa das construções ser substituída por pedra.

Em carta assinada em 25 de maio de 1666, pelo conde de Arcos, é descrita a situação em que se encontra o forte: “[...] se foi o forte de Cabedelo desfazendo e arruinado, e chegou a estado que as muralhas caíram por serem todas aquelas obras de taipa e faxina e as peças de artilharia estão todas no chão sem carretas” (apud MONTEIRO, 1972, p. 23).

[...] em 1680, o capitão mor da Paraíba Amaro Velho Cerqueira, comunicou ao rei, as dificuldades em que passava o reduto, e a necessidade de sua reconstrução, pelo que significa na defesa e segurança de toda aquela capitania. Porém, só em 1697 o rei ordena ao Governador de Pernambuco, através de missiva escrita em Lisboa, a 29 de agosto, dirigida ao capitão mor da Paraíba que, infalivelmente faça passar o engenheiro naquela capitania para desenhar o que se há de obrar na fortaleza do Cabedelo. (MONTEIRO, 1972, p. 44).

A planta do novo forte foi desenhada pelo sargento-mor, engenheiro Pedro Correia Rabello, e foi aprovada por cartas do rei de Portugal ao capitão-mor da Paraíba, Manoel Soares de Albergaria, em 21 de dezembro de 1698. O orçamento

com as despesas com alvenaria, o cordão na muralha e parte da contraescarpa, entretanto, só foram apresentados por Pedro Correia Rabello e Antônio Barbosa de Lima em 16 de junho de 1700. A “traça” dessa reforma do forte teve, mais tarde, algumas modificações introduzidas pelo capitão Engenheiro Luís Francisco Pimentel, da capitania de Pernambuco, nomeado para este cargo em 31 de janeiro de 1701.

Em 9 de janeiro de 1699, o capitão-mor da Paraíba escrevia ao rei, comunicando estar assistindo pessoalmente à execução das obras de levantamento dos alicerces, o que prova que a obra foi iniciada no fim do século XVII. A construção dessa nova fortaleza durou cerca de 40 anos.

A fortaleza de Santa Catarina, antes de terra, pouco a pouco vai sendo reconstruída, usando-se alvenarias de pedras. Pela documentação dessa época, revela-se a grande quantidade de pedras vindas do reino como lastros nos navios, sendo aplicadas na sua construção.

Em carta escrita ao rei, em 20 de agosto de 1708, Joaquim de Maya e Gama relata ter a fortaleza de Cabedelo um baluarte por construir e duas cortinas por terminar, em virtude da falta de dinheiro, especialmente de 7.000 cruzados, provenientes da Capitania de Pernambuco.

Quem executou os serviços na fortaleza foram, na maioria, índios assalariados que, em 1713, recebiam meio tostão por dia. A fortaleza de Santa Catarina, sem sombra de dúvida, só ficou acabada em meados do século XVIII. Entretanto, a falta de dinheiro para sua conservação não permitiu que ela se mantivesse no apogeu de sua força defensiva por muito tempo e, no século seguinte, já entra em decadência.

c) Convento do Almagre

As ruínas do que foi o conventinho da Igreja Nossa Senhora de Nazaré, na praia do Almagre (Figuras 39, 40 e 41), estão situadas a uns 300 m da beira-mar, no Pontal de Campinas, hoje, Praia do Poço. Esse trecho de costa, por suas características físicas, tem formação geológica do período helocênio, com dunas de areia e argila. Há, no meio da areia branca, manchas ou veios de areia ferruginosa, daí o nome do lugar – Almagre.



Figura 39 – Convento do Almagre: ruína da fachada Principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 40 – Convento do Almagre: ruína do arco cruzeiro



Figura 41 – Convento do Almagre: ruína da fachada oeste

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

A igreja tem a forma de um retângulo, medindo 26 m de comprimento por 12 m de largura. Sua altura mede aproximadamente uns 12 m. É isolada, rodeada de coqueiros, no meio de vegetação baixa.

A arquitetura da igreja é toda em cantaria de pedra calcária, formada por blocos de dimensões variadas, ligados por argamassa de cal e areia. A ação do tempo tem afetado bastante toda a construção, cujas paredes estão completamente desmoronadas, com blocos calcários desagregando-se e em começo de pulverização. A igreja tinha uma só nave formando o seu corpo. No fim da nave, existia um arco cruzeiro de cantaria lavrada, sustentado por duas pilastras de pedra, com arte decorativa em relevo.

A nave tinha, de um lado, três tribunas e outras duas do outro lado, bem como um púlpito, do qual só existe a base de pedra bem trabalhada. O espaço da capela-mor estava compreendido entre o arco e o altar e, atrás deste, ficava a sacristia. Vê-

se ainda, a base do altar-mor e os quatro degraus de pedra do supedâneo, que a ele conduziam, tendo desaparecido o trono.

Na capela-mor, existiam dois altares colaterais, duas portas dando para os corredores e, por cima destas, duas tribunas. É provável que o templo possa datar dos fins do século XVI, pois é sabido que os padres jesuítas chegaram em 1585. Coriolano de Medeiros, um dos mais dedicados estudiosos do passado paraibano, cita Dr. Maximiniano Lopes Machado, que, na sua admirável *História da Província da Paraíba* (1977), enumera e localiza as cinco aldeias fundadas pelos padres da companhia, e diz que a de Almagre, ou Almagra, está na enseada de Tambaú, meia légua ao norte da atual povoação deste nome, antiga aldeia da praia, onde, pouco mais ou menos, está a propriedade Ponta de Campinas, com as ruínas do antigo convento.

Cavalcanti (1914), referindo-se à chegada dos padres franciscanos à Capital, em 1589, escreve: “[...] os zelosos apóstolos logo iniciaram a sua ação, chamando aos seus cuidados as aldeias Tabajaras, Assento de pássaros, Almágra, praia, Joane e Mangue, até as quais não chegaram os trabalhos jesuítas”.

3.1 PATOLOGIAS EXISTENTES NAS OBRAS HISTÓRICAS

As patologias existentes nas obras históricas selecionadas, provocadas pela ação deletéria do tempo ou mesmo através do uso destrutivo dos imóveis, são praticamente as mesmas. Revelam, assim, que as intempéries agiram do mesmo modo em razão da mesma natureza físico-química das pedras que as compõem e do próprio microclima no qual estão inseridas. Trata-se de obras próximas ao mar, situando-se a Igreja da Guia numa cota mais elevada. A título de demonstração das patologias encontradas, colocamos fotos separadas nas páginas seguintes, por monumento, inclusive a localização geográfica de cada edifício.

a) Igreja da Guia, em Lucena-PB



Figura 42 – Localização geográfica da Igreja da Guia.
Fonte: Google earth (2013).



Figura 43 – Alteração cromática: parte inferior de uma janela superior da fachada.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 44 – Alveolização: base da parede, fachada sul



Figura 45 – Alveolização: portal da fachada posterior, à fachada principal

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 46 – Biofilme: fachada posterior à fachada principal, lado direito.



Figura 47– Biofilme: imposta do canto esquerdo da fachada principal

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 48 – Esfoliação: base da coluna do lado esquerdo da fachada principal



Figura 49 – Esfoliação: fachada sul, base da parede

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 50 – Perdas: parte superior do capitel da cercadura na fachada principal.



Figura 51 – Perdas: parte anterior da imposta do lado direito da fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 52 – Penetração de raízes: lado posterior direito à fachada principal.



Figura 53 – Penetração de raízes: lado posterior esquerdo à fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 54 – Dilapidação provocada por inscrições: fachada norte, base da parede.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 55 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada leste.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 56 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada oeste.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 57 – Expansão volumétrica diferenciada: imposta central da fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 58 – Recuperação com materiais inadequados: parte frontal da imposta central.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

b) Convento do Almagre, em Cabedelo-PB

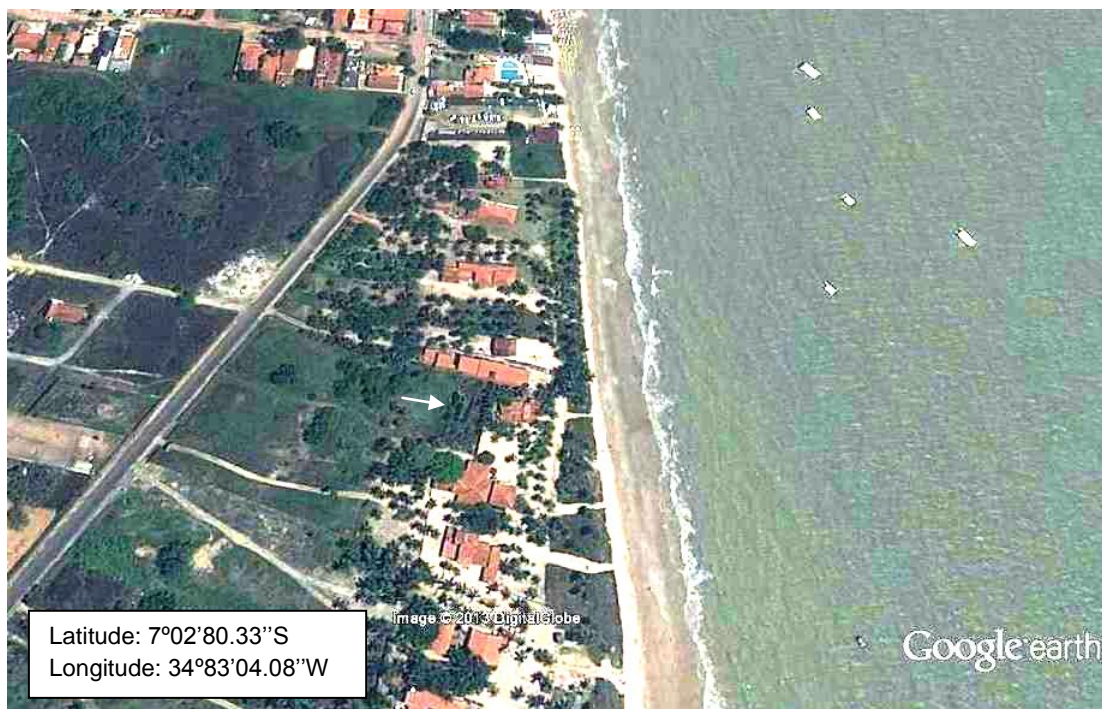


Figura 59 – Localização geográfica da Igreja do Almagre.
Fonte: Google earth (2013).



Figura 60 – Alteração cromática: fachada leste.



Figura 61 – Alteração cromática: pilar esquerdo do arco cruzeiro.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 62 – Alveolização: ruínas da parte posterior da construção.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 63 – Biofilme: arco cruzeiro.



Figura 64 – Biofilme: fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 65 – Degradação diferencial: portal superior da fachada principal.



Figura 66 – Degradação diferencial: portal de entrada da fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 67 – Desagregação: pilar da fachada oeste.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 68 – Perdas: imposta do lado direito da fachada principal.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 69 – Penetração de raízes: fachada oeste.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 70 – Desestabilização de alvenarias: base da parede da fachada oeste.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 71 – Recuperação com materiais inadequados: parede da fachada oeste.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

c) Fortaleza de Santa Catarina, em Cabedelo-PB



Figura 72 – Localização geográfica da Fortaleza de Santa Catarina.
Fonte: Google earth (2013).



Figura 73 – Alveolização: Cunhal da fachada leste.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 74 – Biofilme: cortina leste.



Figura 75 – Biofilme: encontro entre as Cortinas leste e norte.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

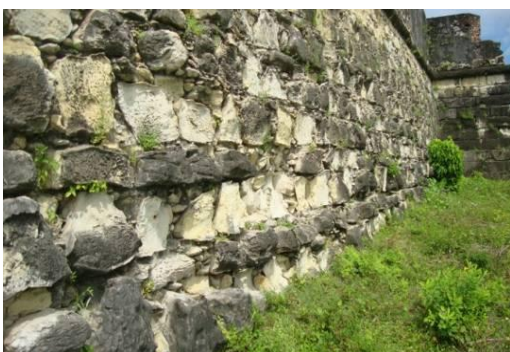


Figura 76 – Desagregação: cortina norte.



Figura 77 – Desagregação: cunhal da cortina norte.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 78 – Pitting: galeria de entrada da fortificação.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 79 – Penetração de raízes:
coroamento da cortina leste.



Figura 80 – Penetração de raízes:
base da cortina norte.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 81 – Desestabilização de
alvenarias: cortina norte.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura
(2011).



Figura 82 – Recuperação com materiais
inadequados: fissuras de retração do reparo.



Figura 83 – Recuperação com materiais
inadequados: descolamento do reparo.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os materiais e os métodos utilizados nesse trabalho, com o objetivo de obter-se um processo de recuperação das alvenarias calcárias, através de argamassas projetadas.

A cal, isoladamente, não poderia ser empregada como ligante, em função da baixa resistência das argamassas com ela elaboradas. Assim, conhecendo-se os resultados históricos da combinação de uma pozolana com a cal, com ótimas propriedades mecânicas, optou-se por utilizar o metacaulim (pozolana) em mistura com a cal e agregado miúdo (areia ou pó calcário), para formar um produto cimentício com propriedades capazes de reconstituir as partes danificadas do calcário da edificação.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Metacaulim

Neste trabalho, utilizou-se o metacaulim procedente da empresa mineradora UNIMIM SOUTH AMERICA, que produz dois tipos de pozolanas metacauliníticas: A e P. Além de algumas diferenças nas propriedades físicas e químicas, elas diferem na coloração. Foi escolhido, para este trabalho, o Metafort P, em função de apresentar menores teores de ferro, implicando, assim, maior pureza para a argamassa de teste. Os Quadros 5 e 6 apresentam algumas propriedades físicas e química, respectivamente.

Quadro 5 – Análise de tamanho de partícula e propriedades de dois tipos de metacaulim

Propriedades Físicas	Metafort A	Metafort P
Retenção em peneira ASTM # 200	1,0%	0,1%
Finura blaine	2.400 m ² /kg	1.800 m ² /kg
Massa específica	2.550 kg/m ³	2.550 kg/m ³
Massa aparente	350 kg/m ³	350 kg/m ³
Cor	Rosa	Branca
Índice de Atividade Pozolânica (mínimo)	1.100 mg Ca(OH) ₂ /g	1.100 mg Ca(OH) ₂ /g

Fonte: Unimim South América (2010).

Quadro 6 – Análise química de dois tipos de metacaulim – Valores médios. Não representam uma especificação

Compostos químicos e perda ao fogo	Metafort A (%)	Metafort P (%)
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	94	94
Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	4,81	0,41
Perda ao fogo (L.O.I)	< 2	<2

Fonte: Unimim South América (2010).

4.1.2 Cal

A cal utilizada neste trabalho foi a CH I da empresa CARBOMIL, cujas características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante constam no Quadro 7.

Quadro 7 – Características físicas e químicas da cal CH I

Características da Matéria-prima	Composição Química	
Estrutura microcristalina romboédrica Origem sedimentar Marinha Carbonato de cálcio Natural Cretáceo Densidade 2,7g/cm ³ Dureza Mohs de 3,0	PPC	23% a 25%
	Ca(OH) ₂	92,5% a 98,5%
	MgO	3,5% Máx
	RI (insolúvel em HCl)	0,5% Máx
	SiO ₂	0,3% Máx
	R ₂ O ₃	1,5% Máx
Características Físicas	Caracterização Granulométrica do Produto	
Retenção na malha 325mesh	D50	19,00
Umidade	D90	55,00
Densidade aparente		

Fonte: Carbomil (2011).

4.1.3 Agregados Miúdos de Calcário

Neste trabalho, usaram-se dois tipos de agregado miúdo oriundos do calcário: o pó calcário e a areia calcária. Esses materiais foram adquiridos de uma mineradora em João Pessoa, que os produz comercialmente.

a) Pó calcário: ensaios de massa unitária (Quadro 8), massa específica (Quadro 9) e composição granulométrica (Quadro 10). Análise feita no LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba).

Quadro 8 – Massa unitária do pó calcário

Conforme ABNT NBR NM 45				
Discriminação	1ª det.	2ª det.	3ª det.	Média
Massa do recipiente + amostra (kg)	12,52	12,59	12,59	
Massa do recipiente	4,75	4,75	4,75	
Massa da amostra (kg)	7,77	7,84	7,77	
Volume do recipiente (dm ³)	7,00	7,00	7,00	
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,11	1,12	1,12	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

Quadro 9 – Massa específica do pó calcário

Conforme ABNT NBR NM 52	
Amostra: Massa seca em estufa =	500g
Massa do recipiente + água destilada =	924,00g
Massa do recipiente + água destilada + amostra =	1.221,30g
Massa específica =	2,47g/cm ³

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

Quadro 10 – Granulometria do pó calcário

Conforme ABNT NBR NM 248			
Peneira (mm, μm)	Peso retido (g)	Percentagem retida %	Percentagem retida acumulada %
6,30	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	0,00	0,00	0,00
1,18	2,50	0,25	0,00
600	42,10	4,21	4,00
300	145,30	14,53	19,00
150	225,00	22,50	42,00
Resíduo	587,10	58,71	-
Total	1.000,00	100,00	-
Dmáx. Caract. (μm)		600	
Módulo de finura		0,65	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

A curva vermelha na Figura 84 representa a distribuição granulométrica do pó calcário. Vê-se que esta está fora das exigências da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como agregado miúdo para argamassas e concretos. As duas curvas azuis, uma à esquerda e outra à direita da curva do meio, representam os limites mínimos e máximos, respectivamente, de enquadramento granulométrico para dado agregado.

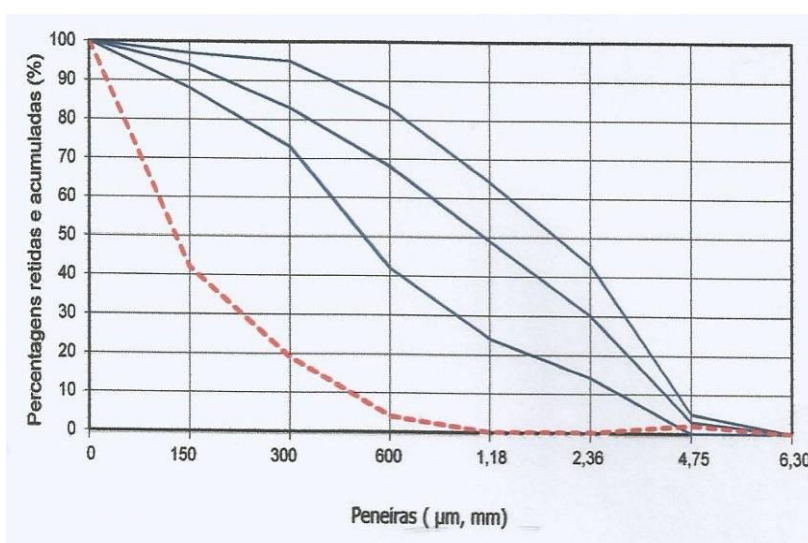


Figura 84 – Curva granulométrica do pó calcário.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

b) Areia calcária: ensaios de massa unitária (Quadro 11); massa específica (Quadro 12) e composição granulométrica (Quadro 13). Análise feita no LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba).

Quadro 11 – Massa unitária da areia calcária

Conforme ABNT NBR NM 45				
Discriminação	1ª det.	2ª det.	3ª det.	Média
Massa do recipiente + amostra (kg)	13,57	13,64	13,60	1,26
Massa do recipiente	4,75	4,75	4,75	
Massa da amostra (kg)	8,82	8,89	8,85	
Volume do recipiente (dm ³)	7,00	7,00	7,00	
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,26	1,27	1,26	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

Quadro 12 – Massa específica da areia calcária

Conforme ABNT NBR NM 52
Amostra: Massa seca em estufa = 500g
Massa do recipiente + água destilada = 924,00g
Massa do recipiente + água destilada + amostra = 1.223,10g
Massa específica = 2,49g/cm ³

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

Quadro 13 – Granulometria da areia calcária

ABNT NBR NM 248			
Peneira (mm, μ m)	Peso retido (g)	Percentagem retida %	Percentagem retida acumulada %
6,30	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	94,70	9,47	9,00
1,18	713,30	71,33	80,00
600	118,10	11,81	92,00
300	10,20	1,02	93,00
150	8,60	0,86	94,00
Resíduo	55,10	5,51	
Total	1000,00	100,00	
Dmáx. caract. (mm)		4,75	
Módulo de finura		3,68	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

A curva vermelha na Figura 85 representa a distribuição granulométrica da areia calcária. Vê-se grande parte desta inserida entre os limites inferior e superior (curvas azuis à esquerda e à direita da curva do meio), conforme exigências da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para agregado miúdo destinado à fabricação de argamassas e concretos.

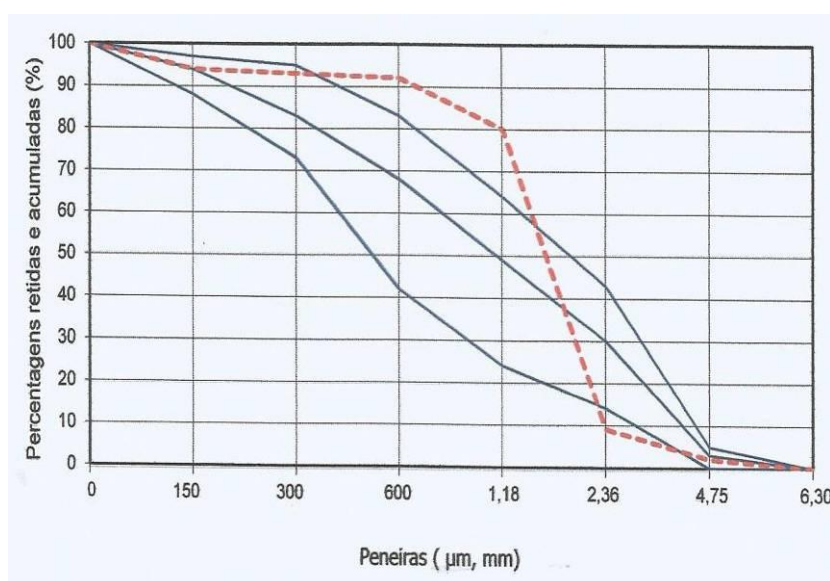


Figura 85 – Curva granulométrica da areia calcária.

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

4.1.4 Pedra Calcária

Foram extraídas com serra copo amostras de pedras calcárias de alvenarias desmoronadas dos monumentos. São amostras com 10 cm de diâmetro com uma área de $78,54 \text{ cm}^2$ e 16 cm de altura, para a verificação da resistência a compressão. Essas pedras foram transportadas para o LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba) como foi dito, e o procedimento de extração se deu conforme registro visto na Figura 86. Foram extraídas 02 (duas) amostras da Igreja da Guia, 03 (três) da Fortaleza de Santa Catarina e 03 (três) amostras da Igreja do Almagre.



Figura 86 – Extração de amostras de pedra calcária.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2010).

As amostras, depois de extraídas, tiveram as faces inferior e superior retificadas através de desgaste abrasivo (Figura 87).



Figura 87 – Retificação das faces de amostras de pedra
Fonte: Laboratório de ensaios de materiais e estruturas da UFPB (2010).

4.2 PROCESSOS METODOLÓGICOS DE MISTURA

A metodologia de mistura se espelhou na relação 1:2,5 entre a soma do peso do cimento (metacaulim+cal) com relação ao peso do agregado miúdo. Foram feitas misturas cujos traços variaram de 1:3,50 (traço 2), a 1:1,5 (traço 6), conforme a Tabela 1. Essa escolha se deu em função de o traço 1:2,5 com argamassa de cimento e areia ser muito utilizado em serviços de recuperação estrutural pelas boas condições técnicas de projeção. O traço 1 foi o único que não obedeceu ao critério, porque foi utilizado sem o agregado miúdo, com a finalidade de se analisar o impacto da mistura contra os anteparos. Os outros traços foram também experimentados, sendo observada a reologia (viscosidade, elasticidade e plasticidade) da pasta, tendo-se encontrado, no traço 4, 1:1:5:2,30 (cal: metacaulim: areia calcária: água), as melhores condições de projeção. Por essa razão, esse traço foi o escolhido para o avanço dos estudos.

Tabela 1 – Traços em massa ensaiados

TRAÇO	DATA DE MOLDAGEM	INGREDIENTES
1)	12/08/10	1: 1: 1 (CAL:METACAULIM :ÁGUA)
2)	30/08/10	1:1: 7: 2,60 (CAL:METACAULIM: AREIA CALCÁRIA :ÁGUA)
3)	11/10/10	1:1: 6: 2,45 (CAL:METACAULIM: AREIA CALCÁRIA :ÁGUA)
4)	20/11/10	1:1: 5: 2,30 (CAL:METACAULIM: AREIA CALCÁRIA :ÁGUA)
5)	03/01/11	1:1: 4: 1,85 (CAL:METACAULIM: AREIA CALCÁRIA :ÁGUA)
6)	10/02/11	1:1: 3: 1,60 (CAL:METACAULIM: AREIA CALCÁRIA :ÁGUA)

Fonte – Paulo Germano Toscano Moura (2010).

Os testes de campo consistiram em verificar, entre os traços apresentados na Tabela 1, quais os que melhor poderiam ser aplicados na técnica por projeção Via Seca. Para isso, foram experimentados com a utilização de equipamento de projeção Via Seca (Figura 88) e os seguintes equipamentos complementares:

- Compressor portátil a diesel, com capacidade de 360 ft³/min.
- Máquina de projeção Via Seca para 3,0 m³/h.

- Bomba hidráulica tipo “sapo” de 65 metros de coluna d’ água.
- Betoneira elétrica para 320 l.



Figura 88 – Equipamento de projeção.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

Para a realização dos ensaios de projeção, foram necessárias as seguintes providências:

- a) Construção de três painéis de parede, em pedra calcária.
- b) Limpeza das superfícies das pedras.
- c) Confecção de 06 (seis) moldes em madeira para a obtenção das amostras para ensaio de compressão.
- d) Preparação dos materiais na betoneira, traço: 1: 1: 5: 2,30 (cal:metacaulim:areia calcária:água).
- e) Ajuste das variáveis de projeção: pressão do jato, vazão e consistência da mistura (*flowtable*).
- f) Moldagem de placas.
- g) Controle da consistência da argamassa projetada.
- h) Extração dos corpos de prova para ensaio da resistência a compressão.
- i) Projeção do material sobre as paredes construídas.
- j) Ensaios de Aderência (*Pull-off*).
- k) Caracterização das argamassas.

a) Construção de três painéis de parede em pedra calcária

Como forma de simular as paredes dos monumentos, em alvenaria de pedra calcária, foram construídos três painéis, em junho de 2011, tomando como argamassa uma composição de saibro, cal e areia. Essas paredes ficaram com dimensões aproximadas de 1,5 m de altura x 1,20 m de largura x 0,50m de espessura (Figura 89).



Figura 89 – Painéis de paredes em pedra calcária para testes.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

b) Limpeza das superfícies das pedras

As pedras calcárias adquiriram ao longo dos anos, pela exposição ao ambiente úmido no local de construção, uma concentração alta de microrganismos. Foi necessário removê-los com escova de fibra. Como a superfície das pedras tem muitas reentrâncias, a limpeza não atingiu 100%. O processo foi executado com fricção e lavagem com água (Figura 90), e a limpeza deu-se após 45 (quarenta e cinco dias) da construção dos painéis.



Figura 90 – Limpeza das pedras para aplicação da argamassa projetada.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

c) Confecção de 06 (seis) moldes, em madeira, para a obtenção de amostras para ensaio de compressão.

A norma *NBR 13070*: Moldagem de placas para ensaios de argamassa e concreto projetado (ABNT, 1994) exige que os moldes sejam confeccionados obedecendo as especificações conforme a do Quadro 14. Na Figura 91, veem-se três moldes construídos com chapa de madeira.



Figura 91 – Moldes para jateamento e extração de corpos de prova.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

Quadro 14 – Moldes para extração de corpos de prova de argamassas e concretos projetados

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	DIMENSIONAMENTO
Inclinação das abas em relação à horizontal (ângulo externo do molde)	$\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$
Dimensão do lado quadrado do fundo	$d = (40 \pm 2) \text{ cm}$
Profundidade do molde	$h = (16 \pm 1) \text{ cm}$

Fonte: ABNT (1994).

d) Preparação dos materiais na betoneira

Foi utilizada uma betoneira de 320 litros, e os materiais acondicionados, secos previamente, necessitaram de uma leve umidificação. Essa operação foi necessária para diminuir a perda de material na passagem do bico projetor por excesso de poeira. O traço utilizado foi em peso com as seguintes proporções: 1:1:5:2,30 (cal: metacaulim: areia calcária: água), e, na betoneira, 18 kg: 18 kg: 90 kg: 41,40 kg. Esse traço foi controlado no processo de projeção através da consistência (*flowtable*), em torno de 22 cm.

e) Ajuste das variáveis de projeção: pressão do jato, vazão e consistência da mistura (*flowtable*)

Antes da moldagem das placas, foram feitos vários testes com a mistura para otimizar as condições de projeção: pressão do compressor, vazão dos materiais, vazão de água no bico com vistas à obtenção da consistência de laboratório (*flowtable*), em torno de 22 cm.

f) Moldagem de placas

Os moldes foram confeccionados com chapa de madeira compensada de 18 mm. Antes da moldagem, elas foram umedecidas. Os testes de projeção são apresentados na Figura 92.



Figura 92 – Moldagem de placas.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

g) Controle da consistência da argamassa projetada

Após os moldes serem hidratados e firmemente presos, foi feito o jateamento nas condições anteriormente descritas. Foram preenchidos 06 (seis) moldes e, durante o processo de jateamento, recolhidas dos moldes amostras da argamassa jateada para a medida da consistência. Os resultados da consistência medida em mesa “*flowtable*” encontram-se no Quadro 15.

Quadro 15 – Preparação das amostras

AMOSTRAS	CONSISTÊNCIA <i>flowtable</i>	MÉDIA
1	23,1 cm	22,27 cm
2	22,5 cm	
3	21,8 cm	
4	22,0 cm	
5	23,2 cm	
6	21,0 cm	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

h) Extração dos corpos de prova para ensaios de resistência à compressão

De cada corpo de prova trapezoidal, foram extraídas 03 (três) amostras através de equipamento rotativo com serra copo de diamantes, perfazendo um total de 18 (dezoito) corpos de prova, conforme modelo mostrado nas Figuras 93 e 94.



Figura 93 – Extração de corpos de prova. Figura 94 – Corpos de prova extraídos.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

i) Projeção do material sobre as paredes construídas

Após a realização de todas as etapas de preparação, foi efetuado o jateamento sobre as paredes – Figuras 95 e 96 –, no que se confirmou, para o traço testado, baixa reflexão do material e produção de pouca poeira.



Figura 95 – Jateamento sobre a parede. Figura 96 – Parede jateada.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

j) Ensaios de aderência (*Pull-off*)

Além das paredes, foram selecionadas pedras soltas, que foram jateadas para os ensaios de aderência (Figuras 97, 98 e 99).



Figura 97 – Pedras para teste de aderência Figura 98 – Pedras jateadas.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).



Figura 99 – Preparação de pedras para a realização do teste de aderência (*Pull-off*).

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

A resistência de aderência à tração foi obtida utilizando-se um aparelho conhecido por aderímetro. Foi feito o teste em 10 (dez) amostras, conforme a disposição abaixo (Figura 100).



Figura 100 – Ensaio de arrancamento ou de *Pull-off*.
Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

k) Caracterização das argamassas

As argamassas projetadas foram caracterizadas através da determinação de índices físicos, sendo também feitos ensaios microestruturais de difração de raios X (DRX) e de termogravimetria, cujos resultados encontram-se no Capítulo 5.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 EXPERIMENTAÇÕES DAS ARGAMASSAS TESTADAS EM LABORATÓRIO

5.1.1 Resultados da Resistência à Compressão

A Tabela 2 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas testadas no LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade Federal da Paraíba). Utilizou-se mistura de cal, metacaulim, areia calcária e água, em diversas proporções, com a finalidade de se encontrar a argamassa mais adequada que atendesse às condições de projeção e, ao mesmo tempo, oferecesse resistência mecânica compatível com as das pedras calcárias. Os corpos de prova foram moldados em cilindros metálicos de 10 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, perfazendo um total de 36 amostras, sendo 18 delas rompidas aos 07 (sete) dias e a outra metade aos 28 (vinte e oito) dias. Os traços ensaiados foram todos em massa.

Tabela 2 – Resistência à compressão das argamassas testadas em laboratório

DATA DE MOLDAGEM	TRAÇO	INGREDIENTES	RESISTÊNCIAS	
			7 DIAS (MPa)	28 DIAS (MPa)
12/08/10	1	1:1:1 (CAL:METACAILIM:ÁGUA)	$\sigma_1=3,30$	$\sigma_4=8,66$
			$\sigma_2=3,90$	$\sigma_5=7,64$
			$\sigma_3=3,75$	$\sigma_6=8,00$
		CAL:METACAILIM:AREIA CALCÁRIA:ÁGUA		
30/08/10	2	1:1:7:2,60 (CAL:METACAILIM:AREIA CALCÁRIA:ÁGUA)	$\sigma_1=5,73$	$\sigma_4=8,30$
			$\sigma_2=7,75$	$\sigma_5=8,40$
			$\sigma_3=5,80$	$\sigma_6=8,55$

11/10/10	3	1:1:6:2,45 (CAL:METACULIM:AREIA CALCÁRIA: ÁGUA)	$\sigma_1=7,38$ $\sigma_2=8,15$ $\sigma_3=7,66$	$\sigma_4=9,08$ $\sigma_5=10,07$ $\sigma_6=10,67$
20/11/10	4	1:1:5,0:2,30 (CAL:METACULIM:AREIA CALCÁRIA: ÁGUA)	$\sigma_1=14,51$ $\sigma_2=12,73$ $\sigma_3=13,17$	$\sigma_4=12,99$ $\sigma_5=17,82$ $\sigma_6=16,55$
03/01/11	5	1:1:4,0:1,85 (CAL:METACULIM:AREIA CALCÁRIA: ÁGUA)	$\sigma_1=14,90$ $\sigma_2=13,24$ $\sigma_3=12,68$	$\sigma_4=15,80$ $\sigma_5=17,05$ $\sigma_6=15,76$
10/02/11	6	1:1:3,0:1,60 (CAL:METACULIM:AREIA CALCÁRIA: ÁGUA)	$\sigma_1=13,74$ $\sigma_2=15,10$ $\sigma_3=14,89$	$\sigma_4=15,90$ $\sigma_5=18,40$ $\sigma_6=16,20$

Fonte: LABEME – Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas, UFPB (2010/2011).

5.1.2 Particularidades dos Traços Testados em Laboratório

O traço nº 1 (Tabela 2), composto de partes iguais de cal e metacaulim, revelou alta coesão na moldagem, e, por isso, o material ficou grudado ao soquete, impedindo uma boa compactação dentro do cilindro. Isso provocou vazios no interior do corpo de prova. Além do mais, esse traço foi testado em campo através do equipamento de projeção e mostrou-se impraticável pela grande quantidade de poeira produzida, precariedade na absorção da água fornecida no bico projetor e ausência de impacto.

Nos traços 2, 3, 4, 5 e 6, em ordem decrescente no consumo do agregado miúdo (areia calcária), nota-se o aumento das resistências em função de a quantidade de (cal e metacaulim) ser crescente e, também, pela diminuição da quantidade água.

O traço 4 apresentou o valor médio para a resistência aos 28 dias de 15,79 MPa, valor este próximo de 17,38 MPa, obtido para as pedras calcárias.

Os traços 5 e 6 apresentaram, para as resistências aos 28 dias, valores ligeiramente superiores ao traço nº 4. Os valores médios respectivos foram 16,19 MPa, e 16,83 MPa. Embora esses valores estejam muito próximos da resistência da pedra calcária, não foram escolhidos por conta da formação granulosa na mistura, que dificultou o processo de projeção.

Em função dos resultados comentados acima e das boas condições de projeção apresentadas, o traço 4, (1:1:5:2,30) foi o escolhido para os testes objeto deste estudo, ou seja, para utilizá-lo no processo de projeção Via Seca. A consistência *Flowtable* média para esse traço foi de 22,27 cm.

5.1.3 Percentuais de Incremento entre as Resistências Medidas aos 7 (sete) e 28 (vinte e oito) Dias das Argamassas Experimentadas em Laboratório

Na Tabela 3, estão registrados, na coluna “incremento”, os ganhos percentuais de resistência, quando são comparados os valores dos 07 (sete) com os de 28 (dias) de idade. São vistos, também, aumentos de resistências para as mesmas idades na sequência dos traços, 2, 3, 4, 5 e 6. O traço 1 apresentou um acréscimo expressivo de resistência, bem como o maior incremento.

Tabela 3 – Percentuais de incremento, entre 07 e 28, dias para as argamassas experimentadas

TRAÇOS	VALORES MÉDIOS (MPa)		INCREMENTO (%)
	07(dias)	28 (dias)	
1	3,65	8,10	122,92
2	6,26	8,42	34,50
3	7,73	9,94	28,58
4	13,47	15,78	17,15
5	13,61	17,35	27,48
6	14,57	16,83	15,51

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2001).

5.1.4 Índices Físicos da Argamassa Projetada e Endurecida, no Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária:água)

Conforme a Tabela 4, foram ensaiadas 10 (dez) amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro. Têm-se a massa unitária e a absorção de água da argamassa projetada no traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária:água). Os valores da massa unitária, com exceção da CP-4 e CP-8, têm valores entre 1,6 g/cm³ e 2,0 g/cm³.

Tabela 4 – Índices físicos da argamassa projetada no traço 1:1:5:2,30 (cal: metacaulim:areia calcária:água)

c.p Nº	Dimensões (mm)		Massa natural (g)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Volume (cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Absorção d' água %
	Ø	h						
1	100	160	2.258,30	2.202,70	2.522,30	1.350,20	1,63	14,40
2	100	153	2.019,90	1.958,20	2.226,90	1.201,00	1,63	13,70
3	100	152	1.964,50	1.914,60	2.201,60	1.193,20	1,60	14,90
4	100	160	2.002,60	1.947,50	2.294,60	1.256,00	1,55	17,80
5	100	149	1.925,40	1.874,40	2.157,80	1.169,60	1,60	15,10
6	100	148	1.945,30	1.893,40	2.142,60	1.161,80	1,63	13,10
7	100	130	1.772,20	1.731,70	1.939,40	1.020,50	1,69	12,00
8	100	156	1.990,40	1.930,00	2.235,30	1.224,60	1,58	15,80
9	100	134	1.795,80	1.754,10	1.999,90	1.051,90	1,67	13,70
10	100	140	1.955,10	1.908,90	2.132,80	1.099,00	1,73	11,70

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

5.1.5 Resistência à Compressão da Argamassa Projetada: Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária; água)

A Tabela 5 apresenta as resistências medidas de amostras (testemunhos) extraídas dos moldes trapezoidais da argamassa projetada. De cada corpo de prova, foram extraídas 03 (três) amostras, totalizando 18 (dezoito) unidades. O procedimento de extração foi através de serra copo.

Tabela 5 – Valores das resistências obtidas para a argamassa projetada: traço 1:1:5:2,30 (cal: metacaulim:areia calcária;água)

EXTRAÇÃO DE MOLDES TRAPEZOIDAIS	Nº DOS CORPOS DE PROVA	CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS ($\varnothing = 10$ cm, h =16 cm)
		RESISTÊNCIA À COPRESSÃO AOS 28 DIAS
A	1	9,0
	2	12,3
	3	15,0
B	4	10,4
	5	14,5
	6	9,3
C	7	12,8
	8	10,3
	9	8,5
D	10	13,3
	11	9,4
	12	14,8
E	13	8,3
	14	9,3
	15	13,7
F	16	9,3
	17	14,0
	18	15,2

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

5.1.6 Análise Estatística dos Valores das Resistências à Compressão da Argamassa Projetada: Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água)

Obtidos os 18 (dezoito) resultados de resistência, indicados na Tabela 5, foi feita análise estatística para se verificar a validade de cada amostra conforme a Tabela 6. O desvio padrão do universo amostral foi de 2,47 MPa e a média aritmética de 11,66 MPa. Na coluna observação, foram anotados os valores que estão fora ou dentro do intervalo de confiabilidade ($média - \sigma \leq X_n \leq média + \sigma$). Vê-se que houve rejeição de 07 (sete) amostras. A nova média calculada para os valores válidos foi de 11,33 MPa.

Tabela 6 – Análise estatística dos valores das resistências obtidas para a argamassa projetada: traço 1:1:5:2,30

AMOSTRAS	RESISTÊNCIA	X-MÉDIA	(X-MÉDIA) ²	OBSERVAÇÃO
1	9,0	-2,66	7,07	FORA
2	12,3	0,64	0,41	DENTRO
3	15,0	3,24	10,50	FORA
4	10,4	-1,66	2,75	DENTRO
5	14,5	2,84	8,06	FORA
6	9,3	-2,36	5,60	DENTRO
7	12,8	1,14	1,30	DENTRO
8	10,3	-1,36	1,85	DENTRO
9	8,5	-3,16	9,98	FORA
10	13,3	1,64	2,69	DENTRO
11	9,4	-2,26	5,11	DENTRO
12	14,8	3,14	9,86	FORA
13	8,3	-3,36	11,29	FORA
14	9,3	-2,36	5,60	DENTRO
15	13,7	2,04	4,16	DENTRO
16	9,3	-2,36	5,60	DENTRO
17	14,0	2,34	5,47	DENTRO
18	15,2	3,54	12,53	FORA
TOTAL			109,83	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

5.1.7 Ensaios de Aderência (*Pull-off*) da Argamassa Projetada no Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água)

As resistências de aderência à tração nas 10 (dez) amostras, medidas com instrumento portátil (aderímetro), indicados na Tabela 7, variaram de 0,17 MPa a 0,38 MPa. A *NBR 13.528* mostra que, para uso externo, os valores deverão ser $R_a \geq 0,30$ MPa. Analisando, então, a Tabela 7, nota-se que apenas 40% dos resultados atenderam à norma. No processo de limpeza das superfícies das pedras, não se atingiu a totalidade da área, em função de incrustações biológicas mais resistentes nas cavidades mais profundas e, assim, atribui-se a esse fato a razão para os resultados obtidos.

Tabela 7 – Valores das tensões de arrancamento

AMOSTRAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tensão de arrancamento R_a (MPa)	0,23	0,35	0,38	0,17	0,28	0,22	0,31	0,30	0,25	0,20

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

5.1.8 Análise Estatística das Tensões de Aderência (*Pull-off*) entre a Argamassa Projetada no Traço 1:1:5:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água) e a pedra calcária

Na Tabela 8, apresenta-se a análise estatística das 10 (dez) amostras constantes da Tabela 7. O desvio padrão do universo amostral foi 0,06 MPa, e a média aritmética de 0,27 MPa. Na coluna, observação, foram anotados os valores que estão fora ou dentro do intervalo de confiabilidade ($média - \sigma \leq X_n \leq média + \sigma$). Vê-se que houve rejeição de 04 (quatro) amostras. A nova média calculada para os valores válidos foi de 0,265 MPa.

Tabela 8 – Análise estatística das tensões de aderência (*Pull-off*)

AMOSTRAS	TENSÃO DE ARRANCAMENTO (R_a)	X-MÉDIA	(X-MÉDIA) ²	OBSERVAÇÃO
1	0,23	-0,04	0,0016	DENTRO
2	0,35	0,08	0,0064	FORA
3	0,38	0,11	0,012	FORA
4	0,17	-0,10	0,01	FORA
5	0,28	0,01	0,0001	DENTRO
6	0,22	-0,05	0,0025	DENTRO
7	0,31	0,04	0,0016	DENTRO
8	0,30	0,03	0,0009	DENTRO
9	0,25	-0,02	0,0004	DENTRO
10	0,20	-0,07	0,0049	FORA
TOTAL	2,69		0,0404	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2011).

5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA ARGAMASSA DE TESTE NO TRAÇO 1:1:5:2,30

5.2.1 Detecção de Fases Cristalinas por Difração de Raios X

A Tabela 9 sumariza as fases cristalinas encontradas nas amostras de argamassas à base de cal:metacaulim: areia calcária, nas diferentes condições de moldagem e aplicações do presente estudo.

Tabela 9 – Sumário de fases nas amostras contendo argamassas à base de Cal:
Metacaulim: Calcário

**SUMÁRIO DE FASES NAS AMOSTRAS CONTENDO ARGAMASSAS À BASE DE CAL:
METACAULIM: CALCÁRIO**

AMOSTRA	CONVENÇÃO	POSIÇÃO	FASES CRISTALINAS					
			CaCO ₃	Ca (Fe ⁺² , Mg) (C O ₃) ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₁₀ O ₁₅ x H ₂ O
			Calcita	Ankerita	Vaterita	Alumina	Quartz	Hidr. de Alumínio
Argamassa moldada em laboratório	AZUL	Fundo	*****	*	*	*		
		Meio	*****	*	*			
		Topo	*****	*	*			
Argamassa moldada aplicada por jateamento “ <i>in situ</i> ”	VERDE	Fundo	*****	*			*	
		Meio	*****	*		*		*
		Topo	*****	*	*		*	
Argamassa jateada no campo e extraída após endurecimento	VERMELHO	Meio	*****	*			*	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

As Figuras 101 e 102 representam os difratogramas obtidos para a argamassa de teste nas seguintes condições: amostras de argamassas moldadas em laboratório, aplicadas *in situ* e curadas no campo, jateadas no campo e extraídas de moldes trapezoidais nas mesmas condições de cura da anterior.

Observa-se que os compostos cristalinos, ankerita, vaterita e hidróxido de alumínio, aparecem constantemente em quase todos os gráficos. Os asteriscos representam a ocorrência semiquantitativa, baseada, puramente, nas intensidades relativas dos picos de difração, enquanto as áreas cinza representam as fases

cristalinas oriundas de processos de reação química, uma vez que esses compostos não foram adicionados nas argamassas antes do endurecimento.

Destaque se dá aos carbonatos de cálcio (ankerita e vaterita), os quais evidenciam a recristalização de estruturas carbonáticas durante o processo de endurecimento das argamassas. Esse mecanismo ocorre por dissolução e precipitação dos carbonatos, principalmente na presença de CO_2 atmosférico, o que pode sugerir uma formação acelerada desses minerais, no processo de endurecimento, uma vez que a fase cristalina mais estável seria a calcita.

É possível também destacar a ocorrência de hidróxido de alumínio na argamassa moldada e aplicada por jateamento *in situ*, podendo indicar algum tipo de reação com os aluminatos da metacaulinita e os outros compostos solúveis da mistura de base.

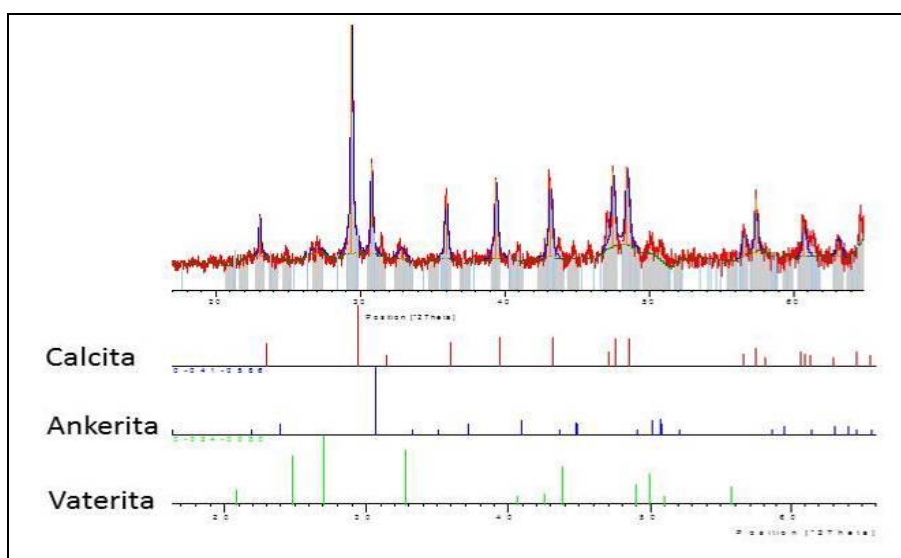


Figura 101 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do topo do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-1 (2013).

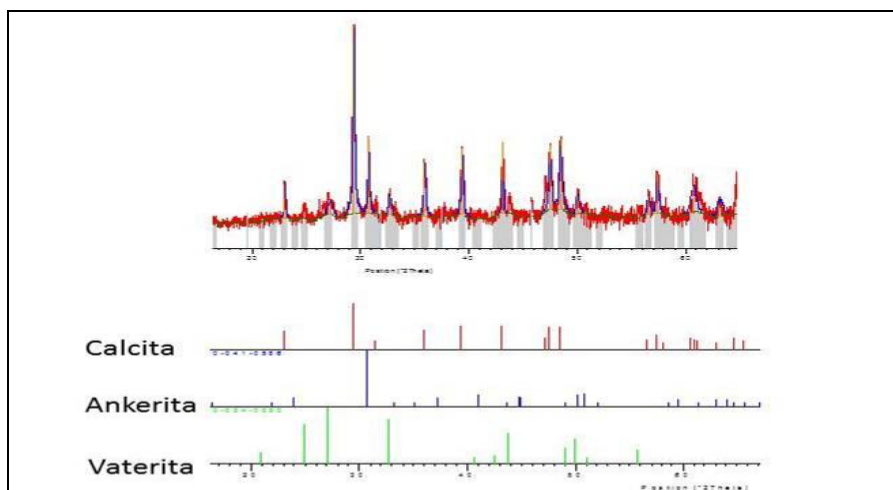


Figura 102 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do meio do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-1 (2013).

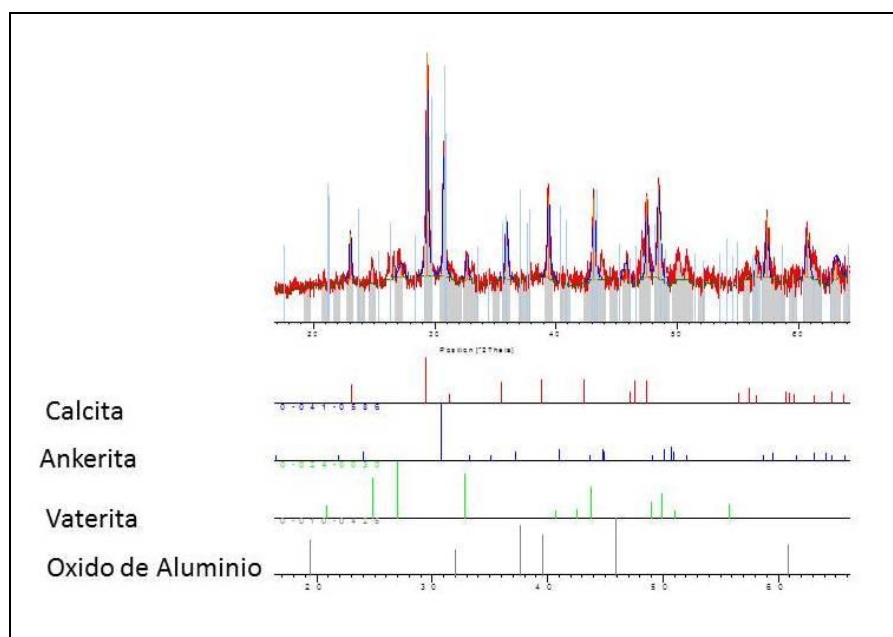


Figura 103 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa moldada em laboratório retirada do fundo do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-1 (2013).

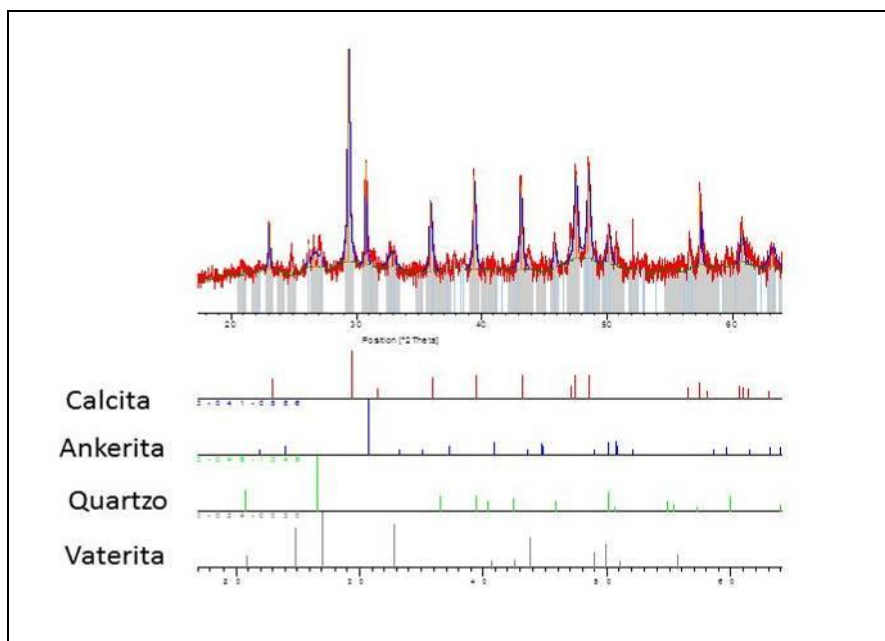


Figura 104 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do topo do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-2 (2013).

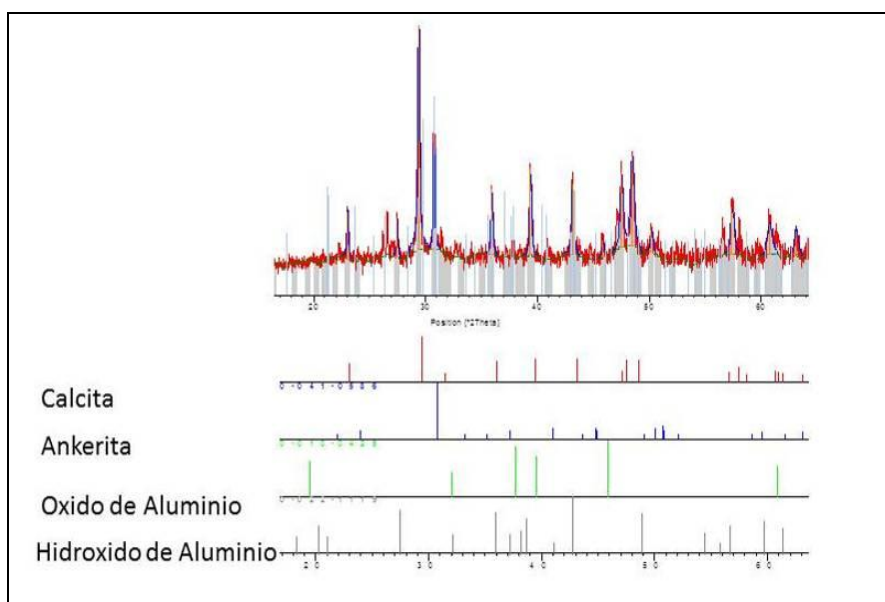


Figura 105 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do meio do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-2 (2013).

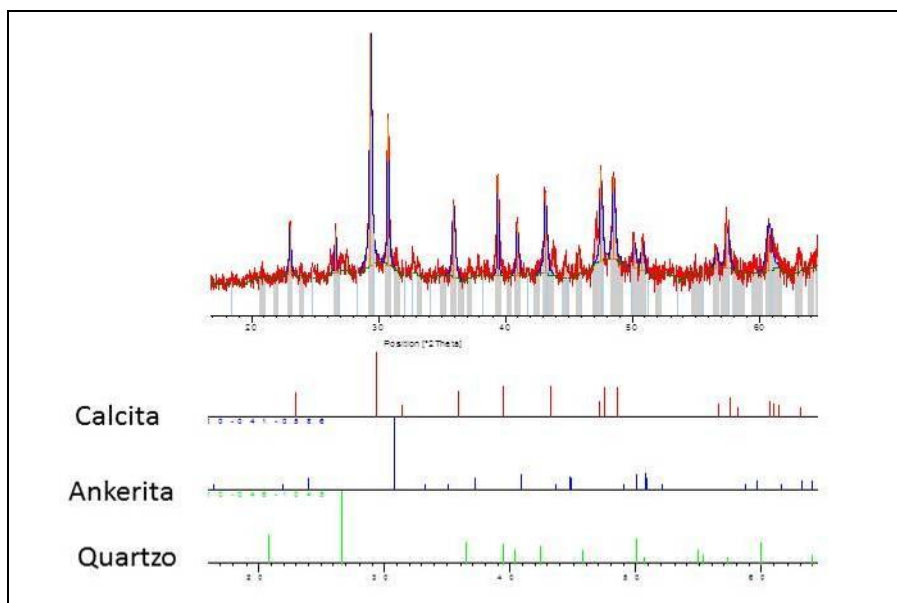


Figura 106 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa aplicada por jateamento e retirada do fundo do corpo de prova.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-2 (2013).

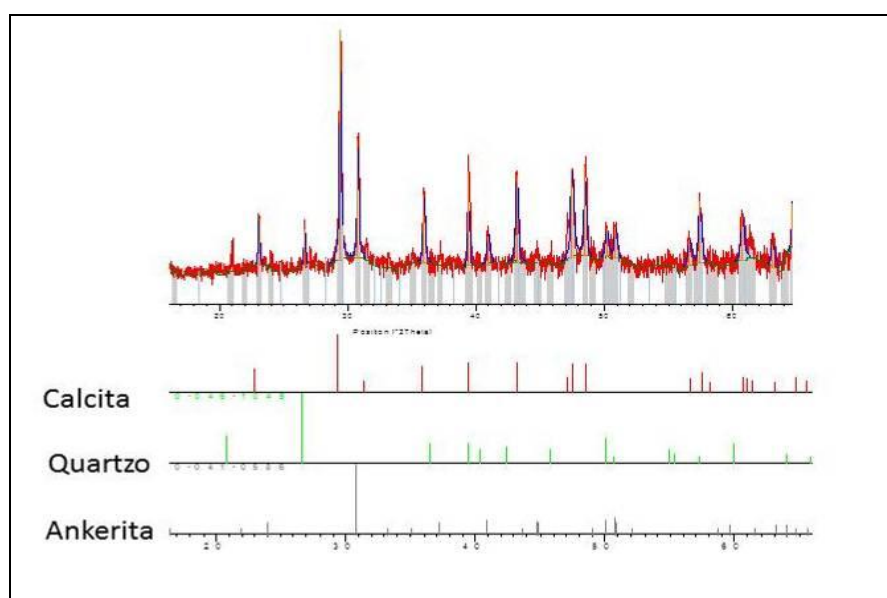


Figura 107 – Padrão de Difração de Raios-X de uma amostra de argamassa jateada no campo e extraída após endurecimento.

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, CP-3 (2013).

No tocante à formação de estruturas cristalinas, há grande incidência de fases carbonáticas, resultando na grande intensidade dos seus picos relativos. A formação de fases de cálcio ou carboalumináticas hidratadas é esperada quando a reação

pozolânica acontece de uma pozolana do tipo metacaulim com a cal. No entanto, suas ausências são aparentemente contraditórias, haja vista a propensão da formação de aluminatos hidratados oriundos da reação pozolânica com a metacaulinita. Porém, pôde-se constatar que essa formação de estruturas carboalumináticas, ou à base cálcioaluminatos hidratados cristalinos, não pôde ser detectada, exceto na amostra moldada e aplicada por jateamento *in situ*. A inabilidade de se detectar sinais evidentes dessas fases pode ser atribuída: (i) caso estas sejam cristalinas, à pouca ocorrência dessas fases nas amostras, o que provocaria a existência de sinais indetectáveis por estarem abaixo da região do ruído de fundo nesta técnica; (ii) a não terem sido formadas, ou (iii) ao fato de estas estruturas terem ocorrido de forma amorfa, cujo sinal seria difuso na técnica de Difração de Raios-X, por definição.

5.2.2 Detecção de Fases Hidratadas e Carbonáticas por Termogravimetria

A Tabela 10 sumariza as perdas de massa percentual encontradas nas amostras de argamassas à base de Cal: Metacaulim: areia calcária, nas diferentes condições de moldagem e aplicações do presente estudo.

Tabela 10 – Sumário da perda de massa percentual nas amostras de argamassas à base de Cal: Metacaulim: Areia Calcária: Água

AMOSTRA	Água Livre	Água Combinada	Portlandita	Fases Carbonáticas
Argamassa moldada em laboratório	6.5%	8.4%	1.6%	83.4%
	8.3%	10.3%	1.6%	79.7%
	5.7%	10.6%	1.8%	81.8%
Argamassa Moldada aplicada por jateamento <i>in situ</i>	8.1%	8.8%	1.4%	81.8%
	5.8%	11.3%	1.7%	81.2%
	9.1%	12.1%	1.7%	77.0%
Argamassa moldada no campo e extraída após endurecimento de moldes trapezoidais	10.0%	7.6%	1.3%	81.1%

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

As Figuras 108 e 109 mostram as curvas termogravimétricas, das quais, foram extraídas as perdas de massa percentuais sumarizadas na Tabela 10. Nelas, veem-se as três condições de moldagens: amostras de argamassas moldadas em

laboratório, aplicadas *in situ* e curadas no campo, jateadas no campo e extraídas de moldes trapezoidais nas mesmas condições de cura da anterior.

As principais ocorrências de perda de massa são oriundas da descarbonatação das fases carbonáticas, em torno de 80% do total perdido. Dessas fases, apenas os carbonatos e a portlandita são cristalinas, justificando o padrão difratométrico observado na seção anterior, e de acordo com as seguintes considerações:

- As fases oriundas de processos de reação química podem também ser amorfas, portanto indetectáveis por difração de raios-x;
- Pode-se atribuir que a água combinada representa o teor de fases que têm potencial de promover ganho de resistência às argamassas estudadas.

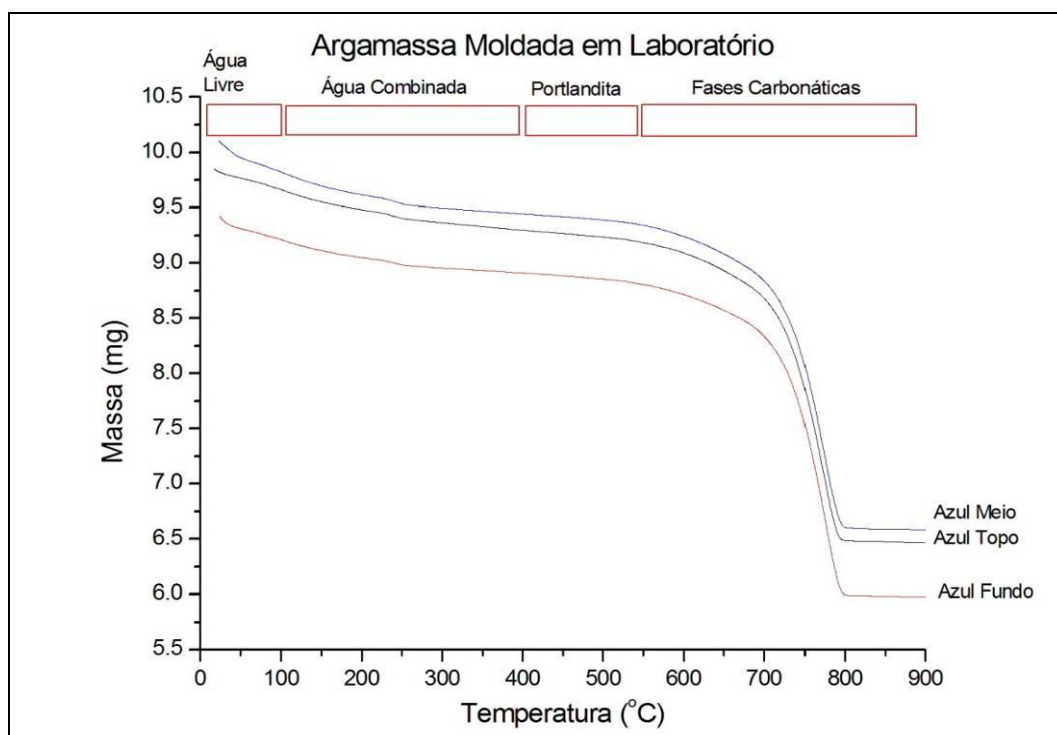


Figura 108 – Curva termogravimétrica de amostras de argamassas moldadas em laboratório aos 28 dias

Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB (2013).

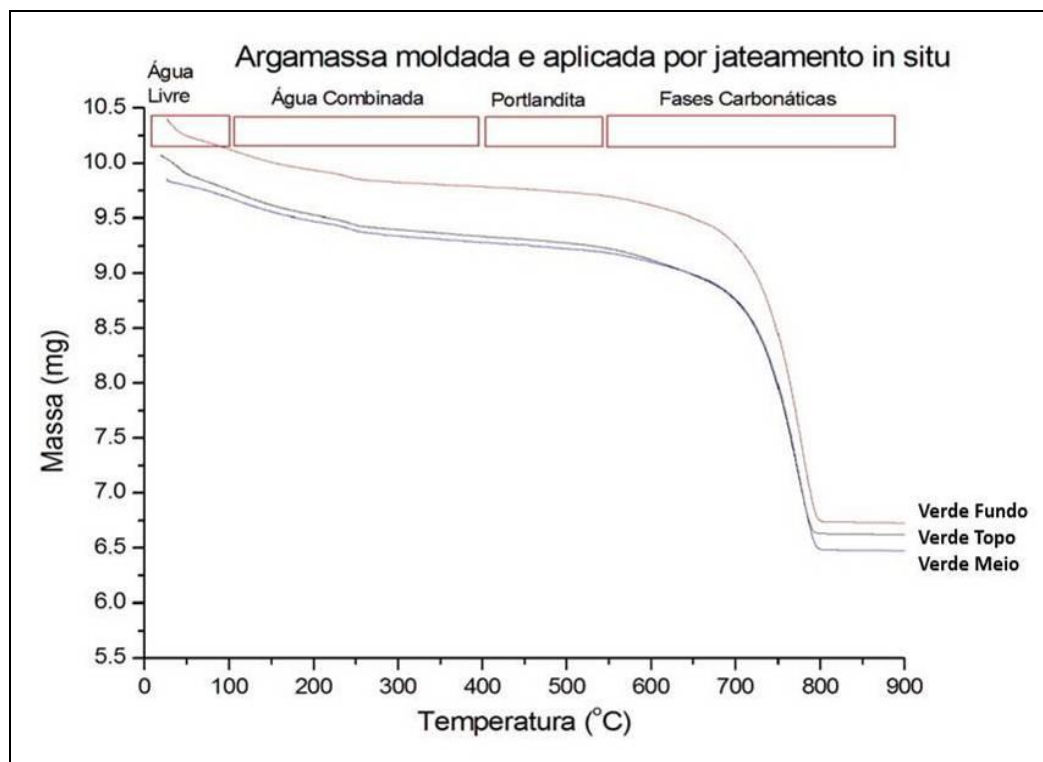


Figura 109 – Curva termogravimétrica de amostras de argamassas moldadas e aplicadas *in situ* curadas em campo aos 28 dias.
Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB (2013).

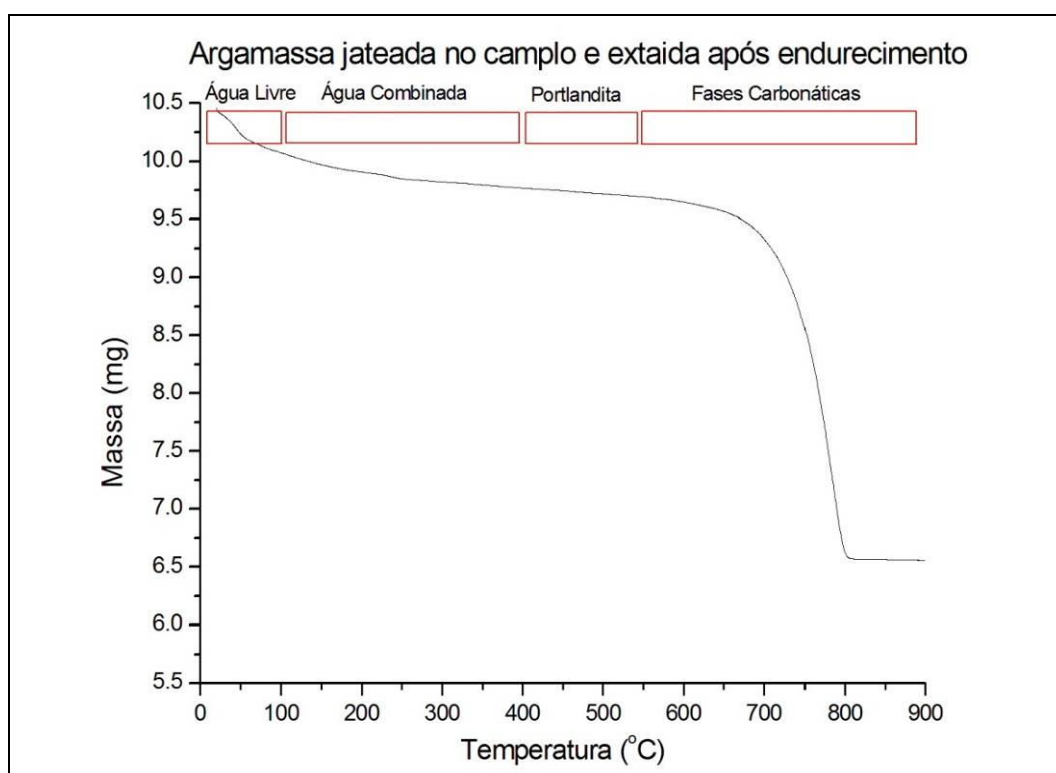


Figura 110 – Curva termogravimétrica de amostra de argamassa jateada no campo e extraída de moldes trapezoidais após endurecimento aos 28 dias.
Fonte: Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB (2013).

No que se refere à comparação, dos diferentes processos de aplicação das argamassas, não há diferenças significativas entre as proporções de composição, nem quanto à profundidade da seção das amostras.

No entanto, as amostras jateadas apresentaram os menores teores de material hidratado, além de menores teores de portlandita. Essa observação pode estar associada a parâmetros do processo de jateamento, que levaram à menor eficiência da combinação do metacaulim com a cal, implicando menor reatividade pozolânica, com efeitos para a resistência mecânica.

As amostras jateadas e ensaiadas, após endurecimento no campo, foram as que desenvolveram menores resistência mecânicas, em torno de 11,33 MPa, como também obtiveram os menores teores de água combinada (7,6 %).

Na Figura 111, podem-se verificar os teores percentuais relativos às perdas de massa das amostras testadas. A escala vertical das perdas percentuais foi ajustada para 50% (cinquenta por cento), para melhor visualização das frações de menor percentual, como a da portlandita.

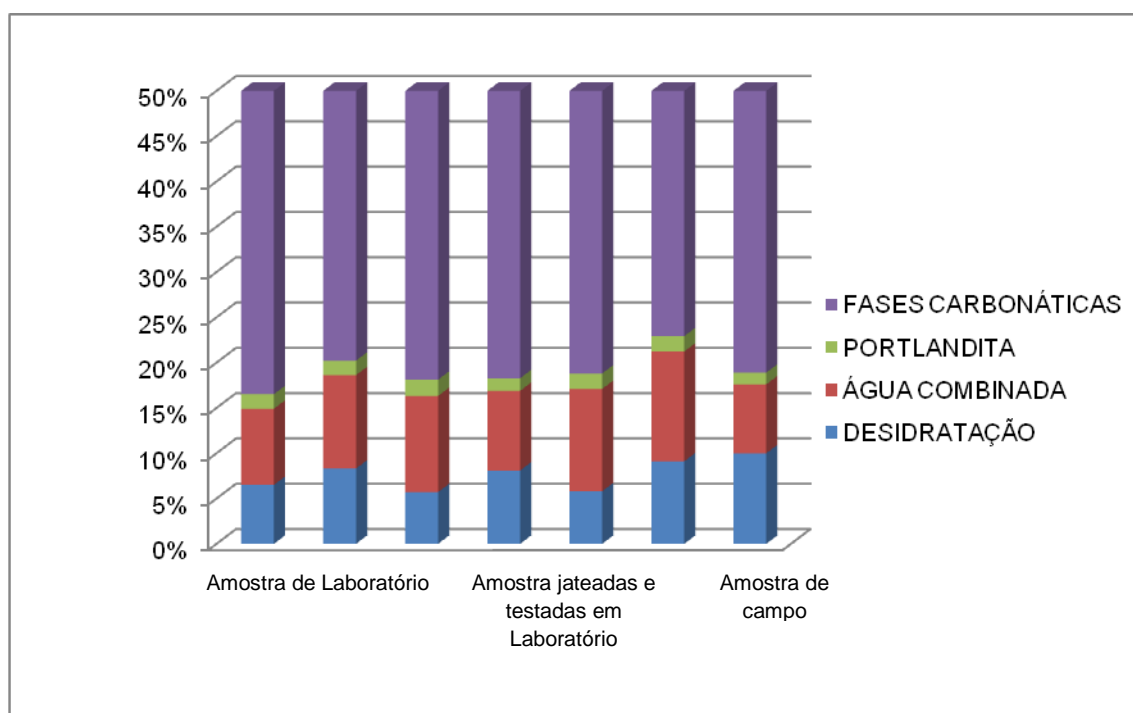


Figura 111 – Teores percentuais relativos às perdas de massa das amostras testadas. Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

Os altos percentuais de fases carbonáticas são oriundos do fato de que foram adicionados às misturas, areia calcária em forma de agregado miúdo, bem como a

formação, por dissolução e precipitação, de novas fases carbonáticas (Vaterita, Ankerita), na presença de CO₂ atmosférico e da cal solúvel.

Os pequenos teores (< 2%) da perda de massa atribuída à portlandita, em todas as amostras, mostram que esta sofreu transformação através de, pelo menos, dois tipos de mecanismos: (i) por carbonatação dos íons solúveis de carbonatos dissolvidos, originando a formação abundante de fases carbonáticas e (ii) da reação pozolânica com a metacaulinita, formando produtos hidratados, provavelmente amorfos, contribuindo para conferir resistência mecânica satisfatória.

Dadas as resistências mecânicas encontradas nas argamassas, entre 11,3±0,57MPa (moldadas e extraídas endurecidas de corpos de prova trapezoidais curados em campo), 15.6±0,78MPa (moldadas e testadas em laboratório) e 12,5±0,68MPa (amostras moldadas e endurecidas em campo), pode-se inferir que, em todos os processos, a formação desses compostos hidratados, muito provavelmente amorfos, evidenciada pelo percentual de água combinada, teve sua eficácia, resultando na produção de argamassas mecânica e quimicamente compatíveis com as das pedras calcárias.

5.3 A REINTEGRAÇÃO DE PEDRAS CALCÁRIAS COM ARGAMASSA PROJETADA NO TRAÇO 1:1:5,0:2,30 (cal:metacaulim:areia calcária;água)

Como o objetivo primordial deste trabalho foi a reintegração de alvenarias de pedras calcárias com argamassa projetada, apresentam-se as evidências da concretização da proposta de pesquisa. Os procedimentos exploratórios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba. Para isso, foi retirado das pedras que tinham sido jateadas, um exemplar, em que foram realizados cortes em diversos ângulos. A Figura 112 mostra o protótipo na mesa de operação.



Figura 112 – Pedra calcária jateada na face frontal.
Fonte: Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB (2013).

Na Figura 113, apresenta-se um corte feito na extremidade anterior à fissura, onde se vê a reintegração da argamassa projetada.



Figura 113 – Corte transversal na extremidade da pedra.
Fonte: Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB (2013).

Na Figura 114, foi feito um corte longitudinal para melhor se visualizar a incorporação da argamassa projetada com a pedra.



Figura 114 – Corte longitudinal em uma das faces da pedra.
 Fonte: Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB (2013).

Na Figura 115, pode-se observar, nas partes superior e inferior da fatia que foi destacada, a incorporação da argamassa projetada. Observa-se, na interface entre a rocha e a argamassa, continuidade pétreia, isto é, ausência de descolamentos.

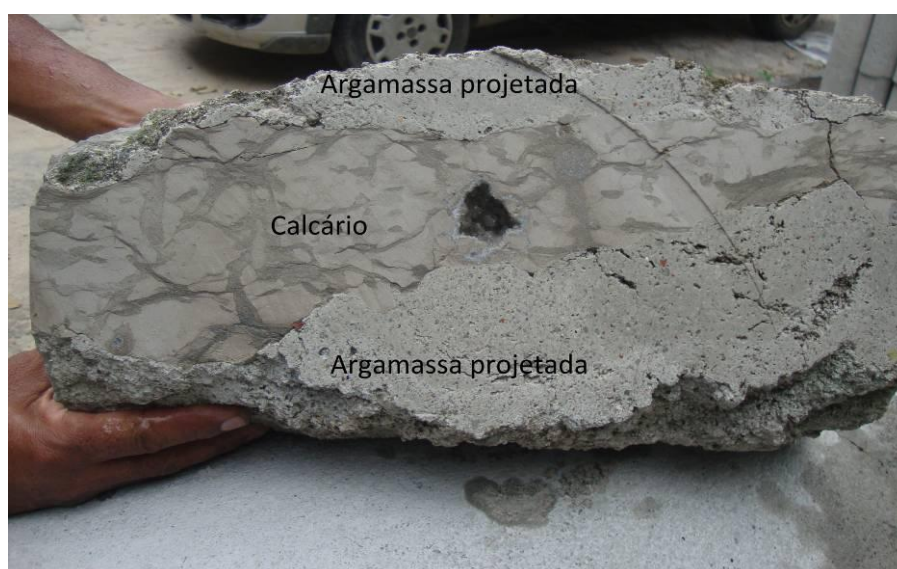


Figura 115 – Pedra cortada longitudinalmente.
 Fonte: Laboratório de ensaios de materiais e estruturas – UFPB (2013).

Na Figura 116, apresenta-se uma vista superior do bloco de pedra que foi cortado longitudinalmente. Foi feito um pequeno trabalho de melhoramento da

textura da argamassa projetada, no intuito de se comparar visualmente os dois materiais.



Figura 116 – Vista superior do bloco de pedra cortado longitudinalmente
Fonte: Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB (2013).

Como forma de comprovar a reintegração da argamassa projetada com a pedra calcária, analisou-se também, através de uma câmera digital, a interface entre a argamassa projetada e o calcário, em uma pequena amostra, com dimensões aproximadas de 14mm de largura, 30mm de comprimento e 5,0 mm de espessura, como se vê na Figura 117: a parte (a) representa uma porção da fotografia em escala maior; o destaque (b) é uma redução da anterior e a foto (c) é uma ampliação de um detalhe menor da interface vista no destaque (b) da Figura. Os quadros (a), (b) e (c) mostram, com mais detalhes, o processo de reintegração da argamassa com a pedra, e não há dúvidas quanto à eficiência de consolidação feita com a tecnologia da argamassa projetada.

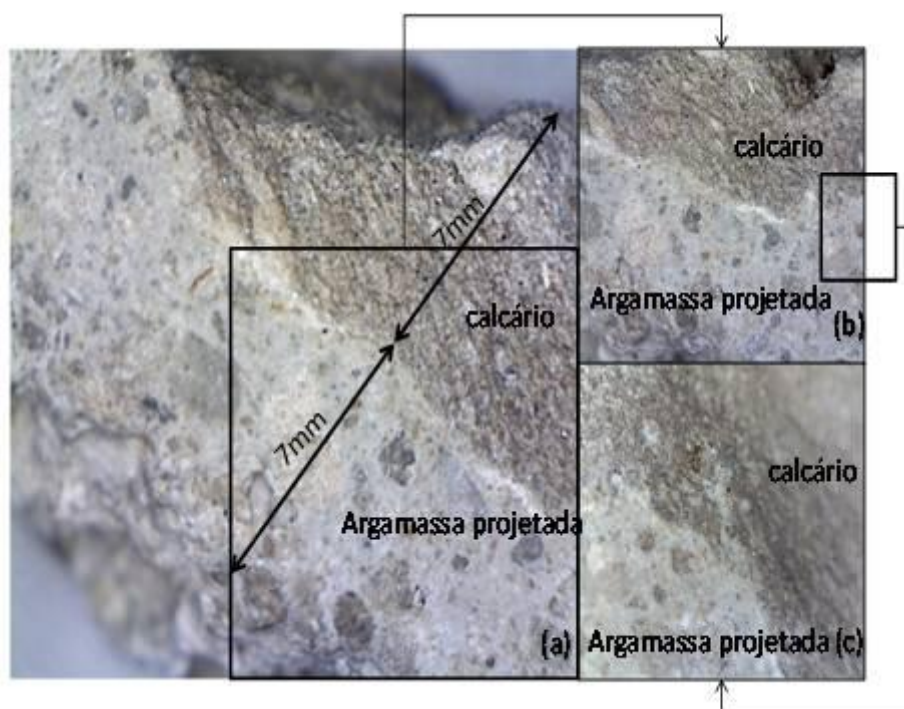


Figura 117 – Análise da interface da argamassa projetada com a pedra calcária em 03 (três) escalas de visualização.

Fonte: Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB (2013).

5.4 EXPERIMENTAÇÕES DO CALCÁRIO COMPONENTE DAS PEDRAS UTILIZADAS NOS MONUMENTOS SELECIONADOS

5.4.1 Valores da Resistência Mecânica à Compressão de Amostras de Pedras Calcárias

Foi verificada a resistência à compressão de amostras tiradas dos monumentos em pedras calcárias, representativas da Igreja da Guia, do Convento do Almagre e da Fortaleza de Santa Catarina. Para isso, foram extraídas das pedras, por rotação abrasiva, amostras de 10 cm no diâmetro e 16 cm na altura, com área $78,54 \text{ cm}^2$. Os resultados estão na Tabela 11. Vê-se uma grande variação de resistência do material, entre 8,9 MPa e 29,3 MPa. As pedras da Igreja da Guia mostraram as maiores resistências, e as do Almagre, menores.

Tabela 11 – Resistência à compressão de amostras em pedras calcárias

AMOSTRA	F(kgf)	Tensão (MPa)
1 Igreja da Guia	16.263	20,7
2 Igreja da Guia	23.009	29,3
3 Forte de Santa Catarina	14.866	18,9
4 Forte de Santa Catarina	15.115	19,2
5 Forte de Santa Catarina	13.555	17,20
6 Almagre	11.000	14,0
7 Almagre	11.200	14,3
8 Almagre	7.000	8,9

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

5.4.2 Análise Estatística dos Valores das Resistências à Compressão das Amostras em Pedras Calcárias

Na Tabela 12, apresenta-se a análise estatística das 08 (oito) amostras constantes da Tabela 11. O desvio padrão do universo amostral foi 5,59 MPa, e a média aritmética de 17,81 MPa. Na coluna observação, foram anotados os valores que estão fora ou dentro do intervalo de confiabilidade ($média - \sigma \leq X_n \leq média + \sigma$). Vê-se que houve rejeição de 02 (duas) amostras. A nova média calculada para os valores válidos foi de 17,38 MPa.

Tabela 12 – Análise estatística dos valores das resistências à compressão das pedras calcárias

AMOSTRAS	RESISTÊNCIA	X- MÉDIA	(X-MÉDIA)²	OBSERVAÇÃO
1	20,7	2,89	8,35	DENTRO
2	29,3	11,49	132,02	FORA
3	18,9	1,09	1,19	DENTRO
4	19,2	1,39	1,93	DENTRO
5	17,20	-0,61	0,37	DENTRO
6	14,0	-3,81	14,52	DENTRO
7	14,3	-3,51	12,32	DENTRO
8	8,9	-8,91	79,39	FORA
TOTAL	142,50		250,09	

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

5.4.3 Composição das Pedras Calcárias dos Monumentos Selecionados com relação às Porcentagens de Material Solúvel, de Areia e Finos (argila e/ou silte) e Classificação Internacional pela Cor segundo *Munsell Soil Color-Charts (Manual de classificação de solos pela cor*, de Munsell)

As análises foram realizadas no Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração da Universidade Federal da Bahia (NTPR). As amostras foram tratadas com ácido clorídrico diluído (25%), apresentando forte efervescência, evidenciando altas porcentagens de carbonato de cálcio.

a) Calcário de jazida local – Cabedelo-PB

A Tabela 13 mostra que foram ensaiadas 02 (duas) amostras da pedra da jazida local, tendo-se obtido 7,47% para a percentagem média dos finos e 3,48% para a fração grossa. O resíduo solúvel (carbonato de cálcio) apresentou o valor médio de 89,05%.

Tabela 13 – Calcário de jazida local, Cabedelo-PB

FINOS (Argila ou/silte)	1	2	MÉDIA
Peso do papel de filtro(g)	1,0713	1,0691	7,47%
Peso do papel+resíduo(g)	1,8302	1,8157	
Peso dos finos(g)	0,7589	0,7466	
% sobre a massa total	7,48%	7,46%	
GROSSOS (areia)	1	2	3,48%
Peso do béquer(g)	64,6409	73,7866	
Peso do béquer+amostra(g)	74,7796	83,7907	
Peso da amostra(g)	10,1387	10,0041	
Peso do béquer+resíduo(g)	65,3200	73,8116	89,05%
Peso da areia(g)	0,6791	0,0250	
% sobre a massa total(g)	6,70%	0,25%	
RESÍDUO SOLÚVEL	1	2	
%R = 100-(%F+%G)	85,82%	92,29%	

COR DOS FINOS – HUE 10YR–3/1 VERY DARK GRAY

Fonte: Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – UFBA (2013).

b) Calcário da Igreja da Guia – Lucena-PB

A Tabela 14 mostra que foram ensaiadas 02 (duas) amostras da pedra da Igreja da Guia, tendo-se obtido 8,96% para a percentagem média dos finos, e para a fração grossa, 1,12%. O resíduo solúvel (carbonato de cálcio) apresentou o valor médio de 89,92%.

Tabela 14 – Calcário da Igreja da Guia, Lucena-PB

FINOS (Argila ou/silte)	1	2	MÉDIA
Peso do papel de filtro(g)	1,0588	1,0946	8,96%
Peso do papel+resíduo(g)	1,9674	2,0071	
Peso dos finos(g)	0,9066	0,9125	
% sobre a massa total	9,02%	8,90%	
GROSSOS (areia)	1	2	
Peso do béquer(g)	68,7357	65,1338	1,12%
Peso do béquer+amostra(g)	78,7841	75,3833	
Peso da amostra(g)	10,0484	10,2495	
Peso do béquer+resíduo(g)	68,8555	65,2416	
Peso da areia(g)	0,1198	0,1078	
% sobre a massa total(g)	1,19%	1,05%	89,92%
RESÍDUO SOLÚVEL	1	2	
%R = 100-(%F+%G)	89,79%	90,05%	

COR DOS FINOS – HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN

Fonte: Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – UFBA (2013).

c) Calcário da Fortaleza de Santa Catarina – Cabedelo-PB

Já para o calcário da Fortaleza de Santa Catarina, cujos resultados são apresentados na Tabela 15, a percentagem da fração fina foi de 6,40%, e a da fração grossa em 1,85%. Para o resíduo solúvel (carbonato de cálcio), foi obtido o valor de 91,75%.

Tabela 15 – Calcário da Fortaleza de Santa Catarina, Cabedelo-PB

FINOS (Argila ou/silte)	1	2	MÉDIA
Peso do papel de filtro(g)	1,0694	1,0663	6,40%
Peso do papel+resíduo(g)	1,7159	1,70094	
Peso dos finos(g)	0,6462	0,6431	
% sobre a massa total	6,40%	6,39%	
GROSSOS (areia)	1	2	1,85%
Peso do béquer(g)	68,2599	67,7907	
Peso do béquer+amostra(g)	78,3512	77,8520	
Peso da amostra(g)	10,0913	10,0613	
Peso do béquer+resíduo(g)	68,4261	67,9983	91,75%
Peso da areia(g)	0,1662	0,2076	
% sobre a massa total(g)	1,64%	2,06%	
RESÍDUO SOLÚVEL	1	2	
%R = 100-(%F+%G)	91,96%	91,55%	

COR DOS FINOS – HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN

Fonte: Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – UFBA (2013).

d) Calcário da Igreja do Almagre – Cabedelo-PB

Na Tabela 16, vê-se que a porcentagem da fração fina da média das duas amostras ensaiadas, que apresentou o valor de 15,07%. O valor relativo à porcentagem da fração grossa foi de 1,84%. O resíduo solúvel (carbonato de cálcio) totalizou o valor de 83,09%.

Tabela 16 – Calcário da Igreja do Almagre, Cabedelo-PB

FINOS (Argila ou/silte)	1	2	MÉDIA
Peso do papel de filtro(g)	1,0613	1,0892	15,07%
Peso do papel+resíduo(g)	2,5947	2,5975	
Peso dos finos(g)	1,5334	1,5083	
% sobre a massa total	15,18%	14,96%	
GROSSOS (areia)	1	2	83,09%
Peso do béquer(g)	72,4773	66,2922	
Peso do béquer+amostra(g)	82,5807	76,3760	
Peso da amostra(g)	10,1034	10,0883	

Peso do béquer+resíduo(g)	72,6563	66,4842	
Peso da areia(g)	0,1790	0,1920	
% sobre a massa total(g)	1,77%	1,90%	
RESÍDUO SOLÚVEL	1	2	1,84%
%R = 100-(%F+%G)	83,05%	83,14%	83,09%
COR DOS FINOS – HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN			

Fonte: Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – UFBA (2013).

e) Resumo da caracterização das pedras calcárias com relação às porcentagens de areia, finos, (argila e/ou silte), resíduo solúvel, e classificação internacional pela cor segundo *Munsell soil color-charts*

No Quadro 16, observa-se que a porcentagem de finos contidos nas amostras de jazida, Fortaleza de Santa Catarina e da Igreja da Guia, teve percentuais próximos, enquanto esse valor, para o calcário da Igreja do Almagre, foi de quase o dobro da média dos valores anteriores. Já as porcentagens de grossos encontradas nas amostras da Fortaleza de Santa Catarina, da Igreja do Almagre e da Igreja da Guia apresentaram valores quase idênticos, e o valor para o calcário de jazida foi quase o dobro da média das porcentagens das outras amostras. As porcentagens de carbonato de cálcio nos quatros locais são também muito próximas. Os finos tiveram valor médio de 9,47% e os grossos de 2,07%. O teor médio de carbonato de cálcio (calcita) existente nas amostras foi de 88,44%.

As amostras do calcário de jazida apresentaram a cor dos finos (*HUE 10YR–3/1 VERY DARK GRAY*), enquanto as outras amostras revelaram a mesma cor (*HUE 2,5Y 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN*). A diferenciação de cor com relação às amostras de jazida está associada ao intemperismo.

Quadro 16 – Comparativo de percentagens de finos, grossos, resíduo solúvel e cor (segundo *Munsell soil color-charts*) do calcário dos monumentos selecionados e amostra de jazida

Origem	%Finos (argila ou/silte)	% Grossos (areia)	Resíduo solúvel (CaCO ₃ diluído em HCl a 25%)	Cor dos finos
Igreja da Guia	8,96	1,12	89,92	<i>HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN</i>
Igreja do Almagre	15,07	1,84	83,09	<i>HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN</i>
Fortaleza de Santa Catarina	6,40	1,85	91,75	<i>HUE 2,5Y – 6/4 LIGHT YELLOWISH BROWN</i>
Calcário de jazida local	7,47	3,48	89,05	<i>HUE 10YR–3/1 VERY DARK GRAY</i>

Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2013).

5.4.4 Análises Petrográficas das Amostras do Calcário dos Monumentos Selecionados

Foram preparadas lâminas com o material retirado das amostras do calcário dos três monumentos e de uma amostra do calcário da jazida local. Os resultados das análises advieram do Laboratório de Petrografia da Universidade Federal da Bahia, e estão de acordo com os Quadros do itens a, b, c, d, e, a seguir.

a) Calcário da jazida

Os resultados apresentados no Quadro 17 mostram que a rocha de jazida ensaiada, de cor cinza escura, é de origem carbonática, comprovada pela reação forte ao ácido clorídrico, e tem arcabouço sustentado predominantemente por matriz micrítica (calcário microcristalino de granulometria equivalente à argila, grãos de tamanho entre 1µm a 5µm, e grãos superiores ou iguais a 10 µm). Vê-se também que os minerais observados são compostos por: romboedros de dolomita [CaMg(CO₃)] (10%), “poliedro de 06 faces em losango”, cristais de calcita (CaCO₃), com a mesma forma cristalográfica que a dolomita, e extraclastos (fragmentos de

origem não orgânica), opacos 1%, e quartzo 1%. Observa-se também a presença de fósseis.

Quadro 17 – Caracterização petrográfica do calcário de jazida

COR	REAÇÃO À HCl DILUÍDO A FRIO	TEXTURA	MINERAIS	FÓSSEIS
Cinza escura	Forte	Matriz micrítica	Romboedros de dolomita 10%, cristais de calcita, extraclastos de mineral opaco 1%, quartzo 1%.	Dispersos

Fonte: Laboratório de Petrografia da UFBA (2013).

b) Calcário da Igreja da Guia

No Quadro 18, veem-se os resultados da caracterização petrográfica da pedra calcária representativa da Igreja da Guia. De cor marrom amarelado, é de origem carbonática, comprovada pela reação forte ao ácido clorídrico, e tem arcabouço sustentado, predominantemente, por matriz calcítica, micrítica e esparítica, (calcário microcristalino de granulometria equivalente à argila, grãos de tamanho entre 1µm e 5µm; também apresenta grãos de dimensões maiores ou iguais a 10µm). Vê-se também que os minerais observados são compostos por: romboedros de dolomita [CaMg(Co₃)] (7%), “poliedro de 06 faces em losango” e extraclastos, (fragmentos de origem não orgânica), de quartzo 3%, de microclina <1% (KAlSi₃O₈), também conhecido por tectossilicato de rochas ígneas, ou feldspato potássico ou alcalino, e dolomita 7%. Nesta amostra, nota-se a presença abundante de fósseis.

Quadro 18 – Caracterização petrográfica do calcário da Igreja da Guia

COR	REAÇÃO A HCl DILUÍDO A FRIO	TEXTURA	MINERAIS	FÓSSEIS
Marrom amarelado	Forte	Matriz calcita micrítica e esparítica	Quartzo 3%, microclina < 1%, dolomita 7%	Muitos organismos

Fonte: Laboratório de Petrografia da UFBA (2013).

c) Calcário da Fortaleza de Santa Catarina

No Quadro 19, veem-se os resultados da caracterização petrográfica da pedra calcária representativa da Fortaleza de Santa Catarina. De cor marrom amarelado, é de origem carbonática, comprovada pela reação forte ao ácido clorídrico, e tem arcabouço sustentado predominantemente por matriz calcítica, micrítica e esparítica (calcário microcristalino de granulometria equivalente à argila, grãos de tamanho entre 1 μ m, a 5 μ m; também apresenta grãos de dimensões maiores ou iguais a 10 μ m. Vê-se, também, que os minerais observados são extraclastos de quartzo e de microclina. Os romboedros de dolomita apresentam percentagem de 3%, quartzo, 2%, e microclina <1%. Nota-se a presença de muitos fósseis.

Quadro 19 – Caracterização petrográfica do calcário da a Fortaleza de Santa Catarina

COR	REAÇÃO À HCl DILUÍDO A FRIO	TEXTURA	MINERAIS	FÓSSEIS
Marrom amarelado	Forte	Matriz calcita micrítica e esparítica	Extraclastos de quartzo e de microclina. Romboedrais de dolomita. Quartzo 2%, microclina < 1%, dolomita 3%	Muitos organismos

Fonte: Laboratório de Petrografia da UFBA (2013).

d) Calcário do Convento do Almagre

No Quadro 20, veem-se os resultados da caracterização petrográfica da pedra calcária representativa do Convento do Almagre. De cor marrom amarelado, é de origem carbonática, comprovada pela reação forte ao ácido clorídrico, e tem arcabouço sustentado predominantemente por matriz calcítica, micrítica, e esparítica (calcário microcristalino de granulometria equivalente a argila, grãos de tamanho entre 1µm e 5µm; também apresenta grãos de dimensões maiores ou iguais a 10µm. Vê-se, também, que os minerais observados são romboedros de dolomita 20%, extraclastos de quartzo 3%, notando-se ainda a presença de microclina pertítica (feldspato potássico ou alcalino), assim como a presença de fósseis.

Quadro 20 – Caracterização petrográfica do calcário da Igreja do Almagre

COR	REAÇÃO À HCl DILUÍDO A FRIO	TEXTURA	MINERAIS	FÓSSEIS
Marrom amarelado	Forte	Matriz micrítica esparítica	Quartzo 3%, calcita, romboedros de dolomita 20%, microclina pertítica,	Presença

Fonte: Laboratório de Petrografia da UFBA (2013).

e) Resumo das análises petrográficas

Vê-se, no Quadro 21, uma síntese dos diversos resultados das caracterizações petrográficas das amostras de pedras calcárias de uma jazida local, da Igreja da Guia, da Fortaleza de Santa Catarina e do Convento do Almagre. Nota-se que as pedras calcárias apresentam praticamente a mesma natureza, isto é, rocha carbonática (predominantemente constituída de calcita e dolomita), bioclástica (gênese de origem animal), tendo em sua matriz fragmentos de extraclastos oriundos de rocha granítica, como quartzo e microclina, e presença de fósseis.

Quadro 21 – Resumo das análises petrográficas

REAÇÃO À HCl DILUÍDO A FRIO	TEXTURA	MINERAIS	FÓSSEIS
Forte efervescência	Calcário bioclástico com arcabouço sustentado por matriz, com contribuição de rocha granítica	Quartzo, microclina, romboedros de dolomita, calcita	Muita presença

Fonte: Laboratório de Petrografia da UFBA (2013).

f) Recristalização das amostras

O processo de recristalização existe nas amostras e é significativo na amostra da Igreja do Almagre. Os romboedros de dolomita são representativos de processo de dolomitização⁶.

5.5 EFEITOS DO ÁCIDO CARBÔNICO SOBRE AS CANTARIAS EM PEDRAS CALCÁRIAS

O dióxido de carbono, presente no ar atmosférico, combina-se com a água de chuva, formando ácido carbônico e, segundo a equação, o ataque acontece com a decomposição da calcita.

⁶ Dolomitização é processo geoquímico no qual íons do magnésio, substituem íons da calcita, originando dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Os íons de dolomita são 13% menores que os de calcita, aumentando a porosidade das rochas. A veiculação de sais de magnésio na água em contato com o calcário ou mesmo a água do mar, respondem por esse processo. Disponível em: <<http://www.dicionario.pro.br/index.php/Dolomitiza%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 24 mai. 2012.

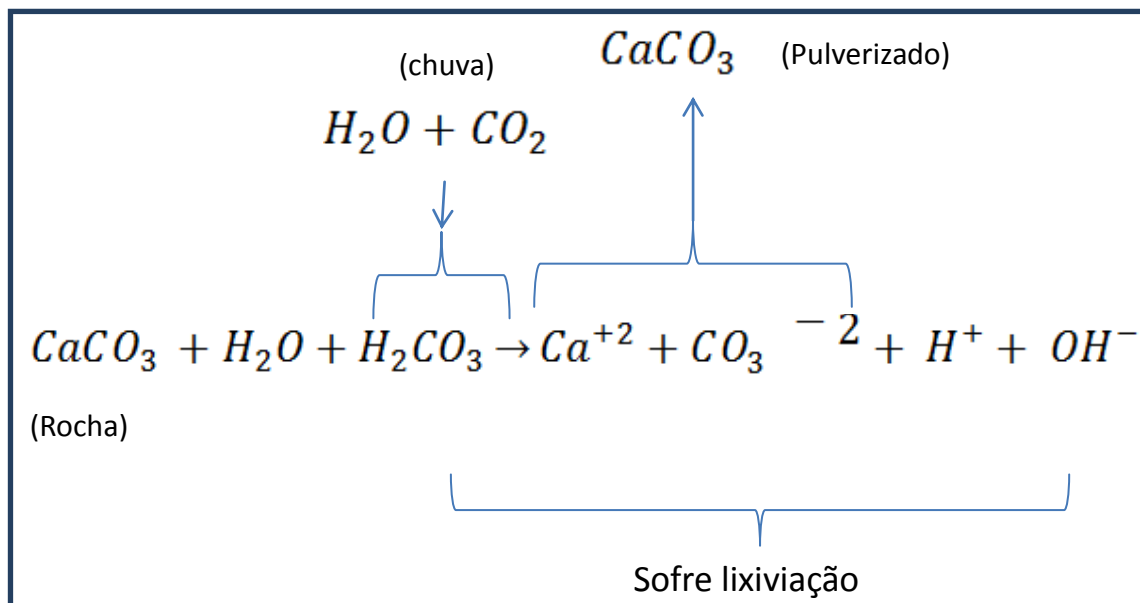
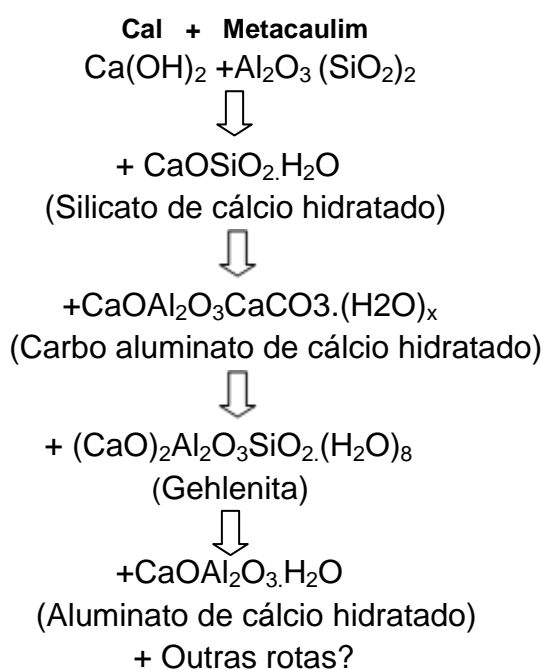


Figura 118 – Efeitos do ácido carbônico sobre o calcário.
 Fonte: Paulo Germano Toscano Moura (2012).

Essa calcita pulverulenta pode ser, em parte, transportada pela chuva, ficando outra fração aderente à rocha em camadas friáveis.

5.6 REAÇÕES DA CAL COM O METACAULIM NA ARGAMASSA DE TESTE E POSSIBILIDADES DE FORMAÇÃO DE COMPOSTOS



Na equação química acima, entre a cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e o metacaulim $[\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2]$, vários subprodutos poderão se formar. O composto $\text{CaOSiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ (silicato de cálcio hidratado) é insolúvel e muito resistente. Outros compostos formados como: $[\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{CaCO}_3\cdot(\text{H}_2\text{O})_x]$ (carboaluminato de cálcio hidratado), tem em sua molécula o aprisionamento do carbonato de cálcio (CaCO_3). Ora, uma vez a pedra calcária recebendo a argamassa testada neste trabalho, esta última pode reter o carbonato de cálcio oriundo do ataque do ácido carbônico (fração friável aderente à pedra), favorecendo a reintegração do carbonato de cálcio lixiviado à rocha. A gehlenita $[(\text{CaO})_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2\cdot(\text{H}_2\text{O})_8]$ é também um subproduto estável e resistente. Na reação, já citada, poderá aparecer também o $[\text{CaOAl}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}]$ (aluminato de cálcio hidratado). Dadas as possibilidades de mistura da cal com o metacaulim, outras rotas de subprodutos poderão aparecer.

5.7 RECOMENDAÇÕES

Para a aplicação do processo de reintegração de pedras calcárias proposto neste estudo, é importante que se observem algumas recomendações: da mistura base cal:metacaulim:areia calcária:água (1:1:5,0:2,3), das variáveis de projeção e dos cuidados com a limpeza das pedras.

a) Processamento da mistura base na betoneira

No processo de mistura na betoneira, deve-se fazer uma umidificação do material, para diminuir sua dispersão no jateamento. Esse procedimento gera a formação de pelotas, que devem ser destruídas antes de o material ser conduzido à máquina de projeção.

b) Ajuste das variáveis de projeção

O compressor deverá trabalhar o mais próximo possível da pressão de 100 Psi (0,68 MPa). A taxa horária de projeção deve ser baixa, para permitir melhor

reintegração da água com a mistura base. Antes da projeção, testes de ajustes deverão ser feitos em outros anteparos destinados exclusivamente a essa finalidade.

c) Limpeza das pedras

Foi observada, durante os ensaios de campo, grande importância da limpeza das pedras nos resultados obtidos. As incrustações devem ser removidas inicialmente com escovação simples com cerdas de *nylon*, e as mais resistentes, através de outros processos já indicados neste trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa nos três monumentos históricos selecionados constatou o estado degradante em que se encontram essas estruturas, servindo para denunciar aos poderes competentes a necessidade urgente de serviços de restauração.

As argamassas projetadas foram introduzidas como inovação tecnológica no restauro de pedras calcárias com as seguintes características:

- O produto desenvolvido é muito rico em carbonato de cálcio, material constituinte da própria pedra.
- Houve grande compactação contra os substratos projetados.
- Pode haver controle do processo com maior ou menor fluxo de argamassa aplicada na unidade de tempo.
- Pode haver controle automático da quantidade de água aduzida à mistura seca.

- Os Traços Analisados

Foram testados o traço 1:1:1 (cal: metacaulim: água) e os demais, com a incorporação de agregado miúdo do calcário. Somando-se a massa da cal com a do metacaulim e dividindo-se pela massa do agregado, os traços ficaram com essa relação igual a 1: 2,5 (traço 4), e os outros, maiores que 1: 2,5 e menores que 1: 2,5.

- Os traços com relações maiores foram: 1:1:6 e 1:1:7.
- Os traços com relações menores foram: 1:1:4 e 1:1:3.

Para os traços com relação (aglomerante+metacaulim), maior quantidade de agregado miúdo, as resistências mecânicas foram menores.

Para os traços com relação (aglomerante+metacaulim), menor quantidade de agregado miúdo, as resistências mecânicas foram maiores.

Os traços com relação (aglomerante+metacaulim), maior quantidade de agregado miúdo, apresentaram muita poeira e menor fixação nos anteparos.

Os traços com relação (aglomerante+metacaulim), menor quantidade de agregado miúdo, apresentaram pouca poeira, formação de pelotas e, portanto, pouca fixação nos anteparos.

O traço com relação (aglomerante+metacaulim), agregado miúdo igual a 1:2,5 foi o que melhor se ajustou para as condições de projeção, permitindo melhor controle no processo. Como já dito, este traço foi em massa, 1:1:5:2,30.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS AOS 28 DIAS DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO OBTIDAS DA ARGAMASSA (TRAÇO 1:1:5:2,30) EM LABORATÓRIO, NO CAMPO, COMPARATIVAMENTE AOS VALORES OBTIDOS DA PEDRA CALCÁRIA

O valor médio obtido da argamassa de teste em laboratório foi de 15,79 MPa.

O valor médio da argamassa de corpos de prova, obtidos em campo por jateamento e extraído endurecido, foi de 11,33 MPa.

O valor médio obtido para a argamassa jateada e colhida *in situ* em campo foi de 12,50 MPa.

O valor médio para os corpos de prova extraídos da pedra calcária dos três monumentos foi 17,38 MPa.

Embora, no processo de jateamento, existam muitas variáveis envolvidas: pressão do compressor, fator água/aglomerante na saída do bico e ângulo entre a linha dos jatos e a superfície, o valor médio obtido de 11,33 MPa para a argamassa de teste correspondeu às expectativas do estudo com relação ao valor obtido em laboratório de 15,79 MPa.

O valor médio de 17,38 MPa da resistência do calcário constituinte das pedras, nos três monumentos, comprovou que o material pétreo utilizado é de baixa resistência mecânica. O calcário lioz, segundo o Professor Mário Mendonça de Oliveira, por exemplo, apresenta resistência à compressão da ordem de 90,00 MPa.

Os resultados mostraram que o material testado possui resistência à compressão compatível com a das pedras calcárias.

6.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS E DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Com respeito às análises termogravimétricas e de difração de raios X, as argamassas testadas neste estudo responderam positivamente, de acordo com as seguintes conclusões: a água combinada de acordo com os diagramas termogravimétricos tem efeito positivo na resistência das argamassas experimentadas. Neste estudo, o ganho de resistência mecânica das argamassas pode ser atribuído a um efeito combinado da formação de compostos hidratados, predominantemente amorfos, juntamente com a cristalização de fases carbonáticas pelo processo de dissolução e precipitação dos carbonatos oriundos, tanto da rocha, como do agregado miúdo, e do CO₂ do ar atmosférico.

O processo de jateamento, apesar de ter proporcionado argamassas com resistências superiores a 10 MPa, carece de otimização no que se refere à sequência de colocação dos materiais, reologia da pasta base, bem como das relações pozolana-cal e tratamentos superficiais, tanto da pedra quanto da argamassa reintegrada. Estudos futuros serão necessários para estender o processo aqui proposto à reintegração de cantarias, haja vista a sutileza da recomposição técnica e artística das áreas degradadas.

Como os testes foram executados com o metacaulim branco, o estudo de dosagem colorimétrica passa a ser indicado para futuros trabalhos.

O processo de jateamento de misturas de cal+metacaulim+areia+calcária mostrou-se tecnicamente viável.

Neste trabalho, embora tenha contribuído com o avanço tecnológico em busca de novos processos e aplicações de outros materiais, os resultados carecem de melhoramentos através de uma linha de pesquisa que possa acompanhar a evolução física e química da argamassa projetada nos seguintes aspectos:

- Conhecimento da evolução na formação mineralógica da argamassa projetada com o tempo.
- Verificação das suas propriedades mecânicas com o envelhecimento.

No estuário do rio Paraíba, existem dois afloramentos de calcário próximos à Fortaleza de Santa Catarina e da Igreja de Nossa Senhora da Guia. Um deles serviu, no passado, como jazida de matéria-prima para a fabricação de cimento na

ilha de Tiriri, que foi a segunda fábrica de cimento instalada no Brasil. O outro guarda, ainda, traços de exploração de calcário e fica na margem oposta do rio da Guia, ao sul, rio este que banha o sopé da igreja de mesmo nome. Essa disponibilidade de rocha calcária nas cercanias daqueles dois monumentos torna-se intrigante quando não se tem informação do seu uso nas ditas construções.

Os resultados das análises das pedras calcárias mostrados neste estudo, principalmente o valor baixo da resistência mecânica (17,38 MPa), se comparada com o calcário português (Lioz), como já foi dito, de 90MPa, apontam para a desmotivação da crença popular de que essas rochas teriam chegado aos locais de aplicação, transportadas em lastros de navios vindas de Portugal.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. N. *Manual de conservação de cantarias*. Brasília: 5ª SR/IPHAN/MinC, 2000.
- ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 1., Lisboa, 2005. *Anais...* Lisboa: APFAC, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13044: Concreto projetado. Reconstituição da mistura recém-projetada*. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13069: Concreto projetado. Determinação dos tempos de pega em pasta de cimento portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega*. Rio de Janeiro, 1994a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13070: Moldagem de placas para ensaios de argamassa e concreto projetado*. Rio de Janeiro, 1994b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13317: Concreto projetado. Determinação do índice de reflexão por medição direta*. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13354: Concreto projetado. Determinação do índice de reflexão em placas*. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13597: Procedimento para a qualificação do mangoteiro de concreto projetado. Aplicado por via seca*. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14026: Concreto projetado. Especificações*. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14278: Concreto projetado. Determinação da consistência através da agulha de proctor*. 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14279: Concreto projetado aplicação por via seca. Procedimento*. Rio de Janeiro, 1999.
- BARLEUS, G. *História dos feitos do Brasil*. Local: editora, 1940. Tradução e notas de Cláudio Brandão. Edição original: Amesterdã: Loannes Blaeu, 1647.
- BARONIO, G.; BINDA, Luigia. *Study of the pozzolanicity of some bricks and clays: construction and building materials*. 1997.
- BAZIN, G. *L' Architecture religieuse baroque au Brésil*. São Paulo: Museu de Arte de São Paulo, 1956.
- BOGUE, R. H. *The chemistry of Portland cement*. New York: Reinhold Publication Corp., 1955.

- BUGINI, R.; FOLLI, L. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei. In: _____. *Lezioni di petrografia applicata*. Italia: CNR/Instituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali, 2008. Disponível em: <<http://www.icvbc.cnr.it/didattica/petrografia/11.htm>>. Acesso em: 2 mai. 2010.
- CAMPBELL, D. H.; FOLK, R. L. The ancient Egyptian pyramids concrete or rock. *Concrete International*, p.29-441, 1991.
- CANEVA, G.; NUGARI, M.; SALVATORI, O. *Biology in the Conservation of Works of Arts*. Rome: ICCROM, 1991.
- CÁNOVAS, M. F. *Patologia e Terapia do Concreto Armado*. Coordenação Técnica L.A Falcão Bauer. Tradução de M. Celeste Marcondes, Carlos Wagner Fernandes dos Santos e Beatriz Cannabrava. São Paulo: PINI, 1988.
- CAVALCANTI, M. T. *Epítome da História da Paraíba*. João Pessoa, Paraíba: Imprensa Oficial do Estado, 1914.
- CHIARI, G.; TORRACA, G.; SANTARELLI, M.J. *Recommendations for systematic instrumental analysis of ancient mortars: the Italian experience*. Standards for Preservation and Rehabilitation, ASTM STP, 1258. 1996.
- CONTENSON, H.; COURTOIS, L. A propos des vases de chaux : recherches sur leur fabrication et leur origine. *Paleorient*, n. 5, p.177-182, 1979.
- DAVIDOVITS, J. Ancient and modern concretes: What is the real difference? *Concrete International*, 1987.
- DAVIDOVITS, J. *Inorganic polymers and methods of making them*. US Patent 4349386, 1982.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and sustainable development. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. In: GEOPOLYMER WORLD CONGRESS: Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, France, June 29, 30 and July 1 2005. *Proceedings of green-chemistry...* France: Institut Géopolymère, 2005. Conference, p. 9-15.
- DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymers cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALINE CEMENTS AND CONCRETES, 1. 1994, Kiev, Ukraine. *Proceedings...* Kiev: Scientific Research Institute on Binders and Materials, 1994. p. 131-149.
- DAVIDOVITS, J.; COURTOIS, L. D.T.A. Detection of intra-ceramic geopolymeric setting in archaeological ceramics and mortars. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARCHAEOOMETRY, 21st., 1981, New York. *Abstracts of papers...* New York, 1981.
- ESTE Industrial e Comercial. Disponível em: <<http://este.com.br/industrial1.htm>>. Acesso em: 20 mai. 2012.
- FERET, R. Slags for the manufacture of cement. *Rev. Mater. Constr. Trav.*, n. 22, 1939.
- FERREIRA, I. P. *Datas e notas para a história da Paraíba*. João Pessoa: Editora da Universidade Federal da Paraíba, 1977.
- GJORV, O.E. Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment. *ACI Concrete International*, p. 35-39, 1994.

- GLUKHOVSKY, V. D. *Soil Silicates*. Kiev, USSR: Gostroiizdat Publish, 1959.
- GRANIZO, M. L. *Activación alcalina de metacaolín: desarrollo de nuevos materiales cementantes*. Tesis Doctoral. España: Universidad Autónoma de Madrid, 1998.
- GUEDES, João; COSTA, Aníbal; ARÊDE, Antonio et al. Reabilitação e reforço de estruturas: patrimônio nacional; experiência da FEUP. In: SEMINÁRIO EURO-MEDITERRÂNICÓ, FORUM UNESCO, jun.2002. Lisboa: Universidade Lusíada, 2002.
- GUNITE. *Supply & Equipment*. Disponível em: <<http://www.gunitesupply.com>>. Acesso em: 20 mai. 2012.
- HAZRA, P.C.; KRISHNASWAMY, V.S. Natural pozzolans in India, their utility, distribution and petrography. *Records of the geological survey of Índia*, n.87, p. 675-706, 1987.
- HERCKMAN, E. Descrição geral da capitania da Paraíba. *Revista do Instituto Arqueológico Histórico e Geográfico de Pernambuco*, v.5, p. 241, 1639.
- INSTITUTO ARQUEOLÓGICO E GEOGRÁFICO DE PERNAMBUCO. *As quatro capitanias conquistadas de Pernambuco, Itamaracá, Paraíba e Rio Grande do Norte*. Recife: Tipografia Universal, 1887.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). *Manual de conservação de cantarias*. Brasília, 2000.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). 3ª Diretoria Regional. *Programa das Cidades Históricas: Restauração e Adaptação do Forte de Cabedelo-Paraíba*. Recife-PE.
- JALALI, Said; EIRES, Ruth. *Inovações científicas de construção em terra crua*. Portugal: Universidade do Minho/Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 2008.
- KANAN, Maria Isabel. *Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal*. Brasília, DF: Iphan/Programa Monumenta, 2008. 172 p.: il.; 20cm (Cadernos Técnicos).
- LANGTON, C. A.; ROY, D.M. Longevity of borehole and shaft sealing materials: characterization of ancient cement-based building materials: scientific basis for nuclear. *Waste Management*, n.26, p.543-549, 1984.
- LEA, F. M. *The chemistry of cement*. 3rd ed. London, 1970.
- LESSICO delle alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei. Disponível em: <http://maxpages.com/achille32/LESSICO_DELLE_ALTERAZIONI>. Acesso em: 28 abr. 2010.
- MACHADO, M. L. *História da província da Paraíba*. João Pessoa: Editora da Universidade Federal da Paraíba, 1977. v.1.
- MALINOWSKY, R. Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International: Design and Construction*, Michigan, Jan. 1979.
- MALINOWSKY, R. Prehistory of concrete. *Concrete International*, n.13, p. 62-68, 1991.
- MEHTA, P.K. *Concrete in marine environment*. New York: Elsevier Science Publishers, 1991.

- MELLO, U.; PERNAMBUCO, V. *Relatório da pesquisa de arqueologia histórica do forte de Santa Catarina do Cabedelo*. Brasília: IPHAN, 1974.
- MONTEIRO, V. S. C. *História da Fortaleza de Santa Catarina*. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 1972.
- MORENO, D. C. *Livro que dá Razão do Estado do Brasil* [1612]. Edição crítica, com introdução e notas de Hélio Vianna. Recife: Arquivo Público Estadual, 1955.
- MUNSELL SOIL COLOR CHARTS. Maryland: Macbeth Division of Kollmorgen instruments corporation, 1988.
- OLIVEIRA, M.M de. *Tecnologia da conservação e restauro: materiais e estruturas: um roteiro de estudos*. 4. ed. rev. e ampl. Salvador: PPGAU/EDUFBA, 2011.
- PAULO JONES. *Paredes de alvenaria de pedra*. Disponível em: <www.paulojones.com/tecnicas/pedra.htm>. Acesso em: 20 mai. 2012.
- PERINET, G.; CONTENSON, H.; COURTOIS, L. Etude mineralogique de vaisselles blanches de Ras-Shamra et Tell Ramad (Syrie). *Compte Rendu Acad. Sci.*, Paris, p.143-144,1980.
- PORTAL DO CDP. *Dilapidação*. Disponível em: <www.portalcdp.com.br>. Acesso em: 20 mai. 2012.
- PURDON, A. O. The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, n.59, p.191-202, 1940.
- ROY, D. M. Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, n.29, p.249-254, 1999.
- ROY, D.M.; LANGTON, C. A. *Studies of ancient concretes as analogs of cementitious sealing materials for repository in tuff*. Los Angeles: Los Alamos Nacional Laboratory, 1989.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, n. 23, p. 441- 454, 2001.
- SANTIAGO, Cybèle Celestino. *Aditivos orgânicos em argamassas antigas*. 128f. 1991. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo/Conservação e Restauração)-Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1991.
- SANTIAGO, Cybèle Celestino. *Argamassas tradicionais de cal*. Salvador: EDUFBA, 2007.
- SHI, Caijun; DAY, Robert. Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, n.23, p.1.389-1.396,1993.
- SILVA, P. F. A. *Concreto Projetado para Túneis*. São Paulo: PINI, 1997.
- TEICHERT, P. *Action And Placing Of Ecologically: shotcrete*. Paper presented at the 5th on Shotcrete Tecnology, Innsbruck, Austria, IGLS, Jan. 1996.
- TEICHERT, P.; AKELEY, Carl. *A Tribute to the Founder of Shotcrete*. New York: American Shotcrete Association, 2002.
- TEIXEIRA, A. H. Seis casos de túneis urbanos com revestimento em concreto projetado armado com fibras. In: SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS. São Paulo: ABGE, 1999.

TORGAL, F.P.; GOMES, J.P.; JALALI, Said. Alkali activated binders: a review Part 3: Properties and durability. *Construction and Building Materials*, 2007.

TORRACA, G. Porous Building Materials. *Science for Architectural Conservation*, Roma, Italy, ICCROM, 1982.

TRANSLADOS E CORRESPONDÊNCIAS OFICIAL DO CONVENTO DO CARMO DO RECIFE 1819 a 1874.

TRIUNFO. Mármore e Granitos de qualidade. Disponível em: <http://www.grupocomelli.com/triunfo/?page_id=13>. Acesso em: 20 mai. 2012.

UNIMIM SOUTH AMÉRICA. Disponível em: <<http://www.unimin.com.br>>. Acesso em: 20 mai. 2012.

VARELA, Noel; VIEIRA, F.S. Cimento: uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 1., 2005, Lisboa. *Anais...* Lisboa: APFAC, 2005.

VEIGA, M.R.; AGUIAR J.; SANTOS, SILVA A.; CARVALHO, F. Methodologies for characterization and repair of mortars of ancient buildings. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON HISTORICAL CONSTRUCTIONS, 3., Guimarães, Portugal, 2001. *Proceedings...* Guimarães, 2001. p. 362.

VILLELA, Clarissa. *Artes e ofícios: a cantaria mineira*. Portal Vitruvius, arquitextos 041, out. 2003.

WIKIPÉDIA. *Laterita*. Flórida: Wikimedia Foundation, 2013. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Laterita&oldid=34815485>>. Acesso em: 22 out. 2013.

YIP, C. K.; DEVENTER, S. J. S. Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, n.38, p.3.851-3.860, 2003.