



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

ANA CRISTIAN ALVES DE MAGALHÃES

**ARGAMASSAS DE CAL COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS:
CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE
FORMULAÇÕES PARA O RESTAURO**

Salvador
2018

ANA CRISTIAN ALVES DE MAGALHÃES

**ARGAMASSAS DE CAL COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS:
CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE
FORMULAÇÕES PARA O RESTAURO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Rosana Muñoz.

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Magalhães, Ana

Argamassa de cal com adições pozolânicas.
Contribuição para o desenvolvimento de formulações para
o restauro. / Ana Magalhães. -- Salvador, 2018.
312 f. : il

Orientador: Mário Mendonça de Oliveira.

Coorientadora: Rosana Muñoz.

Tese (Doutorado - Arquitetura e Urbanismo) --
Universidade Federal da Bahia, Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo, 2018.

1. Argamassa. 2. Cal. 3. Adições. 4. Pozolanas. 5.
Restauro. I. de Oliveira, Mário Mendonça. II. Muñoz,
Rosana. III. Título.



ATA DA SESSÃO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA DOUTORANDA
ANA CRISTIAN ALVES DE MAGALHÃES

Ao trigésimo dia do mês de novembro de dois mil e dezoito, reuniu-se por convocação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, a comissão composta pelos professores doutores Mário Mendonça de Oliveira, Rosana Muñoz, Cybèle Celestino Santiago, Vanessa Silveira Silva, Tatiana Bittencourt Dumet e Helena Carasek Cascudo, sob a presidência do primeiro, na qualidade de orientador da tese, para proceder ao exame do trabalho apresentado pela doutoranda Ana Cristian Alves de Magalhães intitulado **"ARGAMASSAS DE CAL COM ADIÇÕES: CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES PARA O RESTAURO"**.

O ato teve início às 09:00 horas, tendo sido concedido à doutoranda 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 pela candidata.

Concluído o exame, os professores atribuíram as seguintes indicações:

Prof. Dr. Mário Mendonça de Oliveira	APROVADA
Profa. Dra. Rosana Muñoz	APROVADA
Profa. Dra. Cybèle Celestino Santiago	APROVADA
Profa. Dra. Vanessa Silveira Silva	APROVADA
Profa. Dra. Tatiana Bittencourt Dumet	APROVADA
Profa. Dra. Helena Carasek Cascudo	APROVADA

Com o que se julgou a doutoranda APROVADA, sendo recomendado ao Colegiado de Curso deste Programa de Pós-Graduação que seja concedido à **ANA CRISTIAN ALVES DE MAGALHÃES** o grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 30 de novembro de 2018



Mário Mendonça de Oliveira
Orientador
PPG-AU/UFBA



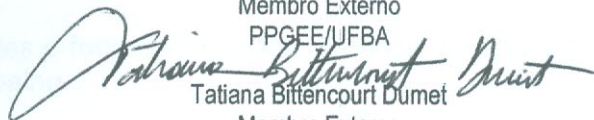
Rosana Muñoz
Coorientadora
PPG-AU/UFBA



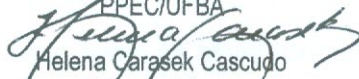
Cybèle Celestino Santiago
Membro Interno
PPG-AU/UFBA



Vanessa Silveira Silva
Membro Externo
PPGEE/UFBA



Tatiana Bittencourt Dumet
Membro Externo
PPEC/UFBA



Helena Carasek Cascudo
Membro Externo
PPG-GECON/UFBA

AGRADECIMENTOS

Finalizada mais esta etapa da vida acadêmica, expresso meus sinceros agradecimentos àqueles que me auxiliaram e incentivaram na conquista deste projeto.

Ao Professor Mário Mendonça de Oliveira, meu orientador, pelo apoio e confiança depositada na realização desta pesquisa e, sobretudo, pelos valiosos ensinamentos durante esses anos de convivência.

À Professora Rosana Muñoz, coorientadora, pela amizade, disponibilidade, estímulo e valiosas sugestões/críticas, que acrescentaram muito à pesquisa.

Às professoras Cybèle Santiago, Vanessa Silva, Tatiana Dumet e Helena Carasek, por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho, pela revisão do texto e por suas valiosas contribuições.

Ao professor Ernande Melo, do Instituto de Geociências da UFBA, pela disponibilização de pessoal e equipamento para a realização de análises de DRX.

Ao professor Luís Edmundo, coordenador do Laboratório de Geotecnia da Politécnica da UFBA, pela disponibilização de Câmara Climática para execução de ensaios.

Ao técnico Paulo César Sant'Anna, do Centro Tecnológico da Argamassa da UFBA, pela disponibilidade e grande apoio na realização de ensaios.

Ao técnico Vilberto Nascimento, do Instituto de Química da UFBA, pela realização de análises de FRX e DRX, e a Erlan Pacheco, doutorando em Engenharia Química, pelo auxílio no tratamento, interpretação e análise dos dados.

Aos técnicos Tenilson Silva e Elias Santos, do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LAMUME), do Instituto de Física da UFBA, pela realização das análises de MEV.

À professora Maria Hermínia, da Escola de Belas Artes da UFBA, por viabilizar a realização dos trabalhos práticos na Igreja de Monserrate, e a seu Milton, pela execução e aplicação das argamassas nos painéis experimentais da igreja.

Ao químico Allard Amaral e à auxiliar de laboratório Alice Santos, pela constante disponibilidade e prontidão na realização de ensaios no NTPR.

A Kércia Ataíde, Manoel Bertino, Letícia Andrade, Mariana Silva e Letícia Frois, graduandos de Arquitetura, pela colaboração no desenvolvimento experimental desta pesquisa.

Aos gestores/administradores das fortificações, que permitiram o acesso para realizar extração de amostras de argamassas.

A todos os fabricantes e fornecedores dos materiais utilizados no desenvolvimento da parte experimental do trabalho.

Aos colegas do NTPR, pelos momentos de convívio profissional e de descontração.

À CAPES, pela bolsa concedida para apoio às atividades essenciais de Doutorado.

Enfim, à minha família e, em especial: aos meus pais, Salvador e Élia, pelo exemplo de vida e ensinamentos de valores como paciência, respeito, confiança e amor ao próximo; ao meu esposo, Luciano, pelo amor, compreensão e incentivo para concluir este trabalho; e ao meu querido Vinícius, por me permitir descobrir forças para ir além do nobre desafio de ser mãe.

RESUMO

O uso de adições minerais em argamassas é conhecido desde a Antiguidade, especialmente quando se desejavam características hidráulicas e de durabilidade nas construções. No Brasil, recomendações sobre a elaboração de formulações com adição de material cerâmico foram constatadas nas descrições de obras de engenheiros militares da época colonial. Na Bahia, também foi registrado o provável emprego desse material nas argamassas de revestimento e assentamento das muralhas de algumas fortificações. Apesar dessas evidências, nota-se, no País, carência de pesquisa aprofundada sobre possíveis adições a incorporar nas formulações destinadas à conservação e ao restauro de edificações do patrimônio histórico nacional. Este trabalho visa investigar o uso de adições minerais, com características pozolânicas e disponíveis nacionalmente, na produção de composições à base de cal, que atendam às exigências para aplicação em intervenções restaurativas de edifícios antigos. A pesquisa compreendeu duas fases. Inicialmente, foi efetuado levantamento bibliográfico e documental sobre as tecnologias tradicionais das argamassas com base em cal (materiais e técnicas de execução), que permitiu análise geral no que diz respeito à incorporação de adições minerais nas misturas de cal. Na segunda fase, realizaram-se procedimentos experimentais, abrangendo duas linhas de estudo: i) conhecimento da composição de argamassas de antigas fortificações, visando à identificação de eventuais adições usadas na sua elaboração; ii) caracterização de formulações de cal, elaboradas com pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa, tendo em vista o cumprimento de requisitos de desempenho para argamassas antigas. Para atingir os objetivos propostos, amostras de argamassas de fortificações foram caracterizadas por meio de análises químicas, físicas e mineralógicas e, além disso, foram elaboradas composições de cal, com as referidas adições, e avaliado o seu comportamento. Os resultados permitiram confirmar a presença de compostos hidratados como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, oriundos das reações de caráter pozolânico em algumas amostras de argamassas antigas estudadas. As composições formuladas com pó cerâmico, sílica ativa e metacaulim apresentaram desempenho global pouco satisfatório quanto às características pretendidas para utilização aplicação em suportes de edifícios antigos. A argamassa de cal com adição de cinzas volantes foi a que se considerou mais adequada à utilização em intervenções em edificações antigas, uma vez que mostrou, no estado endurecido, bom desempenho face à ação da água, boa resistência mecânica, adequada aderência, boa resistência à ação dos sais solúveis, comparativamente às outras argamassas de estudo com adições. Salienta-se a importância desta pesquisa no campo da Conservação e Restauro pelas contribuições geradas, uma vez que permitiu reunir e ampliar conhecimentos sobre a composição de argamassas antigas de cal nacionais e as possíveis alternativas de formulações específicas para intervenções no patrimônio nacional edificado, fundamentadas em critérios que assegurem propriedades de desempenho.

Palavras-chave: Argamassa; Cal; Adições; Pozolanas; Conservação; Restauro.

ABSTRACT

The use of mineral additions in mortar has been known since Antiquity, especially when hydraulic characteristics and durability were desired in construction. In Brazil, recommendations about the elaboration of formulations with ceramic material additives had been found in work descriptions of military engineers during the Colonial period. Also, in Bahia, the likely application of this material in mortar coating and in wall laying was recorded in some military fortification walls. Despite of these evidences, in Brazil, the lack of deepening research about possible additions to be incorporated in formulations in order to apply in the national building heritage conservation and restoration has been noticed. This thesis aims to investigate the use of mineral additions, with pozzolanic features and nationally available, in the production of lime-based compositions that respond to the heritage building restoration intervention requirements. The research was developed in two phases. Firstly, bibliographical and documental survey about traditional lime-based mortar technologies (materials and techniques) was collected, allowing a general analysis about the incorporation of mineral additions in lime mixtures. In the second phase, experimental procedures have been realized, covering two lines of study: i) the study of mortar compositions in ancient fortifications, aiming the identification of eventual additives used in its elaboration; ii) characterization of lime formulations, made of ceramic powder, metakaolin, fly ash and active silica, considering the fulfillment of requirements to historical mortar performance. In order to achieve the purpose of this research, mortar samples of fortifications were characterized by chemical, physical and mineralogical analyses, besides that, lime compounds with the pointed additives were elaborated, having its behavior evaluated. The results confirmed the presence of hydrated compounds as hydrated calcium silicates and aluminates originated from pozzolanic reactions in some of the studied ancient mortar samples. The compositions formulated with ceramic powder, active silica and metakaolin demonstrated an unsatisfactory performance concerning the intended features for the use and application in historical building supports. The lime mortar with fly ash additives was considered the most adequate to be used in historical building interventions, since it has shown, in the hardened state, a satisfactory performance to the effects of water, a satisfactory mechanical resistance, an adequate adherence and a great resistance to soluble salts, comparing to other studied mortars with additions. The importance of this research in the Conservation and Restoration field is emphasized by the contributions produced, since this thesis reunited and enhanced the knowledge about historical Brazilian lime mortar and possible alternatives of specific formulations to be used in the national building heritage, based on specifications that ensure its performance properties.

Keywords: Mortar; Lime; Additions; Pozzolan; Conservation; Restoration.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação da pesquisa desenvolvida	33
Quadro 2 – Antigas formulações com utilização de pó cerâmico	46
Quadro 3 – Resumo das dosagens das formulações antigas com pó cerâmico	47
Quadro 4 – Comportamento mecânico e à ação da água de argamassas com pó cerâmico	54
Quadro 5 – Compostos possíveis de serem formados na atividade pozolânica	69
Quadro 6 – Requisitos técnicos para argamassas, por grau de importância	75
Quadro 7 – Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos	77
Quadro 8 – Identificação das amostras dos fortes e dos locais de extração	80
Quadro 9 – Estudo da composição das argamassas dos fortes	83
Quadro 10 – Composição mineralógica das argamassas dos fortes	92
Quadro 11 – Variação de massa por intervalo de temperatura	94
Quadro 12 – Amostras com fortes indícios de adição de pó cerâmico	97
Quadro 13 – Principais fornecedores da matéria-prima utilizada na pesquisa	102
Quadro 14 – Ensaio de caracterização das matérias-primas	105
Quadro 15 – Massa unitária das matérias-primas	107
Quadro 16 – Massa específica das matérias-primas	108
Quadro 17 – Classificação do agregado em função do módulo de finura, segundo a <i>NBR7211</i> (ABNT, 2009)	109
Quadro 18 – Área superficial específica da cal e das adições	115
Quadro 19 – Compostos cristalinos identificados nas adições	120
Quadro 20 – Identificação dos compostos por fases presentes nas adições	121
Quadro 21 – Valores mínimos índice atividade pozolânica com a cal, estabelecidos pelas normativas brasileiras	131

Quadro 22 – Avaliação geral das características pozolânicas das adições	136
Quadro 23 – Identificação e traços das argamassas estudadas	139
Quadro 24 – Traços utilizados nas composições de estudo	141
Quadro 25 – Dados das argamassas obtidos no estado fresco	145
Quadro 26 – Quantidade de corpos de prova preparados para ensaio	151
Quadro 27 – Representação esquemática dos painéis experimentais	154
Quadro 28 – Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido	162
Quadro 29 – Fases prováveis de encontrar nas argamassas de cal, com e sem adições	171
Quadro 30 – Pressão parcial de vapor, em função da temperatura	174
Quadro 31 – Análise comparativa das características mecânicas e de comportamento à ação da água, aos 90 dias	197
Quadro 32 – Síntese das fases identificadas nas argamassas estudadas	201
Quadro 33 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar de difusão equivalente	203
Quadro 34 – Classificação das formas de ruptura das argamassas dos painéis da Igreja de Monserrate	208
Quadro 35 – Resultados de resistência potencial de aderência à tração, aos 90 dias	209
Quadro 36 – Análise comparativa das características determinadas na segunda fase. Dados obtidos nos painéis da Igreja de Monserrate	217

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Termas de Pompeia, século I.(a, b)	43
Figura 2 – Rebocos em paredes situadas em locais úmidos (a, b)	43
Figura 3 – Argamassas constituídas com fragmentos de cerâmica, em Pompeia (a, b)	45
Figura 4 – Fortaleza dos Três Reis Magos, em Natal (a, b, c)	49
Figura 5 – Casa da Torre de Garcia D'Ávila, no Litoral Norte da Bahia (a, b, c)	50
Figura 6 – Mapa de localização das fortificações de estudo	79
Figura 7 – Extração das amostras (a, b, c)	81
Figura 8 – Representação esquemática da metodologia de caracterização de argamassas antigas adotada nesta pesquisa	82
Figura 9 – Gráfico da distribuição granulométrica da amostra de argamassa do Forte de Santo Antônio Além do Carmo	89
Figura 10 – Difratoograma da amostra do Forte de Santa Maria	91
Figura 11 – Difratoograma da amostra do Forte do Rio Vermelho	92
Figura 12 – Imagens resultantes das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (a, b)	96
Figura 13 – Imagem da análise de MEV e aspecto do EDS da amostra STM2R (a, b)	97
Figura 14 – Aspecto e coloração das adições estudadas	103
Figura 15 – Ensaio de determinação da massa unitária do material em pó (a, b, c)	106
Figura 16 – Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da <i>NBR 7211</i>	110
Figura 17 – Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da <i>BS 1199</i> e da <i>ASTM C897</i>	111
Figura 18 – Gráfico das curvas granulométricas da cal e das adições	113
Figura 19 – Difratoogramas das adições (a, b, c, d)	119
Figura 20 – Micrografias de partículas de metacaulim, obtidas com microscópio	122

eletrônico de varredura com ampliações de (a) 300x, (b) 1000x e (c) 5000x	
Figura 21 – Micrografias de partículas de pó cerâmico, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de (a) 300x, (b) 1000x e (c) 5000x	122
Figura 22 – Micrografias de partículas de cinzas volantes, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de (a) 300x, (b) 1000x e (c) 5000x	123
Figura 23 – Micrografias de partículas de sílica ativa, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de (a) 300x, (b) 1000x e (c) 5000x	123
Figura 24 – Ensaio de perda ao fogo	125
Figura 25 – Índice de desempenho com cimento (a, b, c, d)	129
Figura 26 – Atividade pozolânica com a cal (a, b)	131
Figura 27 – Ensaio de Chapelle (a, b, c, d)	132
Figura 28 – Mistura dos materiais para produção das argamassas estudadas (a, b, c)	142
Figura 29 – Ensaio de consistência da argamassa de cal e cinzas volantes, experiências com diferentes teores de água (a, b, c)	144
Figura 30 – Ensaio de consistência para diferentes formulações de argamassas (a, b, c)	144
Figura 31 – Perfil reológico das argamassas de estudo ($v=0,1$ mm/s)	146
Figura 32 – Corpos de prova em cura, ainda nos moldes (a, b)	149
Figura 33 – Corpos de prova em cura, em ambientes de laboratório e exterior (a, b)	149
Figura 34 – Aspecto geral dos corpos de prova	150
Figura 35 – Confecção dos protótipos de alvenaria (a, ..., f)	152
Figura 36 – Aspecto final dos protótipos de alvenaria de tijolo maciço	152
Figura 37 – Igreja de Nossa Senhora de Monserrate, em Salvador	153
Figura 38 – Alvenaria da Igreja de Monserrate após remoção do revestimento	155
Figura 39 – Aspecto final da alvenaria depois da aplicação do chapisco (a, b)	156
Figura 40 – Sequência de operações para execução e aplicação de argamassas de revestimento estudadas, na Igreja de Monserrate (a, ..., l)	157
Figura 41 – Aspecto final dos revestimentos aplicados na Igreja de Monserrate.	158

Da esquerda para a direita: 50M-1/3; CA-1/2; 50CV-1/3; 50PC-1/3

Figura 42 – Sequência de operações para aplicação de argamassas de revestimento nas alvenarias, na Igreja de Monserrate (a, b, c, d)	159
Figura 43 – Aspecto final das argamassas de revestimento nas alvenarias. Da esquerda para a direita: 50M-1/3; 50CV-1/3; 50PC-1/3; CA-1/2; 50SA-1/3	159
Figura 44 – Ensaio de determinação da massa específica, índice de vazios e absorção por imersão (a, b)	163
Figura 45 – Ensaio de módulo de elasticidade por meio de ultrassom	165
Figura 46 – Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão (a, b)	167
Figura 47 – Ensaio de absorção de água por capilaridade (a, b)	168
Figura 48 – Ensaio de carbonatação com fenolftaleína (a, b)	169
Figura 49 – Selagem das cápsulas com parafina e introdução no dessecador (a, b, c)	173
Figura 50 – Ensaio de resistência aos cloretos: imersão dos corpos de prova em solução salina (a, b, c)	176
Figura 51 – Ensaio de resistência aos cloretos: umedecimento e secagem em câmara climática (a, b, c)	177
Figura 52 – Ensaio de resistência aos sulfatos: secagem e imersão dos corpos de prova em solução salina (a, b, c)	178
Figura 53 – Ensaio de resistência aos sulfatos: pesagem e secagem após imersão em solução salina (a, b)	179
Figura 54 – Ensaio de resistência de aderência (a, b)	181
Figura 55 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência	181
Figura 56 – Ensaio de esclerômetro de pêndulo (a, b)	183
Figura 57 – Ensaio de permeabilidade à baixa pressão, com tubos de Karsten (a, b)	184
Figura 58 – Alvenarias com argamassas aplicadas: início da exposição natural	185
Figura 59 – Massa específica das argamassas estudadas, aos 90 dias	186
Figura 60 – Porosidade das argamassas, aos 28, 90 e 180 dias	183

Figura 61 – Porosidade, aos 90 dias	189
Figura 62 – Gráfico do Módulo de Elasticidade das argamassas, aos 28, 90, 180 e 365 dias	190
Figura 63 – Gráfico da resistência à tração na flexão, aos 28, 90, 180 e 365 dias	191
Figura 64 – Gráfico da resistência à compressão, aos 28, 90, 180 e 365 dias	191
Figura 65 – Gráfico do quociente entre as resistências mecânicas das argamassas	192
Figura 66 – Gráfico do coeficiente de capilaridade, aos 5 minutos, nas idades de 28, 90 e 180 dias	193
Figura 67 – Gráfico do coeficiente de capilaridade, entre 10 e 90 minutos, nas idades de 28, 90 e 180 dias	194
Figura 68 – Gráfico da absorção e secagem das argamassas, aos 180 dias	195
Figura 69 – Gráfico da análise comparativa de área carbonatada ao longo do tempo	199
Figura 70 – Gráfico da variação média de massa no ensaio de resistência aos cloretos	204
Figura 71 – Gráfico da variação de massa no ensaio de resistência aos sulfatos	206
Figura 72 – Resistência de aderência e coeficientes de variação, aos 90 dias	201
Figura 73 – Ensaio com tubos de Karsten nos painéis experimentais da igreja	212
Figura 74 – Aspecto geral dos painéis experimentais, aos seis meses (a, b)	213
Figura 75 – Pormenor do painel argamassa de pó cerâmico, aos 6 meses	214
Figura 76 – Composições estudadas, em exposição natural, aos 6 meses	215
Figura 77 – Composições estudadas, em exposição natural, aos 9 meses	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas	78
Tabela 2 – Caracterização das amostras de argamassas extraídas dos fortes	88
Tabela 3 – Principais elementos obtidos nas amostras por meio de FRX (%)	90
Tabela 4 – Principais compostos presentes nas amostras obtidos por meio de FRX (%)	90
Tabela 5 – Valores de perdas de massa das argamassas de estudo (%)	95
Tabela 6 – Análise granulométrica da areia de estudo	110
Tabela 7 – Dados granulométricos percentuais e partículas inferiores a 45 µm	113
Tabela 8 – Análise química por fluorescência de raios X das adições (%)	117
Tabela 9 – Valores mínimos de perda ao fogo, para materiais pozolânicos, estabelecidos por normativas nacionais	124
Tabela 10 – Valores mínimos de teor de umidade, para materiais pozolânicos, estabelecidos por normativas nacionais	126
Tabela 11 – Valores mínimos de resíduo na peneira 45 µm, para materiais pozolânicos, conforme normativas nacionais	127
Tabela 12 – Resultados de perda ao fogo, umidade e resíduo na peneira 45 µm	127
Tabela 13 – Valores mínimos de índice desempenho com cimento, estabelecidos pelas normativas brasileiras	130
Tabela 14 – Resultados de atividade pozolânica	133
Tabela 15 – Composição química das argamassas, aos 90 dias	200
Tabela 16 – Cloretos retidos e variação de massa por ação de cloretos	204
Tabela 17 – Variação de massa por ação de sulfatos	205
Tabela 18 – Resultados do ensaio de esclerômetro de pêndulo nos painéis da Igreja de Monserrate	211
Tabela 19 – Análise comparativa das características determinadas na primeira fase	216
Tabela 20 – Análise comparativa das características determinadas na segunda fase. Dados obtidos em laboratório	216
Tabela 21 – Avaliação geral das características das argamassas estudadas	221

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
ATG – Análise Termogravimétrica
BET – Brunauer, Emmett, Teller
CA – Cal Aérea
CATAM – Catálise e Meio Ambiente
CETA – Centro Tecnológico da Argamassa
CETENE – Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste
CH – Hidróxido de Cálcio
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado
CSTB – Centre Scientifique et Technique du Batiment
CSTC – Centre Scientifique et Technique de la Construction
CV – Cinza Volante
CVar – Coeficiente de Variação
DMC – Dimensão Máxima Característica
DRX – Difractometria de Raios X
DTG – Análise Termogravimétrica Derivada
EDS – Espectrômetro de Dispersão de Energia
EN – Norma Europeia
FRX – Fluorescência de Raios X
IAP – Índice de Atividade Pozolânica
ICCD – International Centre for Diffraction Data
IE – Índice Esclerométrico
IPQ – Instituto Português da Qualidade
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISI – Indian Standards Institution
LAMUME – Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica
LCM – Laboratório de Caracterização de Materiais
M – Metacaulim
MEV – Microscopia Eletrônica/Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul

NTPR – Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração

PC – Pó cerâmico

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Experts des Matériaux*

SA – Sílica Ativa

Sd – Espessura da camada de ar equivalente

TG – Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVOS	22
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 ESTRUTURA DA TESE	26
2 METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA	28
2.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
2.1.1 Primeira etapa: revisão da literatura	28
2.1.2 Segunda etapa: estudo experimental	30
2.1.3 Terceira etapa: análise e interpretação dos dados	31
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	32
3 REVISÃO DA LITERATURA	35
3.1 OS MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ANTIGAS ARGAMASSAS DE CAL	35
3.2 HISTÓRICO DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS ARGAMASSAS DE CAL	39
3.3 ALGUMAS REFLEXÕES SOBRE AS REAÇÕES POZOLÂNICAS	51
3.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS DE UTILIZAÇÃO MAIS RECENTE	52
3.4.1 Pó cerâmico	53
3.4.2 Metacaulim	55
3.4.3 Cinzas Volantes	60
3.4.4 Sílica Ativa	64
3.5 REAÇÕES POZOLÂNICAS ENTRE A CAL E AS ADIÇÕES	67
3.5.1 Produtos de reação	68

3.5.2 Atividade pozolânica	71
3.6 REQUISITOS DAS ARGAMASSAS DESTINADAS AO RESTAURO	73
4 ESTUDO EXPERIMENTAL COM ARGAMASSAS ANTIGAS	79
4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE	81
4.1.1 Determinação do traço e análise da granulometria	83
4.1.2 Análise por Fluorescência de Raios X (FRX)	84
4.1.3 Análise por Difratomia de Raios X (DRX)	84
4.1.4 Análise termogravimétrica	85
4.1.5 Observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	86
4.2 RESULTADOS E ANÁLISES	87
4.2.1 Determinação do traço e análise granulométrica	87
4.2.2 Análise por Fluorescência de Raios X	89
4.2.3 Análise mineralógica por Difração de Raios X	91
4.2.4 Análise termogravimétrica (TG/DTG)	94
4.2.5 Observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS	96
5 ESTUDO EXPERIMENTAL COM NOVAS FORMULAÇÕES	99
5.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS	99
5.2 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	101
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS QUE COMPÕEM AS ARGAMASSAS	103
5.3.1 Massa unitária	105
5.3.2 Massa específica	107
5.3.3 Composição granulométrica da areia	108
5.3.4 Distribuição granulométrica por difração a <i>laser</i> da cal e das adições	112
5.3.5 Área superficial específica da cal e das adições	115

5.3.6 Análises complementares	116
5.3.6.1 <i>Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)</i>	116
5.3.6.2 <i>Composição mineralógica por Difratometria de Raios X (DRX)</i>	118
5.3.6.3 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	121
5.3.7 Perda ao fogo, teor de umidade e resíduo na peneira 45 µm	124
5.3.7.1 <i>Perda ao fogo</i>	124
5.3.7.2 <i>Teor de umidade</i>	125
5.3.7.3 <i>Resíduo na peneira 45 µm</i>	126
5.3.8 Atividade pozolânica com o cimento, com a cal e ensaio de Chapelle	129
5.3.8.1 <i>Índice de desempenho com cimento</i>	129
5.3.8.2 <i>Atividade pozolânica com a cal</i>	130
5.3.8.3 <i>Método de Chapelle modificado</i>	132
5.3.8.4 <i>Resultados de atividade pozolânica</i>	133
5.3.9 Considerações gerais sobre as adições utilizadas	135
5.4 PROPORÇÕES ENTRE OS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	138
5.5 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	142
5.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	143
5.7 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	148
5.8 APLICAÇÃO DE ARGAMASSAS EM PAINÉIS DE PAREDE	153
5.9 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	160
5.9.1 Primeira fase de caracterização	163
5.9.1.1 <i>Massa específica</i>	163
5.9.1.2 <i>Porosidade aberta</i>	164
5.9.1.3 <i>Módulo de Elasticidade</i>	164
5.9.1.4 <i>Resistência à tração na flexão e à compressão</i>	165
5.9.1.5 <i>Absorção de água por capilaridade</i>	167

5.9.2 Segunda fase de caracterização	168
5.9.2.1 <i>Evolução da carbonatação</i>	169
5.9.2.2 <i>Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X</i>	170
5.9.2.3 <i>Permeabilidade ao vapor</i>	171
5.9.2.4 <i>Resistência aos cloretos</i>	175
5.9.2.5 <i>Resistência aos sulfatos</i>	178
5.9.2.6 <i>Resistência de aderência à tração</i>	179
5.9.2.7 <i>Esclerômetro de pêndulo</i>	182
5.9.2.8 <i>Permeabilidade à água sob baixa pressão (método do cachimbo)</i>	183
5.9.2.9 <i>Exposição natural: avaliação das características visuais</i>	184
5.9.3 Resultados dos ensaios da primeira fase	185
5.9.3.1 <i>Massa específica</i>	185
5.9.3.2 <i>Porosidade aberta</i>	186
5.9.3.3 <i>Módulo de Elasticidade</i>	189
5.9.3.4 <i>Resistência à tração na flexão e à compressão</i>	191
5.9.3.5 <i>Absorção de água por capilaridade</i>	193
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	196
6.1 ARGAMASSAS FORMULADAS E OS REQUISITOS DE LITERATURA	196
6.2 ARGAMASSAS COM ADIÇÕES E A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA	198
6.2.1 Resultados dos ensaios da segunda fase	199
6.2.1.1 <i>Evolução da carbonatação</i>	199
6.2.1.2 <i>Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X</i>	200
6.2.1.3 <i>Permeabilidade ao vapor</i>	203
6.2.1.4 <i>Resistência aos cloretos</i>	204
6.2.1.5 <i>Resistência aos sulfatos</i>	205

<i>6.2.1.6 Resistência de aderência</i>	206
<i>6.2.1.7 Esclerômetro de pêndulo</i>	211
<i>6.2.1.8 Permeabilidade à água sob baixa pressão</i>	212
<i>6.2.1.9 Exposição natural: avaliação das características visuais</i>	213
6.2.2 Análises comparativas	215
6.2.3 Análise global das argamassas estudadas	221
7 CONCLUSÕES	222
REFERÊNCIAS	232
APÊNDICES	247
ANEXOS	307

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos desempenham relevante papel na durabilidade das alvenarias de edifícios. No entanto, por serem elementos construtivos mais expostos às ações agressivas de naturezas diversas, estão muito suscetíveis à degradação, o que faz com que demandem frequentes intervenções de manutenção e de conservação.

Em Salvador, cidade que apresenta rico patrimônio histórico, artístico e cultural, no qual subsistem diversas construções erguidas ainda no Período Colonial, a elevada quantidade de edificações antigas com revestimentos, interiores ou de fachadas, com danos, reflete, muitas vezes, dificuldades de encontrar soluções para reintegração ou substituição nas alvenarias, de certo valor histórico, tendo em conta, entre outros aspectos, as especificidades climáticas da região.

Em outra perspectiva, a existência de fortificações da Época Colonial, na cidade de Salvador, que conservam ainda em suas alvenarias argamassas originais e que têm resistido, por todos esses séculos, às condições particularmente úmidas características da região marítima soteropolitana, atesta que as soluções adotadas pelos antigos seguiam critérios específicos para seleção de materiais e execução das argamassas de revestimento. Em algumas dessas fortificações, o legado deixado pelos engenheiros militares portugueses inclui a utilização da cerâmica moída na composição das argamassas de cal, como constatado por Oliveira (2004), fato que pode justificar o bom estado de conservação das argamassas até os dias de hoje.

Os materiais e as tecnologias de execução das argamassas empregadas pelos antigos continuam suscitando interesse de investigadores. É conhecido que, por meio da seleção cuidadosa dos materiais e do domínio da tecnologia de preparação e aplicação, os antigos produziam argamassas de elevada durabilidade. Adições como as pozolanas, naturais e artificiais, foram extensivamente utilizadas nas composições de cal de edificações, desde a antiguidade, sobretudo, pelos povos sob a influência dos romanos, com o intuito de conferir propriedades de resistência, além de função impermeabilizante (MALINOWSKI, 1982; BARONIO et al., 1997; BAKOLAS et al., 1998; MOROPOULOU et al., 2006). Com esse mesmo fim, o pó cerâmico, considerado como uma pozolana artificial, foi muito usado entre os antigos

construtores, quando na região não se dispunha de pozolana natural.

Para além de Salvador, outras cidades brasileiras detêm construções que ainda conservam argamassas de revestimentos do Período Colonial, e a preocupação com as novas formulações de argamassas a serem usadas na conservação tem ganhado, cada vez mais, relevância nos meios técnico, profissional e científico, como é possível observar a partir das pesquisas nacionais, que tem surgido nessa área, com destaque para as contribuições trazidas por diversos autores (OLIVEIRA; BARRETO, 2006; OLIVEIRA; MELO, 2007; OLIVEIRA, 2008; JAPIASSÚ, 2011; JAPIASSÚ et al., 2013; SOUZA, 2013; SOUZA et al., 2013).

Nas intervenções de conservação, é fundamental para a preservação do patrimônio histórico nacional, dispor de formulações de cal compatíveis com a alvenaria antiga, que se mostrem mais resistentes que as soluções atualmente adotadas para condições climáticas e ambientais, específicas, como as das regiões de Salvador.

Se por um lado, a investigação aprofundada sobre a existência do pó cerâmico nas argamassas de fortificações baianas, em especial aquelas que estão submetidas a condições específicas de presença de umidade constante, pode confirmar a sua durabilidade, justificando a opção por essa adição para atender casos similares em alvenarias antigas; por outro, ampliar o conhecimento sobre adições de uso mais recente, testadas e recomendadas em âmbito nacional ou internacional, validando o seu uso à luz das características particulares das matérias-primas produzidas nacionalmente e das especificidades das condições climáticas e ambientais brasileiras, irá ampliar o leque de possibilidades de formulações de quando se fazem necessárias as reparações pontuais ou substituição dos revestimentos originais.

Diante das variadas possibilidades de materiais a incorporar, como adições pozolânicas, será importante estudar aqueles com disponibilidade comercial e outros, menos disponíveis, mas que ainda poderão ter interesse regional. As novas formulações devem respeitar requisitos mínimos de desempenho indicativos de compatibilidade (funcionais, de aspecto e de comportamento futuro) com suportes antigos. Neste estudo, tem também relevância o enfoque sobre as técnicas de preparação e aplicação, as condições climáticas e de cura e a preparação do suporte, uma vez que não somente as características dos materiais influenciam o comportamento, a durabilidade e, em geral, a qualidade do revestimento.

Salienta-se a importância desta pesquisa no campo da Conservação e Restauro pelas contribuições geradas, entre as quais se destacam a sistematização de informações sobre tecnologias tradicionais de elaboração de argamassas de cal com incorporação de adições e o desenvolvimento de novas formulações destinadas ao restauro, fundamentadas em critérios que assegurem propriedades de desempenho.

1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa compreende duas linhas de estudo na temática de argamassas de cal com adições: i) análise da composição de argamassas antigas de fortes localizados em Salvador, com vistas à identificação de eventuais adições que tenham sido usadas na sua confecção; e ii) elaboração de novas argamassas com adições minerais, destinadas ao restauro.

Dessa forma, foram estabelecidos dois **objetivos gerais**:

- Identificar se foram utilizadas adições minerais nas argamassas empregadas na construção de fortes de Salvador;
- Propor formulações de argamassas de cal, com adições de características pozolânicas, que atendam aos requisitos mínimos de referência e, em conformidade, apontar qual (is) dela(s) apresenta(m) melhor desempenho mecânico, de comportamento à ação da água e aos sais.

Foram estudadas adições que proporcionassem melhor desempenho às argamassas de cal, no que se refere ao comportamento mecânico e às características de absorção de água. Entre os materiais selecionados, destacaram-se aqueles com características pozolânicas, ou seja, que, quando adicionados nas misturas de cal, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos que conferem às composições, as propriedades mencionadas. Entre as adições estudadas incluíram-se a cerâmica moída, o metacaulim, as cinzas volantes e a sílica ativa. Desses, caracterizam-se como subprodutos industriais: o pó cerâmico, as cinzas volantes e a sílica ativa. Excluindo o pó cerâmico, os demais são materiais disponíveis para comercialização no mercado da construção civil do Brasil, e que são utilizados na produção de cimento ou de concreto.

Os **objetivos específicos** do trabalho são apresentados a seguir:

- Sistematizar informações sobre antigas formulações de argamassas de cal, para revestimentos de alvenarias, a partir da leitura de antigos tratados de práticas de construção;
- Identificar fortificações da época colonial, em que foram utilizadas adições nas argamassas de revestimento e/ou levantamento de paredes, por meio da análise da composição de amostras extraídas de antigas edificações;
- Compilar informações sobre adições minerais, em especial aquelas com características pozolânicas, produzidas nacionalmente, selecioná-las e caracterizá-las com fins da sua incorporação em argamassas de cal destinadas ao restauro;
- Conhecer aspectos relativos às reações pozolânicas, assim como os fatores que as influenciam e afetam o comportamento das argamassas;
- Sistematizar informações sobre os requisitos de desempenho para argamassas de revestimento, a serem aplicadas sobre paredes antigas;
- Selecionar e produzir formulações com base em cal e adições, visando avaliar seu desempenho e fazer análise comparativa com os parâmetros de referência estabelecidos na literatura;
- Indicar possíveis formulações de argamassas a serem usadas em antigas edificações, que cumprem critérios de compatibilidade, funcionais, de aspecto e de comportamento em longo prazo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa do presente trabalho baseia-se, fundamentalmente, em sete aspectos, a saber:

1) Experiência prática da autora

O interesse pelo objeto da tese advém da larga experiência e envolvimento da autora em atividades e trabalhos científicos relacionados às argamassas de revestimento de paredes de edifícios antigos, o que conduziu à sua capacitação teórica e prática no tema. Em paralelo, a satisfação de se debruçar sobre assunto tão relevante para a Ciência e Tecnologia da Conservação serviu de estímulo para continuar a aprofundar e sistematizar conhecimentos nesse domínio, que constituem base necessária para a conservação de edifícios do patrimônio nacional edificado, favorecendo o avanço científico do tema no País.

Adicionalmente, a autora sentiu-se encorajada a aprofundar estudos preliminares, realizados no Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração, em duas linhas distintas: i) constatação do uso do pó cerâmico em algumas argamassas antigas de fortificações baianas e ii) verificação de características de desempenho apropriadas, das argamassas de cal aérea e pó cerâmico, para possível aplicação em suportes antigos. Nesse sentido, a autora viu a necessidade de ampliar o conhecimento, tanto no aspecto da composição das argamassas hidráulicas antigas e como nas questões sobre potencialidades de composições formuladas com base em cal aérea e adições minerais, disponíveis atualmente no país.

2) Critérios de intervenção pouco consolidados

A prática da intervenção em edifícios no Brasil, especialmente no que tange à adoção de soluções adequadas à aplicação de argamassas em paredes antigas, é ainda guiada por critérios técnicos pouco consolidados e pela ausência de preocupação com requisitos de desempenho específicos, aspectos que podem contribuir para a aceleração da degradação ou mesmo para a descaracterização e redução da durabilidade do edifício.

3) Carência de produtos nacionais e alto custo dos importados

Apesar da clara preocupação, em muitos países europeus, pelo estudo e desenvolvimento de argamassas específicas, destinadas ao uso no restauro, no mercado brasileiro existe certa carência de formulações, sendo, muitas vezes, recurso habitual utilizar produtos comercializados, patenteados internacionalmente, com custo de aquisição elevado.

A opção por determinado revestimento deve ser analisada ainda conforme as disponibilidades de materiais locais. No Brasil, embora tenha sido constatado o uso de adições minerais em argamassas de cal, desde a época do Período Colonial, sobretudo, do pó cerâmico, a incorporação desses materiais em formulações de restauro foi ainda muito pouco explorada. Grande parte dos estudos versa sobre argamassas à base de cimento, sendo incipientes os trabalhos que abordam a aplicação de adições minerais em argamassas de cal. Muitas vezes as soluções com argamassas de cimento (devido ao elevado módulo de elasticidade e ao seu conteúdo de sais solúveis) não são as mais adequadas, constituindo promissora a adoção de argamassas formuladas com cal aérea e adições com características pozolânicas.

4) Insuficiente capacitação profissional

Notam-se, na área acadêmica, poucas iniciativas de capacitação de profissionais na área da Ciência dos Materiais, especificamente, voltadas para o domínio das práticas construtivas antigas e de toda tecnologia envolvida na produção de materiais com bom desempenho. O desenvolvimento desta pesquisa representa, assim, incentivo importante para qualificação acadêmica e exercício profissional dos envolvidos com a temática da Conservação e do Restauro.

5) Aporte científico nas intervenções práticas de restauro

O estudo suscita ainda interesse não só pelo aporte científico, mas também pela sua aplicabilidade, como ferramenta de apoio às ações de intervenções restaurativas de bens de interesse histórico nacional, incluindo entre os principais beneficiados, os agentes atuantes do patrimônio edificado: empresas, profissionais da área de conservação e os próprios órgãos fiscalizadores e incentivadores da preservação.

6) Contribuição para a conservação e restauro do Patrimônio Nacional

Aprimorar o estado de conhecimento sobre os materiais que entram na composição das argamassas antigas, em especial, no que se refere àquelas com utilização de adições, e sobre as técnicas tradicionais de confecção e aplicação, pode evitar intervenções desastrosas que acarretam, muitas vezes, perda de informações sobre os edifícios de importância histórica e cultural. Aliado a isto, o recurso às novas tecnologias de produção deve colaborar para o desenvolvimento e a adoção de possíveis alternativas de formulações de argamassas de cal adequadas às ações de conservação e restauro do Patrimônio Nacional edificado.

De modo geral, ampliar a compreensão sobre as possíveis alternativas de materiais pozolânicos a usar no país, suas propriedades, melhor proporção da mistura, formas de preparo e seu comportamento no tempo, servirá de subsídio para as recomendações de intervenção. Além disso, no aspecto cultural, o estudo, em sua abordagem científica, contribuirá para o resgate da memória da ciência da construção antiga no Brasil e das raízes europeias que a influenciaram.

7) Incentivo às ações sustentáveis

Um dos principais benefícios esperados deste estudo relaciona-se ainda com a adoção de práticas de construção sustentáveis, já que a incorporação de adições minerais em argamassas de cal, por meio do emprego de resíduos oriundos de desperdício ou de subprodutos que resultem de processos industriais no setor da

construção (material cerâmico moído, cinzas volantes, sílica ativa) permitirá contribuir para a redução do impacto ambiental associado à destinação final do resíduo.

Diante do exposto, este trabalho, que tem como objeto central as argamassas de cal com adições destinadas ao restauro, insere-se na Linha de Pesquisa Ciência e Tecnologia da Conservação e do Restauro, do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal da Bahia, que trata, fundamentalmente, do estudo de matéria de interesse cultural, procurando o prolongamento da sua integridade, por meio de corretas intervenções de conservação ou, em último caso, de restauração.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em sete capítulos. No primeiro, de caráter introdutório, incluem-se os objetivos, os argumentos que justificam a escolha do tema e a estrutura do documento.

No segundo capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos que guiaram o desenvolvimento do estudo. Nele são abordadas as etapas: de revisão da literatura, do estudo experimental e da análise e interpretação dos dados.

No terceiro capítulo, intitulado Revisão da Literatura, são elencadas as bases teóricas do tema de pesquisa, apoiadas em cinco abordagens: materiais constituintes das antigas argamassas de cal; histórico das adições pozolânicas nas argamassas de cal; adições pozolânicas de utilização mais recente; reações pozolânicas e requisitos das argamassas destinadas a restauro.

No quarto capítulo, dedicado à análise experimental de argamassas antigas, é apresentada e aplicada metodologia de caracterização, utilizando técnicas químicas, físicas, térmicas e microestruturais; são também incluídos os resultados dessas análises.

No capítulo quinto, é apresentado programa experimental com identificação das formulações de argamassas para estudo. São detalhados aspectos relativos aos materiais usados na execução das misturas: seleção, obtenção e preparação e caracterização; e às argamassas confeccionadas: proporções entre os constituintes, produção, moldagem e cura dos corpos de prova, além da aplicação em painéis de parede e protótipos de alvenarias. Ainda nesse capítulo, são expostos os resultados

dos ensaios de caracterização das argamassas efetuados nos estados fresco e endurecido.

O capítulo sexto – Análise dos resultados – é dedicado à análise e interpretação dos dados obtidos nos ensaios.

No sétimo capítulo, são apresentadas as Conclusões e algumas sugestões de temas para o desenvolvimento de novos trabalhos na área.

Ao final, são apresentadas as Referências da bibliografia consultada, os Apêndices e o Anexo, que serviram de fundamentação para o desenvolvimento desta tese.

2 METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, inicialmente, foi levantado o problema, e formulada como questão central, ligada ao segundo objetivo: qual(ais) argamassa(s) com adições conferem características de desempenho em relação aos requisitos de referência estabelecidos para as argamassas de restauro?

No item a seguir, serão abordados procedimentos metodológicos utilizados para responder a questão central que estrutura o desenvolvimento deste trabalho de investigação.

2.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para alcançar os objetivos propostos, desenvolveu-se pesquisa experimental, de caráter exploratório, contemplando duas vertentes: a) o estudo de amostras de argamassas retiradas de fortificações antigas e b) elaboração e análise de formulações novas à base de cal com adições. Assim, a pesquisa foi segmentada em três etapas: a primeira, de revisão da literatura, a segunda de realização de estudo experimental e a terceira de análise e interpretação dos resultados.

2.1.1 Primeira etapa: revisão da literatura

A etapa de revisão bibliográfica é dividida em duas fases. A primeira fase compreende o conhecimento do problema de pesquisa por meio de leituras sobre o tema. Foi feita revisão bibliográfica sobre as fortificações de Salvador em livros raros, revistas e artigos, tendo sido usadas, ainda, como fonte de consulta, as publicações sobre materiais e técnicas de construção antigas, especificamente as argamassas de cal e técnicas de execução, adições minerais, pozolanas, reações pozolânicas e argamassas para restauro. De modo geral, a consulta foi feita em manuais de construção, tratados de Arquitetura, traduções dos livros vitruvianos, além de publicações diversas, antigas e recentes, sobre a arte de construir, disponíveis nas Bibliotecas da Universidade Federal da Bahia, principalmente as da Faculdade de Arquitetura e da Escola Politécnica, na base de dados *online* da Biblioteca Nacional de França (BNF), de revistas científicas internacionais,

dissertações de mestrado e teses de doutorado disponíveis *online*.

No que tange aos materiais e técnicas tradicionais de construção, modo de preparo e de confecção de argamassas, foram levantados dados sobre as primeiras construções coloniais brasileiras. Para o efeito, buscaram-se informações em fontes primárias do Brasil existentes no Arquivo Histórico Ultramarino, em arquivos do Itamaraty, em acervos raros da Biblioteca Nacional, no Arquivo Público do Estado da Bahia, no Arquivo Municipal de Salvador, entre outros, e, a partir destas pesquisas, foi feito levantamento das construções antigas nas quais, possivelmente, teriam sido usadas tais adições.

Constituíram ainda fontes de consulta o acervo disponível na biblioteca particular do professor Mário Mendonça de Oliveira, coordenador do Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração (NTPR) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), e professor notório saber da UFBA, bem como algumas de suas publicações que incluíram, além de referências a documentos que tratam das antigas práticas construtivas militares, no Brasil, citações dos grandes nomes que contribuíram para a engenharia e arquitetura militar nacional.

No que diz respeito à incorporação de adições minerais em argamassas antigas, faz-se um enquadramento histórico, tendo como referência os primeiros autores que fizeram alusão a esses materiais, como Vitruvio (1998), Plínio, o Antigo (1629); autores do século XIX, que retomaram a execução de tratados sobre a prática da construção, descrevendo o uso dos materiais, bem como os processos construtivos, a exemplo de Rondelet (1834), ou se dedicando ao estudo de ligantes hidráulicos como Vicat (1818, 1837, 1840, 1858) e Smeaton (1791); manuais que fizeram referência ao uso de adições com características pozolânicas por antigas civilizações, como a grega (MARTIN apud OLIVEIRA, 2008). Em complementação, são analisadas as abordagens de autores mais recentes que tratam da história de técnicas tradicionais de confecção de argamassas, à base de cal, e à compilação de formulações antigas, como a de Arcolao (1998) ou daqueles como Faria (2004) e Velosa (2006), entre outros autores, que desenvolveram estudos aprofundados sobre o tema das argamassas de cal com pozolanas, que correspondem às adições que tem maior relevância, uma vez que foram muito comuns no passado.

Na segunda fase, foram efetuadas leituras sobre as adições minerais de natureza pozolânica, com disponibilidade comercial no Brasil, que pudessem ter interesse para o desenvolvimento do estudo. O ponto de partida foi a análise de

informações colhidas na literatura sobre o emprego atual das adições, sob dois pontos de vista: material de substituição parcial do cimento em argamassas e concreto e adição incorporada às formulações de argamassas de cal destinadas a paredes de edifícios antigos.

Por meio do conhecimento adquirido nessa etapa, desenvolveu-se o referencial teórico sobre argamassas de cal tradicionais e com adições, as possíveis construções nacionais em que foram usadas argamassas incorporadas de adições, as adições com características pozolânicas disponíveis no mercado nacional, a forma como se processam as reações pozolânicas com a cal, os fatores que as influenciam e, por fim, os requisitos de desempenho a respeitar pelas novas formulações de cal destinadas ao restauro.

2.1.2 Segunda etapa: estudo experimental

A segunda etapa da pesquisa envolveu estudo experimental e está subdividida em duas partes. A primeira trata de um estudo de argamassas antigas extraídas de fortificações, localizadas na região de Salvador, e a segunda refere-se à elaboração e avaliação de desempenho de novas formulações de argamassas, com base em cal, visando seu emprego no restauro de paredes de edificações antigas.

O estudo das argamassas antigas compreendeu a realização de ensaios de caracterização física (granulometria e determinação do traço provável) e de análises química, térmica e mineralógica, obtidas por Fluorescência de Raios X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX) e observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV); técnicas complementares entre si, que permitem uma interpretação global, ao confirmar ou esclarecer informações relativas aos compostos presentes nas argamassas.

A segunda parte do estudo experimental da pesquisa abrange a elaboração de formulações de argamassas de cal hidratada, incorporadas de adições com características pozolânicas. Para realizar esta parte da pesquisa, foi delineado plano de trabalho, que incluiu:

- Seleção, obtenção, preparação e caracterização dos materiais, utilizando-se, dentro das possibilidades, os mesmos lotes de cal, areia e adições, a fim de evitarem-se problemas oriundos da mudança de lotes;

- Estabelecimento dos traços e cálculo do consumo dos materiais, em massa, para a realização das formulações de estudo, segundo método adotado utilizado no Centro Tecnológico das Argamassas (CETA) da UFBA;
- Definição da relação água / ligante em massa para cada composição. Tais valores são mantidos fixos para todas as composições ao longo de todo o experimento e o índice de consistência é constante para cada formulação;
- Definição das idades de ensaios de caracterização do comportamento mecânico, de comportamento à ação da água, e de resistência aos sais; além das idades de ensaios mais específicos, tais como: FRX, DRX e MEV;
- Confecção dos corpos de prova de argamassa de cal aérea, com e sem adição, para avaliação, por meio de ensaios, das características mecânicas, de comportamento à ação da água e de resistência aos sais, ao longo do tempo;
- Aplicações das argamassas, com melhor comportamento, em parede de alvenaria antiga e em protótipos de alvenaria, com o fim de aferir o seu desempenho face às agressões climáticas e do ambiente, marinho e úmido, característico da região metropolitana de Salvador.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, os ensaios foram realizados na infraestrutura laboratorial do Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração (NTPR) e do Centro Tecnológico da Argamassa (CETA), ambos laboratórios do Departamento de Ciência e Tecnologia de Materiais (DCTM), da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, além de institutos e centros de pesquisa da UFBA, com os quais o NTPR mantém estreita política de colaboração.

2.1.3 Terceira etapa: análise e interpretação dos dados

Nesta etapa, foi adotado, para as duas linhas de estudo, o método comparativo, por meio do qual é possível explicar os fenômenos segundo as diferenças e similaridades entre eles (GIL, 2008). Para isto, foram compilados e analisados os resultados obtidos por meio de análises comparativas.

No que se refere aos resultados do estudo experimental com as argamassas antigas, foram confrontados os dados obtidos nos ensaios de caracterização física, e de análises química, térmica e mineralógica e microestrutural, obtidas com os de referência encontrados na literatura.

Em relação aos resultados do estudo experimental com as novas formulações, os dados foram comparados da seguinte forma:

1) Argamassas de referência e com adições e os requisitos estabelecidos na literatura para argamassas de substituição para aplicação em alvenarias de edifícios antigos;

2) Argamassas com adições e as composições de referência.

Foram desenvolvidos quadros comparativos dos diversos tipos de argamassa, com dados referentes às características gerais de comportamento químico, físico e mecânico, tornando possível confrontar os dados com os conceitos abordados, e extrair conclusões sobre possíveis soluções a adotar, em intervenções de restauro, dentro dos critérios técnicos e críticos de sua aplicação.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Silveira e Córdova (2009), a pesquisa científica pode ser dividida em quatro tipos: quanto à abordagem (qualitativa e quantitativa), à natureza (básica e aplicada), aos objetivos (exploratória, descritiva e explicativa) e aos procedimentos (experimental, bibliográfica, documental, de campo, *ex-post-facto*, de levantamento, com *survey*, estudos de caso, pesquisa participante, pesquisa-ação, etnográfica e etnometodológica).

No APÊNDICE A, estão apresentadas as diversas tipologias de pesquisa, com a descrição sucinta de suas características, fundamentada em diversos autores (FONSECA, 2002; LAKATOS; MARCONI, 2003; GIL, 2008; GERHARDT; SILVEIRA, 2009; SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009). Diante das informações contidas no APÊNDICE A, a presente pesquisa pode ser classificada, segundo as etapas de desenvolvimento, como exposto no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da pesquisa desenvolvida

Tipologia	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
	Revisão da literatura	Estudo experimental	Análise e interpretação dos dados
Quanto à abordagem	Qualitativa	Quantitativa	Qualitativa e quantitativa
Quanto à natureza	–	Aplicada	Aplicada
Quanto aos objetivos	Exploratória	–	Explicativa
Quanto aos procedimentos	Bibliográfica, documental	Experimental	--

Fonte: Elaboração própria (2017).

A primeira etapa da pesquisa, quanto à abordagem, é **qualitativa**, uma vez que foca na compreensão do tema das tecnologias tradicionais e atuais das argamassas com base em cal aérea (materiais e técnicas de execução). É **exploratória**, pois, por meio de levantamento **bibliográfico e documental**, faz-se um exame e dá-se uma visão geral do assunto, no que diz respeito à incorporação de adições minerais nas misturas de cal, matéria amplamente estudada em nível internacional, mas ainda pouco aprofundado no Brasil. Na segunda fase da pesquisa, os procedimentos são de caráter, essencialmente, **experimental**, e a abordagem adotada é **quantitativa**, uma vez que os dados obtidos nos ensaios realizados durante o desenvolvimento da pesquisa são fornecidos, sobretudo, na forma de variáveis numéricas, representativas das características químicas, físicas e mecânicas das argamassas elaborada para o desenvolvimento do estudo. No que se refere à natureza, esta etapa da pesquisa é **aplicada**, tendo em consideração o fato de que gera conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas no Campo da Conservação e Restauro, especificamente, no que diz respeito às novas soluções de argamassas de revestimento para aplicação em paredes de edificações antigas. A análise e interpretação dos dados constituem a terceira e última etapa da pesquisa e compreendem abordagens **qualitativas** e **quantitativas**, dado que a apreciação em conjunto, sob esses aspectos, permite recolher mais informações do que se poderia obter isoladamente para alcançar os objetivos propostos neste estudo. Tendo em conta a natureza **aplicada** desta etapa, o conhecimento real do objeto requer, além da análise e interpretação dos resultados obtidos, descrição detalhada do objeto. Adicionalmente, o caráter **explicativo**, nesta fase, determina a realização de análise comparativa dos dados obtidos (variáveis), para explicar a existência da

relação entre os mesmos e identificar como e em que medida estas variáveis se relacionam entre si e com as informações levantadas na revisão da literatura.

Após estas considerações sobre a metodologia de pesquisa, parte-se, no capítulo seguinte, para o conhecimento do referencial teórico, que embasa e fundamenta posteriores análises dos resultados obtidos nos estudos experimentais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Nas construções antigas, as argamassas de revestimento eram constituídas, fundamentalmente, à base de cal aérea e areia, mas existiam também, como foi dito, aquelas com adições, que eram incorporadas às misturas com o intuito de melhorar certas propriedades e garantir a durabilidade, permitindo que as composições desempenhassem suas funções, principalmente a de proteção das alvenarias.

No Brasil, as mais recentes opções de adição para uso em argamassas com base cimentícia são diversas e têm sido bem exploradas no meio científico nacional, mas está faltando ainda aprofundar o seu uso em argamassas à base de cal destinadas ao restauro.

Este capítulo discorre sobre os principais componentes das argamassas de cal antigas, as adições usadas no passado e as de utilização mais recente; faz uma abordagem sobre as reações pozolânicas e apresenta as exigências a cumprir pelas argamassas de substituição.

3.1 OS MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ANTIGAS ARGAMASSAS DE CAL

As características de desempenho das argamassas antigas dependiam, além da criteriosa seleção das matérias-primas, das técnicas de confecção e de aplicação. Nos tratados, ou manuais de construção consultados, é constante a preocupação dos autores em explicitar recomendações sobre os materiais adequados à construção, seu modo de preparo e de utilização (MATEUS, 2002).

Os mais antigos tratadistas sobre a arte de construir, como Vitrúvio (1998), arquiteto romano do século I a.C., e Plínio (1629), escritor do século I d.C., forneceram descrições sobre qualidades e características dos materiais que entrariam na composição da argamassa. Autores que vieram a seguir demonstraram também esta preocupação, ao ressaltar que a excelência da pasta dependia, entre outros fatores, da qualidade dos materiais, da boa preparação da cal, das experiências locais quanto à definição das proporções das misturas. Em geral, fizeram citações literais das receitas de Vitruvius e Plínio, e nelas fundamentaram-se para propor novas formulações.

Grande parte dos textos analisados faz menção aos diferentes tipos de materiais utilizados na confecção de argamassas, assim como aos cuidados que devem ser observados na preparação antes de sua aplicação. Era consenso, entre os autores antigos, a abordagem de aspectos relativos à areia, cal e adições. Em relação à primeira, três espécies eram utilizadas para a construção: de jazida, de rio ou de mar. Alguns autores divergiam quanto à origem da melhor areia a ser utilizada, mas a maioria concordava que seria a de jazida a mais apropriada.

Vitrúvio (1998), no Capítulo IV de seu Livro II, estabelece que a areia deveria ser extraída de jazidas e estar seca e isenta de sedimentos de terra. Isso é corroborado e ampliado por autores, tais como: Alberti (2009), tratadista do século XV, D'Aviler (1738), do século XVII, Belidor (1832), do século XVIII; entre outros que também mencionam a necessidade de utilizar areias livres de matérias orgânicas e impurezas. Vitrúvio (1998) menciona ainda que a areia de jazida, apesar de ser de ótima qualidade e superior à de rio, não seria, no entanto, a mais adequada para a utilização em rebocos, por originar fissuração, recomendando a de rio como a mais apropriada nesse caso. Alberti (2009) corrobora essa opinião, acrescentando que a areia de rio deveria ser usada nas camadas intermediárias do revestimento, por ser material mais resistente ao aparecimento de fissuras. A areia poderia ser substituída pelo pó de mármore, como propõem Vasari (1986) e Cataneo (1554).

Apesar das recriminações explícitas observadas nos livros publicados até o século XIX, tanto em Portugal quanto no Brasil, o emprego de areias contendo argila foi abundante, conforme relata Santiago (2012). No que diz respeito a esse tema, Veiga et al. (2004) ressaltam que o excesso de argila pode provocar retrações no processo de secagem das argamassas e aumentar, conseqüentemente, a fissuração, reduzindo a durabilidade.

Até meados do século XIX, diferentes tipos de agregados eram usados na composição das argamassas de cal, tanto para o interior como para o exterior dos edifícios. No Brasil, por exemplo, faz-se referência ao uso, durante o Período Colonial, de solo sob a forma de “saibro”¹ (arenoso) nas argamassas, tanto nas casas como nas fortificações construídas durante essa época (SANTIAGO, 2012). Esse material (areia grossa ou solo arenoso) era obtido em jazidas nas imediações da cidade ou através da remoção de construções públicas.

¹ Espécie de solo formado por mistura natural de areia e argila.

Em relação à cal, principal ligante das argamassas, a proporção era ajustada de acordo com a qualidade da areia. Vitruvius (1998) estabeleceu que a cal, para ser usada na construção, deveria resultar da queima de pedra dura e compacta². Sugeria como proporções ideais desses materiais: no caso de cal extinta e areia de jazida, 1:3; para o mesmo tipo de cal e areia de rio ou mar, 1:2. Em referência a esse último caso, para se obter uma mistura de melhor qualidade, deveria adicionar-se à areia, uma terceira parte de cerâmica moída e peneirada.

De forma geral, os autores mencionavam o uso da cal extinta, porém observou-se que alguns deles faziam alusão à cal viva, tais como Plínio (século I d.C.) e D'Aviler (1699). Ressalta-se o expressivo uso da cal viva em meados do século XVIII com Lorient (1774), Bolognini (1778) e Milizia (1785). Os cuidados que devem ser observados na preparação, antes do uso da cal, principalmente no que se refere à obtenção da cal viva e sua extinção, foram referidos em grande parte dos textos consultados. A cal, tanto para rebocos como para estuques, deveria ser extinta entre dois e três anos antes da sua utilização e ser a mais pura e fina possível. Esse procedimento, mencionado por Vitruvius e repetido por outros tratadistas, fazia parte das operações preliminares de execução da construção, de maneira a dar tempo de extinguir completamente a cal. O desempenho da cal dependia do modo de preparo e do tempo de maturação antes de sua utilização. No Brasil, a cal aérea foi o ligante mais usado nas construções do Período Colonial para a fabricação de argamassas de assentamento e de revestimento, até o século XIX, sendo proveniente, em geral, da calcinação de corais e de conchas.

Quanto às adições, no decorrer dos séculos, foram utilizados vários tipos, visando melhorar as propriedades das argamassas. Há vasta relação de citações sobre o emprego de óleos, sucos, leite, urina, cola animal, sangue de boi, sebo, fibras vegetais e animais, esterco, claras de ovos, açúcar, vinho, entre outras (ARCOLAO, 1998; SANTIAGO, 2012), cada uma com função específica. Especialmente com o objetivo de conferir propriedades às argamassas, no que concerne às características de resistência à ação da água, os autores pesquisados destacavam o uso de pozolanas, como pó cerâmico, cinzas de carvão, escória de ferro, entre outros.

² De acordo com Vitruvius (1998), em função do fim a que se destinava, a cal deveria ser proveniente de pedra espessa e dura, para edificar, e de pedra "esponjosa" e leve, para revestir.

Observou-se que a utilização do pó cerâmico foi bastante ressaltada desde o século I a.C., com Vitruvius, ao século XIX, principalmente em obras sujeitas à ação da água e nos casos em que se objetivasse durabilidade. Villard de Honnecourt, arquiteto do século XIII, no seu conhecido “álbum de desenhos e croquis”, imagem 41, menciona mistura de cal, telha moída e óleo de linhaça para a confecção de recipiente para conter água³. Supõe-se que esta receita se destinava a compor revestimento de reservatórios destinados a preservar a água da chuva.

Na bibliografia que permaneceu como referência básica sobre a arte de construir, desde a época vitruviana, são encontradas alusões ao emprego da cerâmica moída ou pó cerâmico na confecção de argamassas de cal, especialmente em locais como cisternas, aquedutos, reservatórios, canais, pontes entre outros. Alberti (2009) menciona o uso do pó cerâmico para pavimentações. Com o mesmo objetivo, Cataneo (1554) propõe formulação de cal com pó de telha e escória de ferro, tendo sido essa mesma mistura apresentada por Martini (1861) para estuque a ser aplicado em reservatório. Ainda visando estanqueidade, D’Aviler (1738) recomenda o uso de material cerâmico pulverizado, além da cal viva, quando a intenção fosse conferir hidraulicidade à argamassa. Outro investigador que menciona o uso do pó cerâmico para atribuir maior durabilidade e resistência à ação da água é Lorient (1774), que também propõe metodologia de confecção de argamassas a partir do uso das cal viva e extinta, areia e pó cerâmico⁴. Milizia (1785), baseado no método de Lorient, propõe argamassa impermeável para revestir bacias, canais e construções submersas. Adicionalmente, Belidor (1832) e Scamozzi (1838) apresentam formulações com utilização de pó cerâmico, cal e areia, para pontes, aquedutos, cisternas e obras sem fins estruturais.

Além do pó cerâmico, outras adições foram mencionadas no período entre o séc. I a.C. e o séc. XIX, conforme informações colhidas na bibliografia consultada. Na publicação *Ricette del Restauro. Malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, de

³ HONNECOURT, Villard. *Album de dessins et croquis*, 1201-1300, planche XLI, p.168: “on prend chaux et tuile de paiens pilée, et vous ferez autant de l'une que de l'autre, mettant un peu plus de tuile de paiens, jusqu'à ce que sa couleur domine l'autre. Détrempez ce ciment d'huile de lin, et vous en pourrez faire un vaisseau à contenir l'eau.” Tradução da autora: misturamos cal e telhas moídas, na mesma proporção, adicionando um pouco mais de pó de telha, até que sua cor domine sobre o outra. Adicionando óleo de linhaça a essa mistura, você poderá fazer um recipiente para reservar água.

⁴ Um método de confecção de argamassa com cal e pó cerâmico, bastante disseminado na França em finais do século XVIII, refere-se ao descoberto por Antoine-Joseph Lorient, francês que realizou diversas experiências com o uso da mistura de cal viva e pó cerâmico em diversas argamassas (LORIENT, 1774).

Carla Arcolao (1998), que constitui interessante referência sobre o tema, a autora discorre sobre as diversas técnicas de elaborar argamassas tradicionais, difundidas nos vários tratados e manuais. Nota-se claramente que a variação nas receitas de argamassas contemplou a inclusão de componentes diversos, a diferença das proporções de materiais, bem como o tipo de aglomerante usado nas misturas.

Na seção a seguir, faz-se um apanhado histórico sobre as adições usadas, na antiguidade, na produção das argamassas de cal, com destaque para aquelas que, quando unidas à cal, evidenciavam maior capacidade de proteção à ação da água e durabilidade superior das composições em relação às argamassas de cal sem adições.

3.2 HISTÓRICO DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS ARGAMASSAS DE CAL

Como já ressaltado, o uso das adições em argamassas de edifícios é conhecido desde a antiguidade, sobretudo, pelos romanos, que demonstraram conhecimento bastante aprofundado sobre as propriedades dos materiais construtivos. Esta civilização soube aproveitar as potencialidades das argamassas de cal, produzindo-as com elevada qualidade e durabilidade, a partir do aperfeiçoamento de técnicas de execução e da seleção e aplicação adequada dos materiais. De maneira criteriosa, os construtores romanos selecionavam os materiais conforme os objetivos pretendidos.

A necessidade de realizar misturas trabalháveis e, ao mesmo tempo, apropriadas para cura em presença de água, sempre estimulou a criatividade desses povos do passado, especialmente no que tange às obras hidráulicas – cais, docas, pontes, entre outras –, que demandavam espessuras relevantes, e às situações em que não era possível a utilização de argamassas de cal aérea, devido à inexistência de dióxido de carbono do ar (CO_2) para promover a carbonatação. Nestas circunstâncias, os povos romanos utilizavam um sistema composto pela mistura de cal aérea, areia e material vulcânico. Esse último seria o responsável por conferir propriedades de endurecimento das argamassas de cal mesmo em presença de água.

Uma vez que a reserva natural do material vulcânico utilizado na época, era proveniente da região de Pozzuoli, próximo à cidade de Nápoles, na Itália, esse

constituente especial ficou conhecido como “pozolana”⁵, termo que passou a designar todas as substâncias que, em contato com a cal extinta, em determinada proporção, promovem certa hidraulicidade às argamassas.

Os materiais, com natural desempenho pozolânico para endurecer, não eram muito comuns na maior parte das regiões da antiguidade. Coutinho (1958) refere que a primeira pozolana natural empregada teria sido a terra da Ilha de Santorin, ao norte da Ilha de Creta, na Grécia, constituindo a mais célebre de todas as pozolanas naturais empregadas na zona do Mediterrâneo. Na Itália, os romanos descobrem as vantagens da utilização dos tufos vulcânicos da zona de Nápoles na confecção das argamassas de cal, além do tijolo moído e da telha moída, quando se desejava melhorar o desempenho destas em contato com água. Durante as suas conquistas na Europa, os componentes pozolânicos constituíram material bastante difundido pelos povos romanos.

Outros povos também faziam uso, no passado, da argila cozida moída junto à cal na confecção de argamassas. No Egito, tais argamassas recebiam a denominação de *homra*. O termo *surkhi* designava as argamassas, com argila cozida e moída, confeccionadas pelos povos hindus (ZAMPIERI, 1989).

O custo elevado e as dificuldades de transporte das pozolanas naturais deram origem à procura por alternativas de componentes artificiais, para a confecção das argamassas que apresentassem propriedades hidráulicas similares às das pozolanas naturais. Nesse contexto, as pozolanas naturais, muitas vezes, foram substituídas por pozolanas obtidas da calcinação, a altas temperaturas, de determinados tipos de materiais naturais como argilas, turfas, terras diatomáceas, pedras-pomes ou provenientes de subprodutos da fabricação de outras substâncias, como as escórias de ferro e o *mâche-fer*, outra espécie de escória que se aglomerava nas fornalhas das máquinas, onde era trabalhado o ferro, e se formava o resíduo de carvão queimado (SANTIAGO, 2007). Belidor (1832) sugere a

⁵ O termo "pozolana" tem dois significados distintos. O primeiro indica as rochas piroclásticas, essencialmente vítreas e às vezes zeólitas, que ocorrem na região italiana de Pozzuoli (*Puteoli* na época romana) ou em torno de Roma (MASSAZZA, 1998). O segundo significado inclui todos os materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, que endurecem em água quando misturados com hidróxido de cálcio (cal) ou com materiais que podem liberar hidróxido de cálcio (clínquer do cimento Portland). Medina (2011) refere que “Pozolanas são materiais siliciosos ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contêm um elevado teor de sílica reativa, com estrutura pouco cristalina ou mesmo não cristalina (amorfo)”. “Silicioso” por ser constituído essencialmente por sílica (SiO₂) e sílico-aluminoso por apresentar sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃).

utilização desse resíduo das fornalhas após prévia eliminação de sujeiras e do carvão residual, secagem e moagem.

Outros materiais, também usados em substituição das pozolanas, ou em combinação com estas, para promover argamassas com desempenho pozolânico, são citados pelos autores consultados (GRISELINI, 1768; MILIZIA, 1785; BELIDOR, 1832), entre os quais se incluem os terraços (fluviais) do Baixo Reno e as cinzas de Tournai (Bélgica). O primeiro, citado por Santiago (2007), foi descrito como pó cinzento obtido por cozimento e, em seguida, por trituração de uma terra presente nas áreas próximas de Colônia e na região do Baixo Reno, na Alemanha, seria muito útil para compor argamassas adequadas para qualquer tipo de construção, porque poderia resistir tanto à umidade quanto ao calor, como os Terraços fluviais do Baixo Reno. As cinzas de Tournai seriam compostas por pedaços da pedra de Tournai que, desprendidos durante o cozimento no fogo, misturavam-se com os pedaços de carvão mineral usado para alimentar as chamas do forno. Bernard Belidor (1832) sugere o uso desta cinza misturada à escória de ferro e à cal, na composição das argamassas para obras hidráulicas. As partículas de carvão fóssil calcinado, presentes na composição desse material, seriam capazes de aumentar a resistência das argamassas à umidade. Milizia (1785) também fez referência à utilização de carvão fóssil para obtenção de revestimento impermeável à água.

Além dos dois materiais acima mencionados, os textos frequentemente relatam indicações sobre o uso e a composição de argamassas contendo pó de carvão vegetal moído (ou cinzas de madeira), em locais com elevada umidade. As propriedades do carvão vegetal como "isolante" de umidade eram já conhecidas por Vitruvius e o seu conhecimento foi preservado durante a Idade Média. No tratado de Vitruvius consta a descrição de argamassa, provavelmente de origem romana e usada na África, composta por cal, areia, cinza de madeira e acrescentada de óleo durante o manuseio da mistura, que se revelou muito durável e "impermeável à água". Francesco Milizia (1785) fornece indicações interessantes a respeito de argamassas compostas por argila, areia, alcatrão ou óleo de linhaça e cinzas peneiradas, para utilização em locais úmidos.

De forma geral, até o início do século XIX, as misturas produzidas com pozolanas naturais ou artificiais são designadas por argamassas pozolânicas. A partir de meados do século XIX, as adições pozolânicas foram substituídas por ligantes hidráulicos e finalmente pelos cimentos naturais e artificiais, cuja tecnologia

foi impulsionada pelo início da revolução industrial, quando se deu o desenvolvimento de portos, canais e pontes favorecendo a sua utilização, em larga escala. Verificou-se, nesse período, o declínio das antigas argamassas à base de cal e dos materiais pozolânicos em função das extraordinárias propriedades do cimento. Os materiais pozolânicos voltariam a ser utilizados, posteriormente, como materiais de construção, em conjunto com o clínquer, na constituição dos cimentos Portland pozolânicos (ZAMPIERI, 1989).

Especialmente em relação ao pó cerâmico, componente pozolânico que constitui um dos objetos desta pesquisa, serão abordados, a seguir, os principais aspectos relacionados ao seu emprego nas argamassas de cal confeccionadas pelos antigos. As informações obtidas a partir de diversas fontes do passado consultadas foram sistematizadas de forma a obter uma visão geral sobre os materiais constituintes das argamassas, a dosagem das misturas, as recomendações para aplicação, entre outros aspectos. De forma complementar, tecem-se comentários sobre a técnica da produção de argamassas com o pó cerâmico no Brasil.

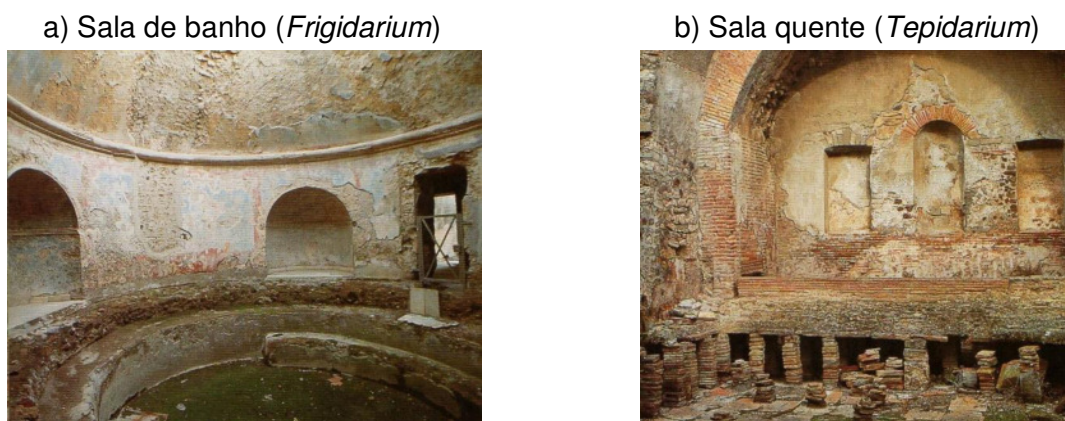
Vitrúvio (1998), no Livro VII, Cap. IV, menciona o uso de pó cerâmico em alvenarias sujeitas a ambientes úmidos, como nos “banhos”, em argamassas de revestimento (Figura 1a) ou de pavimentação (Figura 1b). Recomendava a sua aplicação como uma mistura de cal e pó cerâmico, ao invés de argamassa comum de cal e areia, por exemplo, em uma alvenaria, até uma altura aproximadamente de três pés⁶ (0,87m) acima do piso (Figura 2a). A parede, em seguida, deveria ser revestida com diversas camadas de reboco. Também sugeria esse mesmo procedimento em paredes continuamente sujeitas à umidade, onde deveria ser executada uma segunda parede, separada da primeira por um canal na parte inferior, que desaguaria até uma zona descoberta (Figura 2b). Aconselhava ainda o “branqueamento” da alvenaria com um “leitada de cal”, para melhorar a aderência da argamassa com pó cerâmico ao substrato.

Plínio (1561-1568, Livro XXXVI) refere a necessidade de executar revestimento com fragmentos de terracota, para construções expostas à salinidade, e não somente à umidade. Outra recomendação diz respeito à consistência ideal para

⁶ A medida de um pé romano corresponde a 0,29m.

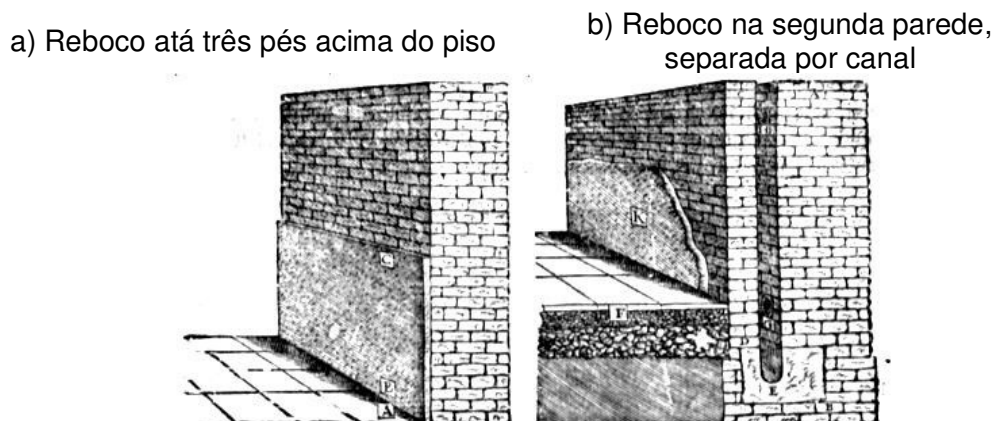
argamassa com pó de mármore e estuque: a primeira não deveria grudar à espátula enquanto a segunda deveria grudar a esta como cola.

Figura 1 – Termas de Pompeia, século I



Fonte: Guzzo e d'Ambrosio (2002, p.116).

Figura 2 – Rebocos em paredes situadas em locais úmidos



Fonte: Rusconi (1660, p.106).

Assim como Vitrúvio e Plínio, Alberti (2009) e outros recomendam a execução de, pelo menos, três camadas de revestimento, devendo a primeira ser áspera; a intermediária, diferenciada em função da granulometria e teor de ligante, da camada anterior para o exterior; e a última, realizada com acabamento fino. Para esses autores, o número de camadas estaria relacionado com a regularização e durabilidade da superfície.

A ampla difusão do uso do pó cerâmico, até o século XVIII, deve-se, precisamente, à sua propriedade de conferir características hidráulicas quando misturado com a cal, fato que propiciou sua consideração, por alguns autores, como adição pozolânica (ASHURST, 1983). Esse material, rico em sílica, óxidos de

alumínio e ferro, funciona, nas argamassas de cal, como componente ativo, sendo capaz de formar compostos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados, que conferem, sobretudo, hidráulica às misturas.

Os bons resultados de desempenho e durabilidade, obtidos com o emprego do pó cerâmico, constam ainda nos registros dos tratadistas que contribuíram para o estudo e o conhecimento da história da construção, da composição e das técnicas usadas na sua execução. Havia consenso que tal material deveria ser moído; no entanto, os estudiosos divergiam quanto à sua proveniência, se de telha ou de tijolo.

A partir de Vitruvius e Plínio, outros estudiosos desenvolveram ou citaram receitas de argamassas de revestimento, variando as proporções de materiais e o tipo de adições utilizadas nas misturas. Em geral, as exigências que influenciavam a escolha de uma determinada composição ou de método de preparo específico de confecção de argamassas estavam relacionadas com a qualidade das matérias-primas utilizadas; as condições de endurecimento; a função da argamassa na alvenaria; o grau de exposição à água; o controle da porosidade e da impermeabilidade; a durabilidade e a resistência exigidas.

Além de Alberti, os seguintes autores mencionam o uso de pó cerâmico nas pavimentações: Cesariano (1521), Barbaro (1556), Quatremère de Quincy (1842), entre outros, inclusive os que fizeram transcrições de texto. Ressalta-se que os dois primeiros autores citam esse material nas traduções comentadas de Vitruvius. Quatremère de Quincy (1842) refere-se ao uso do pó cerâmico em pavimentações no verbete “composto” de seu *Dictionnaire Historique d'Architecture*, publicado entre 1788 e 1825.

Baldinucci, no seu *Vocabolario Toscano dell'Arte del Disegno* (1681, p.14), cita a utilização de pó de cerâmico em verbete relativo a “arricciato per dipingere sopra le mura a olio”, uma espécie de base preparatória para pintura a óleo. Esta camada deveria ser composta por estuque de mármore, pó de tijolo esmagado, óleo de linhaça, piche de colofônia⁷ e resina, ou de tijolo esmagado, areia, resíduos da fabricação da escória (*schiuma di ferro*), clara de ovo e óleo de linhaça; ambas misturas em proporções não definidas.

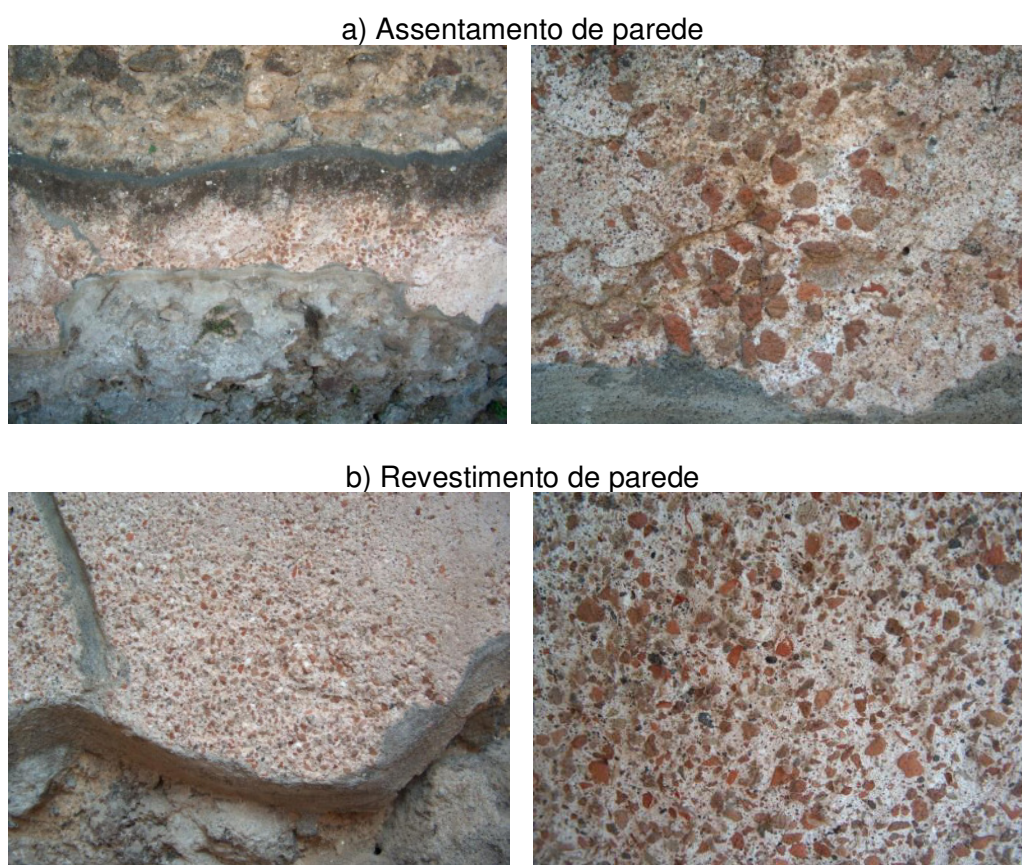
Felibián (1690, p.534) menciona o uso de fragmentos de telha na confecção de argamassas “[...] nostre ciment à faire du mortier, qui est de la tuile cassé [...]”.

⁷ Designa-se colofônia, uma resina de planta amarela sólida e transparente, resíduo da destilação de terebintina (resinas de coníferas *Pinus palustris* e outros pinheiros da família *Pinaceae*).

Como o termo foi encontrado no dicionário anexo ao seu trabalho e o texto deste autor refere-se à pintura e à escultura, acredita-se que a argamassa mencionada trata-se de camada preparatória para receber a pintura. O autor não cita modos de preparo por se tratar de explicação do verbete “ciment”⁸, no dicionário anexo ao seu trabalho *Des Principes de l'Architecture, de la Sculpture, de la Peinture*.

A Figura 3 (a e b) ilustra exemplos de argamassa de cal com evidentes sinais de inclusão de cerâmica triturada em pedaços muito pequenos, como recomendava Vitruvius. Em Pompeia, a técnica *opus signinum*, com argamassas de cal e tijolos triturados e aglutinados, foi bastante empregada nos pisos interiores e exteriores.

Figura 3 – Argamassas constituídas com fragmentos de cerâmica, em Pompeia



Fonte: Fotos da Autora (2017).

O Quadro 2, a seguir, apresenta diferentes formulações destinadas a revestimentos com a utilização de pó cerâmico, visando atingir propriedades relacionadas à impermeabilidade e à durabilidade, dispostas em ordem cronológica.

⁸ Ressalta-se que os termos *ciment* (francês) e *cemento* (italiano), citados por diversos autores consultados, referem-se a um material (pó cerâmico) com propriedades similares à pozolana.

Quadro 2 – Antigas formulações com utilização de pó cerâmico

Tratadista	Ano de publicação original	Formulação
Cennino Cennini (1859)	1437	Argamassa de reboco constituída de cal extinta e areia grossa nas mesmas proporções, além de pó de tijolo esmagado e peneirado, em quantidade não definida.
Martini (1861)	1456-1502	Dois tipos de argamassas de reboco: uma, de uso comum e outra específica para revestimento de reservatórios. A primeira, constituída por uma parte de cal extinta, mesma quantidade de areia de rio ou mar e uma parte de telhas antigas esmagadas. A outra compreende duas partes de cal e cinco partes de areia grossa. Martini não mencionou o uso de pó cerâmico neste último caso, como era de se esperar. Para estuque: duas partes de pó de telha, duas de cal e meia medida de limalha de ferro, sendo que a essa mistura deveria ser adicionada água e decocção de casca de olmeiro. Após agitada por período de 15 dias, a mistura estaria pronta para aplicação com espátula.
Vasari (1986)	1550	Camada preparatória para pintura a óleo: estuque de mármore (uma parte de pó de mármore e duas de cal) e tijolo esmagado para conferir aspereza à superfície. A proporção do pó de tijolo não foi mencionada pelo autor.
Cataneo (1554)	1554	Mistura para pavimentação e obras interiores com mesmas proporções que aquela mencionada por Martini para estuques, que consistia em duas partes de cal, duas de pó de telha e meia de limalha de ferro.
Scamozzi (1838)	1615	Traços 1:3 (cal e areia de jazida) para argamassas de assentamento e 1:2 (cal: areia de rio ou mar) para chapisco. Neste último caso, tal como Vitruvius, Scamozzi recomendou adicionar uma terceira parte de pó cerâmico, caso necessário.
D'Aviler (1738)	1699	Material cerâmico pulverizado (preferencialmente oriundo de pó de telha), além da cal viva, na proporção 1:2 (cal, pó de telha) quando a intenção fosse conferir hidráulidade à argamassa.
Belidor (1832)	1729	Três formulações: a primeira, indicada para pontes, aquedutos e cisternas, deveria ser constituída por um pó produzido a partir da moagem de fragmentos de blocos de argila cozida, de vasos cerâmicos e de escória de ferro (proveniente de carvão queimado em fornalhas), em substituição da areia. A este pó, misturava-se em igual quantidade telha cerâmica (moída em mó de moinho) e cal. A argamassa produzida com este material no traço 1:1:1 seria muito resistente a água. A segunda, constituída por cal e pó de telha na proporção 1:1, ou ainda cal: areia e pó de telha na proporção 1:0,5:0,5 seria destinada para obras sem fins estruturais, mas que não deviam ser negligenciadas. Por fim, especificou uma argamassa para a cisterna da Igreja de Calais, constituída de duas partes de cal viva e três partes de pó de telha.
Loriot (1774)	1774	Loriot, baseado em Vitruvius e Plínio, mencionou o uso do pó cerâmico para elaborar misturas com maior resistência à ação da água e durabilidade. Propôs metodologia de confecção de argamassas a partir do uso das cal viva e extinta, areia e pó cerâmico. O traço proposto pelo antigo investigador consistia em uma porção de pó de tijolo bem moído, duas de areia de rio e uma de cal extinta há algum tempo, devendo a quantidade de cal viva ser igual à de pó de tijolo (MAGALHÃES et al, 2013).
Bolognini (1778)	1778	Uma parte de pó cerâmico (proveniente de tijolo esmagado), duas partes de areia fina, uma parte de cal viva em pó e cal extinta (envelhecida). Não informou a proporção desta última, mas afirmou que a esse material deveria ser adicionada água em quantidade suficiente para formar uma pasta comum e para extinguir a cal viva.
Milizia (1785)	1781	Uma parte de tijolo bastante esmagado e peneirado, duas partes de areia fina de rio, uma parte de cal extinta e uma parte de cal viva em pó. Essa argamassa muito resistente poderia ser utilizada para rebocar bacias, canais e construções submersas. Na ausência de tijolo esmagado, podiam ser utilizados terra cozida e pulverizada, ou tufo calcário seco e pedregoso, pulverizado e peneirado. O pó de carvão fóssil, misturado com igual quantidade de cal viva, proporcionava argamassa impermeável à água.
Bails (1796)	1783	Uma parte de telha moída, outra de areia de rio ou jazida e outra de cal extinta. Bails recomendou a utilização da mistura em subterrâneos úmidos.

Fonte: Elaboração própria (2017).

Com base na compilação de formulações apresentadas no Quadro 2, sistematizam-se, no Quadro 3, as informações obtidas nos tratados sobre as dosagens dos materiais e recomendações de uso, de maneira a permitir uma análise comparativa mais eficiente do emprego de materiais que entram na composição das argamassas.

Quadro 3 – Resumo das dosagens das formulações antigas com pó cerâmico

Autor/ ano	PROPORÇÕES					Usos
	Cal		Areia	Pó cerâmico	Outros materiais	
	Extinta	Viva				
Cennino Cennini (1859)	1		1	n.d. (tijolo)	-	Paredes sujeitas à umidade e destinadas a afrescos
Martini (1861)	1		1	1	-	Reboco para uso comum
	2			2 (telha)	1/2 (limalha de ferro)	Estuque
Vasari (1986)	2			n.d. (tijolo)	1 (pó de mármore)	Camada preparatória para pintura a óleo
Cataneo (1554)	2			2	1/2 (limalha de ferro)	Obras cobertas
Scamozzi (1838)	1		2	1	-	Chapisco/ assentamento
D'Aviler (1738)		1		2 (telhas)	-	Obras hidráulicas
Belidor (1832)	1			1 (telhas)	1 (pó de moagem de material cerâmico + escória de ferro)	Obras hidráulicas
	1			1 (telhas)	-	Obras comuns
	1		1/2	1/2 (telhas)	-	Obras comuns
		2		3 (telhas)	-	Cisterna da Igreja de Calais
Loriot (1774)	1	1	2	1	-	Obras hidráulicas
Bolognini (1778)	n.d.	1	2	1	-	Obras hidráulicas
Milizia (1785)	1	1	2	1 (tijolo)	-	Obras hidráulicas
Bails (1796)	1		1	1 (telha)	-	Obras subterrâneas úmidas

“n.d.” representa a existência do material, porém em quantidade não definida pelo autor.

Fonte: Elaboração própria (2017).

Em várias publicações destaca-se o uso de pó cerâmico associado a algum óleo, de modo a promover maior impermeabilidade ao revestimento. Como já referido, desde os tempos medievais, Villard de Honnecourt cita uma receita para execução de recipiente impermeável especificando o uso de óleo, além do pó de tijolo. Os antigos não ignoravam que o emprego do óleo em argamassas de cal obrigava o uso de pozolanas para acelerar o endurecimento.

Benito Bails (1796), ao fazer referência a Alberti, menciona a utilização de azeite para conferir impermeabilidade às argamassas ordinárias. Ressalta-se que isto também seria possível ao misturar cal com telha moída, em especial, nas obras hidráulicas.

Em relação às proporções, de acordo com o Quadro 3, infere-se que, a partir de meados do século XVIII, as quantidades de materiais das formulações eram semelhantes (LORIENT, 1774; BOLOGNINI, 1778; MILIZIA, 1785). Adicionalmente, observa-se que Cataneo (1554), Martini (1861) e Vasari (1986) apresentaram composições similares utilizando cal extinta, pó cerâmico e limalha de ferro, para os dois primeiros, ou pó de mármore, no caso do último. Nota-se que os citados autores não mencionam o uso da areia como componente das misturas, assim como Belidor (1832), naquelas destinadas a obras hidráulicas.

Ao longo do tempo, cada autor referido expôs distintas técnicas de confecção e recomendações de aplicação de argamassas tradicionais de cal com uso do pó cerâmico. Estas informações, levantadas de tratados antigos, estão sistematizadas em ordem cronológica em Magalhães e Muñoz (2016), e permitem contextualizar o que se fazia na época de estudo considerada nesta pesquisa.

No Brasil, segundo Oliveira (2008), a técnica da produção de argamassas com o pó cerâmico esteve restrita ao domínio dos engenheiros militares. Tem-se conhecimento da existência de relatórios, apontamentos e documentos de obras, desde a época colonial, com recomendações e/ou descrições de modos de execução para as edificações militares, como as do engenheiro-mor do Brasil Francisco Frias de Mesquita, levantadas por D. Clemente da Silva-Nigra (1946).

Na descrição do revestimento exterior de uma abóbada do Forte dos Três Reis Magos (Figura 4), em Natal, em 1619, o referido engenheiro mencionava “[...] será guarnecida por dentro de barro sem mistura de cal nem água salgada e guarnecida por fora de boa argamassa e “tettim” para que melhor se defenda das umidades” (SILVA-NIGRA, 1946, p. 45). O termo “tettim”, segundo Rodrigues et al., citados por

Santiago (2007), significa uma argamassa feita de pó de tijolo, cal e azeite. Acredita-se que esta prática seria adotada para outras construções por engenheiros militares da época.

Figura 3 – Fortaleza dos Três Reis Magos, em Natal



Fonte: Disponível em: <<https://viagemeturismo.abril.com.br>;
<<https://cronicasmacaenses.com>> (2018).

No texto do padre jesuíta português Fernão Cardim (1980), de 1601, foram encontradas referências ao termo “tintim” na descrição da Capela da Casa da Torre de Garcia D’Ávila (Figura 5), situada no litoral baiano, com data provável de construção entre 1560 e 1580: “[...] a mais formosa que há no Brasil, feita toda de estuque e tintim [...]”. A palavra “tintim” teria sido usada originalmente para denominar uma pozolana da região dos Açores, em Portugal, de cor vermelha, também usada como pigmento em pintura. A Figura 5 ilustra, também, o exterior e interior da Capela da Casa da Torre, originalmente revestida com argamassas com adição de pó de tijolo. Segundo Bueno (2001, p 252, nota 5), o termo passou a dar nome a pó de tijolo usado na confecção de certo betume largamente empregado em

obras em lugares úmidos. Possivelmente, os dois termos “tettim” e “tintim” teriam o mesmo significado.

As argamassas de assentamento e revestimentos antigos no Brasil ainda não se encontram suficientemente estudadas e sistematizadas na bibliografia nacional disponível. Nas paredes centenárias de construções militares deixadas no país, subsistem vestígios de argamassas antigas com base em cal, provavelmente, com alguma adição, mostrando-se, ainda nos dias de hoje, com resistência e boa coesão.

Figura 5 – Casa da Torre de Garcia D’Ávila, no Litoral Norte da Bahia



Fonte: Disponível em:<<https://umpouquinhodecadalugar.com>;
<https://www.videoblocks.com>> (2018).

Em Salvador, primeira capital do Brasil, foi constatado o uso de material cerâmico pulverizado em paredes de algumas fortificações, entre elas o Forte do Barbalho e o Forte de São Pedro, como refere Oliveira (2008). No Forte de Santo Alberto (Forte da Lagartixa), as escavações arqueológicas, efetuadas na década de 90, puseram em evidência os maciços das plataformas das canhoneiras, que foram

executados com argamassas de cal, areia e pó cerâmico, de forma a absorver o impacto dos disparos dos canhões (SANTIAGO, 2007). A autora destaca que, na época das escavações, tais maciços ainda se encontravam íntegros.

3.3 ALGUMAS REFLEXÕES SOBRE AS REAÇÕES POZOLÂNICAS

Até princípios do século XIX, a confecção das argamassas designadas “hidráulicas” foi feita quase exclusivamente com pozolanas. Muito embora o conhecimento e o uso desses materiais sejam bastante antigos, a elucidação científica da causa da hidráulidade ocorreu, somente, após o século XVIII. Um dos principais motivos que estimulou a busca por uma explicação científica do fenômeno relaciona-se com a necessidade de esclarecimento sobre o endurecimento, de determinados materiais, dentro de água. Isto permitiria descobrir novos componentes para poder suprir a falta de pozolanas naturais, inexistentes na maior parte das regiões (COUTINHO, 1958).

Coube ao investigador Louis Vicat a compreensão das causas do endurecimento das misturas de cal e pozolana na água. Ele experimentou uma variedade de processos químicos com cal e a cinza vulcânica, e, ao fazê-lo, pôde observar as reações químicas que permitiam que a argamassa de cal endurecesse e se fortalecesse submersa. Vicat já tinha conhecimento sobre os principais constituintes das pozolanas naturais e artificiais, como a sílica e alumina, mas foi mostrando-se atento, sobretudo, para a importância da afinidade dos três elementos (cal, sílica e alumina), como causa do endurecimento progressivo das argamassas dentro d’água, que conseguiu demonstrar a responsabilidade dos componentes de sílica e alumina presentes, juntamente à cal, na formação de combinações que possuíam propriedades hidráulicas (VICAT, 1837, 1840).

Os estudos de Vicat constituem, assim, ponto de partida para outras investigações que vieram a seguir, como as de Henri Louis Le Châtelier, visando determinar, rigorosamente, quais eram os compostos formados com base nas combinações da cal com a sílica e a alumina e como reagiam com a água.

Admitiam-se como produtos resultantes os silicatos e aluminatos de cálcio. Os silicatos, principais componentes dos ligantes hidráulicos, seriam os responsáveis pelo fenômeno de endurecimento. Os aluminatos de cálcio teriam importância secundária para as ações de caráter hidráulico.

Nos últimos anos, técnicas instrumentais avançadas como a difração de Raios X, as análises termodiferencial e termogravimétrica, a microscopia eletrônica, entre outras, tornaram possível o melhor entendimento da química envolvida nas reações entre o hidróxido de cálcio e as adições com características pozolânicas.

Na próxima seção, apresentam-se considerações sobre argamassas com adições de utilização mais recente, com base nas informações obtidas por meio de estudos desenvolvidos sobre as adições com características pozolânicas, particularmente, aquelas que vêm alcançando resultados satisfatórios para a produção de concretos e argamassas, tais como o metacaulim, as cinzas volantes e a sílica ativa, e que constituem possíveis alternativas a serem incorporadas em argamassas de cal para uso no restauro.

3.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS DE UTILIZAÇÃO MAIS RECENTE

A opção pelo emprego de adições, com características pozolânicas, levanta grande interesse no campo da conservação e restauro, pelas possibilidades de contribuição para a melhoria das argamassas de cal aérea. Diversos estudos têm avançado no sentido de ampliar o conhecimento sobre o comportamento de novos materiais, quando inseridos na produção de argamassas de cal, com desempenho melhorado para uso no restauro.

Dentre as adições mais usadas, atualmente, para aplicação na conservação de edifícios, incluem-se aquelas que, misturadas com a cal aérea e a areia, produzem argamassas com boa resistência mecânica e notável durabilidade às condições climáticas severas e à presença constante de umidade. Nesse sentido, a inclusão do **pó cerâmico** (material correntemente usado no passado) ou de adições com características pozolânicas (de uso bastante frequente, em argamassas de cimento e concreto), tais como **metacaulim, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e sílica ativa**, têm sido aceitas ou ainda estão sendo pesquisadas para a elaboração de formulações de argamassas de cal destinadas a paredes de edificações antigas (FARIA, 2004, 2011; VELOSA, 2006; VEIGA et al., 2009).

Entre os materiais mencionados, aqueles resultantes dos resíduos produzidos pelas indústrias, como a sílica ativa, as cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, além do pó cerâmico, têm interesse para uso em argamassas com base em cal

aérea, não apenas em virtude de suas características pozolânicas, mas também, pelo papel que podem desempenhar, em nível de sustentabilidade ambiental.

Na seção a seguir, faz-se uma abordagem sobre as adições de pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa na confecção de formulações de cal, incluindo uma reflexão sobre os traços utilizados e os resultados obtidos pelos diversos autores consultados que trabalharam com os referidos materiais. Ressalta-se que alguns materiais pozolânicos, resultantes de subprodutos industriais, tais como a sílica ativa e as cinzas volantes, constituem resíduos poluidores. Dessa forma, a sua incorporação em argamassas ou concretos tem importância ambiental e ecológica, uma vez que agrega valor a esses materiais.

3.4.1 Pó cerâmico

A eficácia da adição do pó cerâmico em argamassas de cal, comprovada por meio dos testemunhos das construções romanas, e as suas características de composição, promoveram o desenvolvimento de estudos científicos sobre a avaliação de propriedades relevantes para o seu emprego como agregados ou como substituição parcial do ligante em argamassas e concretos. No campo da conservação, as pesquisas realizadas, também, permitiram o aprofundamento do conhecimento sobre esse material; os estudos seguem com o propósito de cativar a comunidade técnica, que intervém no patrimônio histórico edificado, a investir e desenvolver a tecnologia necessária para aplicação prática desse material em formulações de argamassas de revestimento destinadas ao restauro.

No Brasil, experimentos com a utilização de pó cerâmico para aplicação em argamassas de cal mostram a viabilidade desse material no campo da conservação. Na Bahia, os resultados satisfatórios obtidos nas experiências desenvolvidas no NTPR, visando ao uso de adições de cerâmica moída nas misturas de argamassa, permitiram fundamentar a sua aplicação em obras de restauro, tais como em revestimentos exteriores da Igreja do Rosário, em Cachoeira, e na colagem de azulejos do Oratório da Cruz do Pascoal, monumento localizado no centro histórico da Cidade do Salvador (OLIVEIRA, 2014). Destacam-se, ainda, os trabalhos experimentais desenvolvidos no NTPR, com o objetivo de reproduzir argamassas de cal e pó cerâmico, por meio da metodologia estabelecida pelo pesquisador francês Lorient, cujos resultados das experiências efetuadas revelaram algum interesse para

a aplicação do método de confecção de argamassas no campo do restauro (MAGALHÃES et al., 2013).

Em Portugal, a investigadora Ana Velosa (2006) estudou argamassas com incorporação de pó de tijolo na proporção volumétrica de 1:1:4 (cal aérea:pó de tijolo:areia), cujos resultados de resistência são apresentados no Quadro 4. Magalhães et al. (2013), ao reproduzirem argamassas confeccionadas com pó de tijolo e cal viva, segundo metodologia estabelecida por Lorient (1774), misturando uma porção de pó de tijolo bem moído à mesma quantidade de cal viva, duas de areia de rio e uma de cal aérea (extinta há algum tempo), obtiveram os resultados dispostos, também, no Quadro 4.

Quadro 4 – Comportamento mecânico e à ação da água de argamassas com pó cerâmico

Autor	Traço	Comportamento mecânico				Comportamento à água	
		Resistência à tração na flexão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)		Coeficiente de capilaridade	
		28 d	90 d	28 d	90 d	(kg/m ² .h ^{1/2})	(kg/m ² .min ^{1/2})
Velosa (2006)	1:1:4 (cal aérea extinta:pó de tijolo:areia)	0,22	0,19	0,60	0,70	13	1,7
	1:3 (cal aérea extinta:areia)	0,24	0,26	0,50	0,84	17	2,2
Magalhães e Muñoz (2013)	1:1:2:1 (cal viva:pó de tijolo:areia:cal aérea extinta)	0,13	0,17	1,70	2,50	14	1,8
	1:3 (cal aérea extinta:areia)	-	-	-	0,93	15	1,9

Fonte: Elaboração própria (2017).

Outros estudos sobre a viabilidade da utilização de resíduos cerâmicos para incorporação em argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural nas composições destinadas à reabilitação de edifícios portugueses, realizados por Faria (2004) e Matias (2014), foram conclusivos sobre o impacto positivo dessa adição nas propriedades das argamassas.

Em relação aos materiais cerâmicos a utilizar, como constituinte de argamassas com base em cal aérea, há de se considerar alguns aspectos, especialmente, em relação à escolha por tijolos ou telhas moídas. É interessante notar que os estudiosos antigos divergiam quanto à sua proveniência, se de telha ou de tijolo. Muitos davam preferência à utilização de tijolos.

Atualmente, é conhecido que a temperatura de queima constitui fator importante para o desempenho pozolânico do material cerâmico. A elevada temperatura de calcinação consiste em um dos motivos pelos quais os resíduos provenientes de telhas e tijolos atuais apresentam pouca ou nenhuma atividade pozolânica⁹. As temperaturas atingidas para calcinação dos elementos cerâmicos antigos eram bem inferiores às atuais. Em geral, na produção de tijolos e telhas cerâmicas para construção civil, são atingidas temperaturas de queima iguais ou superiores a 900°C, uma vez que os equipamentos e processos de calcinação modernos permitem essas elevadas temperaturas. As partículas de material cerâmico, nesse caso, atuarão como agregado (material inerte) e, portanto, para se obter um traço ótimo, a quantidade de areia deverá ser reduzida.

Outro aspecto relaciona-se com a finura do material. Como referido na seção anterior, era consenso entre os autores antigos que o material cerâmico a ser introduzido na mistura deveria ser finamente moído. Quando introduzidas nas misturas de cal, partículas de cerâmica moída, com dimensão inferior a 75µm, atuam como componente pozolânico e reagem com o hidróxido de cálcio, dando origem à argamassa mais resistente e com característica hidráulica.

3.4.2 Metacaulim

O metacaulim é um material obtido na calcinação de argilas cauliníticas (caulim), a uma temperatura entre 600°C e 900°C. Diferentemente das outras adições pozolânicas (cinzas volantes, sílica ativa), é um subproduto de processo industrial, obtido para fim específico, sob condições controladas de padrões industriais.

A elevada atividade pozolânica desse aditivo mineral tem justificado a sua ampla utilização na produção de argamassas de cimento e concretos, uma vez que se evidenciam melhores resultados no que tange às propriedades mecânicas. Entre as diversas aplicações desse material, destacam-se: concreto de alta resistência, pontes, estações nucleares, estruturas marítimas, barragens e estruturas subterrâneas, pisos onde alta resistência à abrasão é requerida, entre outros.

⁹ O termo atividade pozolânica compreende todas as reações que envolvem os constituintes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água.

O emprego da argila caulínica calcinada para fins pozolânicos, no Brasil, iniciou-se com a construção da barragem de Jupιά, região de Três Lagoas, no estado do Mato Grosso do Sul, na década de 60 (ZAMPIERI, 1989; SILVA, 1999). Nos últimos anos, estudos do concreto, com adição de argila calcinada com características pozolânicas, e, especialmente, com o metacaulim, têm recebido atenção considerável. Destacam-se trabalhos nacionais direcionados à utilização desse material na produção de concretos de alto desempenho e autoadensáveis (BARATA, 1998; BARATA et al., 2002; MORAES, 2010).

Particularmente, em argamassas de cal, a adição de metacaulim proporciona composições com propriedades intermediárias, entre aquelas compostas somente de cal ou somente de cimento, melhorando características no estado fresco, como ganho de resistência nas primeiras idades, e endurecido, como resistência mecânica e à ação da água (DE AZEREDO, 2014). Por essa razão, a sua incorporação em formulações destinadas à substituição ou reparação de argamassas de alvenarias antigas, em locais com presença de água ou com dificuldade de acesso de CO₂, tem grande interesse. Nessas situações, as soluções com argamassas de cimento, com elevado módulo de elasticidade e teor de sais solúveis em sua composição, não são as mais adequadas.

Ao estudar a incorporação de metacaulim em argamassas com base em cal, Veiga (2013) ressalta que a reação pozolânica entre essa adição e a cal aérea é lenta e exige presença de água durante longo período, muito superior ao requerido pela hidratação dos ligantes hidráulicos, como o cimento e a cal hidráulica. Essa reação “entra em competição” com a carbonatação da cal; assim, se as condições ambientais forem mais favoráveis à carbonatação, toda a cal transforma-se em carbonato de cálcio antes de ter oportunidade de reagir com o metacaulim; e este, sem hidróxido de cálcio livre, deixa de funcionar como ligante, passando a atuar como fíler (agregado).

A referida autora acrescenta considerações acerca da importância de ter-se em conta as condições de exposição e de cura, no comportamento das argamassas de cal e metacaulim, uma vez que o bom desempenho destas está associado à garantia de umidade, por um período inicial prolongado, de modo a possibilitar a reação pozolânica antes da carbonatação total da cal aérea. Veiga (2005) indica os locais de adequada aplicação dessas argamassas: paredes sujeitas ao respingo contínuo da água do mar, paredes com capilaridade ascendente e, também, em

ambientes muito úmidos. Ela conclui sobre o potencial de uso das argamassas de cal e metacaulim em conservação de edifícios antigos, desde que resolvidos vários aspectos detectados, tais como fissuração decorrente de retração, que deve ser cuidadosamente analisada.

Os resultados promissores evidenciados nos estudos sobre argamassas de cal com a adição de metacaulim, destinadas à recuperação de argamassas antigas de cal aérea (VEIGA, 2009; VELOSA et al., 2009), abriram possibilidades para a incorporação de metacaulim, também, em argamassas com características similares, produzidas nacionalmente.

A inclusão do metacaulim na produção de argamassas de cal para uso na conservação de edifícios do patrimônio nacional é um campo de estudo ainda em desenvolvimento, destacando-se, pesquisas pontuais, tais como as realizadas por Barbosa e outros (2006), Japiassú (2011) e Souza (2013). O uso tem sido explorado, especialmente, em locais onde é necessária capacidade de endurecimento rápido, em meios muito úmidos e/ou de difícil acesso de CO₂, como é o caso de argamassas de suporte de revestimentos de azulejo (JAPIASSU, 2011; JAPIASSU et al., 2013). Em geral, os estudos levam em conta as proporções entre os materiais constituintes e a avaliação dos aspectos físicos e mecânicos e/ou as propriedades químicas das argamassas de cal com metacaulim, preparadas com diferentes proporções.

Cerny e outros (2006), em seus estudos sobre o uso de metacaulim em argamassas de cal aérea, constataram aumento significativo tanto da resistência à compressão como de tração por flexão. Nesse mesmo sentido, Fortes-Revilla et al. (2006) combinaram metacaulim com cal hidratada, concluindo que a utilização dessa mistura como argamassas de substituição de reboco de alvenarias antigas é possível, em virtude de sua resistência mecânica superior às das argamassas que utilizam, somente, cal aérea, além da adequada adesão ao suporte.

Vejmelkova e outros (2012) verificaram, em seus estudos, que a adição do metacaulim, em 20% de massa, em substituição da cal aérea, permite otimizar as características das argamassas de cal. Os autores constataram aumento na resistência mecânica das argamassas de cal com metacaulim, até os 28 dias, e estabilização a partir dessa idade, sugerindo o término da reação pozolânica. A explicação fundamenta-se na finura das partículas de metacaulim; as partículas muito finas reagem totalmente até essa idade. A resistência à tração por flexão das

argamassas com metacaulim, aos 90 dias, foi de duas a três vezes superior à das argamassas sem adição. No caso da argamassa de cal aérea sem adições, embora o incremento de resistência mecânica tenha acontecido até os 90 dias, o valor da resistência à compressão, nessa idade, foi cerca de cinco vezes inferior ao obtido para as argamassas com adição de metacaulim.

Aggelakopoulou e outros (2011), ao estudarem argamassas de cal aérea com metacaulim, em traços ponderais de metacaulim/cal ≤ 1 , registraram valores máximos de resistência mecânica nos primeiros três meses, notando, posteriormente, diminuição de valores até um ano, período em que estas se estabilizaram. Os autores associaram a perda de resistência mecânica ao aparecimento de microfissuras nos corpos de prova, devido a fenômenos de retração, principalmente, nos casos com maior proporção de metacaulim/cal.

Faria (2004), ao analisar argamassas com três traços volumétricos distintos de cal: metacaulim: areia de rio (1:0,5:3; 1:1:4; 1:1,5:5), obteve melhores resultados para o traço volumétrico (1:1:4) ou traço ponderal metacaulim/cal de 1:0,8. Os valores máximos de resistência foram obtidos para a idade de 60 dias. Aos 90 dias, os valores médios de resistência à tração e à compressão foram, respectivamente, 0,48 e 2,2 MPa.

Em sua tese, intitulada *Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas*, Velosa (2006) avalia argamassas de cal aérea com diversas pozolanas (naturais e artificiais). No que se refere à escolha da composição das argamassas, a autora levou em conta, fundamentalmente, as informações bibliográficas obtidas e, também, os resultados de análises das argamassas antigas. Para as argamassas com pozolanas naturais, pó de tijolo e resíduos (cinzas volantes), ela utilizou a composição em volume 1:1:4 (cal: pozolana: areia). Nas argamassas com metacaulim, foi utilizado o traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado) com percentagens muito pequenas de 10% e 20% de metacaulim, sobre o peso em cal aérea, em razão da elevada reatividade desse material, como explicou a autora.

Velosa (2006) justifica o uso do traço 1:1:4 (cal:pozolana:areia), em volume, na primeira fase de estudo experimental, pela facilidade de comparação, por considerar a pozolana (natural ou artificial) funcionando, parcialmente, como ligante e, parcialmente, como agregado. Comparou os resultados obtidos com esse traço com a composição tradicional de argamassas de cal aérea e areia, 1:3. Para as argamassas com metacaulim, a autora observou um aumento dos valores de

resistência dos 28 para os 90 dias, e concluiu que, embora a adição de maior quantidade de metacaulim parece ter proporcionado um ligeiro aumento da resistência à compressão, o mesmo efeito não aconteceu em relação à resistência à tração.

Velosa (2006) conclui, nos seus estudos, que a quantidade de metacaulim usada nas argamassas estudadas (10% e 20% sobre o peso da cal), inferior à devida, foi consumida na reação pozolânica. Segundo a autora, a taxa deficiente de metacaulim não teria favorecido a formação de produtos de reação em quantidade suficiente para criar ligações. A modificação na estrutura porosa das argamassas de cal aérea com metacaulim teria induzido resistências mecânicas mais baixas e modificações no comportamento à água. Portanto, a reduzida contribuição adicional fornecida, nessa dosagem, às argamassas de cal, não favorece a sua utilização.

Barata (2007) faz referência ao uso de metacaulim na produção de argamassas de cal hidráulica, para aplicação como revestimento e assentamento de blocos, tanto em novas obras como no restauro de construções históricas. Ele menciona que a variabilidade no tempo de pega e na resistência, apresentada pelas argamassas obtidas com cales hidráulicas naturais, pode ser corrigida com a incorporação do metacaulim. Entre as vantagens, além da compatibilidade com as alvenarias antigas, o autor destaca que com a adição de 10% de metacaulim, por exemplo, tanto nas argamassas hidráulicas como naquelas que possuem somente hidróxido de cálcio como aglomerante (argamassas não hidráulicas), a pega inicial ocorre dentro de um período de tempo de 24 horas, o que é aceitável para o construtor, em termos de produtividade.

No que concerne à influência da incorporação desse material nas características de porosidade e distribuição do tamanho de poros, estudos revelam que o incremento do teor de metacaulim proporciona um refinamento da estrutura de poros e o aumento no volume total de poros. Assim, matrizes contendo poros capilares grandes transformam-se em um sistema com poros consideravelmente menores, em que há diminuição do raio de poros e o aumento da quantidade de poros pequenos, pelo que se deve esperar um aumento na durabilidade dessas composições com adições de metacaulim (BARATA, 2007).

Enfim, vale ressaltar que a incorporação do metacaulim em argamassas de cal, para utilização, no campo da conservação e restauro de edifícios, tem sido objeto de investigações portuguesas, no sentido de dotar essas argamassas de capacidade de

endurecimento, especialmente em meios úmidos ou de difícil acesso de CO_2 . Em particular, destaca-se projeto dirigido ao estudo de formulações de argamassas de cal aérea com metacaulim destinadas à conservação de edifícios antigos, o Projeto METACAL, no âmbito do qual surgiram diversos trabalhos sobre o tema (VELOSA, 2013).

3.4.3 Cinzas Volantes

A primeira evidência de indicação para o emprego das cinzas resultantes da queima de carvão como material pozolânico originou-se, como observado por Zampieri (1989), da sugestão de Belidor, ainda em meados do século XVIII, de utilizar os resíduos das fornalhas dos ferreiros, após prévia eliminação de sujeiras e do carvão residual. Posteriormente, o material pulverizado produzido em estações de energia elétrica pela combustão de carvão mineral, depois de removidos os gases de combustão das fornalhas da caldeira e coletados por dispositivos mecânicos, foi visto como alternativa interessante para aplicação na formulação de argamassas e concretos, uma vez que se trata de material constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, com inúmeras propriedades e características.

De modo geral, para as empresas geradoras desse subproduto, resultante da queima de carvão mineral e consagrado em todo o mundo como “cinzas volantes”, o descarte final torna-se um problema comum, sendo de relevante proveito o seu estudo voltado para as aplicações tecnológicas.

Considerando-se que a indústria da construção civil é o maior usuário dos subprodutos de carvão mineral, o emprego desse material na produção de argamassas e concreto possibilita reduzir a estocagem de cinzas geradas solucionando, em parte, o problema ambiental.

As cinzas volantes são formadas de fases cristalinas e amorfas, constituídas, principalmente, por quatro óxidos: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3) e cal (CaO); apresentam, portanto, características pozolânicas. As fases amorfas de silicatos e aluminatos reagem com o hidróxido cálcio, em presença de água, para produzir vários compostos de silicatos de cálcio (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratado. A sua composição depende, essencialmente, dos componentes minerais do carvão. As partículas são, tipicamente, esféricas e constituídas de grãos muito finos, com diâmetros compreendidos, normalmente, entre $1\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$. Fernández-

Jiménez e Palomo (2003) mostram, em seus estudos, que a finura das cinzas depende do grau de pulverização do carvão, do processo térmico envolvido na queima e do tipo de filtro instalado na estação.

Como melhor indicador de comportamento das cinzas volantes em concretos, Thomas (2007) sugere a avaliação do teor de cálcio presente. As cinzas volantes com baixo teor de CaO (<8%) não exibem significativo comportamento hidráulico tal como as cinzas volantes de cálcio elevado (> 20% CaO), que possuem maior variedade de fases cristalinas em relação às outras. Algumas dessas fases, ao reagirem com a água, favorecem reações mais rápidas, permitindo caracterizar as cinzas com alto teor de cálcio de natureza pozolânica e hidráulica.

Como material de construção civil, as cinzas são adicionadas durante a fabricação de cimento pozolânico ou utilizadas na confecção de concretos, como material de substituição parcial do cimento Portland, na forma de fíler. O formato esférico das partículas é vantajoso sob o ponto de vista da exigência de água e da melhora da trabalhabilidade das misturas. Os grãos muito finos e, conseqüentemente, a elevada superfície específica, caracterizam-se por serem mais reativos, pois favorecem a dissolução e a formação do gel na matriz cimentícia.

No Brasil, a utilização de cinzas volantes generalizou-se, sobretudo, na Região Sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina), devido à existência de diversas termoelétricas que foram instaladas nessa região, uma vez que nesta se encontram várias jazidas de carvão mineral.

A normativa brasileira que regulamenta os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, a *NBR 12653* (ABNT, 2014), classifica as cinzas produzidas a partir da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas em Classe C. Diferentemente, as pozolanas naturais e artificiais, como as argilas calcinadas, estão enquadradas na Classe N.

Particularmente, na elaboração de concretos e argamassas, as cinzas volantes constituem subproduto ainda pouco explorado nacionalmente, muito embora dados da literatura mostrem o grande potencial que essas adições minerais apresentam quando substituídas em massa de cimento, sem efeitos nocivos para a durabilidade, desde que as misturas sejam devidamente dosadas. No que concerne à sua utilização na formulação de argamassas nacionais, verificam-se pesquisas que tratam da incorporação das cinzas volantes em argamassas como substituta parcial

do cimento (SIQUEIRA, 2011; SIQUEIRA et al., 2012; FERREIRA et al., 2014; SOUSA et al., 2015), levando-se em consideração o potencial pozolânico que apresentam.

Siqueira e outros (2012) estudaram as cinzas de carvão mineral, como material de reaproveitamento, na formulação de argamassas com base cimentícia. Substituíram, parcialmente, o cimento por cinza, variando os teores em 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, nas argamassas elaboradas no traço de 1:4, sendo uma parte de cimento e cinzas volantes, e quatro partes de agregado. Observaram a diminuição da resistência com o incremento da porcentagem de cinzas e, por meio de análises complementares de Difração de Raios X, constataram que a substituição desse resíduo pode ser feita com sucesso em argamassas com teores de até 30%.

As observações efetuadas por Ferreira e outros (2014) sobre o comportamento físico, mecânico e reológico de argamassa de assentamento e revestimento, com adição de rejeito de construção civil e cinzas volantes, foram conclusivas sobre a adequabilidade do uso desse último material na produção de argamassas com base em cimento.

Sousa e outros (2015), em suas análises sobre a utilização da cinza volante (CV) e de resíduos da construção civil na elaboração de argamassas de cimento, obtiveram resultados indicativos de melhora da trabalhabilidade no estado fresco. No estado endurecido, no entanto, constataram aumento da absorção de água e da porosidade, além da diminuição da resistência à compressão, sendo esse comportamento atribuído às diferenças granulométricas entre as cinzas e o resíduo, o que ocasiona a formação de vazios na estrutura após período de cura. Ainda assim, os autores consideram razoáveis os resultados ao fazer comparações com as exigências da *NBR 13281* (ABNT, 2005).

De forma geral, as observações realizadas pelos autores consultados, no que se refere às argamassas de cimento, mostraram que a incorporação das cinzas volantes, além de reduzir a exigência de água para a confecção da mistura e melhorar a trabalhabilidade, influencia, positivamente, o comportamento mecânico.

Quanto ao emprego das cinzas volantes, em argamassas à base de cal para a conservação e restauro, no país, não foram encontradas pesquisas científicas aprofundadas. Destaca-se, entretanto, estudo publicado sobre o tema, em congresso nacional (SILVOSO, 2016), limitado à avaliação das características no estado fresco e de resistência à compressão de argamassas de cal e areia (traço

1:3), elaboradas com adição de pó de tijolo moído, metacaulim ou cinzas volante, nas proporções 1:0,5; 1:1; 1:2; 1:3 de cal e pozolana.

A incorporação de cinza pesada, outro subproduto proveniente da combustão do carvão mineral, na produção de argamassas de revestimento nacionais, foi também objeto de estudo no trabalho desenvolvido por Margon (2002). Tal cinza, caracterizada por granulometria graúda e por possuir menor reatividade que as cinzas volantes, quando usada em substituição ao agregado nas argamassas de cimento, proporcionam características de desempenho satisfatórias próximas às dos produtos similares utilizados na construção civil, como constatou a autora.

Considera-se importante destacar o estudo sobre o desempenho de composições de cimento, cinzas volantes e metacaulim, realizado pelo investigador português Camões (2013), que desenvolveu experiências com objetivo de caracterizar o comportamento dessa mistura, cujo produto final denomina de “concreto-ecoefficiente”, para uso como alternativa ao concreto convencional.

Em suas experiências, o referido autor elaborou misturas de cimento + cinzas volantes + metacaulim, com percentuais de adições de: 10%Met; 20%CV; 40%CV; 60%CV; 10%Met+20%CV; 10%Met+40%CV; 10%Met+60%CV.

Camões observou que, em pequena percentagem de substituição do cimento por adição de metacaulim (10%), a trabalhabilidade não é crítica, mas, à medida que essa quantidade aumenta, o manuseio da mistura fica comprometido. Ele afirma que a incorporação de cinzas volantes, entre outros aspectos, compensará a reduzida trabalhabilidade da mistura. Nesse sentido, as duas adições são complementares, pois enquanto as cinzas volantes proporcionam um efeito mitigador da desvantagem da utilização do metacaulim (trabalhabilidade), este, reagindo muito mais rapidamente com o hidróxido de cálcio, propicia resistências iniciais elevadas.

As conclusões do autor apontam para a provável responsabilidade da resistência do metacaulim, em uma primeira fase e, em fases mais adiantadas, das cinzas volantes, à medida que essa adição reage, lentamente, com o hidróxido de cálcio. Quanto ao comportamento à água, as composições ternárias (cimento+metacaulim+cinzas volantes) registraram valores muito mais reduzidos relativamente às composições binárias (cimento+metacaulim ou cimento+cinzas volantes). Finalmente, o autor concluiu sobre a eficiência do efeito sinérgico resultante da mistura de metacaulim e cinzas volantes para o desempenho

mecânico e de durabilidade, particularmente interessante, nas situações com elevadas substituições de cimento por outras adições pozolânicas pouco reativas.

Diante do exposto, cabe pesquisa direcionada à avaliação de argamassas de cal aérea, fazendo uso de misturas ternárias, com adições de metacaulim e cinzas volantes, com a finalidade de extrapolar as conclusões extraídas nos estudos efetuados para concretos.

3.4.4 Sílica Ativa

Sílica ativa, microssílica ou sílica fume, é um subproduto resultante da fabricação de metais com ligas de silício e ferro/silício. O material é derivado do processo de produção do silício metálico e das ligas de ferrossilício, em fornos elétricos, que atingem temperaturas na ordem dos 2000°C, e o seu processo de obtenção pode ser explicado, sinteticamente, da seguinte forma: durante o aquecimento da matéria-prima, para fabricação das ligas metálicas, ocorrem reações químicas em que é produzido SiO_2 sob a forma de vapor (fumaça). Essa “fumaça de sílica” oxida-se e condensa-se, em zonas de baixa temperatura, em partículas esféricas extremamente finas, posteriormente removidas por filtração, e que constituem o material designado por sílica ativa (VASKE, 2008).

A composição química da microssílica é, basicamente, sílica amorfa, ou seja, dióxido de silício na fase vítrea, em teores superiores a 80%, o que faz com que este se destaque dentre as outras adições pozolânicas, como composto mais reativo e mais amorfo. O que caracteriza a sílica ativa, como material pozolânico muito reativo, é a sua finura extrema e o alto teor de óxido de silício amorfo.

A sílica ativa era considerada como material de refugo, no entanto, o alto teor de sílica amorfa das partículas e o seu tamanho extremamente reduzido tornam esse material bastante apropriado para uso em concretos e argamassas. É prática corrente o seu emprego em materiais compósitos à base de cimento Portland (argamassas simples de cimento, concreto) devido à sua ação de microfíler e à alta atividade pozolânica, resultando em redução da porosidade e em melhorias na resistência mecânica.

A influência da incorporação desse material, nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto, é elencada por vários autores. Vieira e outros (1997), em sua abordagem sobre a durabilidade e a resistência mecânica de concretos e

argamassas com adição de sílica ativa, afirmam que a influência da adição de sílica ativa tem dois efeitos, microfíler e pozolânico que, em conjunto, propiciam modificação na microestrutura dos materiais à base de cimento, tendo como consequência mistura homogênea, mais compacta, que se reflete no aumento do desempenho dos concretos e argamassas, tanto sob o ponto de vista de durabilidade, como das propriedades mecânicas.

Nacionalmente, diversos estudos foram desenvolvidos no âmbito de argamassas com cimento ou concretos, com adição de sílica ativa, com maior foco na análise do comportamento reológico e mecânico. Destacam-se, sobretudo, pesquisas realizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS). Os resultados obtidos revelaram melhorias significativas, proporcionadas pela adição de sílica ativa em concretos e argamassas, nas propriedades diretamente relacionadas à durabilidade e ao comportamento mecânico.

Vaske e outros (2008) realizaram estudos sobre a aplicação da argamassa com adição de sílica ativa, como material de reforço em elementos comprimidos de concreto, e observaram a atuação da incorporação de sílica ativa sob duas formas: i) efeito físico (fíler), em que as partículas esféricas extremamente finas (com diâmetro médio da ordem de 100 vezes menor que o do cimento) preenchem os espaços vazios deixados durante a hidratação do ligante. Como consequência, há maior densificação da pasta de cimento, do concreto ou da argamassa; ii) efeito químico (pozolânico), no qual as partículas de sílica (dióxido de silício) reagem com o hidróxido de cálcio, gerado na hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado, maior responsável pela resistência da pasta endurecida. Para esses autores, os dois efeitos associados resultam na modificação da microestrutura e nas propriedades macroscópicas das argamassas ou concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Essa modificação proporciona o aumento no desempenho, tanto sob o ponto de vista de durabilidade, quanto das propriedades mecânicas.

De forma geral, os estudos revelam que a sílica ativa proporciona, em concretos: aumento da resistência à compressão, à flexão e do módulo de elasticidade, reduzida permeabilidade (aumenta a resistência aos ataques dos agentes externos). Como consequência, propicia maior resistência à corrosão do aço e ao ataque por cloretos.

O emprego de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado foi avaliado por Schuler (1998), o qual conclui que a incorporação dessa adição confere boa aderência ao substrato, mesmo em baixas idades; e também por Kulakowski (1994), que observou aumento de até seis vezes na resistência à penetração de íons cloretos com adições de 15% de sílica ativa, que impacta, positivamente, na durabilidade de argamassas.

Os estudos sobre argamassas de cimento com sílica ativa são ainda escassos. Gleize e outros (2003) estudaram os efeitos microestruturais da substituição de 10% de cimento Portland por sílica ativa em argamassas de alvenaria com traço 1: 1: 6 (cimento: cal: areia), em volume. Verificaram que a incorporação de sílica ativa reduz a porosidade total e aumenta a resistência à compressão, apenas na idade avançada (acima de 28 dias) e, como esperado, a estrutura de poros da argamassa com sílica ativa é mais fina do que a argamassa sem sílica ativa. Esse refinamento no tamanho dos poros é mais pronunciado aos 28 dias (do que em 7 dias), devido à reação pozolânica da sílica ativa. Os autores constataram que, no sistema cimento-cal-sílica ativa, a cal é mais bem distribuída na mistura e a reação pozolânica da sílica ativa ocorre, principalmente, nos maiores poros capilares.

Outra contribuição, em nível nacional, que merece destaque se refere à pesquisa realizada por Almeida (2007), sobre o desempenho de argamassas de cimento com sílica ativa, expostas ao ambiente marinho. O autor realizou experiências com misturas, traço 1:2,5 (cimento, areia), elaboradas com 6% de sílica ativa em substituição ao cimento, e as submeteu a ciclos de molhagem e secagem em região litorânea, realizando, em seguida, ensaios mecânicos (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) em diferentes idades. Simultaneamente, avaliaram-se, por meio de difração de raios X, as mudanças de fases ocorridas na estrutura, definidas com base na formação dos compostos hidratados, ao longo do tempo.

Almeida verificou que, quando sujeitas ao ambiente marinho, as argamassas com sílica apresentaram elevado desenvolvimento de resistência, nas primeiras idades; mas, com a contínua exposição ao meio agressivo, constatou a diminuição da sua capacidade de resistir à compressão, em idades avançadas, quando comparadas às argamassas de referência. O autor atribui o melhor comportamento das formulações sem sílica à formação de carbonato de cálcio, com características cimentícias dentro dos vazios (fissuras) das argamassas. A maior resistência às

solicitações de compressão das composições com sílica, nas primeiras idades, estaria associada a outros mecanismos envolvidos. Já a perda da resistência seria devida à expansão e fissuração no interior da argamassa provocada pela formação de compostos como etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), em consequência da incorporação de íons sulfato na matriz cimentícia. Por fim, a pronunciada redução do módulo de elasticidade observada nas argamassas com sílica ativa, em idades avançadas, indicando perda de rigidez, constitui, para o investigador, aspecto favorável às composições, uma vez que lhe permite maiores deformações antes de fissurar-se ou romper-se.

Na próxima seção, apresentam-se considerações sobre as reações pozolânicas entre a cal e as adições, efetuadas a partir das informações obtidas da literatura sobre possíveis alternativas a incorporar em argamassas de cal para uso no restauro.

3.5 REAÇÕES POZOLÂNICAS ENTRE A CAL E AS ADIÇÕES

Definem-se como reações pozolânicas as reações químicas que ocorrem entre materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio, em presença de água. Tais materiais, ditos como “pozolânicos”, são constituídos de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e não apresentam propriedade ligante, mas, quando finamente moídos, e na presença de água, são capazes de combinar-se com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para dar origem a compostos estáveis em água e com propriedades ligantes e resistentes, semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes de cimento Portland. Nas argamassas à base de cal aérea com adição pozolânica, a reação acontece como consequência da combinação do hidróxido de cálcio disponível com os elementos reativos do material pozolânico, após a adição de água.

Em geral, os materiais pozolânicos apresentam microestrutura heterogênea, caracterizada por duas fases: a cristalina (óxidos de silício, de alumínio, de ferro, de cálcio, entre outros em pequena proporção); e a vítrea, sob a forma de compostos amorfos, como a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3). Em uma composição, o que de fato caracteriza as reações pozolânicas é a associação entre a fase vítrea (amorfa) do material pozolânico e o hidróxido de cálcio.

Para Zampieri (1989), as reações pozolânicas processam-se, essencialmente, por dissolução e formação de novas fases. O material amorfo, ao entrar em contato com o meio alcalino, provoca a dissolução do silício e do alumínio, na superfície das suas partículas. Esses elementos reagem com o excesso de cálcio existente, dando origem a cristais de aluminatos, silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado.

Usualmente, as reações pozolânicas são bastante complexas e podem ser influenciadas por fatores intrínsecos (natureza, composição, superfície específica) ou extrínsecos ao material pozolânico tais como: temperatura de calcinação do material, relação cal/adicação, quantidade de água e condicionamento das argamassas. As novas fases formadas (compostos hidráulicos) modificam a microestrutura da mistura, sendo estas as responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica e, portanto, pela melhora no desempenho do material no estado endurecido.

Segundo Hoppe Filho (2008), as características intrínsecas das adições pozolânicas, principalmente o teor da fase vítrea, determinam a sua eficiência como material pozolânico. Enquanto a fração cristalina atua como inerte, independentemente da presença de cal, a fração vítrea solubiliza e consome íons de cálcio para formação de compostos hidráulicos. Diante desses fatores, no que se refere à caracterização do material pozolânico, esse autor considera imprescindível a determinação do teor de fase vítrea e da área superficial específica para a classificação do material como pozolânico, uma vez que a análise da sua reatividade depende, sobretudo, da área de interação com o meio alcalino. Julga, também, indispensável a determinação do teor da fase vítrea nas composições com esses materiais, para a análise sistemática da influência do material pozolânico.

3.5.1 Produtos de reação

São vários os produtos de reação resultantes da interação da sílica e da alumina das adições com o hidróxido de cálcio. Dentre os compostos formados, comumente encontrados na literatura, incluem-se os silicatos de cálcio hidratado (CSH), o aluminato de cálcio hidratado (CAH) e o silicoaluminato de cálcio hidratado

(CASH)¹⁰. De modo geral, as equações que expressam as reações que formam esses produtos estão representadas a seguir:

- Sílica (SiO_2) + $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow$ Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H);
- Alumina (Al_2O_3) + $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow$ Aluminato de Cálcio Hidratado (C-A-H);
- Sílica (SiO_2) + Alumina (Al_2O_3) + $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow$ Silicoaluminato de Cálcio Hidratado (C-A-S-H).

O mecanismo que envolve as reações pozolânicas é complexo e processa-se da seguinte forma: à temperatura ambiente, a sílica das adições (SiO_2) reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produzindo o gel de silicato de cálcio hidratado (CSH); ao longo do tempo, o hidróxido de cálcio vai sendo reduzido de forma significativa e novos produtos vão sendo formados pela combinação do hidróxido remanescente com alumina, e/ou outras fases presentes; entre os novos produtos originados, destacam-se os aluminatos de cálcio hidratado (CAH) e os silico-aluminatos de cálcio hidratados (stratlingita – C_2ASH_8). Se, na composição, resta alguma portlandita livre, podem ser produzidos, ainda, os carboaluminatos, em presença de CO_2 .

A literatura consultada (GAMEIRO et al., 2012; GAMEIRO et al., 2014; GRILLO et al., 2014; SANTOS SILVA et al., 2014) faz referência a uma série de compostos de hidratação possíveis de serem formados a partir das reações entre a cal e as adições pozolânicas. No Quadro 5, são apresentados, de forma sintetizada, juntamente à sua fórmula química, os principais produtos referenciados por esses autores.

Quadro 5 – Compostos possíveis de serem formados na atividade pozolânica

Composto	Fórmula química
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	CSH
Silicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H)	C_2ASH_8 Stratlingita ou Gehlenita
	C_3ASH_4 Katoita (sílica hidrogarnet)
Aluminato de cálcio hidratado (C-A-H)	C_4AH_{13} (Aluminato tetracálcico hidratado)
	C_3AH_6 (Hidrogranada – Aluminato tricálcico hidratado)
	$\text{C}_2\text{AH}_{6,5}$
Monocarboaluminato de cálcio hidratado	$\text{C}_4\text{ACH}_{11}$

Fonte: Elaboração própria (2017).

¹⁰ As notações utilizadas referem-se aos compostos intervenientes nas reações: C=CaO, S= SiO_2 , A= Al_2O_3 e H= H_2O , sendo usada essa terminologia em analogia à adotada pela indústria do cimento, para os produtos de hidratação do cimento e da cal hidráulica.

O gel de silicato de cálcio hidratado CSH, um dos primeiros compostos a serem formados, é o principal produto de hidratação das reações entre a cal e o material pozolânico. A alumina, ao reagir com o hidróxido de cálcio, produz fases adicionais, como a stratlingita ou (gehlenite hidratada), com fórmula química, C_2ASH_8 . Esse composto pode ser encontrado nas reações com pozolanas tanto naturais como artificiais, sendo facilmente identificado na difração de raios X como fase cristalina. A sua formação depende, principalmente, da taxa (Alumina + Sílica)/Hidróxido de cálcio e da temperatura de reação. Gameiro e outros (2014) atribuem-lhe a responsabilidade pelo incremento de resistência nas argamassas com adição de metacaulim.

O C_3ASH_4 (Katoita) é um produto de reação que pode ser esperado nas misturas contendo stratlingita e hidróxido de cálcio. Segundo Gameiro e outros (2014), a presença desse sílicoaluminato de cálcio hidratado pode trazer efeitos negativos às composições. A sua ocorrência depende, basicamente, da disponibilidade de hidróxido de cálcio. Nas composições com decréscimo importante desse composto, aos 90 dias, não é suposto haver formação de Katoita, conforme sugere o autor.

Frías e Cabrera (2001) investigaram a cinética da reação pozolânica no sistema metacaulim+hidróxido de cálcio, e observaram que o C-S-H surge aos dois dias, enquanto C_2AH_8 e C_4AH_{13} apareceram, somente, aos nove dias.

Os aluminatos de cálcio hidratados, como o C_4AH_{13} (Aluminato tetracálcico hidratado) e o C_3AH_6 (hidrogranada), são encontrados como produtos de reação da cal com pozolanas artificiais. O aluminato tricálcico hidratado (C_3AH_6) resulta da conversão do aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13}), em condições de cura com elevadas temperaturas.

Gameiro e outros (2014), em suas experiências com argamassas de cal e metacaulim, identificaram fases hidratadas de aluminatos (monocarboaluminatos – C_4ACH_{11} – e aluminato de cálcio hidratado – $C_2AH_{6,5}$) que apresentaram comportamento instável, no decorrer do tempo, derivado, segundo os autores, da redução do hidróxido de cálcio na composição. A presença dessas fases instáveis pode contribuir para o decréscimo da resistência mecânica das argamassas com adição pozolânica.

Nas argamassas de cal sem adições, o hidróxido de cálcio presente vai sendo consumido com a evolução, ao longo do tempo, da reação de carbonatação. O

desenvolvimento dessas reações é confirmado pelas proporções de portlandita e calcita. Nas composições de cal com material pozolânico, pelo menos até os 90 dias, parte do hidróxido de cálcio é, também, consumido nas reações pozolânicas. O ideal é que maior quantidade de hidróxido de cálcio livre esteja disponível para que este possa ser consumido nas reações pozolânicas. Ambientes marinhos ou úmidos apresentam-se como condições ideais de cura para tais composições, uma vez que favorecem a elevada hidratação e menores taxas de carbonatação da cal (GRILO et al., 2014).

3.5.2 Atividade pozolânica

O termo "atividade pozolânica", segundo Massazza (1998), abrange todas as reações que ocorrem entre os constituintes ativos das pozolanas, a cal e a água; sendo os materiais pozolânicos caracterizados pelo grau, ou índice de reação pozolânica, isto é, pela sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio. Pode-se afirmar que, quanto maior a quantidade de hidróxido de cálcio consumido pela pozolana, maior a sua atividade.

A taxa de reação é dependente das características intrínsecas da pozolana (MASSAZZA, 1998). Nas primeiras idades, a atividade pozolânica relaciona-se, fundamentalmente, com a área superficial específica do material. Em idades posteriores, prevalece a composição mineralógica do material (composição química e teores de fases reativas – sílica e alumina) como fator desencadeador das reações pozolânicas. Nesse sentido, destaca-se o efeito da moagem como fator preponderante na cinética da reação pozolânica no período inicial da mistura e, conseqüentemente, para o desenvolvimento da resistência mecânica nas primeiras idades (SHI et al., 2000). Além desse, outros fatores tais como proporções de mistura, relação material pozolânico/cal, quantidade de água ou espaço disponível (para a formação e o desenvolvimento de produtos de hidratação), além da temperatura de reação, também podem controlar a taxa de reação.

O avanço da atividade pozolânica, com a contínua ocupação dos poros pelos compostos hidratados, e a presença de grãos mais finos de material inerte promovem, ao longo do tempo, o gradativo refinamento da microestrutura, o que irá repercutir, diretamente, sobre as propriedades das composições no estado

endurecido, tais como permeabilidade, difusão, absorção capilar, entre outras (HOPPE FILHO, 2008).

No sistema (cal + adição), a atividade pozolânica pode ser avaliada, progressivamente, por meio da redução da cal livre e inclui a determinação de dois parâmetros: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que essa combinação se processa. Ambos os fatores dependem da natureza da pozolana (composição mineralógica, defeitos na estrutura cristalina) e, mais precisamente, da qualidade e quantidade de fases ativas presentes. Aspectos como natureza das fases ativas, proporção de adição, teor de SiO_2 e taxa Ca(OH)_2 /adição pozolânica também influenciam a quantidade de cal combinada com o material pozolânico (MASSAZZA, 1998).

A rapidez com que se processa a combinação da sílica e alumina com a cal difere, substancialmente, entre os materiais pozolânicos. A reação inicial das cinzas volantes com a cal é mais lenta do que a das pozolanas naturais com a cal (até aos 28 dias), como observado por alguns autores (COUTINHO, 1958; MASSAZZA, 1998). Já as reações entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio ocorrem muito rapidamente até o momento da pega. Após esse período, o desenvolvimento das reações é mais lento.

A avaliação da atividade pozolânica das adições é realizada por meio de ensaios que permitam estimar a taxa de combinação com a cal, e que possibilitem a identificação dos produtos (fases) formados, que conferirão resistência às argamassas de cal. Destacam-se ensaios de reação química (método de Chapelle) e de resistência mecânica, com a cal ou com o cimento e, de forma complementar, análises químicas, mineralógicas, térmicas e microestruturais que permitem uma caracterização dos materiais com potencial pozolânico.

Uma abordagem mais detalhada sobre os métodos de ensaios frequentemente utilizados para caracterização (física, química, mineralógica e microestrutural), além da avaliação da atividade pozolânica, será feita no Capítulo 5 desta tese. Na seção a seguir, expõem-se os principais aspectos que devem orientar a formulação das argamassas destinadas às intervenções restaurativas.

3.6 REQUISITOS DAS ARGAMASSAS DESTINADAS AO RESTAURO

De modo geral, as intervenções nos revestimentos de edifícios antigos com algum valor patrimonial devem orientar-se pelo princípio da máxima conservação, reduzindo-se ao mínimo indispensável as remoções e substituições das argamassas originais. A metodologia a ser adotada em uma intervenção sobre revestimentos antigos deve, portanto, como primeira opção, admitir a conservação de soluções antigas, apoiada em estratégias de manutenção e reparação localizadas, em respeito aos princípios de autenticidade e materialidade. Quando se faz necessária alguma operação de substituição ou reparação, esta deve contribuir para garantir os requisitos funcionais, de compatibilidade e de aspecto.

No que concerne à seleção de formulação das argamassas de renovação, os investigadores Papayianni (1998) e Válek (2000) sugerem que esta seja fundamentada em dois procedimentos lógicos: i) tentar reproduzir a formulação antiga ou ii) elaborar solução compatível com o sistema preexistente, com desempenho adequado e aparência estética que salvasse a imagem do edifício e mantenha a sua identidade. Em qualquer dos casos, os autores concordam que a elaboração de composições demanda conhecimento e aplicação de metodologias e tecnologias muito mais parecidas com o original e, portanto, sempre exige estudo de caso cuidadoso.

Veiga (2005) considera praticamente impossível o recurso de reproduzir a formulação antiga, tendo em conta a existência de lacunas de conhecimentos no que diz respeito aos processos dinâmicos de evolução da argamassa, que incluem ciclos de cristalização e recristalização e reações contínuas entre os constituintes. A autora adverte sobre a impossibilidade de rastrear aspectos determinantes para o bom desempenho do revestimento, tais como, técnicas de execução, habilidades de fabricação, tipo de cura e condições climáticas subsequentes à aplicação. Segundo Veiga, ao se tentar reproduzir a composição de uma argamassa antiga com base somente na caracterização analítica, corre-se o risco de obter formulação com desempenho completamente diferente, por vezes, incapaz de cumprir as funções que lhe estão destinadas no edifício.

Ainda de acordo com Veiga (2005), as composições que se destinam à conservação de edifícios antigos, de interesse ao patrimônio histórico ou cultural, necessitam cumprir determinados critérios, devendo: não contribuir para degradação

dos elementos pré-existentes, proteger as paredes, ser reversíveis (ou, pelo menos, reparáveis), ser duráveis e favorecer a durabilidade do conjunto. A autora ressalta, também, que tais soluções não deverão prejudicar a apresentação visual da arquitetura nem descaracterizar o edifício.

Hayen e Van Balen (2005 apud VEIGA, 2009, p.86) admitem que a análise das argamassas antigas contribui para guiar o estudo dos requisitos técnicos para as argamassas de reparação e consideram a necessidade de estes serem estabelecidos em função das condições a que estarão sujeitas, tais como: clima, presença de umidade, presença de sais solúveis; e, também, das características dos materiais constituintes das composições.

Na opinião de Groot e outros (2012), o estabelecimento de requisitos para as argamassas de revestimento destinadas ao restauro é essencial para a tomada de decisão quanto à solução a adotar nas intervenções. Segundo esses autores, ao se estabelecer requisitos que orientem a especificação das argamassas de substituição ou de reparação, o objetivo fundamental é alcançar a melhor compatibilidade entre o substrato e a argamassa, de forma a garantir durabilidade razoável e, assim, proteção à parede. Em virtude de os revestimentos estarem expostos às condições climáticas e à degradação devida à ação da umidade e dos sais solúveis, os requisitos de compatibilidade devem ser cumpridos dando importância às características do substrato, em consonância com as exigências mecânicas e de resistência aos agentes ambientais.

Groot e outros (2012), com base nas determinações da RILEM ¹¹(HUGHES et al., 2012), expõem uma série de requisitos funcionais e atribuem peso a cada um deles para os diferentes tipos de argamassa (reboco exterior, interior ou de juntas), segundo grau de importância, conforme é possível observar no Quadro 6. Nota-se que o nível de exigência de desempenho em relação a determinadas características para rebocos exteriores é superior ao requerido para os rebocos interiores.

¹¹ A RILEM, sigla com significado original em francês – *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Experts des Matériaux* – é conhecida, atualmente, como União Internacional de Laboratórios e Peritos em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas. Incluem-se, entre os seus membros, laboratórios de pesquisa e ensaios de edifícios de diversos países, bem como um número significativo de membros individuais e institucionais que realizam estudos relacionados aos materiais ou à construção.

Quadro 6 – Requisitos técnicos para argamassas, por grau de importância

Requisitos técnicos	Reboco exterior	Reboco interior	Juntas
Aderência	3	3	3
Resistência à compressão e à tração na flexão ^(a)	1	1	2
Deformabilidade (Módulo de Elasticidade)	2	1	3
Resistência à penetração de água	3	1	3
Resistência ao gelo-degelo	3	0	3
Dilatação térmica	3	3	1
Permeabilidade ao vapor de água	3	3	3
Comportamento de absorção e secagem	3	2	3
Estética	3	3	3
Classificação: 0 = não tem importância a 3 = com muita importância			
^(a) Em relação ao substrato, os valores de resistência e rigidez, para argamassa, devem ser menores que os das unidades de alvenaria.			
Fonte: Adaptado de Hughes et al. (2012, p. 1290).			

De forma geral, os autores consultados, que tratam do tema dos revestimentos de renovação (VÉLEK, 2000; FARIA, 2004; VEIGA, 2005; MOROPOULOU et al. 2005), são unânimes sobre as exigências do ponto de vista de autenticidade, de compatibilidade físico-química e mecânica, além do aspecto estético das argamassas que serão aplicadas em alvenarias do patrimônio histórico.

A autenticidade histórica de argamassas requer a combinação de ingredientes, o mais próximo possível dos originais. Para isto, faz-se necessária a coleta de dados sobre a composição das argamassas existentes. Sobre esse assunto, Groot e outros (2012) recomendam a avaliação das argamassas em contato com a alvenaria, por meio da análise da granulométrica, além da utilização de técnicas de caracterização química e mineralógica, para averiguar a composição, o uso de adições e eventuais produtos de reação e degradação formados. A partir daí, espera-se extrair conclusões sobre a matéria-prima, mais próxima da original, que deverá ser usada para reparação, após avaliação da sua adequabilidade.

No que diz respeito à compatibilidade física da composição, ensaios de avaliação da porosidade e do comportamento à ação da água, como absorção capilar e características de secagem, devem ser efetuados. Sobre esse aspecto, os revestimentos devem oferecer alguma resistência à penetração de água até o suporte, sem dificultar a sua secagem. De forma a limitar a quantidade de água que

possa atingir o suporte, as velocidades com que ocorrem a absorção e a secagem são fundamentais. Argamassas com absorção relativamente baixa de água podem fornecer barreira à penetração de substâncias agressivas, como sais da água subterrânea. Adicionalmente, o revestimento novo não deve impedir a passagem do vapor de água que circula entre o interior e o exterior do edifício, pois isto acontecendo poderá ocasionar retenção de água dentro da alvenaria. Nesse sentido, a avaliação da permeabilidade ao vapor d'água das argamassas deve também ser realizada, de forma a avaliar a facilidade de secagem da alvenaria por evaporação.

Quanto à compatibilidade mecânica, os revestimentos devem possuir alguma resistência mecânica, sem transmitir tensões elevadas ao suporte. Do mesmo modo, devem absorver as tensões às quais são submetidos, sem fissurar, e para isto precisam apresentar boa capacidade de deformação. Consideram-se três características relacionadas: resistência à tração, retração e módulo de elasticidade.

De forma geral, a compatibilidade química envolve aspectos de composição que não introduzam sais solúveis no suporte e que resistam à ação de sais existentes. As argamassas de renovação devem, assim, apresentar boa resistência aos sais solúveis, uma vez que as próprias paredes antigas podem conter elevados teores, principalmente de íons cloretos e sulfatos; enquanto a ação dos cloretos é, essencialmente, mecânica por aumento de volume durante os ciclos de cristalização e dissolução, os sulfatos podem ocasionar a ruptura das argamassas, em virtude da formação de produtos expansivos. Acrescenta-se a importância de a nova formulação de argamassa possuir adequada dimensão de poros, de forma a permitir que neles haja espaço para o incremento de volume resultante da cristalização e dissolução de sais, sem desenvolvimento de tensões internas.

No requisito estético, o aspecto visual é, também, decisivo para a conservação do Patrimônio, sendo recomendável avaliar o acabamento e a aparência final (cor e textura) da argamassa de revestimento nova, antes e depois de sujeita às intempéries.

A propósito, com base na análise de diversos resultados de investigações na área de argamassas antigas de cal e de novas formulações de cal preparadas em laboratório, Veiga (2004) quantificou exigências para as características que considera mais relevantes para o cumprimento dos requisitos de compatibilidade, e

estabeleceu alguns parâmetros mínimos para as novas formulações destinadas à conservação e o restauro de edifícios antigos, que são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos, com idade de 90 dias

Tipo de argamassa	Comportamento à água		Características mecânicas (MPa)			
	Permeância ao vapor de água (m)	Coeficiente de capilaridade (Kg/m ² .min ^{1/2})	Resistência		Módulo de Elasticidade (E)	Aderência ao suporte (Ra)
			Tração (Rt)	Compressão (Rc)		
Reboco exterior	< 0,08	1,0 - 1,5	0,2-0,7	0,4-2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou com ruptura coesiva pelo reboco
Reboco interior	< 0,10	-				
Juntas	< 0,10	1,0 - 1,5	0,4-0,8	0,6-3	3000-6000	0,1 - 0,3 ou com ruptura coesiva pela argamassa

Fonte: Adaptado de Veiga e Carvalho (2004, p. 50).

Em algumas situações, nas quais se faz necessário que as argamassas de cal aérea cumpram requisitos mais específicos, em termos de permeabilidade, resistência ou porosidade, por exemplo, é útil a introdução de adições que melhorem as suas características. Como abordado no Capítulo 3, as argamassas que mais se identificam com o que foi adotado, em outras épocas, em construções antigas, são à base de cal, areia e adição de pó cerâmico ou outra pozolana artificial.

Neste contexto, a elaboração de argamassas com componentes que lhes conferem alguma hidráulica – com adição de pozolanas, artificiais ou naturais, ou com cal hidráulica – constitui solução, particularmente interessante, para aplicação em intervenções de edificações antigas importantes, como construções militares e religiosas sujeitas às condições severas de exposição aos sais.

Especialmente sobre o tema das argamassas destinadas às alvenarias históricas, diversos trabalhos foram publicados, nos últimos anos, pela RILEM, associação técnica não governamental, que objetiva contribuir para a disseminação dos avanços científicos relacionados aos materiais de construção, sistemas e estruturas, incentivando a transferência e aplicação desse conhecimento em todo o mundo. Os documentos técnicos da RILEM são produzidos pelos Comitês Técnicos, compostos por grupos de especialistas internacionais em campos específicos, sendo

muitas dessas recomendações adotadas, em pesquisa e na prática, por organismos internacionais.

Entre as contribuições interessantes relacionadas às argamassas de renovação de edifícios, destaca-se o guia: “Repair Mortars for Historic Masonry” (HUGHES et al., 2012); que trata, entre os vários aspectos abordados, dos requisitos de desempenho e dos ensaios para argamassas com diferentes funções: assentamento, juntas, revestimento (reboco exterior e interior), *graute*, de piso e de reparação de superfícies. Destacam-se, também, as publicações de Groot e outros (2012) e Hughes e outros (2012).

Matias (2014), em seu trabalho, apresenta uma sistematização das propriedades mais relevantes de argamassas antigas com base em cal, encontradas em diversos estudos de caracterização realizados ao longo do tempo, por alguns autores (FARIA, 2004; MOROPOULOU, et al. 2005; VELOSA, 2006). Na Tabela 1, apresentam-se esses dados, que poderão ser levados em consideração na análise dos parâmetros de desempenho das novas argamassas de reparação/substituição.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas

Tipo de ligante	Traço	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)	Resistência à tração (MPa)
Cal aérea em pó	1:1–1:4 (1:3)	1,5–1,8	30-45	<0,35
Cal e pozolana natural	1:1–1:5 (1:3)	1,6–1,9	30-42	>0,6
Cal e pozolana artificial	1:3	1,5–1,9	30-40	>0,55
Cal e material cerâmico	1:2–1:4 (1:3)	1,5–1,9	32-43	05-1,2

Fonte: Adaptado de Matias (2014).

Com base na fundamentação exposta no presente capítulo, descrevem-se nos dois capítulos que seguem os trabalhos experimentais realizados para caracterizar as antigas argamassas de fortificações de Salvador e as novas formulações com adições pozolânicas, elaboradas no âmbito desta tese e propostas para aplicação em alvenarias antigas. Adicionalmente, apresentam-se os resultados e discutem-se os dados obtidos nos ensaios e análises efetuadas.

4 ESTUDO EXPERIMENTAL COM ARGAMASSAS ANTIGAS

O estudo e a constatação do uso das adições de material cerâmico em argamassas de cal no Brasil suscitam interesse não só pelas contribuições científicas, mas também pela indicação de possíveis soluções de materiais de reparação a adotar nas ações de conservação e restauro do Patrimônio Nacional. Assim, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre uso do pó cerâmico em argamassas de cal no Brasil, foi realizado estudo experimental com argamassas de assentamento e de revestimento de paredes e de pavimentação de antigas fortificações da época colonial da Cidade do Salvador, visando caracterizar estas argamassas quanto à sua composição, tentando, sempre que possível, confirmar a presença de adições.

Inicialmente, foram selecionados os fortes a serem estudados, com base nas possibilidades de acesso e da retirada de amostras de argamassas. Entre as fortificações escolhidas, incluem-se Rio Vermelho, Santo Antônio Além do Carmo, Santo Antônio da Barra, Santa Maria, São Diogo, São Paulo da Gamboa e São Pedro, que formaram, ao longo dos séculos, a estrutura de defesa da cidade. O mapeamento destas fortificações, com as respectivas localizações, pode ser visualizado na Figura 6.

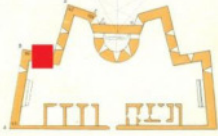
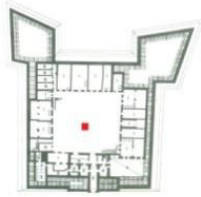
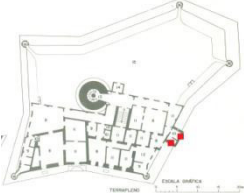
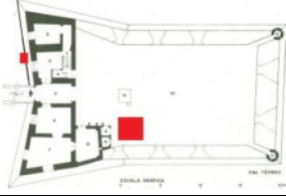
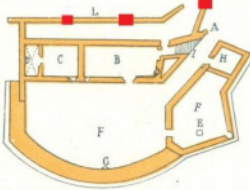

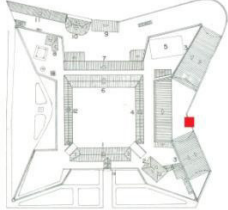
Figura 6 – Mapa de localização das fortificações de estudo



Fonte: Elaboração própria (2017).

Foram realizadas visitas às fortificações para a extração das amostras de argamassas de revestimento e assentamento e os locais de extração contemplaram paredes antigas, sem intervenções visíveis, e aquelas sujeitas à umidade, como cisternas, além de pavimentações. No Quadro 8, consta a identificação das amostras e o local da retirada, na planta, em destaque na cor vermelha.

Quadro 8 – Identificação das amostras dos fortes e dos locais de extração

Forte	Amostra	Localização	Figura
Rio Vermelho	RV1A	Muralha	
Santo Antônio Além do Carmo	STC2A	Parede da cisterna	
	STC3R		
Santo Antônio da Barra	STB8A	Parede do sótão	
	STB9A		
Santa Maria	STM1R	Base da muralha	
	STM2R	Pavimentação do pátio externo	
São Diogo	SDI3A	Muralha	
São Paulo da Gamboa	SPG3A	Muralha	
	SPG4A		
São Pedro	SPE1A	Parapeito da muralha	
	SPE2A		

Fonte: Elaboração própria (2017).

No total, foram analisadas 12 amostras de sete fortificações, identificadas por letras maiúsculas referentes às siglas dos fortes, seguidas de algarismos e das letras “R” ou “A” para indicar se de revestimento ou assentamento, respectivamente, conforme apresentado no Quadro 8. A Figura 7 ilustra a retirada de amostras em algumas fortificações.

Figura 7 (a, b, c) – Extração das amostras



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Após a extração, foi feita observação visual das amostras, com objetivo de identificar a coloração e algum vestígio que já indiciasse a presença de material cerâmico. A seguir, foram realizados ensaios laboratoriais preliminares de caracterização física, que compreenderam a determinação da granulometria e do traço provável. A metodologia de caracterização seguiu os procedimentos descritos em Teutonico (1988).

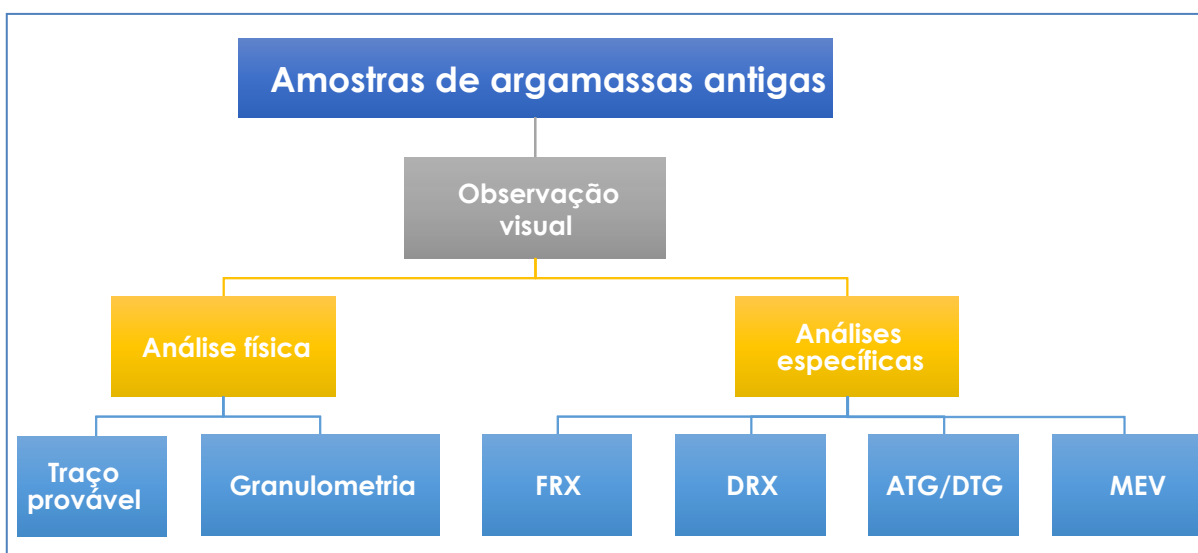
Existe um consenso, na comunidade científica, de que a maneira mais eficaz de caracterizar uma amostra de argamassa é usar a combinação de técnicas físico-químicas. Em se tratando de misturas com prováveis adições pozolânicas, para obter a caracterização mais completa, foram necessárias análises adicionais, uma vez que podem ser vários os produtos formados, ao longo do tempo, oriundos da reação da cal com os demais integrantes e com o meio exterior.

Neste contexto, as amostras de argamassas foram ainda estudadas por meio de um conjunto de análises e ensaios, entre os quais se destacam: análise química,

térmica e mineralógica, obtidas por Fluorescência de Raios X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG/DTG) e observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Estas técnicas são complementares entre si e permitem uma interpretação global, ao confirmar ou esclarecer informações relativas aos compostos presentes nas argamassas. A metodologia adotada foi baseada nos métodos utilizados e nos resultados obtidos por diversos autores que analisaram argamassas antigas (BAKOLAS et al., 1998; GROOT et al., 2000; SANTOS SILVA, 2002; VEIGA et al., 2004; MOROPOULOU et al., 2006; VELOSA, 2006).

A metodologia adotada, nesta pesquisa, para a caracterização das argamassas antigas das fortificações em estudo é ilustrada, de modo esquemático, na Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática da metodologia de caracterização de argamassas antigas adotada nesta pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2017).

Para a obtenção dos resultados, foi observado se compostos oriundos do material cerâmico e de suas reações com a cal, mencionados na bibliografia de referência, estão presentes nas amostras de estudo, uma vez que podem ser vários os produtos formados ao longo do tempo. Na avaliação final, esses dados foram analisados conjuntamente com a análise visual e os resultados das características físicas.

A preparação das amostras para as análises complementares fundamentou-se nos seguintes procedimentos: porções de argamassas foram inicialmente desagregadas com pistilo de porcelana, forrado com borracha na extremidade, e

colocadas na estufa a 75°C. Após o período de secagem de 24 horas, o material foi passado na peneira de 200 Mesh, pesado e levado para análise nos correspondentes laboratórios. Os procedimentos adotados para a caracterização completa das argamassas dos fortes, com os respectivos objetivos, são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Estudo da composição das argamassas dos fortes

ENSAIO	OBJETIVO	LOCAL DE EXECUÇÃO
Traço Provável	Determinar as proporções de ligante: finos (argila, impurezas): agregado.	NTPR
Granulometria	Determinar a distribuição granulométrica do agregado	NTPR
Fluorescência de Raios X	Constatar elementos presentes na amostra de argamassa	Instituto de Química da UFBA
Difratometria de Raios-X	Determinar a composição mineralógica das argamassas, em termos de identificação de fases cristalinas	Instituto de Geociências da UFBA
Análise Termogravimétrica	Identificar e obter dados quantitativos dos componentes das argamassas. Observar reações associadas ao aquecimento controlado da amostra.	Instituto Federal da Bahia
Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS	Observar microcaracterísticas das argamassas, fornecendo informações sobre a morfologia, a formação de produtos de reação, identificação de carbonatos e de compostos hidratados presentes	Instituto de Física Nuclear da UFBA

Fonte: Elaboração própria (2017).

4.1.1 Determinação do traço e análise da granulometria

O ensaio de traço tem como objetivo a determinação da proporção aproximada entre componentes da argamassa de cal analisada: o ligante (carbonatos), os finos (argila e/ou silte) e os grossos (areia). Esta técnica, bastante simples, possui uma limitação: a razão ligante/agregado pode ser falseada pela presença no agregado de carbonatos e/ou outros minerais parcialmente ou totalmente solúveis em ácido.

Após moagem, secagem e pesagem, as amostras são atacadas por ácido clorídrico diluído (1:4), para que o ligante se dissolva. A solução resultante desse ataque é filtrada em papel de filtro, e dela se obtém o resíduo insolúvel, que é seco em estufa. A partir desse resíduo, após seco, são efetuados os cálculos dos percentuais de finos, grossos e ligante, bem como o traço provável da argamassa.

O resíduo proveniente do ataque em ácido, resíduo insolúvel, constituiu a parte dos agregados não-calcários existentes (a grosso modo, o teor de areia na amostra), mas nos casos em que existam agregados de natureza calcária presentes na argamassa, estes irão dissolver juntamente com o ligante, o que resulta na majoração do real teor de ligante, o que conduz a um equívoco na determinação do traço. Para a determinação do teor de ligante das argamassas, outras análises devem ser realizadas de forma a complementar os dados, como análise termogravimétrica (ATG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O ensaio de análise granulométrica tem como objetivo a obtenção de curvas granulométricas do agregado utilizado na argamassa. Para a realização desse ensaio, foram utilizadas as peneiras de numeração 16, 35, 60, 100 e 200. A determinação da granulometria das argamassas antigas é relevante quando da necessidade de recomposição ou substituição por composições com características similares às das argamassas pré-existentes. Esses ensaios foram realizados no NTPR – Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração.

4.1.2 Análise por Fluorescência de Raios X (FRX)

A técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) permite a detecção de elementos presentes, por meio da excitação da amostra de argamassa por um feixe de raios X. O ensaio de FRX foi efetuado no laboratório do Instituto de Química da UFBA, com o Espectrômetro de Fluorescência Shimadzu – XFR – 1800. A preparação das amostras para esses ensaios envolveu a moagem, peneiramento na peneira #200 e secagem das amostras à baixa temperatura. Como resultado, obtém-se a composição química (óxidos) da argamassa.

4.1.3 Análise por Difractometria de Raios X (DRX)

Complementar ao método de FRX, a Difractometria de Raios X (DRX) proporciona obtenção de informação qualitativa dos compostos cristalinos existentes nas amostras. A análise do padrão de difração fornece dados sobre a natureza do material e sua forma cristalina (MATTEINI; MOLES, 2001). A aplicação desta técnica tem como objetivo a determinação da composição mineralógica das argamassas, em termos de identificação de fases cristalinas. O ensaio consiste na colocação da

amostra em uma lâmina de vidro, para ser exposta aos Raios X, por aproximadamente 30-40 minutos. Como resultado, é gerado um gráfico (difratograma) com informações sobre os minerais que constituem o material analisado. A composição mineralógica das amostras foi obtida por comparação dos difratogramas de Raios X gerados pelo difratômetro com os padrões do banco de dados do ICDD – *International Centre for Diffraction Data*.

A análise por Difractometria de Raios X (DRX) foi realizada no laboratório de Mineralogia e Raios-X de Geociências, da UFBA, e os resultados obtidos foram analisados no software *X'Pert High Score Plus*.

O procedimento de preparação das amostras seguiu processo análogo ao do preparo para análise de Fluorescência de Raios X.

4.1.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (ATG) mede a variação percentual de peso, decorrente de eventuais decomposições de um material submetido a aquecimento. É consensual que as perdas de massa observadas na análise termogravimétrica devem-se à libertação da água adsorvida, da água de hidratação e da decomposição dos diversos constituintes (VELOSA, 2006). As variações de massa, mais ou menos acentuadas, correspondem a alterações químicas no material. Partindo do princípio que cada material tem a sua curva típica, é possível a sua identificação por meio da comparação dos picos obtidos com aqueles tidos como padrão de diversos materiais.

Os resultados são expressos em termogramas, nos quais é possível distinguir patamares e “degraus” (perdas de peso), com diferentes alturas e inclinações, que, por comparação, permitem identificar a composição do material. A curva DTG, primeira derivada da função TG, apresenta um conjunto de “picos” com área proporcional à variação de massa que permite estabelecer, com maior rigor, os limites de início e fim de perdas de massa, facilitando a obtenção de dados quantitativos dos componentes das argamassas.

O ensaio de Termogravimetria (ATG/DTG) foi efetuado no Laboratório de Caracterização de Materiais – LCM, do Instituto Federal da Bahia (IFBA). Para as análises, cerca de 15,0 mg de cada amostra foi pesada e introduzida no Aparelho TGA-51-H, da Shimadzu, utilizado para estudos de decomposição térmica, na faixa

de temperatura de 25°C a 950°C. Como resultado, foi obtido um termograma da variação de massa do material em função da temperatura, à medida que este era aquecido a uma velocidade constante.

4.1.5 Observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica que utiliza feixes de elétrons para observar a microestrutura de amostras. Para argamassas, fornece informações sobre a morfologia e a formação de produtos de reação, entre diversos materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio. Em argamassas antigas, é particularmente útil na identificação de carbonatos e de compostos formados pela interação entre a cal e as adições, assim como dos cristais e demais estruturas que constituem as composições. Em argamassas novas, é interessante ferramenta para acompanhar as transformações na microestrutura durante o seu período de cura.

Como recurso opcional associado à técnica de MEV, o Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS) possibilita determinar e quantificar elementos presentes na amostra. As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura foram efetuadas nas instalações do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LAMUME), localizado no Instituto de Física Nuclear, da UFBA. Utilizou-se o MEV da marca Jeol, modelo JSM-6610 LV, magnificação 300000 vezes, resolução 3nm; a avaliação da imagem foi associada à análise química por EDS: marca Oxford Instruments, modelo X-Max 20mm², desvio de 130eV. Foi usado o metalizador da marca DENTON VACCUM, modelo DESK V.

O procedimento para a realização do ensaio com o MEV consistiu em colocar pequena quantidade de material, na forma de fragmento, em porta-amostras, que, a seguir, foi introduzido no metalizador, para recobrir a superfície com um banho de ouro, sob vácuo, e assim melhorar a sua condução elétrica para garantir qualidade das imagens obtidas em distintas escalas. As imagens geradas representam a superfície característica da amostra.

Para interpretação dos resultados, foram utilizadas as descrições coletadas na literatura sobre microestruturas de argamassas de cal antigas, que permitiram comparações com os resultados obtidos nesta pesquisa. Salienta-se que esta técnica foi aplicada a apenas algumas amostras representativas.

4.2 RESULTADOS E ANÁLISES













Nesta seção são apresentados os principais resultados e análises dos vários ensaios abordados na seção anterior e realizados nas amostras de argamassas extraídas das paredes e pavimentações de fortificações de Salvador.

4.2.1 Determinação do traço e análise granulométrica

A Tabela 2 contempla dados sobre identificação visual, principais componentes e traço provável das amostras de argamassa. Alguns aspectos visuais, como coloração rosada e/ou a presença de partículas, ou pequenos fragmentos de cerâmica vermelha, constituem informações adicionais, indicativas da utilização de pó cerâmico nas argamassas. A identificação da coloração do agregado, obtida por meio da Tabela de Cores Munsell está, igualmente, indicada na Tabela 2. Os principais componentes são expressos em termos percentuais aproximados de agregados (resíduo insolúvel) e ligantes (resíduo solúvel em ácido). Na coluna referente ao traço, estão dispostas as proporções de: ligante; adição ou impureza; areia. Valores intermediários iguais ou inferiores a 20% do peso da areia foram considerados como impurezas do agregado e somados à sua proporção, resultando no traço final. Para valores superiores, esta fração poderá representar provável adição de argila ou barro cozido, como observados nos casos STB9A, STM1R, SDI3A, SPG4A, SPE1A e SPE2A.

No que se refere à argamassa do Forte de Santo Antônio Além do Carmo (STC2A e STC3R), ressalta-se que, por ser uma amostra retirada de cisterna, era esperada a presença de adição para conferir certa hidráulidade. No caso do Forte de São Diogo (SDI), é possível concluir sobre a utilização de um traço forte, com presença de adição. No Forte de São Paulo da Gamboa (SPG4A), há indícios da presença de pó cerâmico na argamassa com tonalidade rosada intensa. Ainda é possível observar indicativos de adição em uma das amostras dos Fortes Santo Antônio da Barra (STB), Santa Maria (STM) e nas duas do Forte de São Pedro (SPE). Ressalta-se que os traços das amostras variam em função dos diferentes locais de extração e das diversas matérias-primas usadas na confecção das argamassas.

Tabela 2 – Caracterização das amostras de argamassas extraídas dos fortes

Identificação	Amostra de argamassa		Agregado (%)	Ligante	Traço	Traço Final
	Imagem	Descrição	Coloração Tabela Munsell	(%)	Em volume	
RV1A		Tonalidade clara, rosada	46	54	1:0,14:0,99	1:1,1
			<i>Light brown</i>			
STC2A		Tonalidade clara, bege	66	34	1:0,38:2,22	1:2,6
			<i>Yellow</i>			
STC3R		Tonalidade clara, marrom avermelhado	67	33	1:0,12:2,69	1:2,8
			<i>Yellowish Brown</i>			
STB8A		Tonalidade escura	54	46	1:0,08:1,5	1:1,6
			<i>Yellowish Brown</i>			
STB9A		Tonalidade bege	35	65	1:0,18:0,55	1:0,2;0,6
			<i>Strong Brown</i>			
STM1R		Tonalidade marrom avermelhado	49	51	1:0,42:0,86	1:0,4;0,9
			<i>Reddish Yellow</i>			
STM2R		Tonalidade clara, rosada	28	72	1:0,07:0,45	1:0,5
			<i>Strong brown</i>			
SDI3A		Presença de agregados cerâmicos	37	63	1:0,26:0,52	1:0,3;0,5
			<i>Brownish Yellow</i>			
SPG3A		Tonalidade clara, bege	32	68	1:0,1:0,52	1:0,6
			<i>Strong Brown</i>			
SPG4A		Tonalidade rosada intensa, presença de agregados cerâmicos	49	51	1:0,27:1,01	1:0,3:1
			<i>Yellowish Red</i>			
SPE1A		Tonalidade clara, bege	67	33	1:0,62:2,09	1:0,6;2,1
			<i>Reddish Yellow</i>			
SPE2A		Tonalidade clara, bege	79	21	1:0,91:4,29	1:0,9;4,3
			<i>Very Pale Brown</i>			

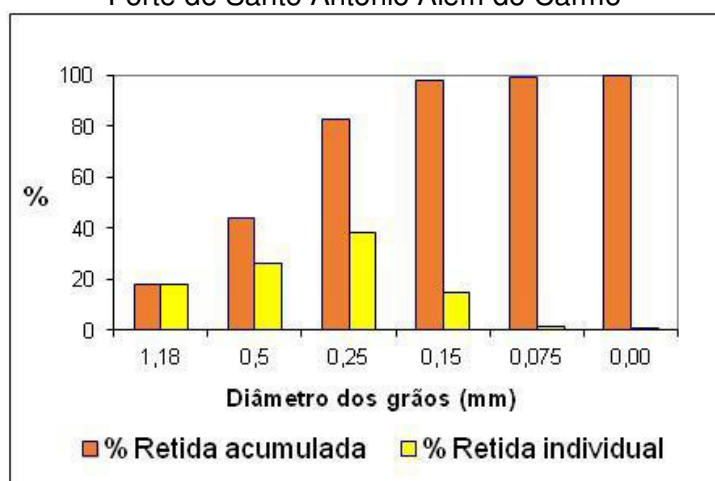
Fonte: Elaboração própria (2017).

Os gráficos de composição granulométrica e as respectivas informações das doze amostras de argamassas antigas analisadas estão apresentados nas fichas 1 a

12, dispostas no Apêndice B. A Figura 9 ilustra exemplo de distribuição granulométrica obtida para a amostra do Forte de Santo Antônio Além do Carmo (STC2A). No gráfico de percentagem retida individual, é possível observar as dimensões máximas características do agregado. Nesse caso, observa-se maior percentual de grãos retidos na malha 0,25 mm. A análise comparativa entre os percentuais de agregado das distintas argamassas, por dimensão de grão, constituem dado complementar às informações sobre a composição a ser utilizada na reintegração de partes faltantes ou na substituição do revestimento.

A identificação da natureza (siliciosa ou calcária) dos agregados utilizados, na elaboração das argamassas de assentamento e de revestimentos das fortificações de Salvador, não foi objeto desta pesquisa. Porém, é possível afirmar que a areia empregada nestas antigas construções é, essencialmente, siliciosa, uma vez que a presença de carbonatos nos agregados não é característica da geologia local das edificações estudadas. Acrescenta-se a isto, o fato de a presença desses elementos não terem sido observados nas inúmeras análises de composição das argamassas antigas realizadas no NTPR, nestes últimos anos.

Figura 9 – Gráfico da distribuição granulométrica da amostra de argamassa do Forte de Santo Antônio Além do Carmo



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.2.2 Análise por Fluorescência de Raios X

Os resultados das análises químicas, por Fluorescência de Raios X, efetuadas nas argamassas dos fortes estão dispostos na Tabela 3, em termos de elementos, e na Tabela 4, em termos percentuais dos óxidos presentes.

Tabela 3 – Principais elementos obtidos nas amostras por meio de FRX (%)

Amostras	Ca	Si	Al	Fe	Mg
RV1A	74,87	11,19	4,27	3,79	1,78
STC2A	45,62	18,74	15,94	10,44	0,96
STC3R	62,08	12,18	8,31	10,70	1,16
STB8A	76,24	12,26	2,84	3,12	1,32
STB9A	62,62	10,31	7,61	13,20	0,71
STM1R	42,43	14,71	12,77	22,27	4,10
STM2R	69,61	10,23	6,49	8,20	1,31
SDI3A	48,51	17,24	13,28	13,28	3,67
SPG3A	66,36	10,75	7,95	7,14	1,76
SPG4A	66,51	9,79	6,62	8,95	3,72
SPE1A	44,19	23,45	14,88	12,02	1,89
SPE2A	46,54	25,54	18,18	5,25	0,77

Fonte: Elaboração própria (2017).

Tabela 4 – Principais compostos presentes nas amostras obtidos por meio de FRX (%)

Amostras	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O
RV1A	66,38	18,29	6,32	2,93	2,47	1,09	0,31	0,25
STC2A	35,87	26,22	21,63	7,06	1,17	4,19	0,34	0,22
STC3R	54,60	18,99	11,88	8,36	1,43	0,87	0,33	0,64
STB8A	68,53	19,91	4,08	2,52	1,69	0,40	0,15	0,37
STB9A	56,51	16,29	11,00	10,66	0,89	0,58	0,16	0,71
STM1R	36,13	21,40	17,02	16,93	5,02	0,89	0,15	0,38
STM2R	62,10	16,32	9,40	6,44	1,70	1,73	0,05	0,10
SDI3A	39,50	24,60	18,12	9,03	4,66	0,79	0,98	0,87
SPG3A	58,58	16,88	11,46	5,44	2,35	0,78	1,93	0,54
SPG4A	59,24	15,57	9,44	7,10	4,77	0,85	0,37	0,88
SPE1A	34,48	32,28	19,81	8,45	2,15	0,63	0,11	0,56
SPE2A	34,03	34,84	24,41	3,28	0,91	0,47	0,11	0,64

Fonte: Elaboração própria (2017).

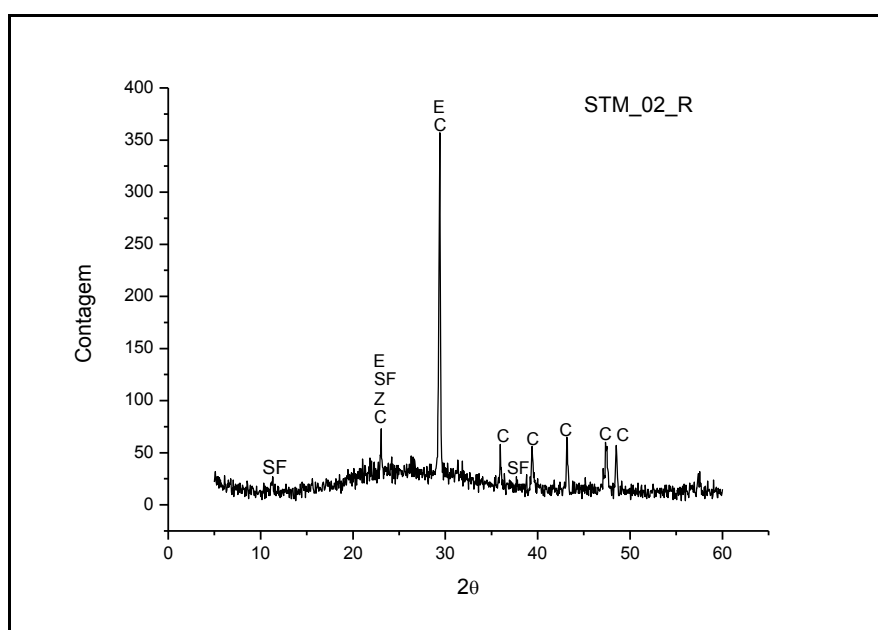
De forma geral, o pó cerâmico apresenta majoritariamente, em sua composição, os elementos Silício, Alumínio e Ferro, sendo os dois primeiros responsáveis pela formação de óxidos (SiO₂ e Al₂O₃), que reagem com o hidróxido de cálcio da cal (Ca (OH)₂), levando à formação de silicatos e aluminatos, compostos que possuem a capacidade de endurecer na presença de água.

A partir da análise da Tabela 3, pode-se inferir que as argamassas STC2A, STM1R, SDI3A, SPE1A e SPE2A (dados em negrito) possuem, provavelmente, adição cerâmica em sua composição. As quantidades de óxido de ferro podem corresponder ainda ao agregado. A Tabela 4 corrobora esses resultados e mostra os valores percentuais dos óxidos SO_3 , Na_2O , K_2O , compostos relacionados a produtos de degradação. De modo geral, as quantidades de silicato, presentes nas amostras estudadas, são sempre elevadas em relação às percentagens de aluminatos.

4.2.3 Análise mineralógica por Difração de Raios X

Os difratogramas das amostras de argamassas analisadas nesta pesquisa estão apresentados nas fichas expostas no Apêndice B. As Figuras 10 e 11 exemplificam os difratogramas das amostras dos Fortes de Santa Maria e do Rio Vermelho, respectivamente, com os minerais identificados a partir da interpretação cuidadosa das informações contidas nos difratogramas. O Quadro 10 mostra uma síntese da composição mineralógica de todas as amostras de estudo.

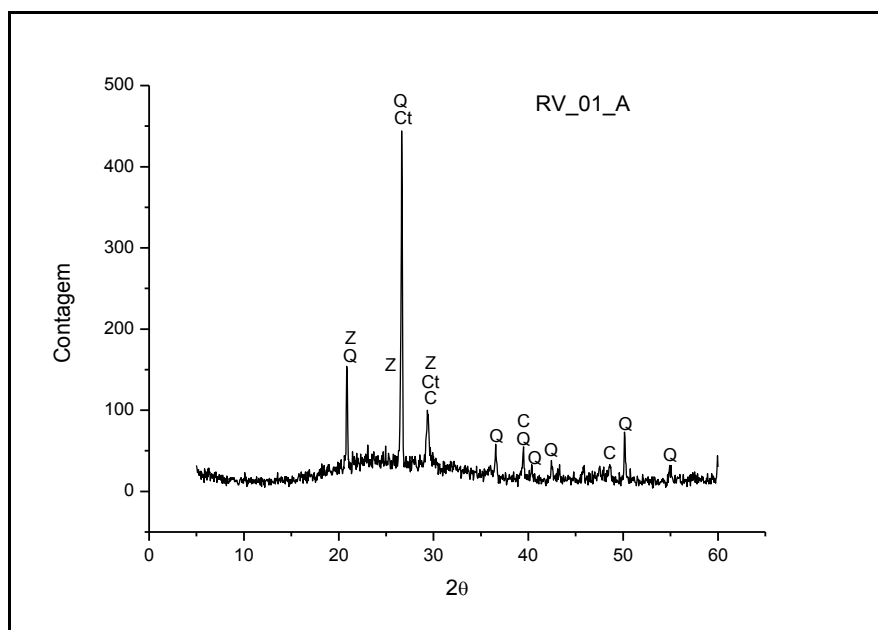
Figura 10 – Difratograma da amostra do Forte de Santa Maria



Fonte: Adaptado pela autora (2017).

Notação: Q – Quartzo, C – Calcita, Z – Zeólita, E – Etringita, SF – Sal de Friedel

Figura 11 – Difratoograma da amostra do Forte do Rio Vermelho



Fonte: Adaptado pela autora (2017).

Notação: Q – Quartzo, C – Calcita, Z – Zeólita, Ct – Cianita, SF – Sal de Friedel

Quadro 10 – Composição mineralógica das argamassas dos fortes

Amostra	Rio Vermelho	Santo Antônio Além do Carmo		Santo Antônio da Barra		Santa Maria		São Diogo	São Paulo da Gamboa		São Pedro	
	RV1A	STC2A	STC3R	STB8A	STB9A	STM1R	STM2R	SDI3A	SPG3A	SPG4A	SPE1A	SPE2A
Quartzo	✓	✓	✓		✓	✓						✓
Calcita	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Óxido de ferro		✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓
Silicato de alumínio (cianita)		✓			✓	✓				✓		
Silicato de alumínio (zeólita)			✓	✓		✓			✓		✓	
Aluminossilicato				✓	✓	✓			✓	✓	✓	
Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Sulfaluminato de cálcio hidratado (etringita)				✓	✓	✓	✓	✓				
Óxido de silício							✓	✓		✓	✓	
Aluminato de cálcio hidratado (katoite)							✓					

Fonte: Elaboração própria (2017).

Os resultados de DRX nas amostras de fortes de Salvador indicam que elas possuem composição mineralógica semelhante entre si; são consistentes com argamassas de cal aérea essencialmente calcítica, uma vez que o ligante predominante é a calcita (CaCO_3). No que concerne aos agregados, estes são de

natureza silicosa, destacando-se o quartzo e a presença de minerais zeólitos. Em algumas amostras, foram observados aluminossilicatos e silicatos de alumínio.

Em especial, nas amostras do Forte Santa Maria (STM02R), foram identificados aluminatos de cálcio hidratados. A presença destes, de forma geral, corresponde a produtos originados pela reação de caráter pozolânico entre a cal e os constituintes mais reativos dos agregados.

Algumas argamassas exibiram compostos de degradação, tais como os cloroaluminatos de cálcio e os sulfoluminatos, o que é consistente com o ambiente agressivo onde estão localizadas as fortalezas. Os cloroaluminatos de cálcio hidratado, conhecidos como Sais de Friedel, foram encontrados em praticamente todas as amostras. Esses compostos, instáveis e não expansivos, têm origem nas reações dos cloretos com os aluminatos presentes na composição das argamassas e, em presença de sulfatos, podem dar origem à etringita, um composto fortemente expansivo que provoca a degradação (MAGALHÃES et al., 2011). A etringita foi observada nas amostras dos Fortes da Barra (STB) e de Santa Maria (STM). Apesar da evidência de compostos de degradação, de modo geral, as argamassas provam ser bastante resistentes e duráveis.

Os zeólitos também foram observados na composição das argamassas de estudo. Trata-se de minerais cristalinos naturais, compostos por aluminossilicatos hidratados, essencialmente de cálcio e, eventualmente, de metais alcalinos (Na, K). Em construções da Antiguidade, detectaram-se compostos constituídos por matriz de natureza zeolítica, aos quais se atribuiu a responsabilidade pela maior durabilidade das argamassas e concretos antigos (PEREIRA, 2010). A detecção de zeólitos, efetuada por DRX, nas amostras STC3, STB8, STB9, SPG3, SPG4 e SPE1, é um possível indicador de reação pozolânica, uma vez que a sua formação pode ser derivada a partir desta. Os zeólitos podem também ser oriundos do agregado.

Muito embora a adição de materiais pozolânicos nas formulações antigas fosse responsável pela obtenção de argamassas mais resistentes, devido à formação de compostos de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), acredita-se não ser esta a razão fundamental para a durabilidade das argamassas milenares, uma vez que as fases dos silicatos de cálcio são suscetíveis a ataques por sulfatos. Em seu trabalho, Torgal e Jalali (2010) levantam esta questão e citam alguns pesquisadores (GLUKHOVSKY, 1959; CAMPBELL; FOLK, 1991; GRANIZO, 1998), defensores de

que a durabilidade dos ligantes antigos devia-se ao alto nível de compostos zeolíticos e amorfos nas composições das argamassas.

4.2.4 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

Com o objetivo de verificar e ratificar a presença dos compostos encontrados nos ensaios de DRX foram analisados os termogramas obtidos nos ensaios de termogravimetria. Nas fichas do Apêndice B, são apresentados os gráficos com as curvas termogravimétricas das perdas de massa das amostras de cada uma das fortificações estudadas. No eixo das ordenadas apresentam-se, do lado direito, as perdas de massa e, do lado esquerdo, a derivada das variações de massa. Este estudo foi realizado com base nas curvas DTG, uma vez que as variações sofridas são mais perceptíveis na curva termogravimétrica diferencial.

Para interpretação dos resultados, foram considerados quatro intervalos de temperatura, nos quais ocorrem as reações que implicam perdas de massa, devidas à desidratação, desidroxilação, decomposição, carbonatação, hidratação, entre outras, do material (MOROPOLOU et al., 1995; SANTOS SILVA et al., 2005; ADRIANO; SANTOS SILVA, 2006). O Quadro 11 apresenta as ocorrências, em termos de variação de massa, da amostra, em função das faixas de temperatura.

Quadro 11 – Variação de massa por intervalo de temperatura

Faixa de temperatura	Ocorrências
Ambiente a 250°C	Perdas de água de umidade, de cristalização e zeolítica
250°C a 400°C	Zona de perda, normalmente, atribuída à presença de compostos orgânicos e de hidróxidos e/ou óxidos de ferro hidratados
400°C a 500°C	Perdas de água combinada (desidroxilação dos grupos hidróxilo dos minerais de argila)
500°C a 900°C	Zona de perda atribuída à presença dos compostos carbonatados e descarbonatação da calcita

Fonte: Adriano e Santos Silva (2006).

Os gráficos obtidos, a partir das análises termogravimétricas, para as amostras da presente pesquisa, encontram-se nas fichas de caracterização de argamassas antigas, dispostas no Apêndice B. Na Tabela 5, sintetizam-se os dados de perda de massa das argamassas, expressos em percentual.

Tabela 5 – Valores de perdas de massa das argamassas de estudo (%)

Amostras	Intervalos de temperatura °C			
	25→250	250→400	400→500	500→900
RV1A	4,1	1,1	0,7	23,2
STC2A	3,8	1,8	0,9	22,3
STC3R	2,6	1,8	0,8	23,5
STB8A	1,7	0,0	0,4	33,3
STB9A	1,6	1,4	0,4	31,0
STM1R	2,3	2,6	1,3	22,0
STM2R	3,6	1,0	0,4	27,9
SDI3A	3,7	2,7	1,4	21,7
SPG3A	5,9	1,4	1,4	26,7
SPG4A	2,0	1,9	1,6	27,2
SPE1A	2,1	0,8	0,6	20,3
SPE2A	1,3	1,2	0,6	18,6

Fonte: Elaboração própria (2017).

A observação dos gráficos, apresentados no Apêndice B, permite concluir que as curvas termogravimétricas da generalidade das amostras são típicas de composições com base em cal aérea, mostrando perda de massa significativa no intervalo entre 550°C e 900°C, expressa em um pico único, que corresponde à descarbonatação da calcita, componente fundamental de argamassas de cal. Esses resultados são confirmados pela análise de DRX, na qual foram detectados minerais de calcita.

Verificam-se, a partir da Tabela 5, perdas de massa devidas à água adsorvida dos minerais argilosos (até 250°C) e perdas pela saída de água de hidratação e desidroxilação de minerais argilosos e, eventualmente, oriundas da liberação de água de hidratação de compostos hidráulicos existentes (entre 250°C e 500°C). Velosa (2006), em seus estudos, considera perdas devidas à água de hidratação de compostos hidráulicos, para valores superiores a 3%. Nesta pesquisa, as maiores perdas de massa nesse intervalo de temperatura foram verificadas para as argamassas STM1, SDI3 e SPG4, em destaque na Tabela 5, evidenciando a presença de compostos hidráulicos (possíveis silicatos e aluminatos). Observa-se ainda, da análise individual dos termogramas de estudo, a existência de picos de perda de massa entre os 500°C e 600°C nas amostras STC2, STC3, STM1, SPE1 e

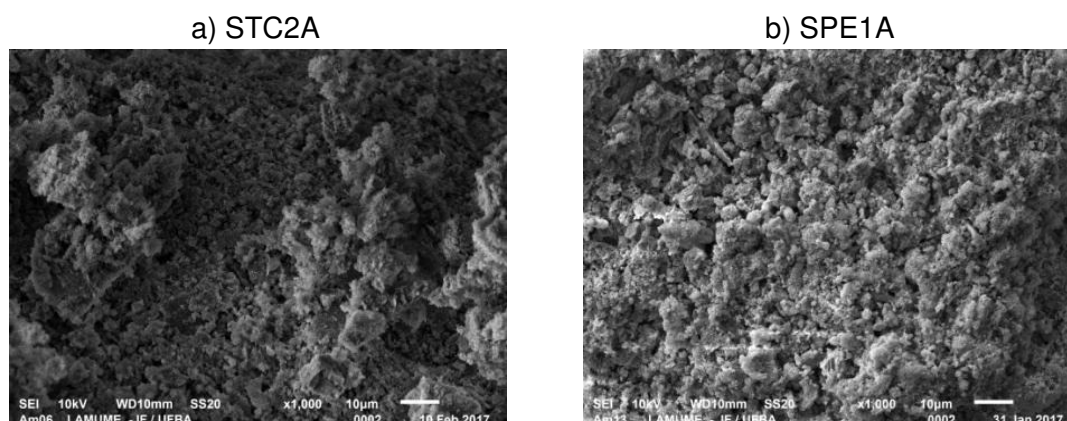
SPE2, que podem estar associados à presença de minerais de argila, de acordo com o disposto por Velosa (2006).

4.2.5 Observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS

A análise da microestrutura, efetuada para as várias argamassas, permitiu visualizar aspectos típicos de argamassa de cal aérea. Nas fichas do Apêndice B, são apresentadas as imagens resultantes das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras estudadas. Na Figura 12 (a e b), observam-se aspectos das amostras do Forte de Santo Antônio Além do Carmo (STC2A) e do Forte de São Pedro (SPE1A), respectivamente.

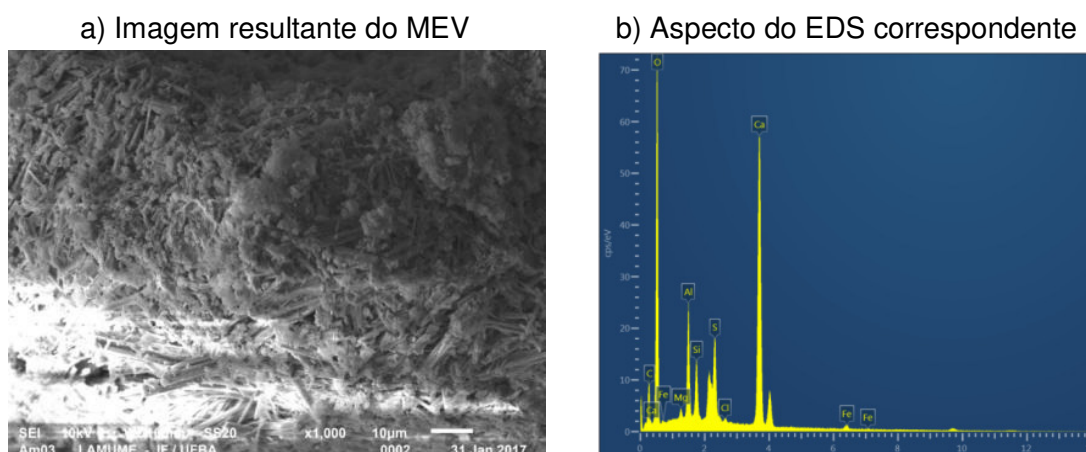
A Figura 13 ilustra um exemplo do resultado de MEV, com aspecto do EDS (Espectrômetro de Dispersão de Energia) correspondente, da amostra identificada como STM2R, extraída da pavimentação do pátio externo do Forte de Santa Maria. Evidencia-se nesta amostra a possível presença de produtos de reações pozolânicas, fato associado à visualização de filamentos do tipo “agulhas”, característicos da formação de etringita, composto resultante da reação do gesso com os aluminatos de cálcio hidratado. Estas informações confirmam os dados obtidos no DRX. Adicionalmente, a caracterização química das argamassas de estudo a partir do Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS), que realiza uma avaliação visual complementar do ponto de observação das amostras, confirmou a presença dos elementos identificados no FRX.

Figura 12 – Imagens resultantes das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 13 (a, b) – Imagem da análise de MEV e aspecto do EDS da amostra STM2R



Fonte: Fotos da Autora (2017).

A partir das análises realizadas, foram selecionadas as amostras com maiores indícios da presença de pó cerâmico, de acordo com cada ensaio. Os resultados são apresentados no Quadro 12.

Diante do exposto, conclui-se que as argamassas em destaque no Quadro 12, a saber: STM1R, SDI3A, SPG4A, SPE1A e SPE2A, apontam fortes indícios da presença de adições de caráter pozolânico, com realce para as dos Fortes de Santa Maria e de São Pedro. Nota-se que as argamassas que evidenciaram maior probabilidade de conter adições são, em sua maioria, de assentamento, o que era de se esperar, já que estas devem apresentar melhores propriedades mecânicas e de comportamento à água. A única exceção, a STM1R, é uma argamassa de revestimento de pavimentação, que também requer destaque nas características de desempenho.

Quadro 12 – Amostras com fortes indícios de adição de pó cerâmico

Forte	Amostra	Ensaio			
		Traço	FRX	DRX	ATG
Rio Vermelho	RV1A				
Santo Antônio Além do Carmo	STC2A		X		X
	STC3R			X	X
Santo Antônio da Barra	STB8A			X	
	STB9A	X		X	
Santa Maria	STM1R	X	X	X	X
	STM2R			X	
São Diogo	SDI3A	X	X		X
São Paulo da Gamboa	SPG3A			X	
	SPG4A	X		X	X
São Pedro	SPE1A	X	X	X	X
	SPE2A	X	X		X

Fonte: Elaboração própria (2017).

Finalmente, os resultados das análises (química, térmica e mineralógica) forneceram, em conjunto, uma compreensão global das argamassas antigas e permitiram confirmar as evidências sobre o uso de adições de caráter pozolânico nas argamassas de fortificações de Salvador. Espera-se que essas informações sejam úteis para fundamentar eventuais trabalhos de conservação. A comparação desses dados com os obtidos no mesmo tipo de análises, realizadas para argamassas preparadas em laboratório, fornece informações importantes, desde que, na interpretação, tenham-se em consideração os processos de envelhecimento por que estas passam.

As análises efetuadas serão retomadas no próximo capítulo, que descreve a campanha experimental desenvolvida para verificação das características de desempenho de novas argamassas elaboradas com base em cal e adição. Adicionalmente, expõem-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios.

5 ESTUDO EXPERIMENTAL COM NOVAS FORMULAÇÕES

O conhecimento sobre a influência de adições, com características pozolânicas, nas propriedades das argamassas de cal serve de fundamentação para o desenvolvimento de novas formulações adequadas ao emprego na conservação de edifícios. Neste contexto, foi desenvolvido estudo experimental com adições nacionais em misturas com base em cal aérea.

Neste capítulo, são abordadas as etapas do estudo experimental desenvolvido desde a fase de seleção, obtenção e caracterização dos materiais à produção e caracterização das argamassas formuladas com adições.

5.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção dos materiais utilizados na presente pesquisa tem por base, fundamentalmente, a revisão bibliográfica de textos antigos relacionados às argamassas de cal e a leitura de publicações científicas recentes sobre possíveis alternativas a serem incorporadas em formulações de cal para aplicação no restauro de edificações antigas. Nessa escolha, levaram-se em consideração, ainda, as informações obtidas nas publicações brasileiras sobre o uso de materiais com características pozolânicas na indústria da construção do país, para melhorar as propriedades de materiais compósitos, argamassas ou concretos.

No que diz respeito ao ligante, é utilizada cal aérea hidratada, em pó. Esta escolha deveu-se, exclusivamente, à maior facilidade atual na sua obtenção e utilização, uma vez que são requeridas características constantes ao longo de todo o estudo. Muito embora sejam conhecidas as vantagens da utilização prática da cal em pasta no que diz respeito, principalmente, à melhora do comportamento reológico que promove às argamassas no estado fresco, optou-se, nesta pesquisa, pela adição da cal em pó na hora da mistura, sobretudo, pela dificuldade de implementação dos procedimentos para obtenção da cal em pasta, tais como: tempo mínimo de 16 horas requerido para sua maturação¹², impossibilidade de

¹² A maturação consiste em deixar a cal em contato com a areia e água, ou mesmo só com a água, durante certo período de tempo, antes do seu emprego na argamassa. Trata-se de um procedimento que pode ser efetuado tanto para a cal virgem quanto para a hidratada. No caso da cal hidratada, a

armazenamento das quantidades necessárias à execução dos corpos de prova, dificuldades de dosagem, além dos aspectos operacionais do laboratório. Acrescentam-se a esses fatos, as conclusões extraídas dos estudos de Margalha (2010) sobre as pequenas diferenças de comportamento entre as argamassas confeccionadas com cal em pó e com cal em pasta.

Como agregado, utilizou-se areia natural de rio, por constituir material com características de aspecto, granulometria e textura adequadas, por apresentar menores problemas de retração, além de ter sido referenciada pelos antigos e amplamente utilizada em experiências com argamassas de cal destinadas a restauro. Entre os materiais com características pozolânicas, com disponibilidade comercial no Brasil, foram selecionados o metacaulim, as cinzas volantes e a sílica ativa. Outro material, com potencial pozolânico, ainda indisponível para comercialização no país, mas de amplo interesse para a formulação de argamassas destinadas ao restauro, é o pó cerâmico. Ressalta-se o interesse do emprego das adições como material a auxiliar no desempenho das argamassas de cal, e, portanto, seu uso não como substituição do ligante e sim como adição. A fundamentação para a seleção de cada um dos materiais utilizados é feita a seguir.

A escolha do pó cerâmico deve-se, principalmente, à menção ao emprego desse material, desde o século I a.C., por Vitruvius e pelos autores que vieram depois dele, até o século XIX, nas obras que necessitassem estar sujeitas à umidade. Esse material constituiu alternativa de uso, na confecção de argamassas de cal, quando da ausência de pozolanas naturais, conforme explicitado no Capítulo 3. Foi ainda de fundamental relevância para a seleção do pó cerâmico, a constatação da sua utilização em paredes de fortificações de Salvador (OLIVEIRA, 2004), além dos bons resultados obtidos nas pesquisas experimentais (OLIVEIRA, 2008; MAGALHÃES et al., 2013) e nas aplicações práticas em obras de edificações antigas realizadas pelo Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – NTPR, como apontado no Capítulo 3.

A opção pelas cinzas volantes resultou da consulta a referências sobre receitas de argamassas antigas de cal com cinzas de carvão mineral (ARCOLAO, 1998). Autores antigos, como Belidor (1832) e Milizia (1785), sugeriam a utilização de

mistura com água é feita de modo que alcance uma consistência pastosa sendo recomendado um período mínimo de dezesseis horas antes do uso, conforme procedimentos descritos na *NBR 7200* (ABNT, 1998).

cinzas de carvão mineral para obtenção de argamassas “impenetráveis à água”. A escolha desse material justifica-se ainda pelos bons resultados alcançados, como componentes pozolânicos, nas composições à base de cimento. Acrescenta-se a esse fato, a sua disponibilidade e crescente comercialização no mercado brasileiro.

Em relação ao metacaulim, além de este material representar alternativa ambiental, e a sua incorporação em concreto encontrar-se já validada, pesquisas recentes, desenvolvidas em outros países sobre a sua utilização em argamassas de cal para conservação de edifícios (GAMEIRO et al., 2002, 2014; GRILLO et al., 2014; SANTOS SILVA et al., 2014), indicam resultados promissores, abrindo a possibilidade do emprego de metacaulins nacionais em argamassas de cal aérea destinadas ao restauro.

No Brasil, destaca-se contribuição da tese de doutorado do investigador Paulo Germano (MOURA, 2013), que realizou experiências com argamassas compostas por areia carbonática, dosada com metacaulim e cal, para serem projetadas como material de reintegração de estruturas de edificações históricas danificadas, construídas com pedra calcária.

A seleção pela sílica ativa como material objeto de pesquisa justifica-se por suas características pozolânicas, pelos aspectos positivos de desempenho em composições cimentícias e pela necessidade de desenvolver, em nível nacional, soluções específicas de restauro para substituição de revestimentos com problemas de umidade e contaminação por sais. As soluções para restauro, com base em sílica ativa, comercializadas nacionalmente por empresas representantes de multinacionais, são ainda de custo elevado.

5.2 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa experimental com novas formulações de argamassas, com base em cal aérea e adição, foram adquiridos os seguintes materiais: cal aérea, areia e adições.

A cal aérea hidratada, em pó, do tipo CH-I, da marca Trevo, foi adquirida comercialmente, tendo sido utilizada, diretamente do saco, tal como é comercializada. A areia de rio fornecida para esta pesquisa foi proveniente da região de Rafael Jambeiro, na Bahia. Foi utilizada sempre a mesma areia, de modo a conseguir avaliar melhor a influência dos outros componentes; no caso em questão,

as adições pozolânicas. Antes da utilização, a areia foi colocada para secar ao ar livre e peneirada, de modo a eliminar pequenas pedras ou raízes ou material orgânico.

Quanto às adições empregadas neste estudo: a) o pó cerâmico utilizado foi proveniente da coleta do resíduo da fabricação de telhas cerâmicas, produzidas pela empresa SIMONASSI, localizada em Alagoinhas-BA. Depois de adquirido, o resíduo foi moído em moinho de bolas e passado na peneira de malha 200 (75 μ m) para obtenção de granulometria adequada à incorporação nas argamassas de estudo. Previamente à incorporação nas misturas, foi submetido à secagem em estufa (48 horas, a 75°C); b) o metacaulim, material proveniente do processo de beneficiamento do caulim, foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda. A sua utilização foi diretamente do saco e na granulometria em que é comercializado, tal como as adições obtidas por processo industrial, usadas nesta pesquisa; c) as cinzas volantes, subproduto industrial das centrais termoelétricas que empregam o carvão como combustível, constituem produto comercializado com a denominação “Pozo Fly” pela firma Comércio de Cinzas Lima Ltda, e foram cedidas pela empresa Concremassa; d) a sílica ativa compõe subproduto oriundo do processo de fabricação do silício metálico ou do ferrosilício e foi fornecida pela empresa Tecnosil Indústria e Comércio de Artefatos de Silicone.

No Quadro 13, constam referências sobre a origem da matéria-prima utilizada nesta pesquisa, além dos principais fornecedores que contribuíram para a realização do trabalho experimental.

Quadro 13 – Principais fornecedores da matéria-prima utilizada na pesquisa

Matéria-prima		Origem/Fornecedores
Cal aérea		Cal aérea hidratada CH-I, da marca Trevo
Agregado miúdo		Areia quartzosa natural proveniente do rio do Peixe, região de Rafael Jambeiro, Bahia
Adições	Pó cerâmico	Resíduo da produção de telhas cerâmicas, fornecido pela empresa Cerâmica Simonassi, da região de Alagoinhas, Bahia
	Metacaulim	Metacaulim HP Ultra, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda
	Cinzas volantes	Material comercializado pela empresa Comércio de Cinzas Lima Ltda, denominado de <i>Pozo Fly</i> , foi cedido pela empresa baiana Concremassa
	Sílica ativa	Material fornecido pela empresa Tecnosil Indústria e Comércio de Artefatos de Silicone

Fonte: Elaboração própria (2017).

O aspecto de cada uma das adições utilizadas nesta pesquisa é apresentado na Figura 14. No que tange à tonalidade, as adições apresentam diferentes colorações: o metacaulim, bege suave, o pó cerâmico mostra forte tonalidade laranja, enquanto as cinzas volantes e a sílica ativa exibem tonalidade cinzenta. A identificação das cores das adições foi efetuada por meio da carta de Munsell (Munsell Soil Color Chart) e está apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Aspecto e coloração das adições estudadas

Metacaulim	Pó cerâmico	Cinzas volantes	Sílica ativa
			
Classificação segundo o sistema de cores de Munsell			
HUE5YR-8/1 WHITE	HUE7,5YR-6/4 LIGHT BROWN	HUE10YR-7/1 LIGHT GRAY	HUE7,5YR 7/0 LIGHT GRAY

Fonte: elaboração própria (2017).

O conhecimento das características dos materiais que irão compor as argamassas constitui um dos aspectos relevantes para conseguir argamassas com bons desempenhos. Os procedimentos para caracterização dos materiais são dispostos na seção subsequente.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS QUE COMPÕEM AS ARGAMASSAS

Para a caracterização geral das matérias-primas que compõem as argamassas produzidas, uma série de ensaios foi adotada relativamente à areia, a cal e as adições utilizadas: metacaulim, pó cerâmico, cinzas volantes e sílica ativa. A areia foi caracterizada quanto à massa unitária, massa específica e distribuição granulométrica. Uma vez que nesta pesquisa é objeto o efeito das adições em argamassas de cal, não foi dada relevância à avaliação de outras características da areia utilizada.

O estudo das adições minerais foi efetuado por diferentes técnicas de caracterização físico-químicas, complementadas por análises mineralógicas e

microestruturais, além da avaliação da atividade pozolânica, para avaliar o seu efeito na formação de compostos hidratados, ao reagir com o hidróxido de cálcio.

A apreciação dos resultados obtidos foi feita de forma comparativa com os parâmetros das normativas brasileiras, que estabelecem requisitos mínimos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. A adoção de normas destinadas a cimento como parâmetro comparativo justifica-se pela avaliação inicial da adição como material pozolânico. No entanto, tendo em conta que a cal é o material que irá reagir com a adição, serão os resultados dos ensaios de Chapelle e de resistência mecânica com a cal que irão fundamentar as conclusões sobre o uso das adições nas argamassas elaboradas.

Foram utilizadas a *NBR 12653* (ABNT, 2014), para o pó cerâmico e as cinzas volantes, a *NBR 13956-1* (ABNT, 2012), para a sílica ativa, e *NBR 15895-1* (ABNT, 2010) para o metacaulim. Em geral, tais normativas estabelecem exigências para: área superficial específica por BET, teor de sílica e alumina, percentual de perda ao fogo, teor de umidade, material retido na peneira de malha 45 µm, índice de desempenho com cimento, atividade pozolânica com a cal e teor de hidróxido de cálcio fixado ao material pozolânico, pelo método de Chapelle.

Ressalta-se que toda a caracterização pozolânica foi realizada nas instalações da UFBA, no Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração (NTPR), alguns com adaptações necessárias de equipamentos e utensílios para a realização dos procedimentos previstos na normativa. No Quadro 14, encontram-se elencados os ensaios efetuados, os materiais, a descrição sucinta dos objetivos, o local de execução e as normas técnicas e/ou procedimentos utilizados.

Na seção seguinte, faz-se abordagem dos vários métodos utilizados na presente pesquisa e apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural da matéria-prima usada na confecção das argamassas, tais como: massa unitária, massa específica, determinação da composição granulométrica, distribuição granulométrica a laser, área superficial específica por BET, fluorescência de raios X, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura, perda ao fogo, teor de umidade, material retido na peneira 45µm, índice de desempenho com cimento, atividade pozolânica com a cal e, por fim, método de Chapelle modificado.

Quadro 14 – Ensaios de caracterização das matérias-primas

ENSAIO	Areia	Cal	Adição	OBJETIVO	LOCAL DE EXECUÇÃO	NORMA TÉCNICA
Massa unitária	•	•	•	Determinar a relação entre a massa do material seco e o volume, incluindo poros permeáveis	NTPR - UFBA	NBR 12127 (ABNT,1991); NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	•	•	•	Determinar a relação entre a massa do material seco e o volume, excluindo poros permeáveis		NBR NM 23 (ABNT, 2001);NBR 9776 (ABNT, 1987)
Determinação da composição granulométrica	•			Determinar a distribuição granulométrica, o diâmetro máximo e o módulo de finura	CETA - UFBA	NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 7211 (ABNT,2009)
Distribuição granulométrica a laser		•	•	Determinar a distribuição do tamanho de partículas	CETENE	
Área superficial específica (BET)		•	•	Determinar a área superficial específica		
Fluorescência de Raios X (FRX)		•	•	Identificar os compostos químicos presentes	Instituto de Química – UFBA	-
Difratometria de Raios X (DRX)			•	Identificar as fases cristalinas presentes		
Microscopia eletrônica de varredura – MEV			•	Observar morfologia e textura das partículas. Confirmar a presença de elementos identificados por DRX	LAMUME – UFBA	
Perda ao fogo			•	Confirmar a quantidade de matéria orgânica presente no material.	NTPR - UFBA	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
Teor de umidade			•	Identificar a quantidade de água presente		NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Resíduo na peneira 45 µm			•	Determinar a finura do material por meio da peneira com abertura de malha 45 µm		NBR 15894-3 (ABNT, 2010)
Índice de desempenho com cimento, aos 7 ou 28 dias			•	Avaliar o desempenho da adição com o cimento		NBR 5752 (ABNT, 2014); NBR15894-2 (ABNT, 2010); NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Atividade pozolânica com a cal			•	Avaliar a atividade pozolânica da adição com a cal, aos 7 dias		NBR 5751 (ABNT, 2015); NBR12653 (ABNT, 2014)
Método Chapelle modificado			•	Determinar o teor de hidróxido de cálcio fixado		NBR 15895 (ABNT, 2010)
NTPR (Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração); CETA (Centro Tecnológico da Argamassa); CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste); LAMUME (Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica)						

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.3.1 Massa unitária

A massa unitária fornece indicações sobre o volume que o material ocupa quando disposto, sem compactação (material + vazios). A sua determinação é de fundamental importância para a conversão do traço em massa para o traço em

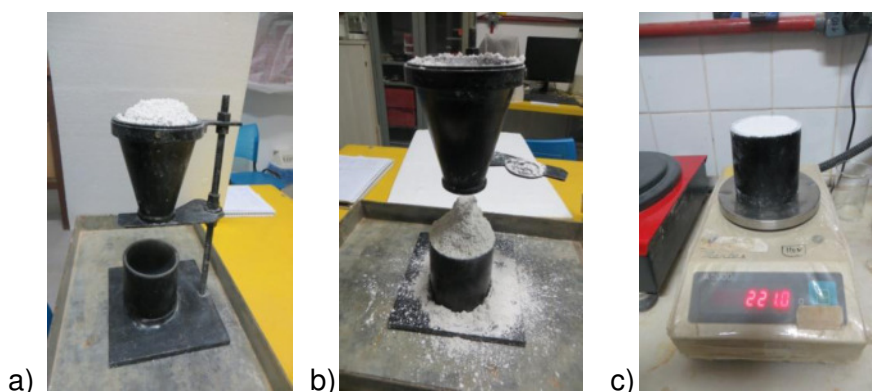
volume, comumente usado em obra, o que facilita as atividades em campo; esse parâmetro é, ainda, essencial para dosagem rigorosa em laboratório.

Para a areia, a determinação da massa unitária foi efetuada de acordo com a *NBR NM 45* (ABNT, 2006), sendo utilizado recipiente de forma cilíndrica, rígido e provido de alças, com capacidade mínima de 10 dm³. A amostra, depois de seca até massa constante em estufa, mantida a 105±5°C, foi despejada no recipiente, de uma altura de cerca de 50 cm da sua borda, até que o mesmo transbordasse. Registraram-se as massas do recipiente antes e depois de cheio. A massa unitária da areia é calculada pela relação entre a diferença de massas do recipiente e o volume deste, sendo expressa em (g/cm³).

A massa unitária da cal e das adições pozolânicas foi obtida com base na *NBR 12127 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio* (ABNT, 1991). O ensaio foi efetuado com recurso a aparelho constituído por um recipiente tronco-cônico e outro cilíndrico, adaptado do *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, de Paris (CSTB, 1993). O material a ensaiar é introduzido no recipiente cônico, com a parte inferior fechada e, finalmente, quando está cheio, a parte inferior é aberta para que o material desça, por gravidade, de maneira a encher o recipiente cilíndrico disposto abaixo do recipiente tronco-cônico. Depois de nivelada a superfície do material, determina-se a sua massa do recipiente cheio. A massa unitária, em g/cm³, é dada pela relação entre a diferença de massas (recipiente cheio e vazio) e o volume do recipiente.

A Figura 15 ilustra algumas fases da determinação da massa unitária do material em pó. Os valores obtidos para as matérias-primas utilizadas nesta pesquisa são mostrados no Quadro 15.

Figura 15 – Ensaio de determinação da massa unitária do material em pó



Fonte: Fotos da Autora (2016).

Quadro 15 – Massa unitária das matérias-primas

Matéria-prima	Massa unitária (g/cm³)
Areia de rio	1,40
Cal aérea	0,48
Metacaulim	0,55
Pó cerâmico	0,63
Cinzas volantes	0,90
Sílica ativa	0,49

Fonte: Elaboração própria (2016).

Os dados observados no Quadro 15 mostram que as cinzas volantes são as adições que apresentam maior massa unitária, seguidas do pó cerâmico, do metacaulim e da sílica ativa.

5.3.2 Massa específica

A massa específica da areia foi determinada por meio do procedimento descrito na *NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por recurso do frasco Chapman – Método de ensaio* (ABNT, 1987). A partir do resultado da leitura do frasco de Chapman, determina-se a massa específica pela relação entre a massa da amostra (500g) e a diferença entre o volume de ar deslocado e o volume inicial da água inserida no frasco (200cm³). A massa específica da areia é expressa em g/cm³.

Para os materiais finos, cal e adições pozolânicas, a massa específica foi determinada por meio da *NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica* (ABNT, 2001), que estabelece o método de determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de “Le Chatelier”. O resultado é a média de duas determinações, sendo a massa específica do material calculada pela relação entre a massa do material ensaiado e o volume por ele deslocado. A massa específica do material fino (pó) é expressa em g/cm³.

Os valores de massa específica obtidos para as matérias-primas utilizadas nesta pesquisa são mostrados no Quadro 16.

Quadro 16 – Massa específica das matérias-primas

Matéria-prima	Massa específica (g/cm³)
Areia de rio	2,64
Cal aérea	2,33
Metacaulim	2,62
Pó cerâmico	2,76
Cinzas volantes	1,95
Sílica ativa	2,17

Fonte: Elaboração própria (2016).

Os valores de massa específica das adições são muito próximos dos resultados obtidos para a areia e a cal. A massa específica das cinzas volantes é inferior às das demais adições. Em geral, as adições estudadas possuem valores de massa específica inferiores à do cimento Portland, que se encontra entre 2,90 e 3,15 g/cm³, a depender do teor de pozolana (escória de alto forno ou argila calcinada) incorporado na sua composição.

5.3.3 Composição granulométrica da areia

A composição granulométrica de um agregado corresponde à distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que o compõem. A areia de rio desta pesquisa foi submetida à análise granulométrica por meio de peneiramento, utilizando-se um conjunto de peneiras colocadas umas por cima das outras, por ordem crescente de abertura de malha. O ensaio foi realizado com base na *NBR NM 248* (ABNT, 2003), sendo as peneiras selecionadas para a execução desse ensaio, as mesmas adotadas no CETA (Centro Tecnológico da Argamassa), a saber: 6,3mm; 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm. Previamente à realização do procedimento de ensaio, a areia foi seca até massa constante, em estufa, à temperatura de 105±5°C. As percentagens retida e acumulada, em cada peneira, foram calculadas, e representada graficamente a curva granulométrica do agregado.

O Módulo de Finura e a Dimensão Máxima Característica também foram determinados, a partir do ensaio de distribuição granulométrica. O primeiro foi obtido pela soma das percentagens retidas acumuladas de cada peneira da série normal, dividida por 100. Esse parâmetro equivale à área da superfície compreendida entre a curva de distribuição granulométrica e a abscissa inferior, sendo indicativo da finura do material. Trata-se de um parâmetro útil para classificar o material nas zonas de distribuição granulométrica do agregado. A *NBR 7211* (ABNT, 2009), específica para agregados destinados à produção de concretos de cimento Portland, impõe limites inferiores e superiores, por zonas, conforme disposto no Quadro 17.

Quadro 17 – Classificação do agregado em função do módulo de finura, segundo a *NBR7211* (ABNT, 2009)

Módulo de Finura	
Zona utilizável inferior	1,55 – 2,2
Zona ótima	2,2 – 2,9
Zona utilizável superior	2,9 – 3,5

Fonte: Elaboração própria (2017).

No que se refere à dimensão do agregado miúdo, a versão antiga da *NBR-7211* (ABNT, 1982) estabelecia a seguinte classificação: $MF < 2,0$ (muito fina); $2,0 < MF < 2,4$ (fina); $2,4 < MF < 3,2$ (média); $MF > 3,2$ (grossa). Quanto maior o Módulo de Finura, mais graúdo é o agregado.

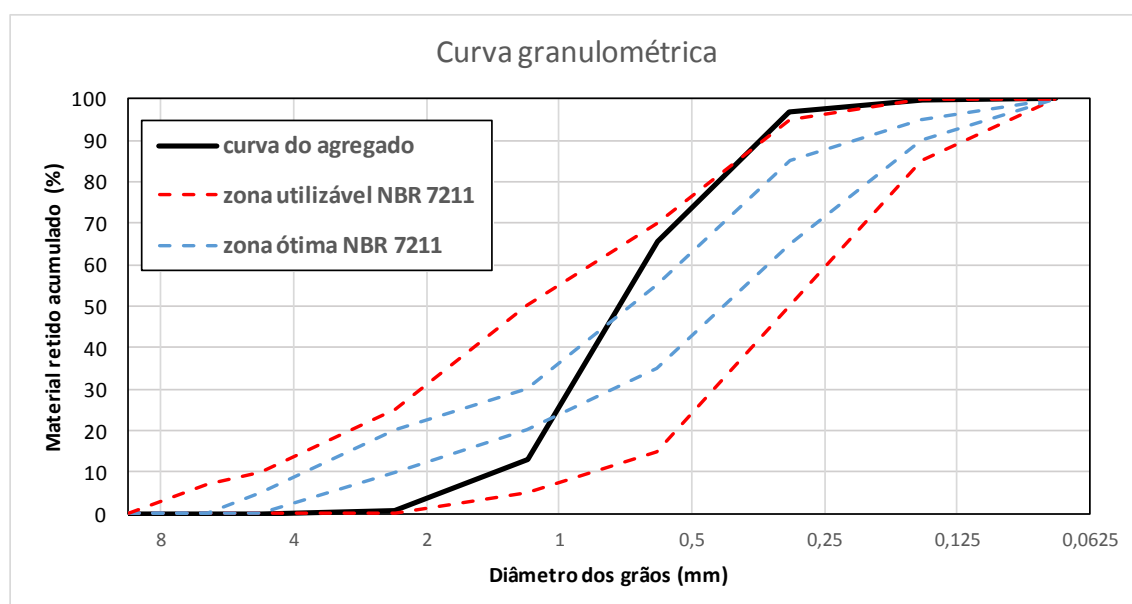
A Dimensão Máxima Característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira, da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5% da massa total da amostra. Em geral, quanto maior a Dimensão Máxima Característica do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que tem de ser coberta pela pasta de ligante, para uma dada relação água/ligante. Apresentam-se, na Tabela 6 e na Figura 16, os resultados da determinação da composição granulométrica de amostras da areia de rio utilizada, bem como o gráfico da curva de distribuição granulométrica do agregado.

Tabela 6 – Análise granulométrica da areia de estudo

Peneiras (mm)	% Retida	
	Individual	Acumulada
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	0,7	1
1,18	12,2	13
0,600	52,8	66
0,300	31,0	97
0,150	3,1	100
Módulo de Finura	2,76	
Dimensão Máxima Característica	2,36 mm	

Fonte: Elaboração própria (2018).

Figura 16 – Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da *NBR 7211*



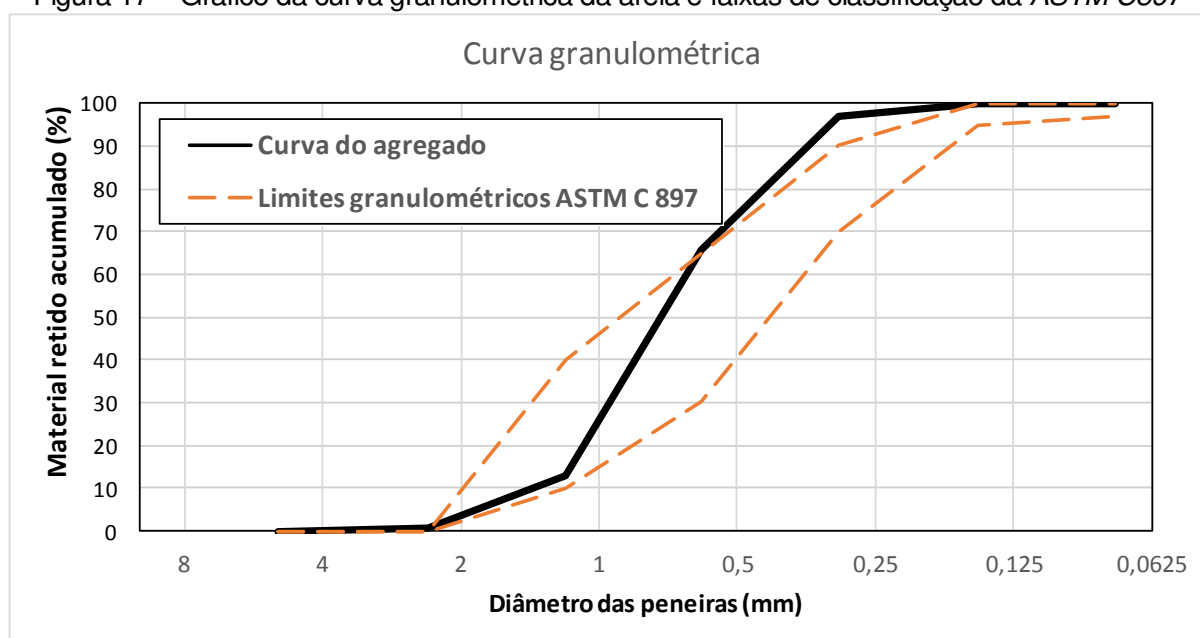
Fonte: Elaboração própria (2016).

O valor de módulo de finura obtido para a areia utilizada na produção das argamassas (2,77) encontra-se classificado dentro da zona ótima (2,2 a 2,9), conforme a *NBR 7211* (ABNT, 2009), ou como areia média, segundo a versão antiga da mesma norma. Da mesma forma, o módulo de finura da areia atende os limites, entre 2,05 e 3,05, estabelecidos pela *ASTM C897/00* (ASTM, 2000), norma específica para argamassas de reboco.

Simultaneamente, a areia de estudo poderá ser classificada ainda dentro da zona utilizável, uma vez que todas as porções desse material se encontram dentro da faixa estabelecida pela *NBR 7211* (ABNT, 2009) como “zona utilizável”. Segundo a antiga classificação da *NBR 7211* (ABNT, 1982), quanto à dimensão, a areia é média. A DMC do agregado de 2,36 significa que, no máximo, 5% dos grãos possuem dimensões igual ou superior a esse valor.

Os resultados de composição granulométrica da areia utilizada foram, também, comparados com os limites granulométricos prescritos pela normativa internacional para areias especificamente destinadas à utilização em argamassas de reboco, a *ASTM C897-00* (ASTM, 2000). A Figura 17 ilustra a curva granulométrica da areia estudada e a classificação conforme os limites estabelecidos pela referida normativa, que propõe distribuição granulométrica contínua para as areias.

Figura 17 – Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da *ASTM C897*



Fonte: Elaboração própria (2017).

Conforme a classificação da *ASTM C897/00* (ASTM, 2000), a curva granulométrica do agregado objeto da pesquisa mostra percentual de grãos finos ligeiramente fora dos limites para atender as condições impostas pela norma (Figura 17). Para o atendimento à referida normativa, a curva granulométrica do agregado requer ajuste, o que pode ser obtido diminuindo a quantidade de grãos finos.

5.3.4 Distribuição granulométrica por difração a *laser* da cal e das adições

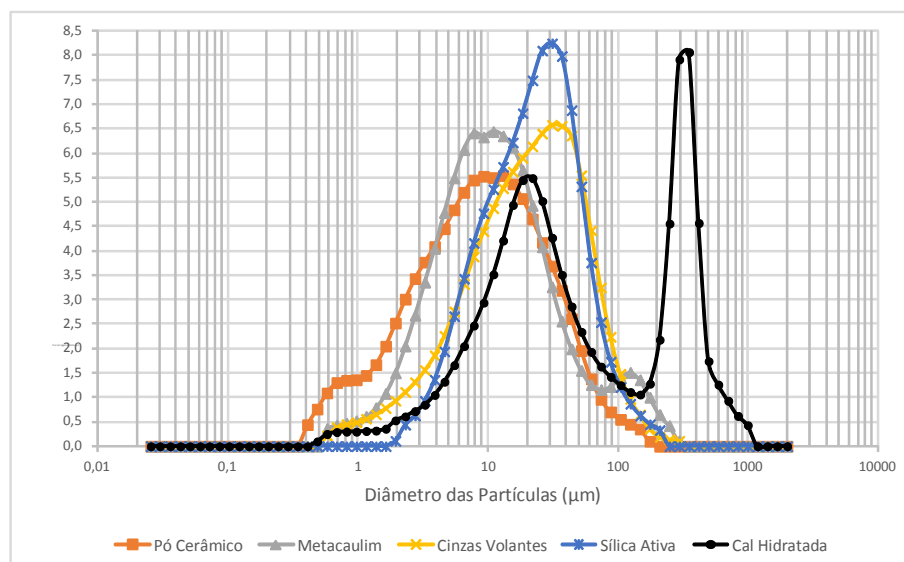
A cal e as adições utilizadas no presente estudo foram analisadas granulometricamente por espalhamento dinâmico de luz (granulometria a laser). Esta técnica fundamenta-se na medida de distribuição espacial da intensidade de luz provocada pela presença de partículas na trajetória do feixe luminoso incidente sobre uma amostra. As distribuições de tamanho das partículas são determinadas por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser, enquanto que as pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Os dados sobre a intensidade da dispersão angular são correlacionáveis com o tamanho das partículas, gerando, desse modo, a curva granulométrica do material.

A análise da distribuição granulométrica das partículas foi realizada no Laboratório Multiusuário de Nanotecnologia do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), localizado em Recife, Pernambuco, utilizando-se o Analisador de Tamanho de Partículas Microtrac S3500.

A importância da determinação da distribuição granulométrica das adições está no conhecimento da distribuição da dimensão de suas partículas e na frequência com que elas ocorrem. Trata-se de um aspecto que influencia a área específica do material (o processo de moagem do material irá, por exemplo, determinar a maior ou menor área específica) e o comportamento reológico das misturas (partículas mais finas atuam como pontos preferenciais para a hidratação de compostos hidratados do ligante).

No Anexo A, as Figuras A.1 a A.5 ilustram os gráficos de distribuição granulométrica a laser da cal e das adições, fornecidos pelo Laboratório Multiusuário de Nanotecnologia, do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, onde foram realizadas as análises. Na Figura 18, estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica a laser das partículas da cal e das adições usadas nesta pesquisa. Na Tabela 7, expõem-se, de forma resumida, os resultados da distribuição granulométrica acumulada dos diâmetros das partículas, nos percentuais de 10%, 50% e 90% da quantidade total passante, o diâmetro máximo desses materiais.

Figura 18 – Gráfico das curvas granulométricas da cal e das adições



Fonte: Elaboração própria (2017).

Tabela 7 – Dados granulométricos percentuais e partículas inferiores a 45 µm

Material	Dados granulométricos percentuais (µm)				Partículas com dimensão inferior a 45 µm (%)
	D ₁₀	D _{médio} (D ₅₀)	D ₉₀	D _{máx(95)}	
Cal aérea	6,03	32,09	348,20	418,20	56
Metacaulim	4,78	14,48	39,07	52,56	90
Pó Cerâmico	1,45	8,22	35,06	49,75	94
Cinzas Volantes	5,13	26,52	76,61	101,40	86
Sílica Ativa	6,09	21,07	55,73	75,45	89

Fonte: Elaboração própria (2017).

A cal aérea e as adições, naturalmente, apresentam morfologias e áreas superficiais específicas características, tendo em conta a natureza distinta desses materiais. Enquanto a cal mostra distribuição bimodal (um pico próximo dos 20 µm e o outro, dos 300 µm), verifica-se a distribuição da dimensão de partículas das adições com um único pico, com intensidade e ocorrência variáveis, característico de cada material.

Observa-se que o Diâmetro médio¹³ (D50) da cal é muito superior aos das adições, fato que poderá propiciar o efeito “microfíler”, fenômeno relacionado ao preenchimento de vazios entre os grãos do ligante, que proporciona maior densidade e compacidade à matriz (HOPPE FILHO, 2008). Esse autor sugere que, para que esse fenômeno aconteça, faz-se necessário que o diâmetro médio das partículas da adição seja semelhante ou inferior ao diâmetro médio das partículas do ligante e isto é o que se verifica nas adições estudadas. As cinzas volantes caracterizam-se por ter maior diâmetro médio, com cerca de 26 μm , seguida da sílica ativa, com 21 μm , do metacaulim, com cerca de 15 μm , e do pó cerâmico, com 8 μm . Em síntese, todas as adições analisadas são constituídas por partículas extremamente finas, sendo o pó cerâmico o material que apresentou a granulometria mais reduzida e as cinzas volantes granulometria mais grossa.

Para as adições com características pozolânicas, importa analisar as partículas inferiores a 45 μm . Segundo Hoppe Filho (2008), são estas as partículas que serão capazes de atuar como pontos preferenciais para a formação dos compostos hidratados, uma vez que, quanto o menor o diâmetro da partícula, maior será a sua influência na aceleração da hidratação do ligante. Para Mehta e Monteiro (1994), as partículas de cimento maiores que 45 μm são difíceis de hidratar e as superiores a 75 μm nunca se hidratam por completo. Observa-se que as adições em estudo possuem elevados percentuais de partículas com dimensão inferior a 45 μm , o que traduz em teores reduzidos de resíduos na peneira de malha 45 μm .

Da análise da Figura 18 e da Tabela 7, é possível constatar diferenças entre as adições no que se refere às percentagens de partículas com grãos de maior ou menor dimensão: as cinzas volantes e a sílica ativa registram maior quantidade de partículas maiores (acima de 77 e 56 μm , respectivamente), o metacaulim e pó cerâmico, mostram maiores percentuais de finos (partículas com dimensões inferiores a 39 e 35 μm , respectivamente). Esta última adição aparentemente mais fina e com partículas de diâmetros menores que o metacaulim.

¹³ O Diâmetro médio (Dmédio) corresponde ao tamanho médio dos grãos pelo qual passaram 50% das partículas do material.

5.3.5 Área superficial específica da cal e das adições

A determinação da área efetivamente exposta (área superficial específica) é importante na análise da cinética de reação das partículas de adição com a cal, que ocorre na superfície dos grãos. A área superficial específica constitui uma das características que se relaciona à atividade pozolânica: quanto maior a área superficial do material, maior será a facilidade dele reagir com o hidróxido de cálcio devido a uma disponibilidade de área de contato entre os reagentes, principalmente nas primeiras idades.

As normativas específicas para o metacaulim, *NBR15894-1* (ABNT, 2010), e *NBR13956-1* (ABNT, 2012) para a sílica ativa, determinam valores mínimos de área superficial específica. Para a primeira adição, igual ou superior a 15 m²/g e para a sílica ativa, os valores devem estar compreendidos entre 15m²/g e 30m²/g, respectivamente. Não foram identificados parâmetros de referência para as adições de pó cerâmico e cinzas volantes.

A área superficial específica da cal e das adições pozolânicas foi determinada pelo método de adsorção de nitrogênio (B.E.T. – Brunauer, Emmett, Teller), que é o mais apropriado para a caracterização desse parâmetro em materiais extremamente finos, como os estudados neste trabalho. A técnica consiste em promover a adsorção do gás (nitrogênio) ao material pulverizado sob pressão controlada, à baixa temperatura. Esta análise foi realizada no Laboratório Multiusuário de Nanotecnologia do CETENE e o equipamento utilizado foi um Analisador de superfície e de tamanho de poros Micromeritics ASAP 2420. Os valores de área superficial específica da cal e das adições estão apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 – Área superficial específica da cal e das adições

Material	Área superficial específica B.E.T (m²/g)
Cal aérea	24,08
Metacaulim	32,74
Pó Cerâmico	27,36
Cinzas volantes	23,61
Sílica ativa	26,09

Fonte: Elaboração própria (2017).

Os resultados obtidos para estas duas adições estão coerentes com as normativas. Não foram identificados parâmetros de referência para o pó cerâmico e para as cinzas volantes, mas é importante referir que os valores encontrados para estas adições são da mesma ordem de grandeza das adições de metacaulim e sílica ativa. O metacaulim e o pó cerâmico possuem área superficial específica mais elevada, em relação às adições de sílica ativa e cinzas volantes. Como seria expectável, as partículas menores correspondem a superfícies específicas superiores.

Diante do que foi discutido, do ponto de vista da granulometria e da área superficial específica, as adições que possuem características mais favoráveis para promover as reações de hidratação com o ligante e formar compostos hidratados são o pó cerâmico e o metacaulim.

5.3.6 Análises complementares

A cal e as adições pozolânicas foram analisadas mediante um conjunto de análises complementares, importantes para avaliar a natureza e a composição química¹⁴ e mineralógica das adições pozolânicas, entre os quais se destacam: análise por Fluorescência de Raios X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX) e observação ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Neste item, diferentemente dos demais, faz-se abordagem, apenas, sobre os resultados obtidos para as adições estudadas, uma vez que a descrição dos procedimentos e metodologias de análise, assim como as características dos equipamentos utilizados foram expostos no Capítulo 4, referente à caracterização das argamassas antigas.

5.3.6.1 Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)

As composições químicas, na forma de óxidos, do metacaulim, do pó cerâmico, das cinzas volantes e da sílica ativa são mostradas na Tabela 8, na qual é possível observar a predominância de sílica (SiO_2) e do óxido de alumínio (Al_2O_3) como principais constituintes das três primeiras adições. O metacaulim é mais rico nesses compostos. A sílica ativa tem como principal componente apenas o dióxido de silício (SiO_2) e praticamente não contém alumínio. De modo geral, os resultados obtidos

¹⁴ Embora a composição química não seja um parâmetro adequado para averiguar a potencialidade das reações pozolânicas, pelo fato de não distinguir a sílica cristalina da não cristalina, pode ser útil no controle de produção da matéria-prima.

para as adições em estudo estão de acordo com os referenciados nas normativas *NBR 12653* (ABNT, 2014), *NBR 13956-1* (ABNT, 2012) e *NBR 15894-1* (ABNT, 2010), no que diz respeito à classificação como materiais pozolânicos.

Tabela 8 – Análise química por fluorescência de raios X das adições (%)

Adições	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
Metacaulim	56,38	33,94	3,51	0,08	0,88	0,04	3,02	1,91	0,04
Pó cerâmico	53,39	20,39	8,29	9,82	1,81	1,36	2,81	1,26	0,24
Cinzas volantes	57,73	26,68	6,43	1,80	0,73	0,46	3,66	1,65	0,37
Sílica ativa	93,05	0,15	1,38	0,45	1,14	0,48	2,14	-	1,06

Fonte: Elaboração própria (2017).

Para as cinzas volantes e o pó cerâmico, a *NBR 12653* (ABNT, 2014), relativa aos requisitos para materiais pozolânicos, estabelece que a soma dos teores percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve superar o mínimo de 70%. Para essas duas adições, a fração desses óxidos reativos (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) acima de 70%, atende os requisitos como materiais pozolânicos.

As normativas *NBR 13956-1* (ABNT, 2012) e *NBR 15894-1* (ABNT, 2010) preconizam, respectivamente, os percentuais mínimos de SiO₂, de 85%, para sílica ativa e de ≥44% e ≤ 65%, para o metacaulim. As adições em estudo atendem os valores estabelecidos.

Particularmente para o metacaulim utilizado nesta pesquisa, o valor obtido encontra-se dentro dos limites recomendados pela normativa para caracterizar o material com alta atividade pozolânica.

Quanto ao teor de SiO₂ na composição química de argilas calcinadas, Barata (2007) refere sobre a constatação de alguns autores quanto ao maior teor desse composto, que pode indiciar maior quantidade de quartzo e, portanto, menor a atividade pozolânica. Adicionalmente, o autor menciona alguns limites químicos prescritos pela normativa indiana *IS 1344* (ISI, 1981), para argilas calcinadas, entre os quais, o valor mínimo de 40% para o SiO₂.

Em relação ao teor de óxido de cálcio (CaO) presente nas adições de pó cerâmico, embora não haja parâmetro de referência da normativa brasileira, o dado apresentado, de 9,82%, é muito superior aos das outras adições. Esse valor está abaixo, mas muito próximo, do limite máximo de 10% prescrito, pela norma indiana

IS 1344 (ISI, 1981), para o uso de argilas calcinadas como adição mineral em misturas de concreto de cimento Portland. O elevado teor em cal livre (óxido de cal não combinado) no pó cerâmico pode ser indicador de deficiente cozimento da cerâmica.

Toda adição pozolânica, quando em contato com o óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio, em meio aquoso e em concentração adequada, promove reações químicas e formação de compostos com capacidade cimentícia, que endurecem com o decorrer do tempo. Em geral, as adições pozolânicas devem conter baixo teor de cálcio, pois o excesso pode interferir negativamente nesse processo, quando em contato com o hidróxido de cálcio livre proveniente do ligante.

O óxido de titânio presente em concentrações inferiores a 2% nas adições de metacaulim, de pó cerâmico e de cinzas volantes não afeta diretamente o seu uso como adição para produtos à base de cal. Em produtos à base de cimento, a presença desse óxido pode estar associada a minerais que afetam negativamente as reações de endurecimento da pasta, diminuindo sua resistência mecânica ou química (ROCHA, 2005). Estudos de desempenho com estas adições se fazem necessários para determinar se a presença desse óxido afeta negativamente a resistência mecânica das misturas com base em cal.

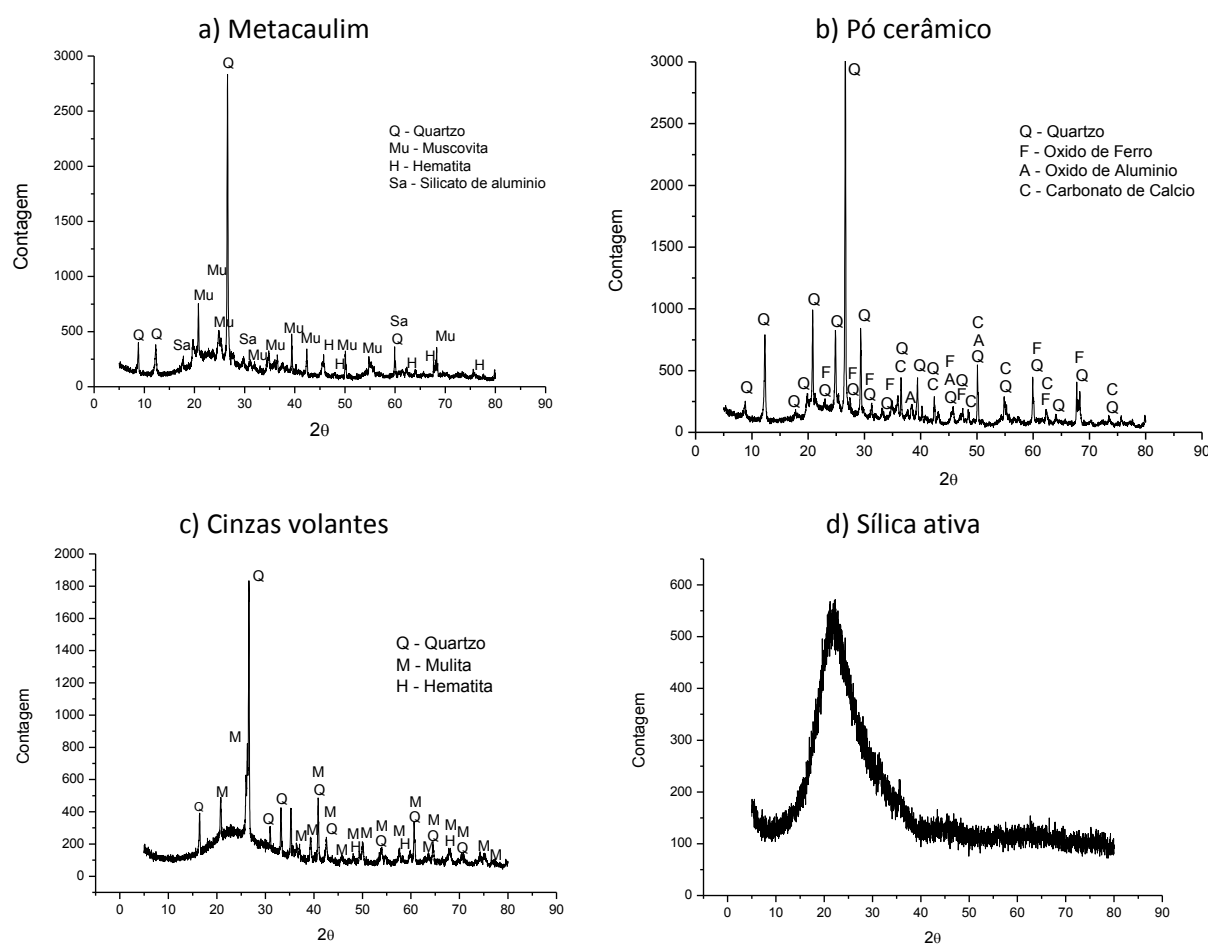
5.3.6.2 Composição mineralógica por Difractometria de Raios X (DRX)

Por meio da difração de raios X foram identificados os compostos cristalinos que compõem os materiais. Nos difratogramas apresentados, identificam-se os principais minerais de fase cristalina, por comparação com o banco de dados do ICDD – *International Centre for Diffraction Data*, entidade que reúne e cataloga os padrões de difração de raios X para todos os compostos cristalinos já encontrados até hoje.

Para uso como materiais pozolânicos, espera-se que as adições minerais estejam na fase amorfa e por isso o difratograma deve registrar curva suave com pouco ou nenhum pico bem definido. Quanto menor a incidência de picos bem definidos no gráfico de DRX, maior é o grau de vitrificação (amorfismo) do material, ou seja, há menor presença de planos cristalinos bem definidos (menor cristalinidade).

Os difratogramas obtidos para as adições estudadas são apresentados na Figura 19. No Quadro 19, são indicados os compostos cristalinos com os respectivos códigos de referência das fichas do ICDD empregadas na identificação das fases cristalinas, além da fórmula química e do mineral presente.

Figura 19 – Difratogramas das adições



Fonte: Elaboração própria (2018)

Quadro 19 – Compostos cristalinos identificados nas adições

Adição	Código de referência*	Nome do composto	Fórmula Química	Mineral
Metacaulim	080-1832	Óxido de Silício	SiO ₂	–
	043-0745	Óxido de Silício	SiO ₂	–
	074-1976	Silicato de alumínio	Al ₂ SiO ₅	–
	079-2363	Silicato de Alumínio	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Muscovita
	075-0948	Silicato de Alumínio	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita
	089-2810	Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	Hematita
Pó cerâmico	080-2147	Óxido de Silício	SiO ₂	Quartzo
	083-2468	Óxido de Silício	SiO ₂	Quartzo
	047-1770	Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	–
	041-1475	Carbonato de Cálcio	CaCO ₃	Aragonita
	076-1821	Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	–
Cinzas volantes	065-0466	Óxido de Silício	SiO ₂	Quartzo
	082-1561	Óxido de Silício	SiO ₂	–
	001-1053	Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	Hematita
	088-2049	Silicato de Alumínio	Al ₅ SiO _{9.5}	Mulita
Sílica ativa	-	Óxido de Silício	Si O ₂	Amorfo

*Obtido a partir do banco de dados de estruturas cristalográficas, do ICDD – *International Centre for Diffraction Data*.

Fonte: Elaboração própria (2017).

Os dados obtidos indicam que todas as adições, à exceção da sílica ativa, contêm o mineral quartzo em sua constituição, sendo esse material formado, essencialmente, de sílica (SiO₂) em estado amorfo. Há evidências de ter maior proporção de fase amorfa entre as adições estudadas.

Nas adições de cinzas volantes, de metacaulim e de pó cerâmico observa-se a presença de picos correspondentes à fase cristalina de hematita. O difratograma das cinzas confirma a presença de aluminossilicatos amorfos. No metacaulim foram encontrados a muscovita e os aluminossilicatos na forma amorfa. No pó cerâmico além da presença dos minerais associados aos óxidos de ferro e alumínio, foram evidenciados carbonatos.

Os picos correspondentes à hematita (Fe₂O₃), nas adições de metacaulim e cinzas volantes, explicam a presença desse composto, que foi identificado nas análises químicas (item 5.3.6.1). Compostos como CaO, MgO e Na₂O não se mostraram presentes ou associados a nenhum tipo de mineral nos difratogramas. O composto K₂O foi identificado com mais clareza somente na adição de metacaulim, que apresentou traços de muscovita [KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂ e KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂] na sua composição.

A relação sílica/alumina das adições de pó cerâmico (2,62) e cinzas volantes (2,16), superior ao valor obtido para o metacaulim (1,67), pode justificar a presença dos picos de quartzo (sílica livre) apresentados nos difratogramas.

No Quadro 20, estão indicados, de forma resumida, os compostos encontrados em cada adição, com identificação das prováveis fases, cristalinas e vítreas, presentes.

Quadro 20 – Identificação dos compostos por fases presentes nas adições

Adição	Fase cristalina	Fase vítrea
Metacaulim	Quartzo, Muscovita, Hematita	Aluminossilicato na fase amorfa
Pó cerâmico	Quartzo, Carbonato de cálcio (aragonita), Óxido de ferro (hematita)	Sílica (SiO ₂) e Alumina (Al ₂ O ₃) na fase amorfa
Cinzas volantes	Quartzo, Hematita, Mulita	SiO ₂ (sílica na fase amorfa)
Sílica ativa	Não há	SiO ₂ (sílica na fase amorfa)

Fonte: Elaboração própria (2017).

É de salientar que a quantificação exata de compostos presentes com fase amorfa tem interesse para a correlação com propriedades físico-mecânicas dos materiais. Esta quantificação é possível por meio da conjugação da técnica de DRX com a aplicação do Método de Rietveld, usado para caracterização estrutural de compostos cristalinos e quantificação de componentes de materiais (GOBBO, 2009). Por restrição da pesquisa, a quantificação de fases amorfas das adições, pelo referido método, não foi aplicada no âmbito desta tese.

5.3.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

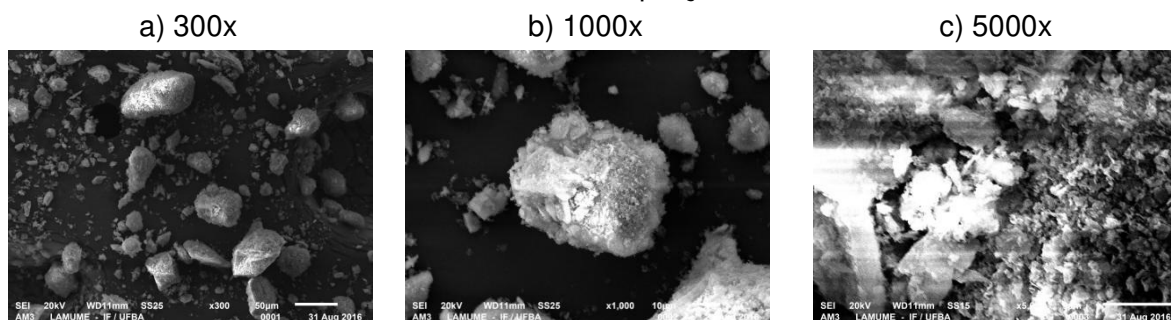
A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada com o objetivo de verificar a morfologia das partículas das adições. As micrografias das adições são mostradas nas Figuras 20 a 23.

De forma geral, a análise por microscópio eletrônico de varredura permitiu comparar as adições que constituíram as argamassas do presente estudo. A partir dessa análise, distinguiram-se microestruturas particulares para os diferentes componentes pozolânicos. Observa-se que, para ampliações de 300x, e às vezes para ampliações de 1000x, não é possível ainda identificar características marcantes que classifiquem a adição.

No caso do metacaulim, é expectável que as partículas tenham formato lamelar (caulinita), eventualmente, com a presença de partículas tubulares. Esta primeira característica passa a se sobressair na ampliação de 5.000x, observando-se também partículas aglomeradas, de morfologia irregular e angular, além de possuírem superfície rugosa. O pó cerâmico apresenta estruturas de partículas de formato irregular e angular, com rugosidade superficial e dimensões variáveis; observam-se, ainda, algumas formas laminadas de partículas nesta adição.

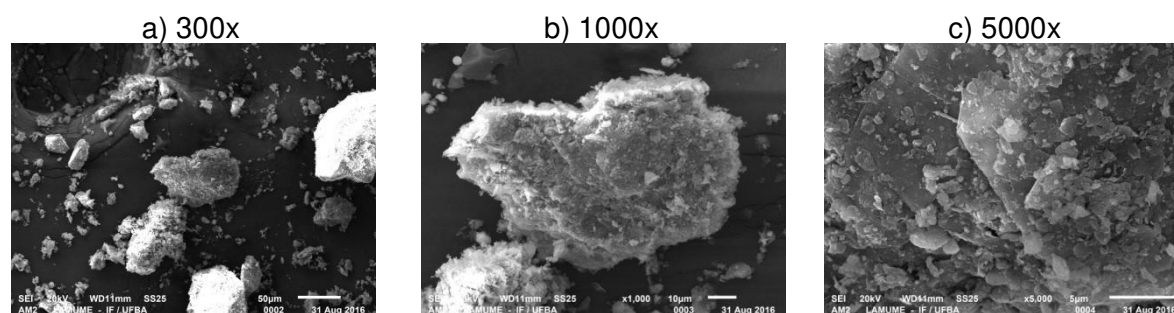
As micrografias das cinzas volantes mostram claramente morfologia singular, com grande percentual de partículas esféricas de superfície lisa e homogênea, de dimensões variáveis (provavelmente, a mulita). São inúmeras as partículas irregulares de maior dimensão em formato de esferas, que podem ser ocas ou conter partículas de menores no seu interior. Em geral, são visíveis concreções (agregados) de partículas na superfície. O aspecto esférico e arredondado das partículas é uma característica favorável à melhora da trabalhabilidade da argamassa no estado fresco e à diminuição do consumo de água, quando da sua utilização nas misturas.

Figura 20 – Micrografias de partículas de metacaulim, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de



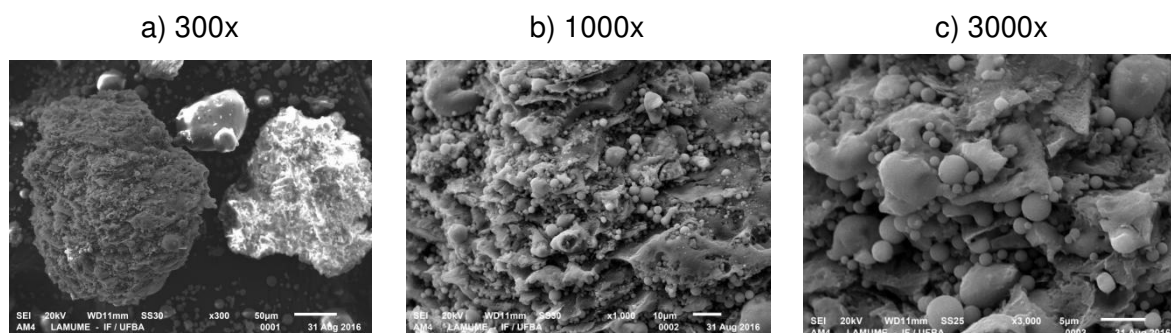
Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 21 – Micrografias de partículas de pó cerâmico, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de:



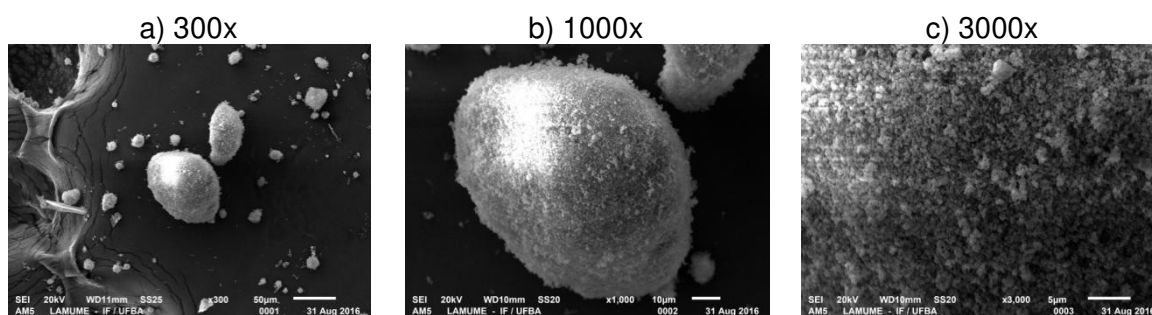
Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 22 – Micrografias de partículas de cinzas volantes, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de:



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 23 – Micrografias de partículas de sílica ativa, obtidas com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de:



Fonte: Fotos da Autora (2017).

A sílica ativa possui microestrutura contendo aglomerados de micropartículas de sílica, de tamanho e forma variados, inferiores a 5 μm. Da mesma forma que as adições de metacaulim e pó cerâmico, são visíveis partículas irregulares, com superfície rugosa.

Em síntese, as distintas morfologias das partículas das adições são evidentes e podem justificar diferentes comportamentos no estado fresco das argamassas a serem produzidas. Destaca-se o formato esférico das partículas de cinzas volantes que pode ser atribuído ao fato de esta adição não ter sido moída. As demais adições, de metacaulim, de sílica ativa e de pó cerâmico, são constituídas de formações de pequenos aglomerados de partículas irregulares com superfície rugosa.

5.3.7 Perda ao fogo, teor de umidade e resíduo na peneira 45 μm

5.3.7.1 Perda ao fogo

Designa-se por “perda ao fogo” a perda de massa que ocorre a 1000°C, referente aos materiais voláteis (água combinada + CO₂ dos carbonatos), que são liberados a esta temperatura. Pode-se dizer que o valor obtido no ensaio de perda ao fogo está associado à quantidade de matéria orgânica, não calcinada, inerte, presente na amostra. O ensaio serve, portanto, para confirmar a quantidade de matéria orgânica presente no material. Valores reduzidos de perda ao fogo são indicativos da boa qualidade do material.

Para os materiais pozolânicos, trata-se de um requisito químico que deve estar em conformidade com normativa específica para esses materiais. Para serem classificados como materiais pozolânicos, a normativa brasileira estabelece requisitos distintos de perda ao fogo, conforme o material. A *NBR 12653* (ABNT, 2014) determina para o pó cerâmico (equivalente a argilas calcinadas, materiais da classe N), valores iguais ou inferiores a 10%. Para as cinzas volantes, a mesma norma estabelece limite máximo de 6%. A norma *NBR 15894-1* (ABNT, 2010) preconiza valores iguais ou inferiores a 4%, para o metacaulim e, para a sílica ativa, a *NBR 13956-1* (ABNT 2012) limita em 6% o valor de perda ao fogo. Os valores mínimos de perda ao fogo para materiais pozolânicos, estabelecidos pelas normativas brasileiras estão indicados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores mínimos de perda ao fogo, para materiais pozolânicos, estabelecidos por normativas nacionais

Material pozolânico	Normativa	Perda ao fogo
Metacaulim	NBR15894-1	≤4%
Pó cerâmico	NBR 12653	≤10%
Cinzas volantes	NBR 12653	≤6%
Sílica ativa	NBR 13956-1	≤6%

Fonte: Elaboração própria (2018).

O procedimento para a determinação da perda ao fogo, realizado no NTPR, baseou-se na *NBR NM 18* (ABNT, 2012). A amostra do material, depois de calcinada em forno mufla (Figura 24) durante 50 min, foi pesada e registrada a sua

massa. O cálculo da perda ao fogo, em porcentagem, foi feito a partir da relação entre a diferença de massas depois e antes da calcinação.

Figura 24 – Ensaio de perda ao fogo



Fonte: Foto da Autora (2017).

5.3.7.2 Teor de umidade

O teor de umidade da adição constitui outro requisito químico que deve estar em conformidade com os valores mínimos referenciados pela norma, no que diz respeito à classificação do material como pozolânico.

O ensaio, que determina o teor de umidade do material, seguiu os procedimentos da *NBR NM 24* (ABNT, 2003); consistiu na pesagem de 1g de amostra, secagem em estufa à temperatura de $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$, até que a diferença entre duas determinações sucessivas fosse menor que 0,001g. O cálculo do teor de umidade, em porcentagem, é dado pela diferença de massas antes e depois da secagem em estufa.

O valor máximo de teor de umidade, estabelecido pela *NBR 12653* (ABNT, 2014), para o pó cerâmico e para as cinzas volantes, é de 3%. Esse mesmo limite é preconizado, pela *NBR 13956-1*, para sílica ativa. Já a *NBR15894-1* (ABNT, 2010), define para o metacaulim valor inferior a 2%. Os valores mínimos de teor de umidade para os materiais pozolânicos, preconizados pelas normativas brasileiras, são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores mínimos de teor de umidade, para materiais pozolânicos, estabelecidos por normativas nacionais

Material pozolânico	Normativa	Teor de umidade
Metacaulim	NBR15894-1	≤2%
Pó cerâmico	NBR 12653	≤3%
Cinzas volantes	NBR 12653	≤3%
Sílica ativa	NBR 13956-1	≤3%

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.3.7.3 Resíduo na peneira 45 μm

A normativa brasileira impõe valores mínimos de finura aos materiais pozolânicos, especificando teor máximo de resíduo retido na peneira de malha 45 μm . Com esse propósito, foi realizado, no NTPR, o ensaio de resíduo na peneira com abertura de malha 45 μm , para todas as adições.

Tanto para o metacaulim, como para as outras adições¹⁵, o ensaio foi realizado conforme as condições estabelecidas na *NBR15894-3* (ABNT, 2010) – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm . Para a sílica ativa, utilizou-se o procedimento estabelecido na *NBR 13956-4* (ABNT, 2012). Em relação aos resultados obtidos com esse método, observou-se incoerência, justificada pelos problemas na execução de ensaio, sobretudo, pelas condições pouco adequadas da peneira disponível, dificuldades de limpeza da malha extremamente fina, entre outros aspectos operacionais. Neste sentido, optou-se por adotar como valores de resíduo na peneira 45 μm , o resultado aproximado da diferença entre 100% e o percentual de partículas com dimensão inferior a esta malha, obtido a partir da curva de distribuição granulométrica a laser de cada material (ver Tabela 7).

Para o pó cerâmico e as cinzas volantes, a *NBR 12653* (ABNT, 2014) especifica que o percentual máximo retido na referida peneira 325 “mesh” (45 μm) deve ser de 20%. Para as adições de metacaulim e sílica ativa, as normas *NBR 15895-1* (ABNT, 2010) e *NBR 13956-1* (ABNT, 2012), respectivamente, estabelecem limite máximo de 10% de material retido na referida peneira.

¹⁵ A *NBR 12653* (ABNT, 2014), relativa a materiais pozolânicos em geral, determina que o mesmo método de ensaio adotado para metacaulim seja adaptado para os materiais pozolânicos.

Os valores mínimos de resíduo retido na peneira 45 μm , para materiais pozolânicos, definidos pelas normativas brasileiras, são indicados na Tabela 11. Os resultados de perda ao fogo, teor de umidade e resíduo na peneira de malha 45 μm são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Valores mínimos de resíduo na peneira 45 μm , para materiais pozolânicos, conforme normativas nacionais

Material pozolânico	Normativa	Resíduo na peneira 45 μm
Metacaulim	NBR15894-1	$\leq 10\%$
Pó cerâmico	NBR 12653	$\leq 20\%$
Cinzas volantes	NBR 12653	$\leq 20\%$
Sílica ativa	NBR 13956-1	$\leq 10\%$

Fonte: Elaboração própria (2018).

Tabela 12 – Resultados de perda ao fogo, umidade e resíduo na peneira 45 μm

Adição	Perda ao fogo		Teor de umidade		Resíduo na peneira 45 μm	
	Valor médio obtido (%)	CVar (%)	Valor médio obtido (%)	CVar (%)	Valor obtido* (%)	CVar** (%)
Metacaulim	4,3	14,7	0,5	3,0	10,0	n.d.
Pó cerâmico	10,4	3,7	0,1	0,2	6,5	n.d.
Cinzas volantes	1,9	10,5	0,3	1,6	14,0	n.d.
Sílica ativa	3,1	12,6	0,1	2,2	11,0	n.d.

Fonte: Elaboração própria (2018).

* Valor = 100% - Percentual de partículas com dimensão inferior a 45 μm (valor da última coluna da Tabela 7).

** Dado não determinado (n.d.) pelo Centro de Pesquisa que efetuou os ensaios.

A análise da Tabela 12 permite extrair as conclusões a seguir explicitadas.

Os resultados de **perda ao fogo** mostram que o valor obtido para pó cerâmico em estudo, próximo de 10%, é bastante superior aos das demais adições. Isto mostra que esta adição pode conter, em sua composição, elevada quantidade de material não calcinado após o processo de transformação da argila em cerâmica, indicando deficiente controle de produção. Isto é justificável pelo fato de o resíduo cerâmico utilizado nesta pesquisa tratar-se de um material proveniente de produção

industrial de larga escala de telha cerâmica, cujos parâmetros como taxa de aquecimento, quantidade de material e temperatura são muito difíceis de serem controlados.

As cinzas volantes, com valor inferior a 2%, mostram menor perda ao fogo em relação às demais adições. O metacaulim e a sílica ativa apresentam valores intermediários. O valor reduzido de perda ao fogo indica quantidade pequena de matéria orgânica presente.

A variabilidade dos resultados do ensaio de perda ao fogo é menor para a adição de pó cerâmico (4%) e maior para a adição de metacaulim (15%), as demais adições (sílica ativa e cinzas volantes) mostram valores intermediários de coeficientes de variação. Observa-se relação inversamente proporcional entre os coeficientes de variação (CVar) obtidos e o teor de CaO da adição, sugerindo que a presença desse composto pode ter contribuição para o CVar mais elevado nas adições de metacaulim e mais reduzido nas adições de pó cerâmico.

No que se refere à conformidade com os requisitos de perda ao fogo, para ser considerado como material pozzolânico, somente as cinzas volantes e a sílica ativa apresentam valores mais próximos do ideal, respeitando os limites das respectivas referências normativas. Ressalta-se, no entanto, que os valores obtidos para as adições de metacaulim (4,3%) e de pó cerâmico (10,4%), apesar de superiores, ficaram muito próximos dos limites máximos preconizados pelas normas relativas a cada um desses materiais ($\leq 4\%$, para o metacaulim e $\leq 10\%$, para o pó cerâmico).

No que tange ao teor de umidade, observam-se valores desprezíveis, entre 0,1 e 0,5%, e que atendem os requisitos da normativa para o material ser classificado como material pozzolânico. No que diz respeito à variabilidade dos resultados desse ensaio, obteve-se coeficientes de variação reduzidos ($< 3\%$). Os requisitos de teor de umidade são atendidos por todas as adições em estudo, para serem consideradas como material pozzolânico.

Relativamente ao Resíduo na peneira 45 μm , as cinzas volantes, com percentual mais elevado de 14%, mostra quantidade de partículas grossas superior às das demais adições. O pó cerâmico, o metacaulim e a sílica ativa possuem, em suma, partículas com maior finura, o que poderá repercutir, entre outros aspectos, no estado fresco das argamassas, especialmente, na demanda de água para molhamento das partículas e na trabalhabilidade. No estado endurecido, a finura das

partículas das adições promove aumento da compactidade da argamassa (densidade) devido ao efeito fíler (maior empacotamento das partículas).

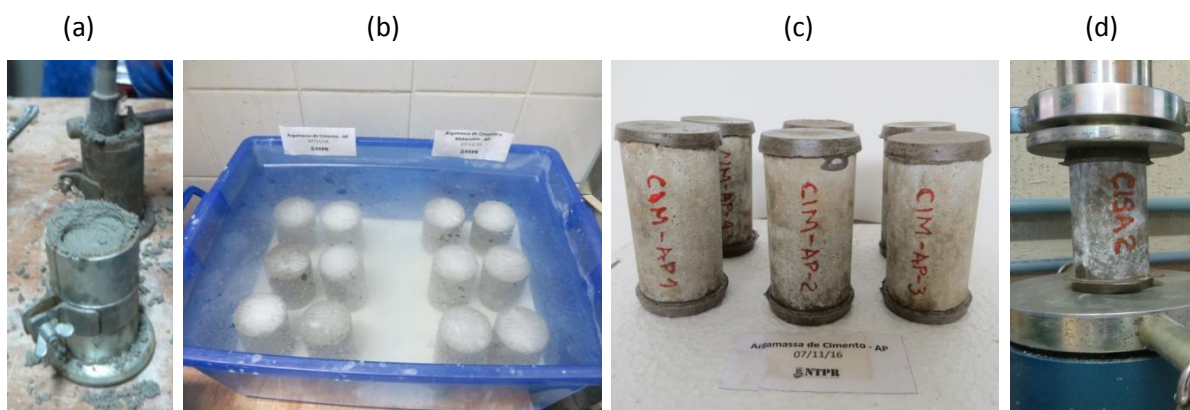
Apenas as adições de pó cerâmico e cinzas volantes atenderam aos requisitos da normativa nacional, referente a material pozolânico, no que concerne ao percentual de resíduo retido na peneira 45 μm . Salienta-se que tanto o metacaulim como a sílica ativa mostraram valores muito próximos dos limites máximos estabelecidos ($\leq 10\%$), que são mais rigorosos do que aqueles estipulados ($\leq 20\%$) para as outras adições.

5.3.8 Atividade pozolânica com o cimento, com a cal e ensaio de Chapelle

5.3.8.1 Índice de desempenho com cimento Portland

O procedimento de preparação dos corpos de prova para determinação do índice atividade pozolânica com uso o cimento Portland foi realizado conforme estabelecido na norma *NBR 5752* (ABNT, 2014). O índice de desempenho com cimento Portland foi determinado por meio do ensaio de ruptura à compressão de corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm, moldados no laboratório do Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Conservação – NTPR (Figura 25). Para elaboração das argamassas, foram utilizadas quatro frações granulométricas da Areia Normal: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100).

Figura 25 – Índice de desempenho com cimento



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Apesar de a *NBR 5752* (ABNT, 2014) estabelecer a determinação do índice de atividade pozolânica para materiais pozolânicos, aos 28 dias, as normativas específicas para o metacaulim e para a sílica ativa, *NBR 15894-2* (ABNT, 2010) e *NBR 13956-3* (ABNT, 2012), respectivamente, estabelecem, para esses materiais, que esse índice seja determinado aos sete dias.

Os valores de ruptura obtidos são verificados se estão em conformidade com requisitos físicos propostos pela *NBR 12653:2014* (ABNT, 2014), para as adições de cinzas volantes e pó cerâmico, pela *NBR 13956-1* (ABNT, 2012), para a sílica ativa e pela *NBR15894-2* (ABNT, 2010), para o metacaulim.

Para que o material possa ser considerado pozolânico, a *NBR 12653* (ABNT, 2014) preconiza, para as cinzas volantes e para o pó cerâmico, que o índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias, seja igual ou superior a 90%. Especificamente para o metacaulim, a norma *NBR 15894-1* (ABNT, 2010) orienta que esse índice, determinado aos sete dias, seja igual ou superior a 105%. Ambas as normas referidas estabelecem que o desvio máximo relativo, tomando como base a *NBR 7215* (ABNT, 1997), seja inferior a 6%. Para considerar o material como pozolânico, os valores mínimos de índice desempenho com cimento devem atender os parâmetros indicados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores mínimos de índice desempenho com cimento, estabelecidos pelas normativas brasileiras

Material pozolânico	Normativa	Idade (dias)	Índice de desempenho com cimento
Metacaulim	NBR 15894-1	7	≥105%
Pó cerâmico	NBR 12653	28	≥90%
Cinzas volantes	NBR 12653	28	≥90%
Sílica ativa	NBR 13956-1	7	≥105%

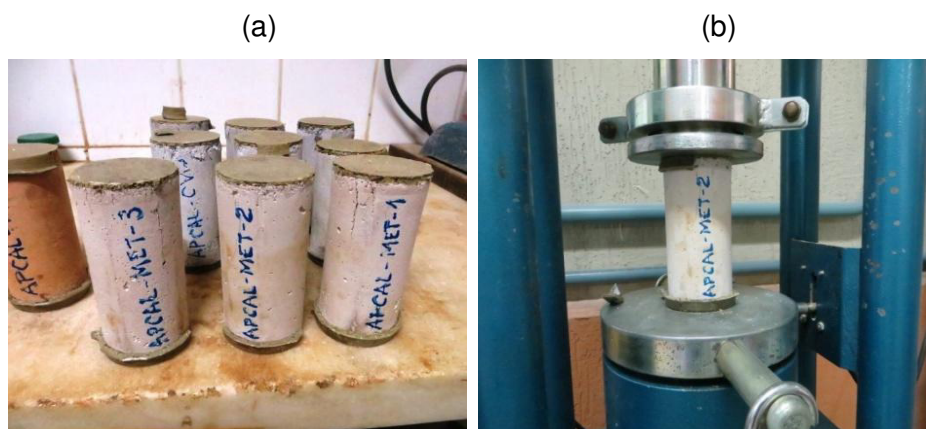
Fonte: Elaboração própria (2018).

5.3.8.2 Atividade pozolânica com a cal

O procedimento para determinação do índice atividade pozolânica com a cal foi realizado conforme estabelecido na norma *NBR 5751* (ABNT, 2015). A atividade pozolânica com a cal, aos sete dias, foi determinada por meio do ensaio de ruptura à

compressão de corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm (Figura 26), moldados com a utilização de quatro frações granulométricas da Areia Normal: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100).

Figura 26 – Atividade pozolânica com a cal



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Da mesma forma que o realizado com cimento, os valores de ruptura encontrados para as argamassas moldadas com cal são verificados, no que se refere à conformidade com os requisitos físicos propostos pela *NBR 12653:2014* (ABNT, 2014), para as adições de cinzas volantes e pó cerâmico. Esta mesma norma preconiza valor mínimo de índice de atividade pozolânica com a cal para esses materiais de 6 MPa. No que se refere às adições de sílica ativa e metacaulim, as normativas específicas, *NBR 13956-1* (ABNT, 2012) e *NBR15894-2* (ABNT, 2010), respectivamente, não incluem índice atividade pozolânica com a cal como requisito de avaliação. Os valores mínimos de índice de atividade pozolânica com a cal estão indicados no Quadro 21.

Quadro 21 – Valores mínimos índice atividade pozolânica com a cal, estabelecidos pelas normativas brasileiras

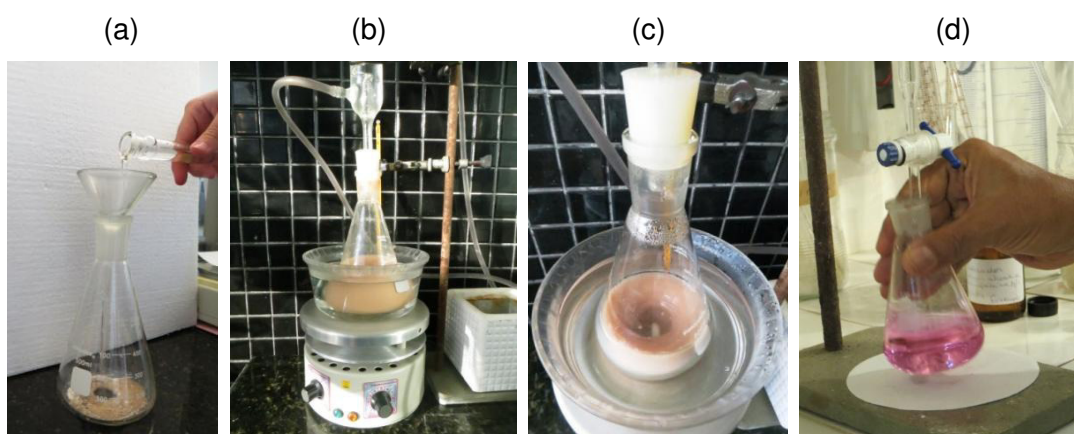
Material pozolânico	Normativa	Idade (dias)	Índice de desempenho com a cal
Metacaulim	NBR15894-1	Não é requisito de avaliação	
Pó cerâmico	NBR 12653	7	≥ 6 MPa
Cinzas volantes	NBR 12653	7	≥ 6 MPa
Sílica ativa	NBR 13956-1	Não é requisito de avaliação	

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.3.8.3 Método de Chapelle modificado

O Método de Chapelle permite aferir a pozolanicidade de uma adição por meio da avaliação do teor de hidróxido de cálcio fixado à sílica e à alumina, componentes presentes nos materiais pozolânicos. Por meio desse ensaio é possível medir a quantidade de Ca(OH)_2 consumida durante a reação com a sílica e a alumina, presentes nos materiais com potencial pozolânico, após período de tempo padronizado, em que a reação é acelerada por elevação da temperatura. O experimento, posto em prática nas instalações do NTPR (Figura 27), foi feito, com algumas adaptações, a partir das recomendações da *NBR 15895 – Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado* (ABNT, 2010). O resultado é expresso pela quantidade de Ca(OH)_2 consumida, ou fixada, por grama de material pozolânico.

Figura 27 – Ensaio de Chapelle



Fonte: Fotos da Autora (2016).

O material é considerado pozolânico se o consumo de óxido de cálcio for superior a 330 mg de CaO/g da amostra (ou 436 mg de Ca(OH)_2 por grama de pozolana), limite mínimo determinado por Raverdy et al. (1980) para a pozolana ser considerada como material ligante em substituição ao cimento. Em geral, metacaulins comerciais mostram índices de consumo de hidróxido de cálcio da

ordem dos 920 aos 1560 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de material, sendo caracterizados como pozolanas altamente reativas ou pozolanas de alta reatividade¹⁶.

Estudos com diversos materiais pozolânicos nacionais, realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), objetivando a determinação do consumo de cal, mostram valores de Ca(OH)_2 consumidos por grama de material, oscilando entre os 377 e 645 para as cinzas volantes, 993 e 1340 para metacaulins e entre 1276 e 1522, para a sílica ativa (QUARCIONI et al., 2015).

5.3.8.4 Resultados de atividade pozolânica

Na Tabela 14, são apresentados os resultados de desempenho com o cimento Portland, da atividade pozolânica com a cal e Índice de atividade pozolânica Chapelle.

Tabela 14 – Resultados de atividade pozolânica

Adição	Índice de desempenho com o cimento Portland (%)			Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)		Índice de atividade pozolânica Chapelle (mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de material)	
		Valor médio obtido	CVar (%)	Valor médio obtido	CVar (%)	Valor obtido	CVar (%)
Metacaulim	7 dias	100,83	7,2	10,20	3,7	677	n.d.
	28 dias	124,64	4,0				
Pó cerâmico	7 dias	n.d.	-	4,10	2,8	231	n.d.
	28 dias	101,74	4,0				
Cinzas volantes	7 dias	n.d.	-	3,9	3,3	411	n.d.
	28 dias	88,64	5,1				
Sílica ativa	7 dias	104,44	14,8	8,9	2,4	998	n.d.
	28 dias	120,47	8,2				

Fonte: Elaboração própria (2018).

n.d. – não determinado

A análise das Tabelas 13 e 14 e do Quadro 21 permite extrair as conclusões explicitadas a seguir.

¹⁶ Estas pozolanas aceleram a hidratação do ligante, sendo a reação pozolânica extremamente rápida; são empregadas normalmente em concretos de alta resistência e de alto desempenho. Distinguem-se das demais pelo alto teor de material vítreo (silicioso ou aluminossilicoso) e pela área superficial específica muito elevada (entre 16 a 60m²/g), conforme explica Barata (2007).

Os resultados de índice de desempenho com o cimento das adições de metacaulim e da sílica ativa, aos 28 dias, são superiores aos valores obtidos para as cinzas volantes e o pó cerâmico. Aos 7 dias, as adições de metacaulim e sílica ativa já apresentam valores da ordem de 100%. A variabilidade dos resultados é superior aos 6% preconizados pela norma. Aos 28 dias, somente o coeficiente de variação das argamassas com adição de sílica ativa (da ordem de 15%) é superior aos 6%. Fatores relacionados à execução e moldagem dos corpos de prova poderão explicar esta alta dispersão nos resultados, uma vez que o metacaulim e, principalmente, a sílica ativa são materiais que demandam maior quantidade de água para obtenção da mesma trabalhabilidade que a argamassa de cimento de referência.

O índice de desempenho com cimento para o metacaulim, determinado aos sete dias, foi inferior ao valor especificado pela norma ($\geq 105\%$). No entanto, ressalta-se que o valor encontrado (aproximadamente 101%) pode atestar a conformidade da adição, uma vez que há estudos, como o de Rocha (2005), citado por Barata (2007), que classificam o metacaulim em diferentes níveis de reatividade: baixa ($>75\%$), média ($>85\%$) ou alta ($>90\%$). Considerando que o requisito mínimo da norma se refere ao metacaulim de alta reatividade pozolânica, o material em estudo poderá ser classificado como de média reatividade pozolânica. As adições de cinzas volantes e de sílica ativa não atendem os requisitos mínimos estabelecidos, mas há de se ter em conta que os valores obtidos (88,64% e 104,44%, respectivamente) estão muito próximos dos preconizados como requisitos mínimos, 90% (pela *NBR 12653:2014*) e 105% (pela *NBR 13956-1:2012*), respectivamente. A adição de pó cerâmico está em conformidade com o valor mínimo estabelecido como índice de desempenho com o cimento Portland.

Em relação ao ensaio de atividade pozolânica com a cal, as adições de cinzas volantes e de pó cerâmico, com valores aproximados da ordem de 4 MPa, mostram menores índices de atividade pozolânica com a cal, quando comparadas ao metacaulim e à sílica ativa. A variabilidade dos resultados é reduzida ($<4\%$), sugerindo homogeneidade nas condições de execução, moldagem e cura dos corpos de prova.

Adicionalmente, os resultados de ensaio de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias indicam a não conformidade das adições de pó cerâmico e cinzas volantes. Para adições de metacaulim e sílica ativa, esse parâmetro não é requisito para classificação como material pozolânico. No entanto, os resultados obtidos mostram

que estas adições proporcionam às argamassas resistências superiores ao estipulado para as outras adições.

Os resultados de Índice de atividade pozolânica, por meio do método de Chapelle, mostram que o valor obtido para sílica ativa em estudo, próximo de 1000 mg de CaOH_2/g de material, é bastante superior aos das demais adições. Isto mostra que esta adição poderá favorecer a obtenção de elevados resultados de resistência mecânica das argamassas. Valores intermediários de índice de atividade de Chapelle foram obtidos para as argamassas com adição de metacaulim e de cinzas volantes. Os valores da ordem de 230 mg de CaOH_2/g de material, obtidos para o pó cerâmico, traduzem baixa reatividade com a cal em relação às demais adições estudadas, que poderão explicar resistências reduzidas, inicialmente, para as argamassas confeccionadas com esta adição.

A análise comparativa do resultado de 677 mg de CaOH_2/g de metacaulim com o requisito mínimo estabelecido pela *NBR 15894-1* (ABNT, 2010) sugere não conformidade, uma vez que esse dado deve ser igual ou superior a 750mg de CaOH_2/g de material. No entanto, dados do fabricante desse material indicam valor obtido de 880 mg de CaOH_2/g de material, por meio do método de Chapelle. Os valores obtidos para as adições de pó cerâmico e cinzas volantes foram inferiores ao valor mínimo de 6 MPa, da norma *NBR 12653* (ABNT, 2014). O valor obtido para a sílica ativa 998 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de material foi bastante superior ao preconizado pela *NBR 13956-1* (ABNT, 2012), o que demonstra a alta reatividade da sílica ativa utilizada.

5.3.9 Considerações gerais sobre as adições utilizadas

De modo geral, os dados obtidos nos ensaios realizados, além de permitirem caracterizar as adições sob os aspectos físicos, químicos, mineralógicos e microestruturais, possibilitaram apreciação quanto à conformidade com as exigências específicas de classificação como material pozolânico. Esta avaliação é de fundamental importância para identificar se a adição irá desempenhar função como material pozolânico ou inerte.

Os resultados de caracterização obtidos para cada adição e a apreciação quanto à sua conformidade com as normativas nacionais encontram-se sintetizados nas Fichas C.1 a C.4, do Apêndice C. No Quadro 22, apresenta-se uma síntese da

avaliação das adições quanto à conformidade com os principais requisitos normativos relacionados a materiais pozolânicos.

Quadro 22 – Avaliação geral das características pozolânicas das adições

Característica avaliada	Metacaulim	Pó cerâmico	Cinzas volantes	Sílica ativa
Área superficial específica (BET)	Atende	Atende ⁽²⁾	Atende ⁽²⁾	Atende
SiO ₂	Atende ⁽¹⁾	Atende	Atende	Atende
Al ₂ O ₃				n.d.
SO ₃				n.d.
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +FeO ₂				n.d.
Perda ao fogo	Valor próximo do limite	Valor superior ao limite	Atende	Atende
Teor de umidade	Atende	Atende	Atende	Atende
Material retido na peneira 45µm	Atende	Atende	Atende	Valor superior ao limite
Índice de desempenho com cimento Portland	Valor inferior ao limite	Atende	Valor próximo do limite	Valor próximo do limite
Atividade pozolânica com a cal	Atende ⁽³⁾	Valor inferior ao limite	Valor inferior ao limite	Atende ⁽³⁾
Consumo de miligrama de Ca (OH) ₂ /g de material	Valor próximo do limite	Valor inferior ao limite	Valor próximo do limite	Atende
Fonte: Elaboração própria (2018).				
n.d. – não determinado, pois não é exigido pela normativa específica deste material.				
(1) – Atende à norma específica para materiais pozolânicos (NBR12653).				
(2) – Atende às normas específicas para metacaulim (NBR15894-1) e sílica ativa (NBR13956-1).				
(3) – Parâmetro não exigido pela norma de metacaulim ou de sílica ativa, mas valor encontrado atende à norma específica para materiais pozolânicos (NBR 12653).				

Da análise das informações obtidas, é possível extrair as seguintes considerações:

Todas as adições atenderam aos requisitos de área superficial específica, por BET. Destaca-se que, no caso do pó cerâmico e das cinzas volantes, esse parâmetro não é especificado pela respectiva *NBR 12653* (ABNT, 2014), mas como os valores encontrados atenderam às exigências das normativas de metacaulim e de sílica ativa, considerou-se, neste trabalho, que ambos os materiais atendem a esta exigência.

O metacaulim, o pó cerâmico e as cinzas volantes são constituídos, essencialmente, de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), além de possuírem teores mínimos de minerais inertes (quartzo, carbonato de cálcio, óxidos de ferro, entre outros), que podem influenciar a redução da reatividade pozolânica. A predominância de sílica e de alumina como principais constituintes desses materiais reflete o potencial pozolânico, sendo o metacaulim mais rico nesses compostos. Os valores encontrados para esse material, assim como para o pó cerâmico e as cinzas volantes, atendem as exigências mínimas para uso como material pozolânico.

No requisito de perda ao fogo, o metacaulim mostra valor muito próximo do limite aceitável da normativa. O pó cerâmico apresenta valor elevado de perda ao fogo e superior ao limite estabelecido. As demais adições de cinzas volantes e sílica ativa estão em conformidade com a norma.

Todas as adições atenderam aos requisitos de teor de umidade. Quanto ao material retido na peneira $45\mu\text{m}$, somente a sílica ativa não atendeu as exigências, mas mostrou valores muito próximos do limite máximo.

As adições de metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa apresentam valores próximos das exigências da norma quanto o requisito de desempenho mecânico com o cimento. O pó cerâmico atende esta exigência.

No quesito atividade pozolânica com a cal, as adições de pó cerâmico e cinzas mostram valores inferiores aos requisitados pela normativa. Destaca-se que, no caso do metacaulim e da sílica ativa, esse parâmetro não é especificado pelas respectivas normativas *NBR 15895-1* (ABNT, 2010) e *NBR 13956-1* (ABNT, 2012), no entanto, como os valores encontrados atenderam às exigências da *NBR12653* (ABNT, 2014), considerou-se, neste trabalho, que ambos os materiais atendem a esta exigência.

Quanto ao consumo de hidróxido de cálcio, por grama de adição pozolânica, parâmetro determinado pelo método de Chapelle, os resultados obtidos com o metacaulim e as cinzas volantes estão muito próximos dos limites aceitáveis. Considera-se nesta pesquisa, que da mesma forma que adição de sílica ativa, estas adições atendem às exigências de classificação como material pozolânico. Somente o pó cerâmico não está em conformidade com as exigências.

Em suma, a avaliação dos resultados permitiu concluir que as adições de metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa atendem parcialmente os requisitos para

serem classificados como material pozolânico. Alguns resultados ficaram muito próximos do limite aceitável das características satisfatórias.

No que diz respeito ao pó cerâmico, material produzido a partir da calcinação de argilas e passado por processo de moagem, a característica de finura desse material não é suficiente para desenvolver, de forma satisfatória, a atividade pozolânica. Adicionalmente, o teor elevado de CaO na composição sugere inferior qualidade do material e pode prejudicar a sua atividade pozolânica. Conclui-se que esse material, antes de ser usado, necessita de etapa prévia de beneficiamento para remoção de impurezas para alcançar os parâmetros de qualidade necessários para uso como adição pozolânica, procedimento que não foi realizado nesta pesquisa.

As seções subsequentes abordam aspectos relativos às argamassas de cal, com e sem adição, elaboradas no âmbito desta pesquisa: definição das proporções entre os constituintes, produção, ensaios no estado fresco, moldagem, aplicação e, por fim, caracterização no estado endurecido.

5.4 PROPORÇÕES ENTRE OS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Após revisão da literatura e realização dos ensaios de caracterização dos materiais, foram definidas as proporções que iriam compor as misturas. A seguir, descrevem-se as formulações de estudo, com os devidos embasamentos de cada escolha.

Estabeleceram-se, como parâmetros de referência, composições de cal e areia, com traços volumétricos 1:2 e 1:3. Vários autores consideram estas proporções como as mais adequadas para argamassas de cal aérea e componentes pozolânicos. A proporção 1:3 (cal: areia) era adotada por antigos tratadistas, como Vitrúvio, Plínio, Alberti, entre outros, que fizeram descrições sobre as características das argamassas antigas, e foi utilizada, também, nas pesquisas desenvolvidas até então no NTPR. A adoção do traço 1:2 levou em conta, também, a recomendação de Vitrúvio no que se refere à opção pela utilização de areia de rio, conforme abordagem feita no item 3.1 desta tese. A elaboração dessas argamassas, designadas neste trabalho por CA-1/2 e CA-1/3, tem como objetivo avaliar a influência das adições em relação a elas.

Na presente pesquisa, o metacaulim, o pó cerâmico, as cinzas e a sílica ativa foram utilizados como material para desempenhar função de ligante junto à cal

(componente que com ela reage diretamente), e não como material de substituição do ligante. As formulações com adições foram embasadas nas argamassas somente de cal aérea e areia de rio, no traço volumétrico padrão 1:3 (cal: areia) e nelas utilizaram-se as relações (ligante + adição): agregado 0,5 e 0,6, conforme estudos recentes sobre argamassas com materiais com características pozolânicas, entre os quais se destacam (FARIA, 2004; VELOSA, 2006; VEIGA, 2013).

A notação utilizada para identificar as composições consistiu no uso de letras maiúsculas para designar as iniciais do material utilizado: CA – cal aérea; M – metacaulim; PC – pó cerâmico; SA – sílica ativa; CV – cinzas volantes. Ao lado das letras maiúsculas, os números indicam o percentual de adição usado em relação à cal. Separado por hífen, indica-se a relação cal: areia, em volume. No Quadro 23, estão identificadas as argamassas estudadas, com as designações correspondentes, além dos traços volumétricos e ponderais; esse último parâmetro, determinado em função dos valores de massa unitária dos materiais.

Quadro 23 – Identificação e traços das argamassas estudadas

ARGAMASSA		Traço cal: adição: areia	
		Em volume	Em massa
1	CA-1/3	1:3	1:8,75
2	CA-1/2	1:2	1:5,71
3	50M-1/2,5	1:0,5:2,5	1:0,58:7,29
4	50M-1/3	1:0,5:3	1:0,56:8,75
5	100PC-1/2	1:1:2	1:1,31:5,83
6	50PC-1/3	1:0,5:3	1:0,64:8,75
7	100PC-1/4	1:1:4	1:1,43:11,67
8	50SA-1/3	1:0,5:3	1:0,94:8,75
9	50CV-1/3	1:0,5:3	1:0,51:8,75
10	40M10CV-1/3	1:0,4:0,1:3	1:0,46:0,19:8,75
11	25M25CV-1/3	1:0,25:0,25:3	1:0,28:0,47:8,75
12	25M25PC-1/3	1:0,25:0,25:3	1:0,29:0,33:8,75

Fonte: Elaboração própria (2016).

Para as argamassas com metacaulim, foram estabelecidas cinco formulações, utilizando:

- o metacaulim como única adição – foi incorporado 50% de metacaulim, em relação à cal, variando o traço ligante/agregado entre 1:2,5 e 1:3, ficando a relação (ligante + adição) /areia de 0,6 e 0,5, respectivamente. Estas composições são identificadas como 50M-1/2,5 e 50M-1/3. A proporção 1:0,5:2,5 foi definida com base nos estudos de Velosa (2006) e Veiga (2013), uma vez que as autoras encontraram

esse traço como sendo o mais favorável, em termos de resistência mecânica, quando comparados a outros estudados;

- o metacaulim e as cinzas volantes como adições – em uma composição, foram incorporados 40% de metacaulim e 10% de cinzas volantes, em relação à cal, e na outra, 25% de metacaulim e 25% de cinzas volantes, em relação à cal, foram adicionados, mantendo o traço ligante/agregado 1:3 e a relação (ligante+adição) /areia 0,5. Estas composições são identificadas como 40M10CV-1/3 e 25M25CV-1/3, respectivamente. A utilização desses percentuais prende-se ao fato de buscar compensação entre as duas adições, uma vez que, como referido no capítulo 3, a adição de metacaulim tem probabilidade de aumentar resistência e as cinzas de requisitar menor quantidade de água e melhorar a trabalhabilidade das misturas;

- o metacaulim e o pó cerâmico como adições – foram incorporados 25% de metacaulim e 25% de pó cerâmico, em relação à quantidade de cal, mantendo o traço ligante/agregado 1:3 e a relação (ligante+adição) /areia 0,5. Tal composição foi designada de 25M25PC-1/3. A elaboração de mistura com adição de metacaulim e pó cerâmico justifica-se, em âmbito experimental, para avaliar o efeito conjunto dessas duas adições no desempenho, principalmente, no que diz respeito à resistência à ação da água.

Ressalta-se que, nesta pesquisa, por dois motivos, foi seguida recomendação distinta daquela que o fabricante do metacaulim determina: dosagem entre 5% a 15% em relação à massa de cimento na mistura. O primeiro motivo refere-se ao ligante utilizado ser a cal e não o cimento. O segundo relaciona-se com o fato de ser pretensão, no presente trabalho, adotar proporções de adições similares às usadas, anteriormente, nas experiências com argamassas de cal destinadas à conservação e restauro. Adicionam-se a esses motivos, as constatações dos estudos de Velosa (2006) sobre a pouca contribuição que oferecem as proporções entre 10% e 20% de metacaulim às argamassas de cal.

Por razões análogas às citadas para o metacaulim, foi adotada, neste estudo, proporção distinta da recomendação do fabricante, entre 5 e 8% de sílica ativa em relação ao peso do ligante, para elaboração de concretos, argamassas e pastas de cimento. Para as argamassas com pó cerâmico foram estipuladas três composições: a) uma no traço 1:0,5:3, analogamente à mistura de metacaulim, designadas por 50PC-1/3; b) outras duas nos traços, 1:1:2 e 1:1:4, com quantidades iguais de pó

cerâmico e cal, variando o traço ligante/agregado entre 1:2 e 1:4. A relação (ligante + adição) /areia foi de 1,0 e 0,5, respectivamente. Os traços foram estabelecidos a partir de resultados de estudos anteriormente efetuados com materiais pozolânicos em argamassas de cal aérea. Em particular, o traço 1:1:4 (cal:pozolana:areia) foi utilizado nos estudos preliminares da tese de Velosa (2006) e também nas análises efetuadas por Veiga (2013), para misturas de cal com pozolanas naturais. A composição 1:1:2 foi estipulada com base em uma adaptação da mistura definida pelo engenheiro francês Lorient, do século XVIII, que propôs a composição cal extinta: cal viva: pó cerâmico: areia (1:1:2:1), com traço em volume, para uso em locais onde se pretendia melhor comportamento à ação da água (MAGALHÃES et al, 2013).

Salienta-se que as quantidades de adições empregadas nas composições selecionadas para estudo não têm a intenção de elevar ao máximo a resistência mecânica, mas sim o emprego de quantidades criteriosas, que modifiquem propriedades das argamassas de cal, permitindo o seu ajuste aos padrões de formulações destinadas às intervenções de restauro de edificações antigas. No Quadro 24, estão dispostos, de forma detalhada, os traços utilizados nas formulações, com destaque para a (relação cal+adição) /agregado de cada mistura.

Quadro 24 – Traços utilizados nas composições de estudo

Argamassa	Cal	Metacaulim	Pó cerâmico	Cinzas volantes	Sílica ativa	Areia	Relação (cal+adição) /agregado
Referência	1	-	-	-	-	3	-
	1	-	-	-	-	2	-
Com uma única adição	1	0,5	-	-	-	3	0,5
	1	-	0,5	-	-	3	0,5
	1	-	-	0,5	-	3	0,5
	1	-	-	-	0,5	3	0,5
	1	0,5	-	-	-	2,5	0,6
	1	-	1	-	-	2	1,0
	1	-	1	-	-	4	0,5
Com duas adições	1	0,4	-	0,1	-	3	0,5
	1	0,25	-	0,25	-	3	0,5
	1	0,25	0,25	-	-	3	0,5

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.5 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A normativa brasileira relativa às argamassas, *NBR 13276 – Argamassa para*

assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo de mistura e determinação do índice de consistência (ABNT, 2016) prevê a preparação de misturas de argamassas dosadas à base de cimento, cimento e adições ou argamassa mista (cimento e cal), mas não dispõe de metodologia de mistura específica para confecção de argamassas só de cal aérea. Nesse contexto, os procedimentos de execução das composições estudadas, no âmbito desta pesquisa, tiveram como fundamentação publicações recentes sobre experiências com argamassas de cal e adições (FARIA, 2004; VELOSA, 2006; JAPIASSÚ et al., 2013; SOUZA, 2013; BRANCO, 2013), que possibilitaram estabelecer o procedimento para confecção das misturas, apoiado nas orientações da *NBR 13276* (ABNT, 2005), mas, com algumas adaptações, no que diz respeito ao tempo de mistura mecânica e à ordem de introdução dos materiais na cuba.

Para a produção das argamassas, procederam-se os seguintes passos: inicialmente, os materiais secos (cal, adição mineral, areia) foram pesados e homogeneizados por cerca de dois minutos dentro de saco plástico (Figura 28 a); em seguida, essa mistura foi despejada na cuba (Figura 28 b) do misturador mecânico (argamassadeira) e a água adicionada nos primeiros segundos, sendo a massa misturada mecanicamente, por dois minutos, em velocidade baixa (Figura 28 c). Imediatamente após os dois minutos de mistura, desligou-se a argamassadeira por um minuto e foi realizada a raspagem do material retido nas laterais e no fundo da cuba. Em seguida, voltou-se a ligar o misturador por mais 30 segundos em velocidade alta, de forma a concluir o processo de mistura.

Figura 28 (a, b, c) – Mistura dos materiais para produção das argamassas estudadas
a) Homogeneização no saco plástico b) Manual na cuba c) Mistura mecânica



Fonte: Fotos da Autora (2016).

No que se refere à quantidade de água a usar nas argamassas, nenhum autor antigo consultado fazia menção, apenas referiam que a sua quantidade deveria ser suficiente para tornar a mistura trabalhável. Recentemente, entre os pesquisadores que se dedicam ao tema das argamassas de revestimentos à base de cal para a conservação (FARIA, 2004; VEIGA, 2013), é unânime a constatação que as formulações com cal devem ter trabalhabilidade aceitável, sem que para tal seja necessário adicionar água em excesso.

Nesse contexto, decidiu-se adotar, nesta pesquisa, a utilização da quantidade de água mínima, indispensável para a boa trabalhabilidade da mistura, permitindo a sua possível aplicação em alvenarias. Dessa forma, a quantidade de água usada na confecção de cada composição estudada foi previamente definida, a partir de experiências com diferentes teores, de forma a obter uma mistura trabalhável, cuja avaliação foi feita em função do Índice de Consistência (espalhamento) da argamassa, obtido por meio da mesa de consistência (*Flow Table*), segundo os procedimentos descritos na *NBR 13276* (ABNT, 2005). Descrevem-se, no item a seguir, os principais aspectos relacionados aos ensaios realizados para avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco.

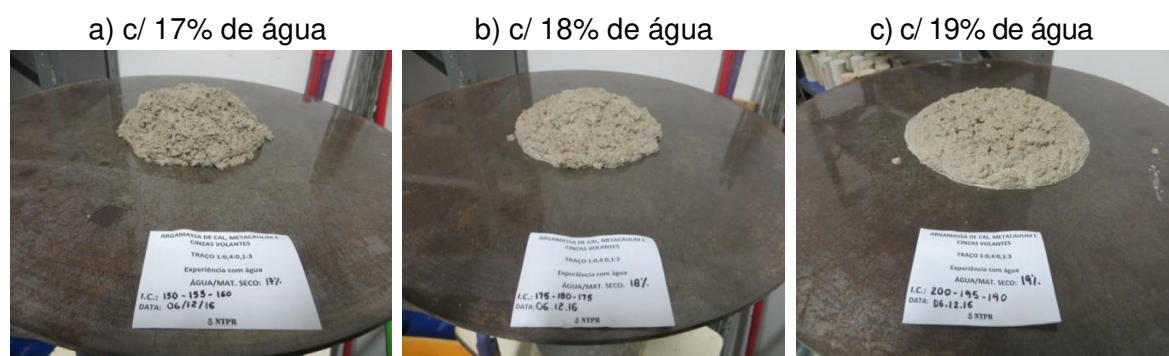
5.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A mais atual normativa brasileira, que prescreve o método de determinação do índice de consistência da argamassa a ser usada na realização de ensaios necessários à caracterização do material, *NBR 13276* (ABNT, 2016), não menciona valores de referência para esse parâmetro. Em contrapartida, a versão de 2005 dessa mesma norma recomendava, no caso de falta de informação, a adoção, na mistura de argamassa, de quantidade de água necessária para o índice de consistência normal, na faixa de 260 ± 5 mm. No entanto, observou-se nos ensaios preliminares com as argamassas de referência (cal hidratada em pó e areia) da presente pesquisa, que as misturas efetuadas com base na referida faixa de valores evidenciavam consistência bastante fluida.

Com o objetivo de ajustar a consistência, novos ensaios no estado fresco foram realizados, para cada composição, com diferentes teores de água (Figura 29), de forma a obter uma mistura trabalhável, em conformidade com as constatações da literatura. Assim, com base nestas experiências prévias, tomaram-se como

aceitáveis, para aplicabilidade em obra, índices de consistência por espalhamento situados dentro do intervalo 205 ± 10 mm, valores que variam em função do tipo e do percentual de adição empregados nas composições estudadas. No caso das argamassas que apresentaram valores de espalhamento fora do intervalo estabelecido, novas misturas foram efetuadas e o teor de água ajustado.

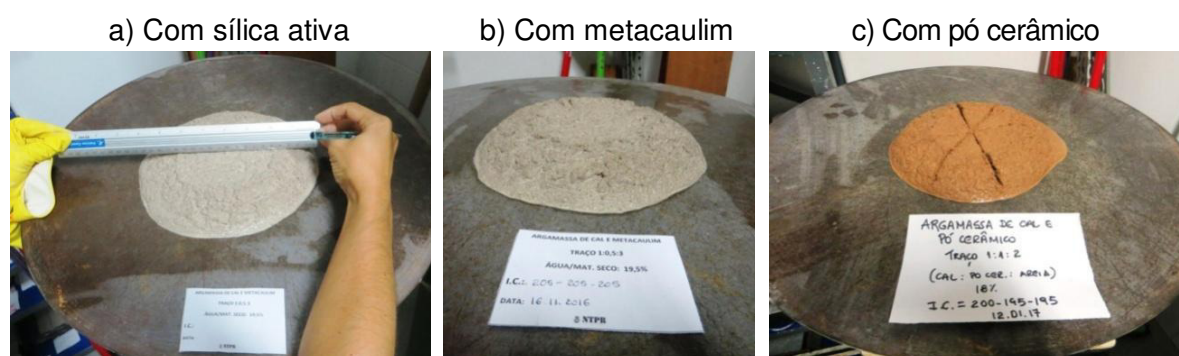
Figura 29 (a, b, c) – Ensaio de consistência da argamassa de cal e cinzas volantes, experiências com diferentes teores de água



Fonte: Fotos da Autora (2016)

A partir das experiências de determinação do espalhamento, foram registrados os percentuais de água usados e fixada a relação água/ligante para cada composição produzida (Figura 30), com e sem adição. Com esses dados, foi possível calcular o consumo dos materiais para a produção das argamassas.

Figura 30 (a, b, c) – Ensaio de consistência para diferentes formulações de argamassas



Fonte: Fotos da Autora (2017).

A densidade de massa no estado fresco foi determinada por meio dos procedimentos estabelecidos na *NBR 13278* (ABNT, 2005). Os valores de índice de consistência por espalhamento, as relações água/ligante e água/material, além

da densidade de massa, dados obtidos para cada composição, são apresentados no Quadro 25.

Quadro 25 – Dados das argamassas obtidos no estado fresco

Argamassa		Traço em volume (cal: adição: areia)	Índice de Consistência (mm)	Relação		Densidade de massa (g/cm ³)
				Água/cal	Água/material seco	
1	CA-1/3	1:3	207	1,9	0,18	1937
2	CA-1/2	1:2	215	1,4	0,19	1969
3	50M-1/2,5	1:0,5:2,5	210	1,7	0,20	1991
4	50M-1/3	1:0,5:3	215	2,0	0,18	1971
5	100PC-1/2	1:1:2	210	2,6	0,18	1986
6	50PC-1/3	1:0,5:3	205	1,9	0,17	1973
7	100PC-1/4	1:1:4	210	2,5	0,18	1982
8	50SA-1/3	1:0,5:3	195	2,0	0,19	1962
9	50CV-1/3	1:0,5:3	200	1,8	0,16	1996
10	40M10CV-1/3	1:0,4:0,1:3	195	1,9	0,18	1987
11	25M25CV-1/3	1:0,25:0,25:3	210	1,8	0,16	1978
12	25M25PC-1/3	1:0,25:0,25:3	200	2,0	0,18	1986

Fonte: Elaboração própria (2017).

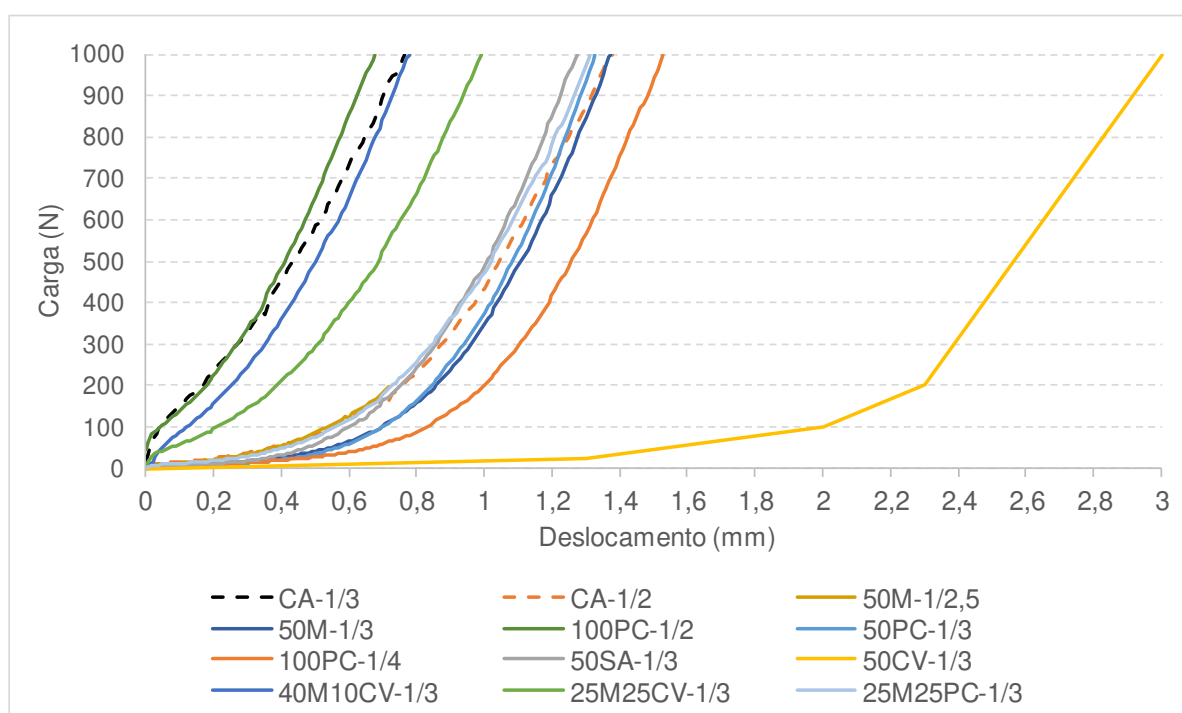
Embora o parâmetro adotado para a fixação do teor de água tenha sido a trabalhabilidade, determinada por índice de consistência por espalhamento, esta característica também foi analisada por meio do ensaio de *Squeeze Flow*, que permite a avaliação do comportamento reológico das argamassas. Os procedimentos para realização do referido ensaio seguiram as determinações da *NBR 15839* (ABNT, 2010).

O método consiste em conhecer a capacidade da mistura fresca de fluir e de se deformar quando submetida a uma determinada tensão de cisalhamento. As tensões de cisalhamento ou solicitações externas são impostas tanto na mistura como na aplicação da argamassa (SILVA et al., 2005). É em função das características reológicas que a argamassa poderá apresentar maior contato com o substrato, potencializando o mecanismo de aderência. O ensaio consiste, essencialmente, na avaliação da deformação da argamassa decorrente da compressão imposta pelo equipamento, sendo possível comparar, entre as várias composições estudadas, qual apresenta maior dificuldade de deformação.

Em sua pesquisa, Metz (2011) avalia o comportamento reológico de

argamassas com cimento, cal e diversos tipos de areia, e estabelece quatro faixas de possibilidades de aplicação, em termos de resultados de deslocamento da curva tensão x deslocamento. Segundo a autora, a aplicação é possível quando a curva está compreendida entre 2,5 e 4,0 mm. Para valores entre 1,8 e 2,5 mm, as argamassas são de difícil aplicação; e de impossível aplicação abaixo de 1,8 mm e acima de 4,0 mm. Os perfis reológicos para argamassas de referência (CA-1/3) e com adições estudadas na presente pesquisa são mostrados na Figura 31.

Figura 31– Perfil reológico das argamassas de estudo ($v=0,1\text{mm/s}$)



Fonte: Elaboração própria (2017),

A Figura 31 mostra que a argamassa identificada como 50CV-1/3 com adição de cinzas volantes, em termos de trabalhabilidade, apresenta melhor resultado do que as de referência e as demais composições com adições. É a única composição com característica reológica mais próxima da possibilidade de aplicação, segundo a classificação estabelecida por Metz (2011). Esta adição conferiu maior trabalhabilidade, muito provavelmente, devido ao formato esférico das partículas como mostrado na Figura 22, do item 5.3.6.3 desta tese.

No que tange à densidade no estado fresco, notam-se ligeiras diferenças nos valores obtidos para as diversas composições analisadas. Esta característica tem influência direta no comportamento no estado endurecido, principalmente pela

trabalhabilidade da argamassa no estado fresco ao se espalhar, o que irá determinar a extensão de aderência entre a argamassa aplicada e o substrato. Argamassas com densidades elevadas no estado fresco podem comprometer o desempenho.

Na prática de laboratório, as argamassas confeccionadas visando a moldagem de corpos de prova revelaram composições com trabalhabilidade aceitável, sem que para tal fosse necessária a adição de água em excesso e, sim, em quantidade suficiente para o bom manuseio da mistura e posterior preenchimento dos moldes. Nesse caso, está em análise, sobretudo, a influência das características intrínsecas da mistura.

As experiências de aplicação de composições selecionadas (CA-1/2; 50M-1/3; 50PC-1/3 e 50CV-1/3) em painéis de parede antiga mostraram-se, também, muito úteis para melhor avaliação da trabalhabilidade das composições. Diante disso, estão em análise, não somente as características intrínsecas da mistura, mas também as características do substrato, a habilidade do pedreiro que está executando o serviço, além da técnica de aplicação. A experiência mostrou que a única composição considerada com alguma dificuldade de aplicação foi a de cal e areia (argamassa de referência). A mistura, de consistência relativamente seca e áspera, considerada “de pouca liga” pelo profissional que realizou as aplicações, não favoreceu muito, segundo ele, a sua fácil aplicação; sendo necessário ajuste na água para obtenção de uma consistência adequada à “chapada” na parede, o que foi feito.

A propósito, é certo afirmar que dificilmente um profissional, sem habilidade com a cal aérea, conseguirá aplicar argamassas com consistência seca, característica das composições elaboradas com ligante dessa natureza, em que trabalhabilidade depende, em grande parte, de uma mistura enérgica, vigorosa e prolongada. Tradicionalmente, as argamassas com base em cal aérea são aplicadas com consistência relativamente seca, se comparadas às argamassas de ligante hidráulico, devendo ser apertadas contra o suporte à força, condição que nem sempre é cumprida em obra.

As demais formulações, com adição de pó cerâmico (50PC-1/3), de metacaulim (50M-1/3) e, sobretudo, de cinzas volantes (50CV-1/3), mostraram-se mais aplicáveis do que a argamassa de cal aérea sem adição. Particularmente, a composição com cinzas volantes foi expressa, nas palavras do profissional, como “a mais macia de todas”. De forma geral, do ponto de vista reológico, os resultados

práticos mostram alguma coerência com a classificação estabelecida por Metz, no que se refere ao grau de aplicabilidade das formulações estudadas: de menor (argamassa de cal e areia), mediana (argamassa de metacaulim e de pó cerâmico) e melhor aplicabilidade (argamassa de cinzas volantes).

Em síntese, esta análise das argamassas estudadas, em obra, é particularmente importante, uma vez que o comportamento mecânico, com destaque para a aderência é influenciado diretamente pelas características reológicas e de composição da formulação.

5.7 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram confeccionadas argamassas para moldagem de corpos de prova prismáticos e cilíndricos, com base nos requisitos da *NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão* (ABNT, 2005), a fim de avaliar as características das argamassas no estado endurecido, com tempos de cura distintos, 28, 90, 180 e 360 dias, contados a partir da data da sua preparação. A relação água/ligante das argamassas foi determinada como aquela necessária para permitir as reações de hidratação da cal e das adições e obter pastas minimamente trabalháveis, como referido no item 5.5.

No que se refere às condições de cura, para argamassa de cal aérea não existe normalização brasileira específica aplicável. A normativa nacional *NBR 13279* (ABNT, 2005), referente aos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, prevê as seguintes condições de cura para argamassas à base de cimento (com adições ou aditivos) e de cimento e cal (hidratada ou virgem): permanência no molde por 48 ± 24 h e, em seguida, até a data de ensaio, continuação em condições ambientais de laboratório de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ de temperatura e (60 ± 5) % de umidade relativa.

Diante da inexistência, no NTPR e no CETA, de sala com as especificações exigidas pela normativa, após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nos moldes (Figura 32), em ambiente de laboratório, por 72 horas, no caso das argamassas com adição, e, por sete dias, para as argamassas de referência (sem

adição)¹⁷. Durante o período de permanência nos moldes, as medidas de temperatura e de umidade relativa do ar foram registradas, diariamente, por meio de termo-higrômetro e variaram de $26 \pm 1^\circ\text{C}$ e $70 \pm 6\%$, respectivamente. Em seguida, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em ambiente exterior até a data do ensaio, em condições atmosféricas normais da região de Salvador, com temperatura do ar $26 \pm 5^\circ\text{C}$ e $78 \pm 20\%$ de umidade relativa. A Figura 33 ilustra os corpos de prova, fora dos moldes, em período de cura, nos ambientes mencionados e a Figura 34 mostra o aspecto geral dos corpos de prova elaborados.

Figura 32 (a, b) – Corpos de prova em cura, ainda nos moldes



Fonte: Fotos da Autora (2016).

Figura 33 – Corpos de prova em cura, em ambientes de laboratório e exterior



Fonte: Fotos da Autora (2016).

¹⁷ O período de sete dias foi o mínimo necessário para a desmoldagem dos corpos de prova de cal aérea e areia.

Figura 34 – Aspecto geral dos corpos de prova



Fonte: Foto da Autora (2017).

Com os corpos de prova prismáticos realizaram-se ensaios de densidade, de comportamento mecânico (módulo de elasticidade, resistência à tração e à compressão), de comportamento à água (determinação da absorção de água por capilaridade), de massa específica, índice de vazios, de determinação da profundidade de carbonatação (nas seções de corte dos corpos de prova resultantes dos ensaios de resistência à tração), além de ensaios de resistência aos cloretos e à ação de sulfatos. Para análises específicas de FRX e DRX, utilizaram-se fragmentos dos corpos de prova, uma vez que pequenas quantidades de material são suficientes para identificar os compostos formados e as fases cristalinas presentes. Os corpos de prova cilíndricos, em formato de bolachas, foram utilizados para a determinação da permeabilidade ao vapor de água. A relação das quantidades de corpos de prova usadas, em cada ensaio, por composição estudada, é apresentada no Quadro 26. Nesta tabela indica-se, também, o total de corpos de prova preparados para ensaio no âmbito do presente trabalho, 588, sendo 444 do tipo prismático (4x4x16)cm e 144 de formato cilíndrico (Ø5x1cm).

Quadro 26 – Quantidade de corpos de prova preparados para ensaio

TIPO	Ensaio	Quantidade					Total
		Idade (dias)			Por ensaio	Por composição	
		28	90	180			
PRISMÁTICO (4x4x16)mm	Densidade, resistência à tração e à compressão	3	3	3	9	108	444
	Módulo de elasticidade	3			3	36	
	Absorção de água por capilaridade	3			3	36	
	Massa específica, índice de vazios, absorção por imersão	3			3	36	
	Carbonatação	4	-	-	4	48	
	Sulfatos	-	-	3	3	36	
	Cloretos	-	-	3	3	36	
	DRX, FRX	1	1	1	3	36	
	SUPLENTES	2	2	2	-	72	
CILÍNDRICO (Ø5x1)cm	Permeabilidade ao vapor	-	4	-	8	96	144
	SUPLENTES	-	4	-	-	48	

Fonte: Elaboração própria (2018).

Com fins de realizar avaliação complementar das formulações, em ambiente externo, foram confeccionadas paredes de tijolos maciços, com dimensões de 30 cm x 40 cm x 10 cm e sobre elas aplicadas argamassas, selecionadas dentre aquelas estudadas, com melhor resultado de desempenho.

Para a confecção das paredes, foi utilizada argamassa de assentamento composta por cal, cimento e areia, traço 0,9:0,1:3, em volume, resultando no traço, em massa, 0,9:0,25:8,75. A mistura dos materiais e o levantamento da alvenaria foram feitos, de forma manual, por profissional experiente em execução de paredes. A opção por incluir pequeno percentual de cimento na composição da argamassa de assentamento teve por finalidade incrementar, em curto período, a resistência dos protótipos de alvenaria, possibilitando alcançar os objetivos pretendidos nesta pesquisa de avaliar as características das argamassas de revestimento aplicadas. As Figuras 35 e 36 ilustram, respectivamente, a sequência de operações para confecção dos protótipos de alvenaria e o seu aspecto final.

Figura 35 (a até f) – Confeção dos protótipos de alvenaria



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 36 – Aspecto final dos protótipos de alvenaria de tijolo maciço



Fonte: Foto da Autora (2017).

5.8 APLICAÇÃO DE ARGAMASSAS EM PAINÉIS DE PAREDE

Com a finalidade de avaliar o desempenho das formulações estudadas, em condições reais de obra, com variações climáticas, degradação por presença de umidade de ascensão capilar, ocorrência de sais, entre outras, realizaram-se aplicações de algumas composições estudadas em parede de alvenaria de edificação antiga, localizada na região de Salvador.

Com os revestimentos aplicados nos painéis experimentais, foi possível realizar uma primeira avaliação da sua adequabilidade ao suporte e às condições climáticas existentes para seleção de composição, de forma fundamentada. As aplicações foram realizadas na Igreja de Nossa Senhora de Monserrate, monumento do século XVII, localizado na região conhecida como Ponta de Humaitá, na península de Itapagipe, em Salvador (Figura 37).

Figura 37 – Igreja de Nossa Senhora de Monserrate, em Salvador



Fonte: Foto da Autora (2017).

A seleção do local para realização dos painéis experimentais foi feita em visita prévia à Igreja. Optou-se por área de fácil acesso e com visíveis problemas de destacamento e/ou desagregação do revestimento devido à ação da água de ascensão capilar.

Entre as composições experimentais escolhidas, incluem-se as argamassas sem adição (cal: areia) e com as adições de metacaulim, pó cerâmico e cinzas volantes. Os materiais usados na preparação das argamassas dos painéis foram os

mesmos usados na confecção dos corpos de prova desta pesquisa: cal aérea da marca Trevo; metacaulim HP Ultra, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil; cinzas volantes Pozofly, cedidas pela empresa Concremassa; pó cerâmico e areia de rio da região de Rio do Peixe. No total, foram executados quatro painéis experimentais, de 60x80cm, definidos com características descritas no Quadro 27.

Quadro 27 – Representação esquemática dos painéis experimentais

PAINEL 1	PAINEL 2	PAINEL 3	PAINEL 4
CAL + METACAUULIM + AREIA	CAL + AREIA	CAL+ CINZAS VOLANTES + AREIA	CAL + PÓ CERÂMICO + AREIA
Traço 1:0,5:3	Traço 1:2	Traço 1:0,5:3	Traço 1:0,5:3
Chapisco seguido de reboco em uma camada (20 mm), com argamassa tipo 50M-1/3	Chapisco seguido de reboco em uma camada (20 mm), com argamassa tipo CA-1/2	Chapisco seguido de reboco em uma camada (20 mm), com argamassa tipo 50CV-1/3	Chapisco seguido de reboco em uma camada (20 mm), com argamassa tipo 50PC-1/3

Fonte: Elaboração própria (2018).

Os trabalhos de execução e aplicação das argamassas nos painéis foram realizados por profissional da área de construção, experiente na execução de argamassas de revestimentos de paredes e tetos, e incluíram a seguinte sequência de operações:

- ✓ Remoção da argamassa existente, seguida de limpeza da superfície para eliminação de todo o material pulverulento ou solto, que pudesse impedir o contato perfeito da argamassa com o substrato (alvenaria).
- ✓ Pré-umedecimento da superfície do substrato minutos antes da aplicação do chapisco, por meio de aspersão de água, com broxa, em abundância, porém evitando a molhagem exagerada, a fim de impedir a perda de água de amassamento da argamassa para o substrato.
- ✓ Execução de chapisco, constituído por argamassa de cal aérea e areia, no traço volumétrico 1:0,5, mais fluida do que o normal – com relação água/ligante 0,7 e relação água/materiais secos 0,27 – e lançada, vigorosamente, sobre o suporte, de forma a constituir uma camada rugosa e aplicada de forma descontínua, com espessura da ordem de

3 a 5 mm.

- ✓ Execução do revestimento, após intervalo de 4 dias, com argamassas de CA/1/2, 50M-1/3, 50CV-1/3 e 50PC1/3, aplicadas com espessura de 20 mm.
- ✓ Regularização do revestimento e acabamento final da superfície.

A Figura 38 mostra o aspecto da área selecionada para execução dos painéis experimentais sobre alvenaria antiga, no interior da Igreja de Monserrate, após remoção do revestimento. Observa-se, na imagem, a existência de duas argamassas de assentamento distintas: uma mais clara (maior parte, à esquerda) e outra mais rosada (à direita). Nesse caso, a preparação do substrato, por meio da aplicação do chapisco, propiciou superfície rugosa adequada para a aplicação do revestimento, contribuindo para eliminar, em parte, a influência das diferentes argamassas de assentamento nos resultados de resistência de aderência.

Figura 38 – Alvenaria da Igreja de Monserrate após remoção do revestimento



Fonte: Foto da Autora (2017).

A Figura 39 ilustra a execução do chapisco e o aspecto final da alvenaria chapiscada com argamassa de cal aérea e areia.

Figura 39 (a, b) – Aspecto final da alvenaria depois da aplicação do chapisco

(a)

(b)



Fonte: Fotos da Autora (2017)

Para execução das argamassas a serem aplicadas na alvenaria, todos os componentes foram pesados em uma balança e, em seguida, misturados em um recipiente, manualmente, com colher de pedreiro. Após a homogeneização dos constituintes secos, adicionou-se a água, em etapas, visando o controle da consistência das argamassas. A quantidade total de água adicionada foi, proporcionalmente, similar à utilizada nas argamassas produzidas em laboratório para a confecção dos corpos de prova, de forma a obter a mesma relação água/ligante para cada composição.

A fim de evitar o excesso de água na mistura, que poderia ocasionar, posteriormente, a porosidade excessiva do revestimento, o acréscimo de água foi feito, eventualmente, quando solicitado pelo profissional, para obter pastas minimamente trabalháveis, sendo esse incremento realizado de forma controlada.

Durante as aplicações, teve-se o cuidado de evitar desempenos e regularizações demasiadas, acompanhando a forma irregular da alvenaria. Em determinadas áreas, foi necessário executar camadas com pouco mais de 20 mm. Sobre a parede, a argamassa foi lançada, vigorosamente, sendo exercida pressão (“aperto”), após o seu lançamento. Utilizaram-se, para o efeito, madeira, régua e colher de pedreiro. Cada painel, depois de revestido, foi nivelado com desempenadeira de madeira e, finalmente, acabado com a passagem de esponja úmida sobre a superfície. No decorrer dessas operações, evitaram-se desempenos

e regularizações excessivas, acompanhando as formas gerais das alvenarias. Finalizado cada painel, as suas dimensões totalizaram cerca de 60 cm x 80 cm.

A sequência de operações para execução e aplicação de argamassas de revestimento estudadas é mostrada nas imagens da Figura 40.

Figura 40 (a até l) – Sequência de operações para execução e aplicação de argamassas de revestimento estudadas, na Igreja de Monserrate



Fonte: Fotos da Autora (2018).

A Figura 41 ilustra o aspecto final das composições de metacaulim (50M-1/3), de cal e areia (CA-1/2), de cinzas volantes 50CV-1/3 e de pó cerâmico (50PC-1/3), respectivamente, aplicadas sobre alvenaria da igreja de Monserrate. Ressalta-se que as três primeiras composições foram aplicadas sobre a superfície da alvenaria com argamassa de assentamento de coloração mais clara e a argamassa com pó cerâmico, sobre a alvenaria de tonalidade mais rosada.

Figura 41 – Aspecto final dos revestimentos aplicados na Igreja de Monserrate. Da esquerda para a direita: 50M-1/3; CA-1/2; 50CV-1/3; 50PC-1/3



Fonte: Foto da Autora (2018).

Ressalta-se que as aplicações das argamassas nos painéis da igreja aconteceram no mês de junho, período em que se observaram boas condições atmosféricas, caracterizadas por tempo fresco e úmido, com temperaturas diurnas em torno de 25°C e umidade relativa próxima dos 70%. O monitoramento e registro da temperatura e da umidade relativa, no interior da igreja, foram realizados, durante o período de aplicação das argamassas nos painéis experimentais, com o auxílio de um termo-higrômetro portátil.

Sobre os revestimentos executados nos painéis, foram realizados ensaios de aderência à tração, dureza superficial (esclerômetro do pêndulo), permeabilidade à água à baixa pressão (método do cachimbo ou dos tubos de Karsten). Foi avaliado ainda o comportamento das composições em relação à ação dos agentes atmosféricos e à ação dos sais solúveis.

Depois de dois meses de execução dos protótipos de alvenarias, foi efetuada a aplicação das composições CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50CV-1/3 e 50SA-1/3 em uma das faces de cada um deles (Figuras 42 e 43), atentando-se para todos os cuidados recomendados em obra. Em seguida, estes protótipos foram armazenados, em ambiente externo, próximo da Igreja de Monserrate para avaliação das características físicas ao longo do tempo (polverulência, aparecimento de manchas, fissuras, esfoliação, fragmentação, entre outros aspectos), por meio do ensaio de exposição natural.

Figura 42 (a, b, c, d) – Sequência de operações para aplicação de argamassas de revestimento nas alvenarias, na Igreja de Monserrate



Fonte: Fotos da Autora (2018).

Figura 43 – Aspecto final das argamassas de revestimento nas alvenarias. Da esquerda para a direita: 50M-1/3; 50CV-1/3; 50PC-1/3; CA-1/2; 50SA-1/3



Fonte: Foto da Autora (2018).

Na seção a seguir, será descrita a campanha experimental realizada e apresentados os resultados obtidos no âmbito desta pesquisa, com a finalidade de caracterizar as argamassas estudadas, no estado endurecido, em diferentes idades de cura.

5.9 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Depois de elaboradas as argamassas, procedeu-se extensa campanha experimental, visando a sua caracterização no estado endurecido, em idades predefinidas de cura. Para isto, foi selecionado um conjunto de ensaios que se considerou representativo para a análise do comportamento do ponto de vista físico e mecânico.

Salienta-se que são poucas as referências normativas relativas às argamassas que se adequam à área da conservação do patrimônio, uma vez que as normas abrangem, em geral, composições com base em ligantes hidráulicos (cimento) e não aos aéreos (cal aérea). Tais normativas servem, no entanto, de suporte para a definição e/ou estabelecimento de métodos e procedimentos de ensaio, necessários à caracterização dos materiais componentes das argamassas de cal.

A determinação das características das argamassas endurecidas foi efetuada em duas fases distintas. A primeira fase incluiu a caracterização física e mecânica das composições elaboradas no presente estudo e teve como objetivo principal avaliar os parâmetros que devem atender aos requisitos estabelecidos na literatura para utilização em restauro. Para cumprir esse objetivo, foram realizados ensaios, em laboratório, de determinação de massa específica, porosidade, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e à compressão, e de absorção de água por capilaridade. Um conjunto de 12 formulações foi analisado, com diferentes idades de cura.

Em uma segunda etapa, considerando a análise detalhada dos resultados obtidos na primeira fase, procedeu-se à caracterização complementar de argamassas de cal selecionadas – uma sem adição (referência) e as demais, com adição –, com o objetivo de aprofundar outros aspectos de desempenho. O atendimento aos requisitos estabelecidos por Veiga (2004) constituiu uma das premissas para seleção de formulações elaboradas nesta pesquisa, para esta fase.

Os ensaios efetuados na segunda fase contemplaram análises laboratoriais e

em obra. Entre os ensaios de laboratório incluem-se as análises da composição química por Fluorescência de Raios X (FRX) e mineralógica por Difractometria de Raios X (DRX), o acompanhamento da evolução da carbonatação, a determinação da permeabilidade ao vapor d'água e da resistência aos sais solúveis (cloretos e sulfatos). Finalmente, no que concerne ao revestimento aplicado em obra, além da observação das características visuais ao longo do tempo, foi feita avaliação da resistência de aderência à tração e da resistência superficial, por meio de esclerômetro de pêndulo e a determinação da permeabilidade à água sob baixa pressão, por meio do método do cachimbo (tubos de Karsten).

No Quadro 28, relacionam-se os ensaios realizados nas duas fases mencionadas, com identificação dos objetivos, local de realização e indicação, quando houver, da norma técnica ou procedimentos de referência.

Quadro 28 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Fase	Ensaio	Objetivo	Local	Norma técnica	
1	Massa específica, índice de vazios (porosidade aberta), absorção por imersão	Determinar a razão entre a massa e o volume, a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total, e o aumento de massa devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água	NTPR	NBR 9778 (ABNT, 2009)	
	Módulo de Elasticidade	Avaliar a capacidade que a argamassa tem de se adaptar ao suporte sem fissurar		NBR 15630 (ABNT, 2009)	
	Resistência à tração na flexão e à compressão	Indicar a capacidade de resistência das argamassas a agentes que atuam externamente, como os choques ou as intempéries		NBR 13279 (ABNT, 2005)	
	Absorção de água por capilaridade	Avaliar a resistência das argamassas quanto à penetração da água		NBR 15259 (ABNT, 2005)	
	Carbonatação	Verificar a velocidade com que a carbonatação ocorre nos corpos de prova de argamassa de composições variadas		Não há norma específica	
	Composição química por FRX e análise mineralógica por DRX	Identificar compostos e fases cristalinas formadas, ao longo do tempo, avaliando a evolução das reações de hidratação; confirmar a presença de elementos identificados		Institutos: Química da UFBA; IFBA	Não há norma específica
	Permeabilidade ao vapor	Determinar a espessura da camada de ar de difusão, que traduz a permeabilidade ao vapor da argamassa		NTPR	BS EN 1015-19 (BSI, 1999)
2	Resistência aos cloretos e aos sulfatos	Quantificar e qualificar comparativamente o desempenho de resistência aos sais. Caracterizar o comportamento face à ação dos sais existentes no suporte	NTPR; Laboratório de Geotecnia - UFBA	NP EN 12370 (IPQ, 2001)	
	Resistência de aderência à tração	Determinar a resistência de aderência à tração do revestimento aplicado sobre alvenaria antiga	Igreja de Nossa Senhora de Monte Serrate	NBR 13528 (ABNT 2010)	
	Dureza superficial: esclerômetro de pêndulo	Determinar o índice de dureza superficial por meio do esclerômetro de pêndulo		TC 127- MS (RILEM, 1997)	
	Permeabilidade à água sob baixa pressão	Medir, por meio dos Tubos de Kasrten, a quantidade de água absorvida, pela superfície do revestimento aplicado		Metodologia da RILEM (1980)	
	Avaliação das características visuais	Verificar as argamassas aplicadas quanto ao aparecimento de manchas, fissuras, pulverulência, esfoliação, cristalização de sais etc		Não há norma específica	

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.9.1 Primeira fase de caracterização

Nesta seção, descrevem-se os procedimentos experimentais realizados para o desenvolvimento da primeira fase de caracterização, no estado endurecido, das argamassas formuladas nesta pesquisa, cujos resultados serão apresentados e analisados no Capítulo 6.

5.9.1.1 Massa específica

A determinação dessa característica, indicativa da compacidade da argamassa, é importante, uma vez que pode explicar o desempenho das argamassas quanto às propriedades mecânicas. A massa específica seca foi obtida por meio de dois métodos. O primeiro, método geométrico, pela relação direta simples entre a massa seca do corpo de prova e o volume que este ocupa, determinado geometricamente. Os corpos de prova, previamente à medição, foram secos em estufa até massa constante, a 105 °C. A medição do comprimento, da largura e da altura, foi realizada com o auxílio de paquímetro, e a determinação da massa, por meio de balança com resolução de 0,01 g. Com estes dados foi calculada a massa específica, em g/cm^3 .

O segundo método de determinação da massa específica seca, realizado conforme a *NBR 9778* (ABNT, 2005), baseia-se no princípio proposto por Arquimedes. Os corpos de prova, após imersão em água, são pesados por meio de pesagem hidrostática: as amostras são suspensas em suporte pendurado na parte inferior da balança e é realizada a sua pesagem em imersão (Figura 44). A massa específica corresponde ao quociente entre a massa seca do corpo de prova e o volume que este ocupa quando imerso em água, em estado de saturação.

Figura 44 (a, b) – Ensaio de determinação da massa específica, índice de vazios e absorção por imersão



Fonte: Fotos da Autora (2017).

5.9.1.2 Porosidade aberta

A porosidade aberta relaciona-se com a percentagem de volume de poros presentes no interior da argamassa, que têm ligação ao exterior e com outros poros. Esse parâmetro influencia as características de resistência mecânica, permeabilidade à água (sob a forma líquida e de vapor), absorção de água por capilaridade das argamassas, entre outras, além de induzir os principais mecanismos de degradação física. A porosidade influencia diretamente a durabilidade das argamassas de revestimento, por isto é importante o seu conhecimento.

Nas argamassas, a porosidade aberta (ou aparente) assume proporção majoritária na porosidade total e, por esse motivo, para efeitos de análise de resultados, despreza-se a porosidade fechada. A determinação da porosidade aparente, ou índice de vazios, foi feita pelo método de ensaio descrito na *NBR 9778* (ABNT, 2009), sendo o valor obtido pela relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

5.9.1.3 Módulo de Elasticidade

Para as argamassas, o módulo de deformação ou módulo de elasticidade é a propriedade que mede a capacidade de deformação de um material sob a ação de tensões relacionadas ao carregamento, às variações térmicas ou à retração. Em argamassas aplicadas, as tensões de tração podem surgir, desde as primeiras idades, quando há impedimento de deformação da argamassa aderida à base e, caso a sua capacidade de deformação não seja compatível com as tensões geradas, é possível a ocorrência de fissuração. Por esse fato, é fundamental a avaliação desse parâmetro que, diretamente relacionado ao comportamento elástico, fornece informações a respeito da deformabilidade e da rigidez da argamassa de revestimento.

Neste estudo, o módulo de elasticidade das argamassas foi determinado pelo método baseado na *NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica* (ABNT, 2009). Para o ensaio, utilizou-se o aparelho de ultrassom, da marca CONTROLS, modelo UPVE48, com transdutores

de 54 kHz. O equipamento emite pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, por meio dos transdutores, que são acoplados às extremidades dos corpos de prova prismáticos (Figura 45). A leitura do tempo de propagação das ondas que atravessam os corpos de prova foi efetuada, diretamente, no painel do aparelho.

Figura 45 – Ensaio de módulo de elasticidade por meio de ultrassom



Fonte: Foto da Autora (2017).

Para o ensaio, foram utilizados três corpos de prova, por composição. As determinações de módulo de elasticidade foram realizadas aos 28, 90, 180 e, para algumas formulações, 365 dias. A partir do registro de valores de tempo e comprimento do corpo de prova, calculou-se a velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos. O módulo de deformação está associado a esta velocidade segundo o princípio de propagação de ondas explícito na expressão [1]:

$$E_d = \rho V^2 (1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu) \quad [1]$$

Em que:

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

ρ = Densidade do corpo de prova (kg/m^3)

V = Velocidade de pulso (km/s)

ν = Coeficiente de Poisson (adotado 0,2, de acordo com a normativa brasileira)

5.9.1.4 Resistência à tração na flexão e à compressão

A avaliação das características mecânicas (de resistência à tração e à compressão), embora não seja suficiente para garantir boa qualidade e durabilidade das argamassas, pode constituir uma primeira abordagem para avaliar formulações com base em cal aérea. Os valores de resistência à tração por flexão e à

compressão foram obtidos conforme prescrito na *NBR 13279* (ABNT, 2005). O primeiro parâmetro representa a tensão máxima suportada por um corpo de prova prismático 4 x 4 x 16 (cm³) simplesmente apoiado, submetido à aplicação de uma carga vertical, centrada no sentido longitudinal; a resistência à compressão corresponde à tensão máxima a que o material resiste quando sobre ele é aplicada carga distribuída em seção conhecida.

Para o ensaio de tração, é aplicada carga concentrada, no meio do vão, de (50 ±10) N/s. A força de ruptura do corpo de prova, na flexão corresponde à máxima carga registrada pela máquina. A resistência à tração por flexão, de cada corpo de prova, é obtida pela expressão [2]:

$$R_T = 1,5 \times (F_T \times L) / 40^3 \quad [2]$$

Em que:

R_T = Resistência à tração na flexão (MPa)

F_T = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma (Newton)

L = Distância entre os suportes (mm)

No ensaio de resistência à compressão foram usadas as metades dos corpos de prova prismáticos, obtidas no ensaio de resistência à tração por flexão. Os meios prismas foram colocados em dispositivos de compressão que asseguram área de contato de 1600mm², de seção quadrada, e sobre eles aplicada, carga de (500±50) N/s. A carga de ruptura de compressão corresponde à máxima força registrada pela máquina. A resistência à compressão é calculada dividindo a carga máxima pela área da seção transversal do corpo de prova (considerada 1600 mm²). A resistência à compressão, de cada corpo de prova, é obtida pela expressão [3]:

$$R_C = F_C / A \quad [2]$$

Em que:

R_C = Resistência à compressão (MPa)

F_C = Carga máxima aplicada (Newton)

A = Área da seção quadrada do dispositivo, 40 mm x 40 mm (mm²)

Os ensaios realizados no âmbito desta pesquisa foram executados em prensa manual hidráulica, da marca PAVTEST, com leitura digital, com célula de carga com capacidade de 5 Toneladas (5000 kgf) e resolução de 1 kgf (Figura 46).

Figura 46 (a, b) – Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão



Fonte: Fotos da Autora (2017).

5.9.1.5 Absorção de água por capilaridade

A capacidade de absorção de água, bem como a velocidade com que ocorre esta absorção, constituem características relevantes para a análise da durabilidade das argamassas, uma vez que permite avaliar a maior ou menor dificuldade de penetração dos agentes agressivos. Quer a velocidade de absorção, quer a quantidade de água absorvida de uma argamassa são caracterizadas por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade.

No presente trabalho, o referido ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos definidos na *NBR 15259* (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, mas com adaptações para argamassas com base em cal, no que se refere ao intervalo de tempos para determinações das massas dos corpos de prova, efetuadas ao fim de 5, 10, 30, 60 e 90, 180, 300, 360 minutos e 24 horas (Figura 47). Essas pesagens frequentes permitem a obtenção de curva de absorção detalhada, especialmente, na região em que o ritmo (velocidade) de absorção se altera.

Em geral, a absorção de água e o coeficiente de capilaridade, parâmetro que traduz a velocidade de absorção, são calculados para os tempos de 10 e 90 min. No entanto, para as argamassas de cal, a avaliação da velocidade de absorção tem mais significado se determinada nos primeiros cinco minutos de ensaio, quando ocorre a rápida absorção de água. Nessas argamassas, predominam poros grandes, que são os maiores responsáveis pela rápida absorção. Para além da taxa de

absorção inicial (aos 5 minutos), determinada pelo coeficiente de capilaridade, importa analisar a quantidade total de água absorvida pela argamassa durante determinado período. Estudos anteriores com esse ensaio mostram que as argamassas de cal atingem massa constante ao fim de 24 horas.

Figura 47 (a, b) – Ensaio de absorção de água por capilaridade
(a) (b)



Fonte: Fotos da Autora (2017).

A quantidade de água absorvida por cada corpo de prova, por unidade de superfície é calculada por meio da expressão [4]:

$$C = (m_i - m_o) / S \quad [3]$$

Em que:

C = Quantidade absorvida de água (g/cm^2)

m_i = Massa do corpo de prova ao fim de um dado tempo (g)

m_o = Massa do corpo de prova seco, no início do ensaio (g)

S = Área da seção transversal em contato com a água (cm^2)

Com os valores obtidos, é possível traçar o gráfico representando a curva de absorção capilar, que exprime a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do corpo de prova, em função da raiz quadrada do tempo. O coeficiente angular da reta obtida na primeira parte do gráfico corresponde ao coeficiente de capilaridade (expresso em $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$), que traduz a velocidade com que a absorção ocorre nos instantes iniciais.

5.9.2 Segunda fase de caracterização

Nesta seção, são descritos os procedimentos de ensaios complementares para caracterização das argamassas selecionadas para aprofundar aspectos de desempenho. Os resultados obtidos nesta segunda fase serão apresentados e

analisados no Capítulo 6.

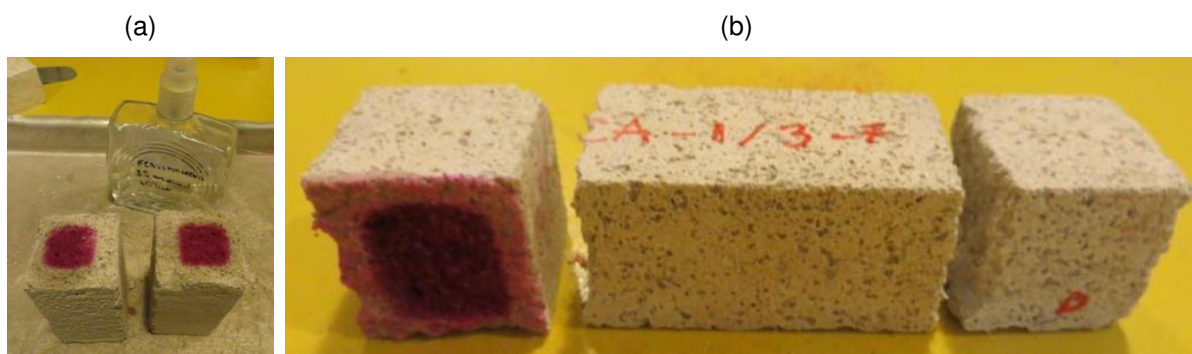
5.9.2.1 Evolução da carbonatação

A carbonatação em argamassas de cal é um processo moroso, que pode levar meses ou anos, no entanto, a determinação da evolução de carbonatação de argamassas dessa natureza é possível de ser avaliada ou estimada. Em geral, esta avaliação é feita por meio do uso da solução de fenolftaleína – indicador incolor em meio ácido e rosa em meio básico (alcalino) – que, quando em contato com a superfície alcalina, mostra a extensão de área com alteração de cor.

A variação de cor da fenolftaleína para coloração rosa ocorre na presença de carbonatos solúveis ou na existência de características alcalinas, com pH entre 8,3 e 10. Desse modo, em argamassas com base em cal aérea, a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3) origina reação neutra, por ser insolúvel, enquanto a presença de cal não carbonatada Ca(OH)_2 é identificada por alteração de cor (FARIA, 2004).

Diante desse contexto, a mudança de cor da solução de fenolftaleína, ao entrar em contato com argamassa, de incolor para rosa (Figura 48), que se faz notar em poucos segundos, indica variação de pH, permitindo identificar se a argamassa já está carbonatada. O ensaio permite avaliar se a argamassa possui pouca ou nenhuma extensão de carbonatação (TEUTONICO, 1988). A profundidade de carbonatação, em corpos de prova prismáticos, é medida com régua nas quatro bordas, determinando-se a percentagem de área carbonatada.

Figura 48 (a, b) – Ensaio de carbonatação com fenolftaleína



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Quando as argamassas são de cal aérea com adições com características pozolânicas, os componentes oriundos das reações podem, eventualmente,

introduzir alterações no pH, que mascaram os resultados do ensaio, devendo esta análise ser feita com cautela.

5.9.2.2 Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X

A técnica de Fluorescência de Raios X, como referido no Capítulo 4 (item 4.1.2), permite a detecção de elementos/compostos (sílica, alumina, óxidos de ferro, cálcio, magnésio, entre outros) presentes nas argamassas. A preparação das amostras das novas formulações seguiu procedimento análogo à das amostras antigas e à das adições; envolveu a moagem, peneiramento na peneira #200 e secagem das amostras. Para o ensaio, foi utilizado o Espectrômetro de Fluorescência Shimadzu – XFR – 1800, do laboratório do Instituto de Química da UFBA.

A determinação da composição mineralógica, ou seja, dos minerais que compõem as argamassas, foi efetuada por meio da técnica de Difractometria de Raios X (DRX), conforme descrito no Capítulo 4 (item 4.1.3). O procedimento de preparo das amostras seguiu o adotado para as amostras antigas analisadas neste trabalho. Dessa forma, uma pequena amostra do corpo de prova prismático foi triturada, moída em almofariz e, em seguida, peneirada na peneira #200 (0,075 mm). Para análise, foi recolhida a fração passante na referida peneira. Como resultados, foram obtidos difratogramas, com informações sobre os minerais que constituem o material analisado, cuja interpretação foi efetuada por meio de análise comparativa com os padrões de difratogramas de Raios X, do banco de dados do ICDD – *International Centre for Diffraction Data*.

A análise mineralógica das argamassas, objeto desta tese, por meio da Difractometria de Raios X (DRX), foi realizada no equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, do laboratório de Catálise e Meio Ambiente (CATAM), da Escola Politécnica da UFBA, sendo efetuado o tratamento dos dados obtidos com recurso ao software *X'Pert High Score Plus* (programa específico para Difração de Raios X). Na presente pesquisa, os experimentos de difração de raios-X sobre as novas composições foram executados utilizando-se radiação Cu-K α , com tensão de 30 kV e corrente de 30 mA, com varredura entre 10° e 80°, velocidade de rotação de 2°/min, etapa de 0,02 graus e rotação de 60 rpm.

No Quadro 29, estão dispostas, de forma sintetizada, as fases prováveis de

encontrar em argamassas de cal aérea com e sem adição (de metacaulim, de pó cerâmico, de sílica ativa e de cinzas volantes).

Quadro 29 – Fases prováveis de encontrar nas argamassas de cal, com e sem adições

Argamassas	Fases prováveis
Cal e areia	Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Carbonato de cálcio (CaCO_3) Quartzo (SiO_2)
Cal e metacaulim	Quartzo (SiO_2) Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] Carbonato de cálcio (CaCO_3)
Cal e pó cerâmico	Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
Cal e sílica ativa	Stratlingita ou Gehlenita (C_2ASH_8) Monocarboaluminato ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) ou ($\text{C}_4\text{A}\underline{\text{C}}\text{H}_{11}$)
Cal e cinzas volantes	Aluminato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_{7,6,5}\text{H}_2\text{O}$) ou ($\text{C}_2\text{AH}_{6,5}$) Aluminato de cálcio hidratado (C_4AH_{13}) Katoite (sílica hidrogarnet) [$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$] ou (C_3ASH_4) Hidrogranada (C_3AH_6)

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.9.2.3 Permeabilidade ao vapor

A permeabilidade ao vapor constitui, da mesma forma que a quantidade total de água absorvida por capilaridade, critério importante quanto a proteção à água das paredes de edifícios antigos. A reduzida permeabilidade ao vapor de água das argamassas, associada à baixa porosidade, dificulta a evaporação, contribuindo significativamente para o processo de degradação da alvenaria antiga. Nesse contexto, é fundamental que o revestimento seja mais permeável do que o próprio suporte sobre o qual esteja aplicado. A avaliação dessa característica fundamenta-se no princípio de transporte de vapor em materiais porosos, por meio da avaliação do fluxo de vapor de água, considerando as variações de umidade e pressão de vapor (PÁSCOA, 2012).

A determinação da permeabilidade ao vapor consiste em submeter o corpo de prova a dois ambientes à mesma temperatura, mas com pressões parciais de vapor diferentes, criando assim gradiente de pressões entre as faces do corpo de prova e

provocando, através deste, uma corrente de fluxo de vapor. Dessa forma, criam-se as condições ambientais necessárias para a determinação da quantidade de vapor que passa pelo elemento construtivo. O ensaio é realizado por meio do método do recipiente seco (*dry-cup method*) ou úmido (*wet-cup method*). No primeiro método, a umidade interior do recipiente é 0%(±2%) enquanto no outro lado do corpo de prova, de 50%(±2%). O método de recipiente úmido, com umidade relativa, em um dos lados do corpo de prova de 100%(±2%), e de 50%(±2%) no outro lado do corpo de prova.

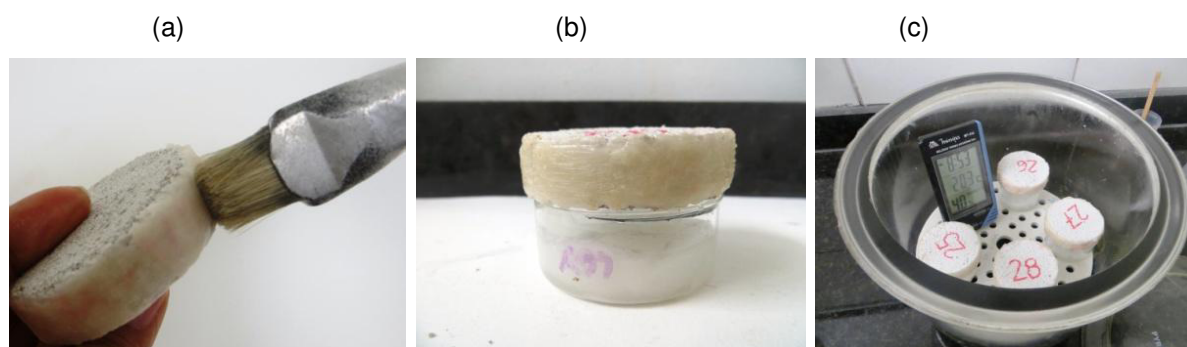
Com a finalidade de determinar a permeabilidade ao vapor de água, foram utilizados corpos de prova, com o formato cilíndrico, com cerca de 50 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. As argamassas foram moldadas em duas camadas e sobre cada uma delas aplicados cerca de 10 golpes com o soquete. Em seguida, a superfície foi nivelada com uma régua e os corpos de prova foram, então, armazenados nas mesmas condições que os prismáticos, em temperatura e umidade ambiente.

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor foram utilizados quatro corpos de prova por composição (máximo que cabia no interior do dessecador). Uma vez que nem todos os corpos de prova podiam ser ensaiados à mesma idade, estipulou-se, por questões de logística, a idade mínima de 90 dias para a realização do ensaio, de modo que, em todos eles, já tivesse ocorrido parte significativa da carbonatação.

Neste trabalho, para a execução do ensaio, optou-se pelo método da cápsula úmida, no entanto, por limitações laboratoriais, fizeram-se algumas adaptações. Na ausência de cápsulas de medição preconizadas pela normativa *BS EN 1015-19* (1999), recorreu-se ao uso de cápsulas de vidro disponíveis no laboratório, com diâmetro externo igual ao do corpo de prova, de cerca de 50 mm. Além disso, na indisponibilidade de câmara climática com ambiente controlado, realizou-se o ensaio em sala condicionada, com temperatura de $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$ de umidade relativa, e com recurso a um dessecador (com sílica gel no interior para garantir ambiente seco), onde foram armazenados os corpos de prova para ensaio.

Próximo da data do ensaio, os corpos de prova foram colocados em estufa, com temperatura de 75°C , por 24 horas. Após esse período, toda a envolvente lateral dos corpos de prova foi selada com parafina, de forma a tornar esse perímetro impermeável ao vapor, conforme ilustra a Figura 49.

Figura 49 (a, b, c) – Selagem das cápsulas com parafina e introdução no dessecador



Fonte: Fotos da Autora (2017).

No interior das cápsulas de vidro foi colocado algodão¹⁸ embebido em água até uma altura de 10 mm abaixo da base do cilindro, de modo a garantir uma umidade relativa de 100% no interior. Em seguida, acoplou-se o corpo de prova sobre a borda da cápsula e vedou-se, lateralmente, com fita adesiva o conjunto cápsula+corpo de prova. Foram, assim, criadas as condições de umidade relativa no interior da cápsula, admitindo ser de 100%.

Imediatamente após ter sido vedado o sistema de ensaio (cápsula + corpo de prova), foi realizada a pesagem em balança, com precisão de 0,01g, e após o registro da massa, o conjunto foi colocado no interior de um dessecador, com sílica gel e registrados os valores de temperatura e umidade iniciais, cuidando para que fossem da ordem de 23°C e 50%, respectivamente. Diariamente, a massa do sistema de ensaio foi anotada, a fim de se determinar a quantidade de vapor de água que se difundia através da argamassa e, em simultâneo, foi aferida a temperatura e umidade do interior do dessecador.

Os registros diários de massa prosseguiram até se atingir regime estacionário, ou seja, quando a quantidade de vapor de água que atravessa o corpo de prova na unidade de tempo for constante, conforme prescrito na BS EN 1015-19 (1999). No gráfico de variação de massa (eixo das ordenadas) em função do tempo decorrido (eixo das abscissas), identifica-se o regime estacionário quando a curva obtida tende para uma reta horizontal ou sem inclinação, considerando-se, assim, as condições estáveis.

Anotadas as massas (m) do conjunto cápsula+corpo de prova, é calculado o

¹⁸ O algodão foi utilizado com o objetivo de diminuir a possibilidade de ocorrência de eventuais respingos quando do manuseio das cápsulas. A quantidade de água usada foi a suficiente para garantir a permanência de água no interior da cápsula até o término do ensaio.

fluxo de difusão (G), para cada instante (t), por meio da equação: $(m_i - m_{i-1})/(t_i - t_{i-1})$. Considerou-se o final do ensaio o instante em que a variação de massa por unidade de tempo (G) se manteve constante em, pelo menos, 4 determinações consecutivas (variação inferior a 6%). Em seguida, determinaram-se a permeância (Wvp), a permeabilidade ao vapor de água (δ) e a espessura da camada de ar equivalente a 0,01 m de reboco (Sd). A permeância ao vapor de água (Λ), em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ é calculada por meio da expressão [5]:

$$\Lambda = 1/[A\Delta p/(\Delta G/\Delta t) - R_A] \quad [5]$$

Em que:

Λ = permeância ao vapor de água, em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

A – área do corpo de prova, em m^2 ;

Δp – Diferencial de pressão de vapor entre as duas faces do corpo de prova, em Pa;

$\Delta G/\Delta t$ – fluxo de difusão, em $(\text{kg/s}) \times 10^{-9}$;

R_A – resistência ao vapor de água entre a amostra e a solução ($0,0048 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2/\text{s}/\text{kg}$ para 10 mm de camada de ar)

A área do corpo de prova, com 50 mm de diâmetro, é $1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

O diferencial de pressão Δp , foi calculado considerando a pressão de vapor a 22°C , temperatura média registrada durante o período de ensaio. No Quadro 30, encontram-se os valores de pressão parcial de vapor em função da temperatura.

Quadro 30 – Pressão parcial de vapor, em função da temperatura

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Pressão parcial de vapor (Pa)
20	2336
21	2483
22	2640
23	2806
24	2980
25	3164

Fonte: Faria (2004).

Sendo, $P = P_{\text{sat}} \times (\text{HR})/100$

Considerando a temperatura do ar existente entre a superfície do corpo de prova e a água igual a 22°C , e as umidades relativas em cada uma das faces dos

corpos de prova, iguais a 50% e 100%, é possível calcular a diferença entre a pressão de vapor exterior e interior:

$$\Delta p = 2640 \times (\Delta HR)/100 = 2640 \times (100-50)/100 = 1320 \text{ Pa}$$

A permeabilidade ao vapor de água (δ) foi determinada a partir da multiplicação do valor da permeância (Λ) pela espessura do corpo de prova (e), conforme a expressão [6]:

$$\delta = \Lambda \times e \quad [6]$$

A permeabilidade ao vapor de água pode também ser expressa por meio da espessura (e) da camada de ar de difusão equivalente a 0,01 m de reboco (S_d), sendo determinada a partir da expressão [7]. Esse valor exprime a espessura de uma camada de ar com a mesma permeância que uma camada de material com espessura “e”.

$$S_d = 1,95 \times 10^{-10} \cdot e / \delta \quad [7]$$

Sendo, $1,95 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m.s.Pa})$, o coeficiente de difusão de vapor de água no ar à pressão atmosférica.

5.9.2.4 Resistência aos cloretos

A presença de sais solúveis é muito comum no interior das alvenarias antigas, sendo a sua cristalização um das principais fatores responsáveis pelo aparecimento de danos nesses elementos construtivos, constituídos por materiais porosos que facilitam não somente ascensão de água por capilaridade, mas também a acumulação de sais de origens diversas. Particularmente, as ações dos sais cloretos, muito frequentes em edifícios localizados próximos de zonas costeiras, são basicamente mecânicas, por aumento de volume dos sais ao longo da sua cristalização/dissolução. Quando se trata de argamassas destinadas ao restauro, cabe avaliar esta característica juntamente a outros parâmetros, a fim de prevenir processos que conduzam à degradação.

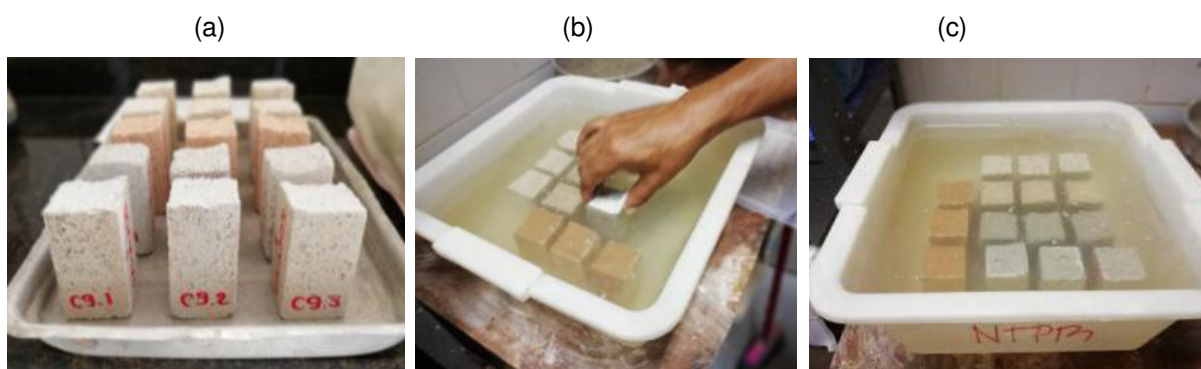
Na ausência de normas diretamente aplicáveis a argamassas de revestimento no que se refere à ação dos sais solúveis, foram seguidas as indicações e os procedimentos adotados por pesquisadores portugueses (FARIA, 2004; BARRETO,

2010; BRANCO, 2013), que adotaram, em seus trabalhos, o método de ensaio estabelecido pela norma *NP EN 12370* (IPQ, 2001) para determinação da resistência à cristalização de sais de pedras naturais, com porosidade aberta superior a 5%.

O referido ensaio foi realizado em idade superior a 365 dias, com os corpos de prova resultantes da determinação do módulo de elasticidade dinâmico, previamente condicionados à temperatura ambiente. Para o ensaio, foram usados três meios corpos de prova prismáticos de cada composição que se pretendeu estudar. Após secagem em estufa, até massa constante, registrou-se a massa inicial seca dos corpos de prova (M_0), em gramas (Figura 50a). Em seguida, foi preparada solução saturada de cloreto de sódio, obtida dissolvendo cerca de 3,12 kg desse sal em 8,7 litros de água aquecida¹⁹. Considerou-se a solução pronta para a imersão dos corpos de prova depois de confirmada a deposição pouco significativa de sal no fundo do recipiente.

Alguns cuidados foram tomados em conta durante a imersão dos corpos de prova na solução, como a garantia do afastamento entre eles de, pelo menos, 1 cm e de 2 cm para as bordas do recipiente onde foi realizada a imersão, além da verificação do nível da solução acima dos corpos de prova, pelo menos, 8 mm de altura, como mostram a Figuras 50b e 50c.

Figura 50 (a, b, c) – Ensaio de resistência aos cloretos: imersão dos corpos de prova em solução salina



Fonte: Fotos da Autora (2018).

Os corpos de prova, após um período de imersão de 24h na solução, foram

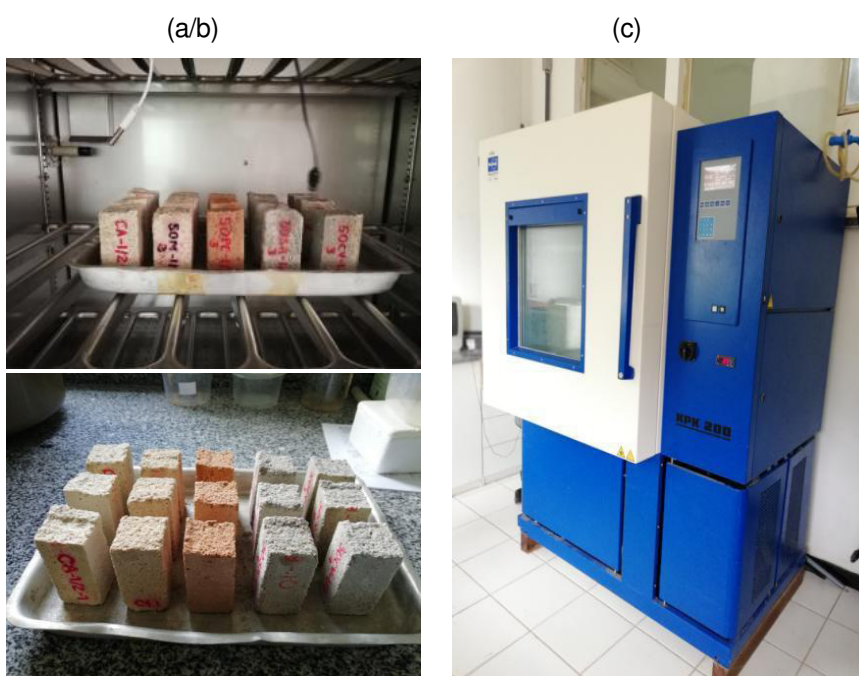
¹⁹ Esses valores foram conseguidos sabendo que a solubilidade do cloreto de sódio a 25°C é de 35,9 g por cada 100 mililitros de água; isto é, 359 g por cada 1 litro de água. Para 8,7 litros (volume necessário de solução saturada de cloreto de sódio para a introdução dos 15 meios corpos de prova no recipiente previsto para a realização do ensaio), foram calculados 3,12 kg de sal.

colocados em estufa, à temperatura de $90\pm 5^{\circ}\text{C}$, até massa constante, e registrada a sua massa com os cloretos retidos (M_1). A partir da diferença entre as massas secas dos corpos de prova antes (M_0) e após (M_1) a imersão na solução, foi determinada a quantidade de cloretos retidos, em termos de porcentagem em relação à massa seca inicial (M_0).

Logo depois da pesagem, os corpos de prova foram colocados em câmara climática, com temperatura de 23°C , e sujeitos a ciclos sucessivos de 12 h a 40% de umidade relativa, e 12 h a 90% de umidade relativa (Figura 51). Tais ciclos de umedecimento/secagem/pesagem continuaram para determinação da perda de massa até à conclusão de 50 ciclos ou até à ruptura dos corpos de prova. A cada três ciclos completos, ao fim de cada ciclo seco, as massas foram registradas e, em simultâneo, avaliado o estado de integridade das argamassas, por meio de observação visual.

A câmara climática utilizada para a realização dos ciclos de umedecimento e secagem, modelo Type 3423/16, da Feutron Klimasimulation GmbH, foi disponibilizada pelo laboratório de Geotecnia, da Escola Politécnica da UFBA. O equipamento possui faixa de operação de temperatura de -40°C a $+100^{\circ}\text{C}$ e de umidade de 10% a 95%.

Figura 51(a, b, c) – Ensaio de resistência aos cloretos: umedecimento e secagem em câmara climática



Fonte: Fotos da Autora (2018).

5.9.2.5 Resistência aos sulfatos

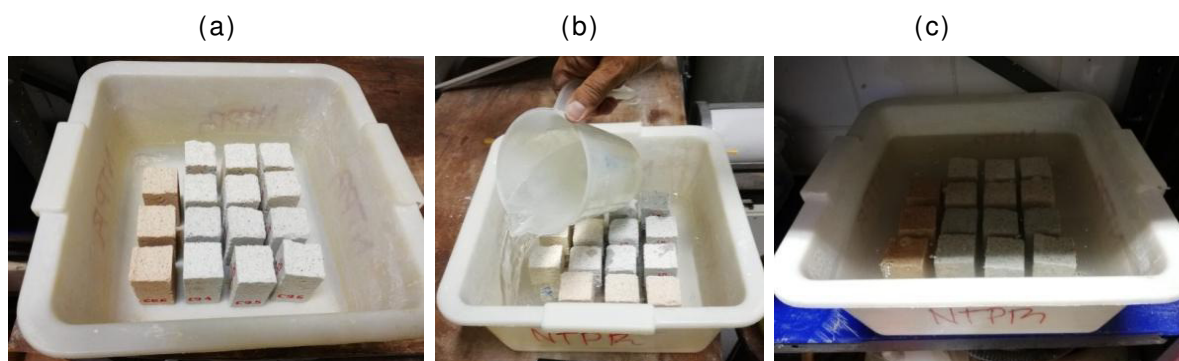
Da mesma forma que os cloretos, é de fundamental importância avaliar a resistência aos sulfatos existentes no suporte, cuja ação química por formação de produtos expansivos, conduzem à ruptura e desagregação da argamassa.

O procedimento utilizado para determinação da resistência aos sulfatos, tal como para o ensaio de resistência aos cloretos, teve por base as indicações adotadas por pesquisadores portugueses, que seguiram a metodologia estabelecida pela norma de ensaio para pedra natural *NP EN 12370* (IPQ, 2001).

Da mesma forma que no ensaio de resistência aos cloretos, os corpos de prova foram os mesmos usados para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, tendo sido previamente condicionados à temperatura ambiente. A idade de ensaio dos corpos de prova analisados foi de cerca de um ano.

Após secos em estufa a 105°C, até massa constante, foi registrada a massa inicial de cada corpo de prova (M_0), em g, e em seguida procedeu-se à sua imersão em solução saturada de sulfato de sódio²⁰, por duas horas. Durante a imersão em solução de sulfato, cuidados similares aos considerados para o ensaio de cloretos foram observados, tais como, garantir afastamento de 1 cm entre os corpos de prova e de 2 cm para as bordas do recipiente e a verificação do nível da solução acima do topo dos corpos de prova, pelo menos 8 mm de altura (Figura 52).

Figura 52 (a, b, c) – Ensaio de resistência aos sulfatos: secagem e imersão dos corpos de prova em solução salina



Fonte: Fotos da Autora (2018).

²⁰ Previamente, foi preparada uma solução de sulfato de sódio anidro, com concentração de 6,17%, equivalente a 14% de sulfato de sódio decahidratado. Os valores foram obtidos por meio das massas moleculares do sulfato de sódio anidro (142 g/mol) e do sulfato de sódio deca-hidratado (322 g/mol).

Após esse período, os corpos de prova foram colocados novamente em estufa a 105°C por, aproximadamente, 21 horas e, em seguida, efetuada sua pesagem (Figura 53). Realizaram-se ciclos sucessivos de imersão/secagem/imersão, com registro da perda de massa e avaliação da integridade, ao final de cada ciclo, até o instante em que, pelo menos, metade dos corpos de prova apresentasse perda de massa superior a 90% ou até a sua ruptura completa. A determinação da variação de massa de cada corpo de prova, em %, ao longo do período de ensaio, permitiu traçar gráfico representativo do comportamento das argamassas à ação dos sulfatos.

Figura 53 (a, b) – Ensaio de resistência aos sulfatos: pesagem e secagem após imersão em solução salina



Fonte: Fotos da Autora (2018).

5.9.2.6 Resistência de aderência à tração

Entre as principais propriedades exigidas a uma argamassa de revestimento no estado endurecido, destaca-se a aderência ao substrato. Por esse motivo, a sua avaliação é particularmente importante para as argamassas aplicadas em paredes.

Trata-se de um fenômeno mecânico, decorrente da penetração da pasta (ligante + água) nas reentrâncias e saliências do suporte, que garante a união entre os dois elementos construtivos (revestimento e substrato). Quando a parte da água de amassamento da argamassa, que contém os constituintes aglomerantes dissolvidos, penetra nos poros e interstícios do substrato, os compostos formados, ao longo do período de cura, irão propiciar a ancoragem da argamassa ao suporte. Por consequência, o revestimento deve aderir à base e não descolar mediante

solicitações de tração e compressão desenvolvidas, seja por variações dimensionais, impactos ou outras causas.

A resistência de aderência, bem como a extensão de aderência entre a argamassa e o substrato, dependem, entre outros aspectos, das condições (características) do suporte – matéria-prima, porosidade, capacidade de absorção de água, textura superficial (CARASEK et al., 2001), das circunstâncias de execução do revestimento, entre as quais se destacam as condições atmosféricas durante a aplicação e secagem da argamassa. Uma boa aderência ao suporte contribui para melhorar o comportamento à fissuração, uma vez que favorece à melhor distribuição de tensões pela argamassa.

O ensaio foi realizado sobre revestimentos aplicados em painéis experimentais de alvenaria na antiga da Igreja de Nossa Senhora de Monserrate, localizada em Salvador. As argamassas de revestimento, com cerca de 20 mm de espessura, foram aplicadas sobre chapisco de cal aérea e areia, no traço 1:0,5, em volume.

Para a determinação da resistência de aderência à tração, foi adotada a metodologia prescrita na *NBR 13528* (ABNT, 2010), utilizando-se corpos de prova de seção circular, com 50 mm de diâmetro. Nos casos em que se constatou a impossibilidade de uso dos corpos de prova de formato circular – em especial, nas argamassas de pó cerâmico e de cinzas volantes, aos 28 dias – foram utilizados os de formato quadrado, conforme preconizava a versão mais antiga da *NBR 13528* (ABNT, 1995), na tentativa de obtenção de dados comparativos para a idade referida.

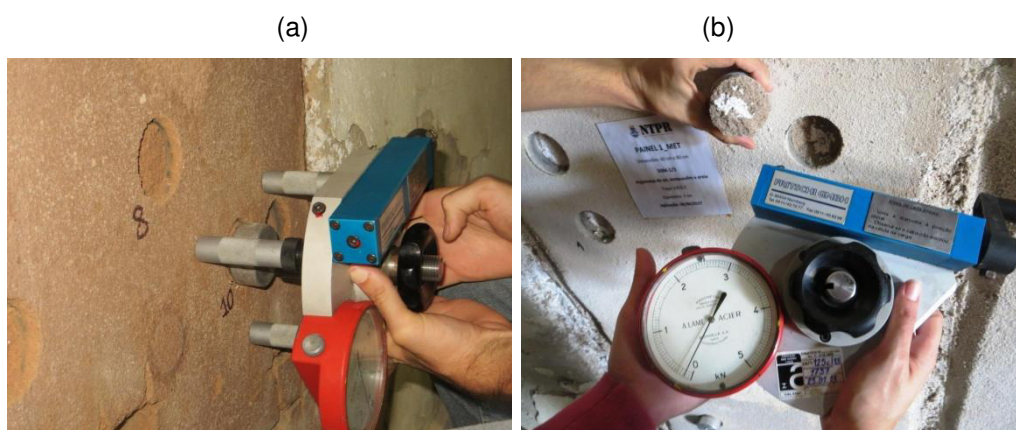
Para avaliação da capacidade de aderência dos revestimentos foram executadas cinco incisões na profundidade de toda a argamassa para cada idade de ensaio, 28 e 90 dias. Salienta-se que o número restrito de incisões deveu-se ao espaço disponível nos painéis, com dimensões de 60 x 80 (cm²), no qual estavam previstos realizar outros ensaios.

Sobre o revestimento delimitado pelo corte (corpo de prova), foram coladas as pastilhas metálicas e, depois de 48 horas²¹, realizado o ensaio de arrancamento (ou tração direta) das pastilhas metálicas, com equipamento específico para procedimento, que permite a leitura do esforço de tração máxima necessário à ruptura da área limitada de revestimento (corpo de prova). Ressalta-se que o

²¹ Tempo necessário para obter-se a colagem das pastilhas.

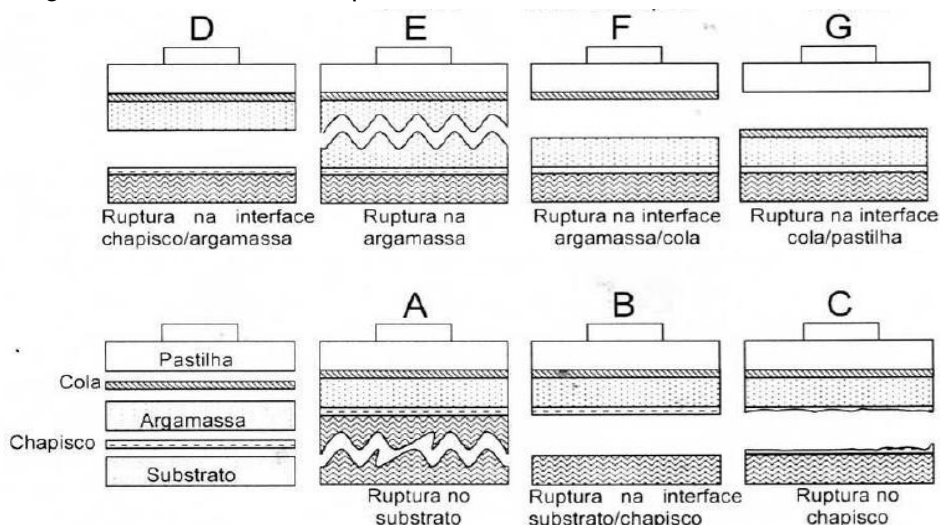
equipamento utilizado foi adequado para ensaio de arrancamento em argamassas de baixas resistências, por encaixe e ajuste às pastilhas (Figura 54). Utilizou-se dinamômetro de tração analógico, de 5 kN de força máxima e precisão de 0,05 kN, marca FRITTSCHI GMBH, modelo D90459, do NTPR. Registrado o valor da força máxima exercida, em seguida avaliou-se o tipo de ruptura obtida, com base na *NBR 13528* (2010), conforme ilustra a Figura 55. Em suportes com argamassas à base de cal aérea, a ruptura no interior do substrato nunca ocorre, uma vez que estas composições são relativamente fracas em relação ao substrato.

Figura 54 (a, b) – Ensaio de resistência de aderência



Fonte: Fotos da Autora (2017).

Figura 55 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência



Fonte: *NBR 13258* (ABNT 2010).

A tensão de aderência (R_a), em MPa, é obtida dividindo-se a carga de ruptura (força lida no dinamômetro), em kN, pela área de contato com a pastilha, em mm^2 . O valor final da tensão de aderência corresponde à média das determinações

efetuadas em cada argamassa.

Simultaneamente às determinações da resistência de aderência, aos 90 dias, amostras do revestimento foram retiradas para determinação quantitativa do teor de umidade em laboratório. Depois de identificadas, as amostras foram condicionadas em sacos plásticos, devidamente selados de forma a evitar trocas de umidade com o ambiente. Em laboratório, o material foi pesado e, em seguida, mantido em estufa à temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingir massa constante. Registrada a massa seca, foi calculado o teor de umidade a partir da média de três determinações.

5.9.2.7 Esclerômetro de pêndulo

A coesão da argamassa de revestimento pode ser avaliada por meio de ensaios de avaliação da dureza superficial, que relacionam esta característica com a resistência suportada pela superfície. Com esse propósito, o método do esclerômetro do pêndulo permite estimar a resistência à compressão da argamassa, por meio da determinação da medida do índice esclerométrico.

O ensaio, fundamentado nas recomendações da RILEM TC 127 – MS (RILEM, 1997), consiste na aplicação de um impacto de massa dura contra a superfície a ensaiar, após o qual é possível determinar o valor do ressalto da massa (deslocamento em sentido contrário ao inicial do movimento), provocado pelo choque. O índice de dureza da superfície ensaiada (valor do ressalto, ou índice esclerométrico) é registrado na escala acoplada ao aparelho. Quanto mais dura e compacta é a argamassa, maior é a altura do ressalto. Ao contrário, quanto mais brando o material, maior é quantidade de energia que ele absorve e menor a altura do ressalto (ALVES et al., 2010). Por meio dessa análise, o método de ensaio fornece informação sobre a resistência mecânica e a deformabilidade do revestimento. Assim, é possível afirmar que, quanto maior o Índice Esclerométrico (IE), maior a resistência da argamassa.

Muito embora o ensaio com esclerômetro seja um método dispersivo, os resultados obtidos são considerados bastante úteis na avaliação rápida e expedita sobre a qualidade das composições analisadas (MAGALHÃES et al., 2003).

Na literatura consultada (GALVÃO, 2009; FLORES-COLEN, 2009), encontraram-se, unicamente, valores de referência do esclerômetro pendular para argamassas com base cimentícia. Para Flores-Colen (2009), valores de ressalto $\text{IE} \geq$

64 podem caracterizar tais argamassas com desempenho mecânico adequado ao uso como rebocos exteriores. No caso de argamassas de juntas, elaboradas com base cimentícia, a MS-D.7 (RILEM, 1997) classifica as argamassas de acordo com os seguintes índices esclerométricos: $IE < 15$ (argamassa muito fraca); $15 \leq IE \leq 25$ (argamassa fraca); $25 \leq IE \leq 35$ (argamassa moderada); $35 \leq IE \leq 45$ (argamassa normal); $45 \leq IE \leq 55$ (argamassa dura); $IE \geq 55$ (argamassa muito dura).

Nesta pesquisa, o esclerômetro de pêndulo usado, modelo P, é adequado para avaliar resistências de argamassas da ordem de 1 a 10 MPa. As determinações foram uniformemente distribuídas, fazendo-se uso de um gabarito sobre a área de ensaio (Figura 56).

Figura 56 (a, b) – Ensaio de esclerômetro de pêndulo

(a)



(b)

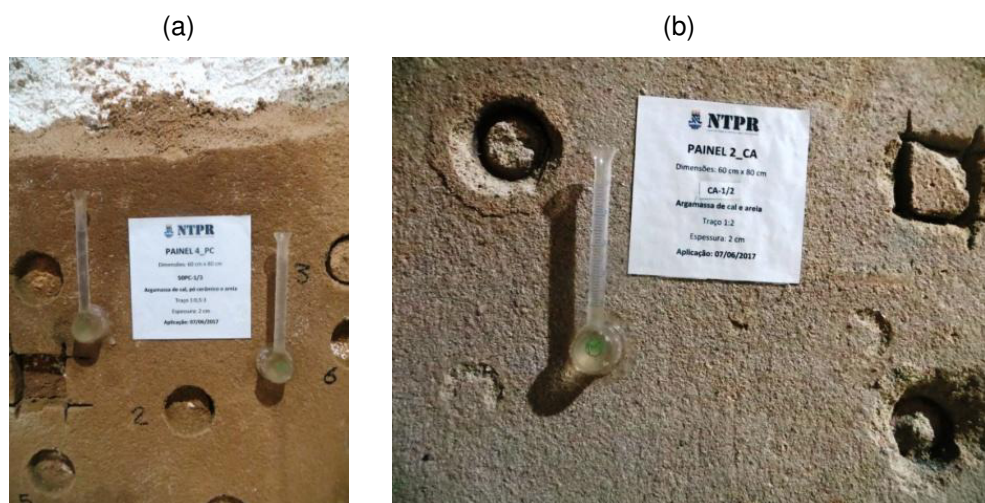


Fonte: Fotos da Autora (2017).

5.9.2.8 Permeabilidade à água sob baixa pressão (método do cachimbo)

A técnica de ensaio, também conhecida como método do cachimbo ou ensaio com tubos de Karsten, baseia-se na metodologia adotada pela RILEM (1980) e consiste em medir a quantidade de água absorvida por determinada superfície do reboco após período de tempo definido, empregando-se, para isso, um conjunto de pequenos tubos de vidro graduados, em forma de cachimbo, que são fixados às zonas da parede objeto de estudo (Figura 57).

Figura 57 (a, b) – Ensaio de permeabilidade à baixa pressão, com tubos de Karsten



Fonte: Fotos da Autora (2017).

As leituras da quantidade de água absorvida pelo revestimento são efetuadas com base na redução do nível de água observada nos tubos graduados. Em geral, usam-se três tubos em cada área a ensaiar para ter em conta a heterogeneidade do material. As leituras são, normalmente, efetuadas aos 5, 10 e 15 minutos, prolongando-se muitas vezes até os 30 minutos, ou mesmo, até os 60 minutos, sempre que o nível de água nos tubos ainda permita o registro do volume de água absorvido. De forma a auxiliar na interpretação de resultados, é determinado um valor único representativo da curva obtida, ao longo de determinado período, conforme proposto pelo *Centre Scientifique et Technique de la Construction* – CSTC (1982). Esse valor, expresso em cm^3 (ou ml), é calculado pela diferença das leituras de água absorvida nos tubos, entre o 5º e o 15º minutos.

O ensaio de permeabilidade à água, com o método do Cachimbo, foi realizado sobre os revestimentos aplicados em painéis de alvenaria da Igreja de Nossa senhora de Monserrate.

5.9.2.9 Exposição natural: avaliação das características visuais

O ensaio de exposição natural compreendeu o acompanhamento e avaliação do comportamento dos revestimentos em condições ambientais reais *in situ*, sujeitos à ação dos agentes atmosféricos. No interior da Igreja de Monserrate, em simultâneo aos ensaios, foi efetuada a observação do comportamento das

argamassas experimentais aplicadas sobre uma das paredes da igreja.

Após aplicação das argamassas, os protótipos de tijolos maciços foram colocados em ambiente exterior e observados, regularmente, de modo a ser detectada alguma alteração (variação na textura, tonalidade, aparecimento de manchas, pulverulência, entre outras) durante o período de secagem, ao longo do tempo, decorrente do processo de envelhecimento natural (Figura 58).

Figura 58 – Alvenarias com argamassas aplicadas: início da exposição natural



Fonte: Foto da Autora (2017).

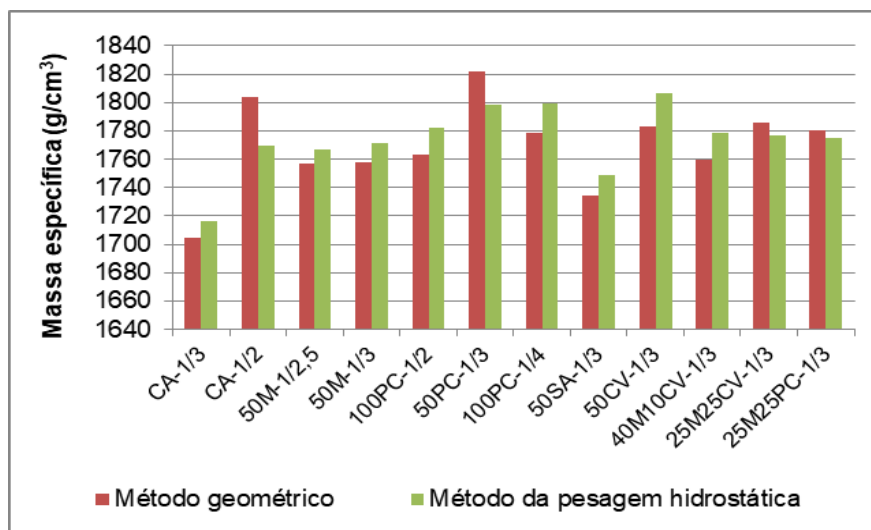
Depois de apresentados os aspectos relativos ao estudo experimental que nortearam a caracterização da matéria-prima e das argamassas elaboradas, com e sem adição, no âmbito da presente pesquisa, apresentam-se a seguir, os resultados de caracterização no estado endurecido.

5.9.3 Resultados dos ensaios da primeira fase

5.9.3.1 Massa específica

Os valores médios de massa específica, obtidos aos 28, 90 e 180 dias, para as argamassas estudadas, por meio do método geométrico e de pesagem hidrostática, estão apresentados no Quadro D.1 e nas Figuras D.1 e D.2 do Apêndice D. A análise do gráfico ilustrado na Figura 59 permite fazer comparação dos valores de massa específica, obtidos aos 90 dias, por meio dos métodos mencionados. Verificam-se valores muito próximos entre os dois métodos de ensaio. Constatou-se, como era de esperar, aumento da densidade com a presença de adições na mistura, indicando aumento da compacidade em relação às argamassas de cal de referência, com proporção, ligante: agregado, 1:3.

Figura 59 – Massa específica das argamassas estudadas, aos 90 dias

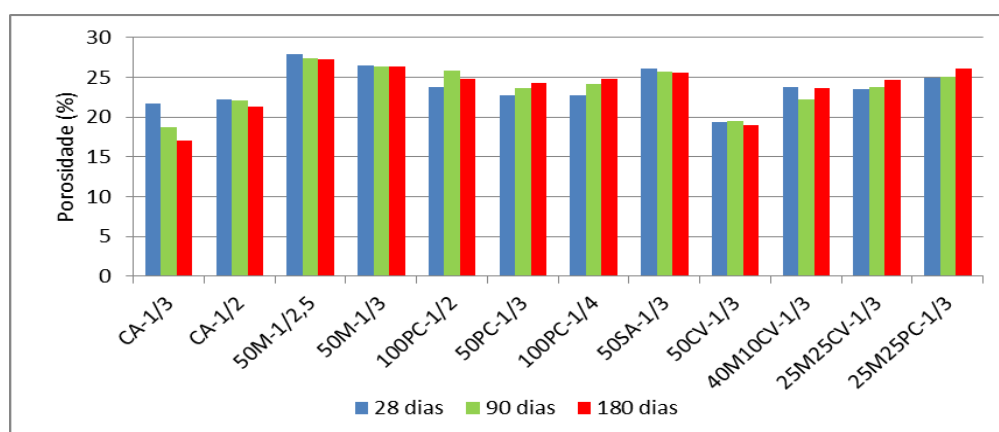


Fonte: Elaboração própria (2018).

5.9.3.2 Porosidade aberta

Os valores médios de porosidade aberta, obtidos, aos 28, 90 e 180 dias, para argamassas estudadas, por meio do método de pesagem hidrostática, encontram-se indicados na Tabela D.1 do Apêndice D. Na Figura 60, apresenta-se, graficamente, a evolução da porosidade entre as idades de 28 e 180 dias.

Figura 60 – Porosidade das argamassas, aos 28, 90 e 180 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

Da análise da Figura 60, é possível concluir: a) a porosidade de argamassa de referência CA-1/3 decresce ao longo do tempo. Trata-se de um processo natural nas argamassas de cal aérea: à medida que a carbonatação ocorre, o carbonato de cálcio, em processo de formação, expande-se e preenche os poros mais largos,

resultando na diminuição do volume de poros da composição. A microestrutura vai sendo alterada e a argamassa torna-se menos permeável, à medida que a reação de carbonatação prossegue.

Na composição CA-1/2, a quantidade de cal hidratada é mais elevada do que a da CA-1/3. Existindo mais hidróxido de cálcio disponível, em um mesmo volume, levará mais tempo a se transformar em carbonato. Assim, a argamassa CA-1/2 carbonata mais lentamente que a CA-1/3 e, em consequência, a diminuição do volume de poros, por meio do processo de carbonatação, é mais lento, na primeira composição em comparação com a segunda.

Todas as composições com adição, excetuando a que tem cinzas volantes (50CV-1/3), possuem porosidades mais elevadas em relação às argamassas de referência (CA-1/3 e CA1/2). A maior quantidade de água introduzida nestas misturas pode ter influência no acréscimo da porosidade.

Os valores de porosidade das argamassas com, 50M-1/2,5 e 50M-1/3, são bastante similares, sendo a primeira composição, sutilmente, mais porosa que a segunda. No que tange à evolução da porosidade das argamassas com metacaulim, observa-se insignificante variação ao longo do tempo. Nessas composições, há predominância das reações pozolânicas, nas primeiras idades, em relação às reações de carbonatação. O hidróxido de cálcio é consumido pela adição e formam-se novos produtos de reação que irão preencher os poros.

Em relação às argamassas com pó cerâmico, as três composições estudadas 50PC-1/2, 50PC-1/3 e 50PC-1/4 tendem a apresentar, ao longo do tempo, incremento na porosidade. Para 50PC-1/2 e 50PC-1/4, a explicação desse comportamento pode estar no fato de ter-se usado maior quantidade de água na confecção das misturas (relação água/cal, respectivamente de 2,6 e 2,5) para torná-las mais trabalháveis. No entanto, para a composição 50PC-1/3, outra explicação deverá justificar o aumento da porosidade ao longo do tempo, uma vez que a relação água/cal utilizada (1,9) é inferior e aproxima-se da adotada para a argamassa de referência (CA-1/3).

A formulação com sílica ativa 50SA-1/3 apresentou comportamento semelhante ao da argamassa com metacaulim, com porosidade constante ao longo do período analisado.

As argamassas com cinzas volantes mostram valores de porosidade inferiores aos obtidos para as demais. Entre os 28 e 90 dias, a porosidade dessa composição

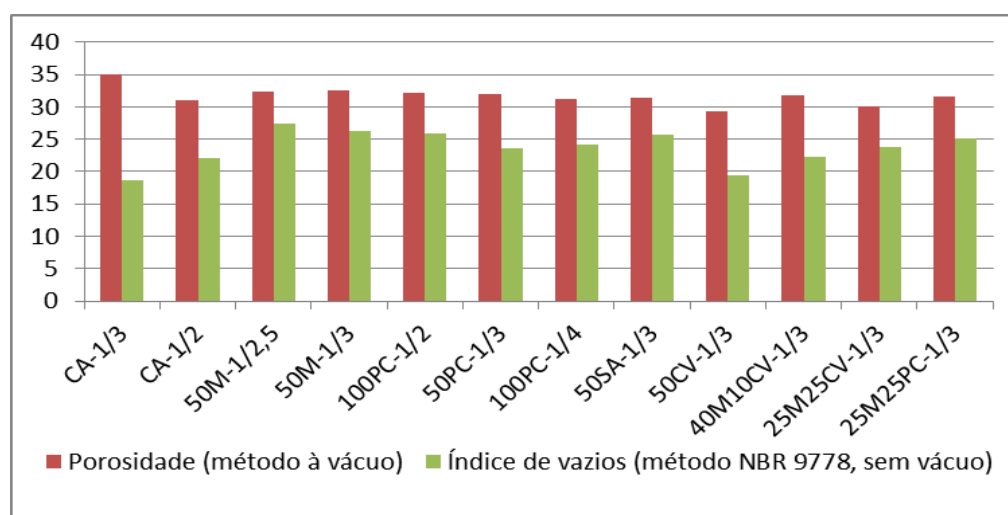
mantém-se constante e, aos 180 dias, nota-se suave decréscimo. As reações de carbonatação, em simultâneo com as reações pozolânicas (lentas nas adições de cinzas volantes) parecem ocorrer com certo equilíbrio.

De modo geral, o que se observou em relação às porosidades das argamassas de cal com adição é que estas se mantiveram estáveis ou aumentaram, no decorrer do tempo, apesar dos novos produtos formados durante as reações pozolânicas. Da mesma forma, as composições binárias, com mais de uma adição (40M10CV-1/3, 25M25CV-1/3, 25M25PC-1/3), mostram tendência para acréscimo de porosidade ao longo do tempo.

No NTPR, habitualmente, a determinação da porosidade em argamassas de cal é obtida por meio do procedimento específico, que faz uso de bomba de vácuo para retirar o ar do interior dos poros, facilitando, assim, a entrada de água nestes. A condição de saturação em água para determinação da “massa saturada imersa” é, portanto, distinta daquela estabelecida pela normativa brasileira *NBR 9778* (ABNT, 2005): a “massa da amostra saturada imersa em água” deve ser determinada após fervura durante 5 horas. No entanto, as primeiras experiências realizadas com argamassas de cal e areia mostraram, ao fim de várias horas dentro de água em ebulição, a fragilidade desses materiais, com eventual perda de massa o que poderia resultar em incoerência de resultados. Diante disso, a determinação da massa saturada, nesta pesquisa, foi feita sem considerar fervura, deixando a argamassa submersa em água durante 24 horas.

Com o objetivo de fazer análise comparativa de resultados entre os dois métodos (normativa brasileira e o adotado no NTPR), procedeu-se à determinação da porosidade, aos 90 dias, por meio da metodologia adotada no NTPR. Os valores médios de porosidade aberta obtidos, nesse período, para as argamassas estudadas, por meio da utilização da bomba de vácuo, encontram-se indicados na Tabela D.2 do Apêndice D. Na Figura 61, apresentam-se os dados de porosidade, obtidos, aos 90 dias, pelos dois métodos referidos.

Figura 61 – Porosidade, aos 90 dias



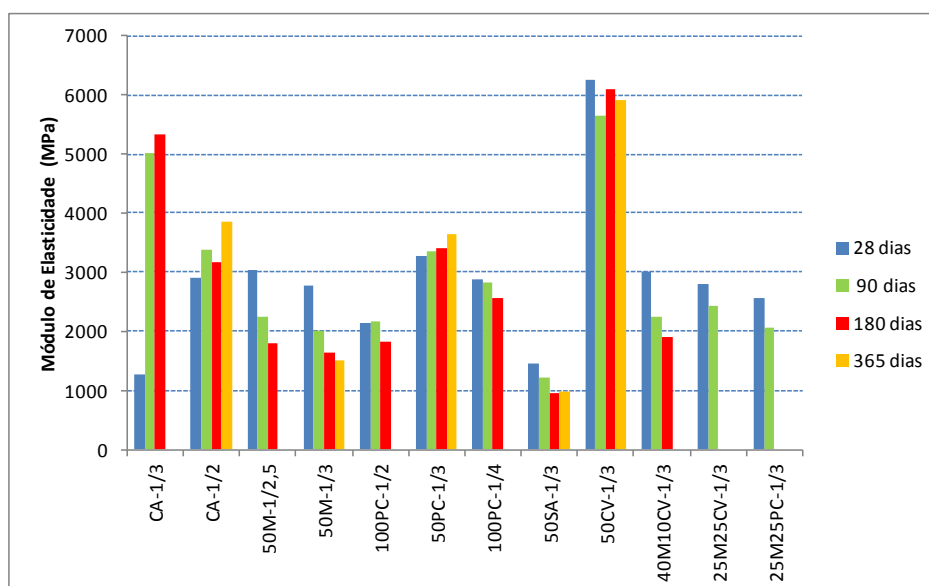
Fonte: Elaboração própria (2018).

Observa-se, a partir da Figura 61, que os valores obtidos no ensaio de porosidade, por meio da metodologia adotada no NTPR, com saturação total em água sob vácuo, são mais elevados que os obtidos pelo método da *NBR 9778*, com imersão em água. A explicação pode estar no fato o ensaio ter sido realizado sem a fervura do corpo de prova durante 5 horas, como recomenda a norma, por motivos expostos anteriormente.

5.9.3.3 Módulo de Elasticidade

Os valores médios de Módulo de Elasticidade, obtidos aos 28, 90 e 180 dias, para as composições objeto de estudo, encontram-se representados nas Tabelas D.3, D.4 e D.5 do Apêndice D. Os valores de Módulo de Elasticidade, obtidos, aos 365 dias, para as composições CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CV-1/3, são apresentados na Tabela D.6 do Apêndice D. No gráfico da Figura 62, ilustra-se a evolução do Módulo de Elasticidade, ao longo do tempo, para as argamassas estudadas.

Figura 62 – Gráfico do Módulo de Elasticidade das argamassas, aos 28, 90, 180 e 365 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

A análise do gráfico da Figura 62 permite extrair as seguintes conclusões: as argamassas confeccionadas com adições, com exceção das que contêm cinzas volantes (50CV-1/3), mostram valores de módulo de elasticidade inferiores aos obtidos para a argamassa de referência (CA-1/3); as restantes composições (de referência com menor relação ligante/agregado, com metacaulim, com pó cerâmico, com sílica ativa, além das argamassas binárias) apresentam, todas, valores relativamente baixos (<4000MPa) de módulo de elasticidade, destacando-se as argamassas com sílica ativa (50SA-1/3) com valores demasiadamente reduzidos (próximo dos 1200MPa).

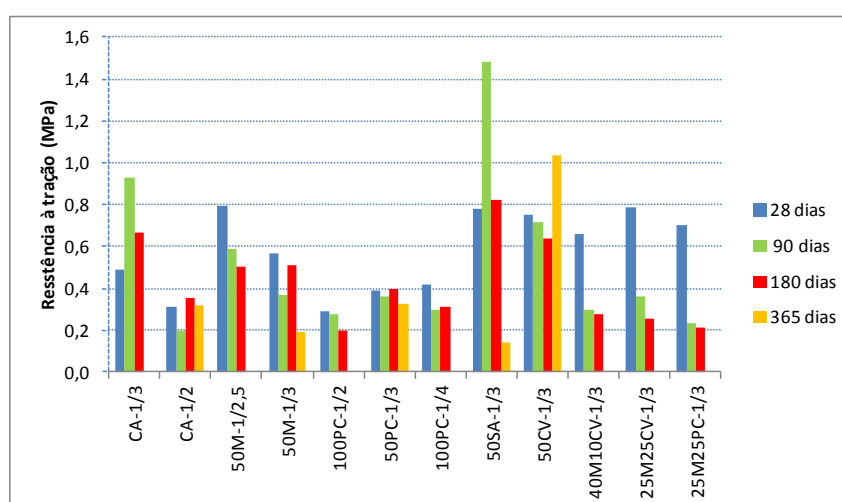
Comparando as argamassas com cal aérea, com traços de 1:2 e de 1:3, aos 90 e 180 dias, verifica-se que, contrariamente ao teor de ligante, a argamassa CA-1/3 apresenta módulo de elasticidade superior ao valor obtido para a CA-1/2. A explicação para essa situação pode dever-se ao preenchimento dos vazios da areia por parte do ligante, resultando em uma menor rigidez da argamassa.

Observa-se, para as argamassas CA-1/3, CA-1/2 e 50PC-1/3, que o módulo de elasticidade vai aumentando com a idade dos corpos de prova, o que é expectável, de acordo com a previsível progressão da carbonatação. No entanto, algumas argamassas parecem contrariar esta tendência como é o caso das argamassas com metacaulim (50M-1/2,5 e 50M-1/3), com pó cerâmico (100PC-1/2 e 100PC-1/4), com sílica ativa (50SA-1/3), com cinzas volantes (50CV-1/3), além das restantes composições com mais de uma adição.

5.9.3.4 Resistência à tração na flexão e à compressão

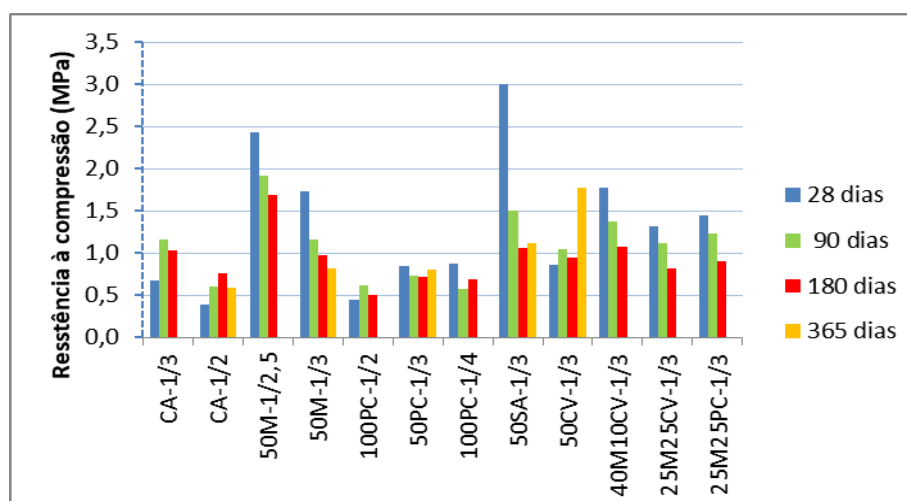
Os valores médios, de resistência à tração na flexão e à compressão, obtidos aos 28, 90 e 180 dias, para as composições objeto de estudo, são apresentados nas Tabelas D.7, D.8 e D.9 do Apêndice D. Na Tabela D.10 do Apêndice D, apresentam-se os valores de resistência à tração na flexão e à compressão, obtidos aos 365 dias, para as composições CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CV-1/3. Nos gráficos das Figuras 63 e 64, ilustra-se a evolução da resistência mecânica, ao longo do tempo, para as argamassas estudadas.

Figura 63 – Gráfico da resistência à tração na flexão, aos 28, 90, 180 e 365 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

Figura 64 – Gráfico da resistência à compressão, aos 28, 90, 180 e 365 dias

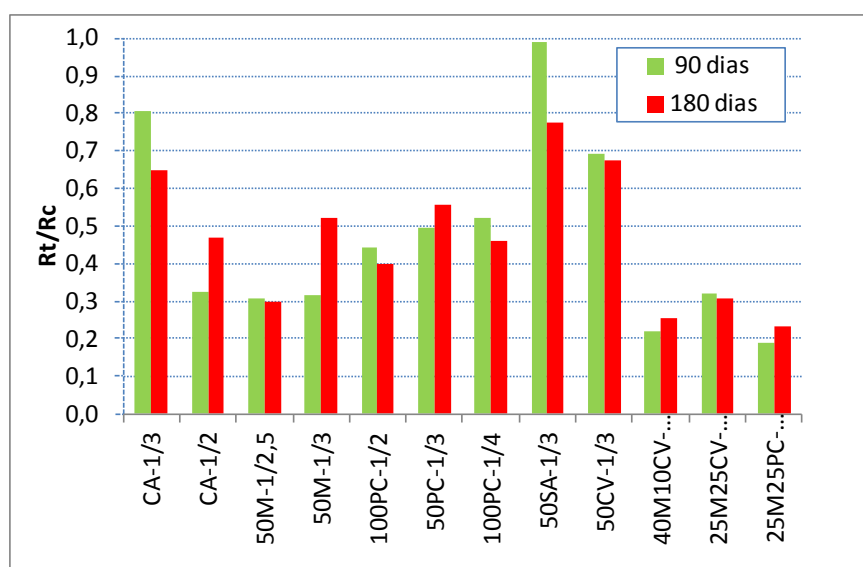


Fonte: Elaboração própria (2018).

A partir da análise dos resultados obtidos para as resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas estudadas, constata-se que as composições com adição de pó cerâmico apresentam valor geralmente da mesma ordem de grandeza da obtida para a argamassa de referência CA-1/2. Entre as argamassas com adição, verifica-se que as que contêm metacaulim (50M-1/2,5) e sílica ativa (50SA-1/3) mostram características mecânicas pouco superiores. A princípio, a argamassa com cinzas volantes possuem resistências mecânicas da mesma ordem de grandeza da registrada pela argamassa de cal aérea CA-1/3, mas atinge, particularmente, valor elevado aos 365 dias. Salienta-se que, para aplicação em edifícios antigos, os valores de módulo de elasticidade não devem exceder as características mecânicas dos próprios suportes antigos.

Segundo Faria (2004), um quociente mais elevado entre as resistências à tração e à compressão traduz um comportamento menos rígido (mais dúctil) da argamassa. Esta menor rigidez favorece a capacidade de resistência às tensões de tração criadas. Ilustra-se, na Figura 65 e no Quadro D.2 do Apêndice D, a razão entre a resistência à tração na flexão e a correspondente resistência à compressão, obtidas aos 90 e 180 dias.

Figura 65 – Gráfico do quociente entre as resistências mecânicas das argamassas



Fonte: Elaboração própria (2018).

De acordo com os dados apresentados na Figura 65, entre todas as composições estudadas, a de referência CA-1/3 juntamente com as que contêm

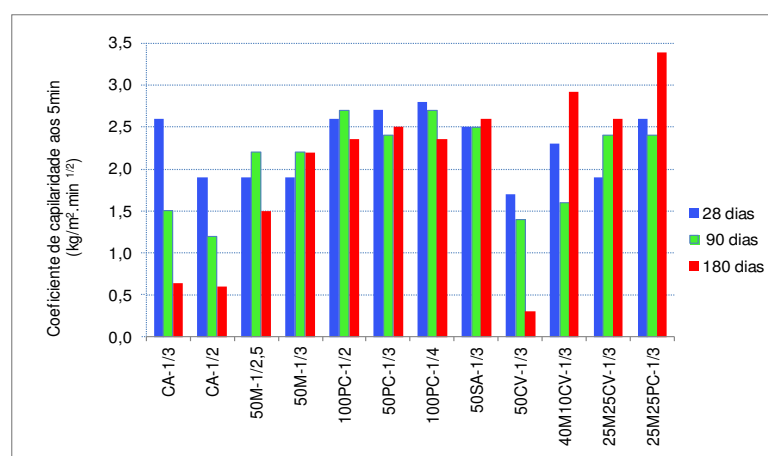
sílica ativa (50SA-1/3) e cinzas volantes (50CV-1/3) na composição, resultaram menos rígidas. Observa-se, nesses casos, tendência para o aumento de rigidez com o avanço da idade. Contrariando os resultados da generalidade das argamassas analisadas, as formulações de referência CA-1/2, com menor quociente entre as resistências mecânicas à tração e à compressão, nas primeiras idades e maior quociente em idades mais avançadas, mostram tendência para se tornarem menos rígidas ao longo do tempo.

5.9.3.5 Absorção de água por capilaridade

Os valores médios, de absorção capilar, em 24h, e de coeficiente de capilaridade, obtidos aos 28, 90 e 180 dias, para as composições objeto de estudo, são apresentados nos Quadros D.3, D.4 e D.5 do Apêndice D. Uma síntese dos resultados obtidos nesse ensaio é apresentada no Quadro D.6 do Apêndice D.

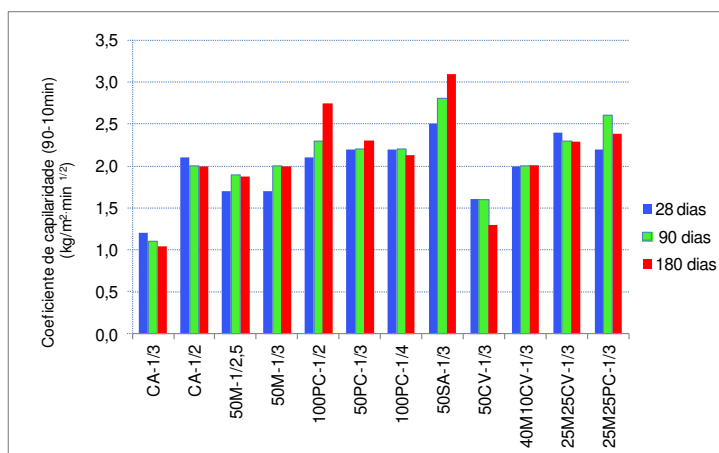
Os gráficos das Figuras D.3 e D.4 do Apêndice D ilustram o comportamento das principais composições estudadas (CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CV-1/3), quanto à velocidade de absorção de água por capilaridade, nas idades de 28 e 90 dias, respectivamente. A Figura D.5 do Apêndice D ilustra o comportamento dessas mesmas composições, quanto à velocidade de absorção e de secagem, aos 180 dias. Nas Figuras 66 e 67, respectivamente, representa-se a evolução do coeficiente de capilaridade, aos 5 minutos, e, entre 10 e 90 minutos, nas idades de 28, 90 e 180 dias.

Figura 66 – Gráfico do coeficiente de capilaridade, aos 5 minutos, nas idades de 28,90 e 180 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

Figura 67 – Gráfico do coeficiente de capilaridade, entre 10 e 90 minutos, nas idades de 28,90 e 180 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

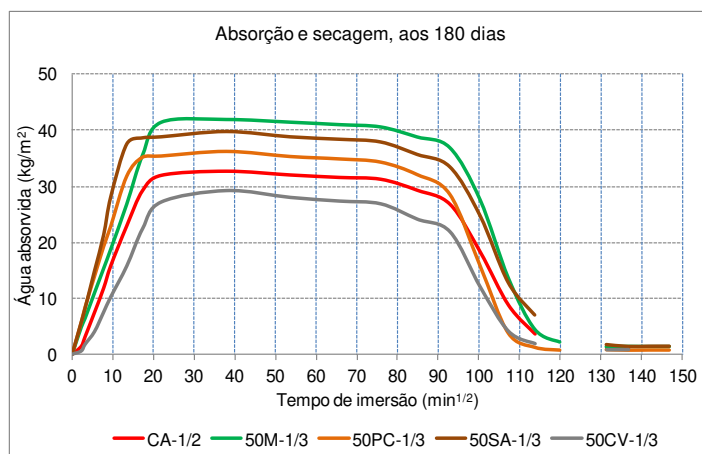
Em relação ao coeficiente de capilaridade, aos 5 minutos, é possível extrair as seguintes conclusões: a) os valores dispersos obtido nos ensaios efetuados aos 28 dias não possibilitaram estabelecer uma relação entre as argamassas analisadas; b) entre as idades de 90 e 180 dias, verifica-se uma tendência para diminuição ou estabilização da velocidade de absorção, para a maior parte das argamassas; c) exclusivamente, as argamassas 50PC-1/3 e as composições binárias (40M10CV-1/3, 25M25CV-1/3 e 25M25PC-1/3) sugerem aumento da velocidade de absorção capilar nos primeiros minutos em contato com a água; d) a composição contendo cinzas volantes (50CV-1/5) mostrou valores muito próximos das argamassas de referência; e) os mais elevados coeficientes de capilaridade, aos 5 minutos, foram verificados nas argamassas com pó cerâmico (100PC-1/2, 50PC-1/3, 100PC-1/4), com sílica ativa (50SA-1/3) e na composição com metacaulim e pó cerâmico (25M25PC-1/3).

No que diz respeito ao coeficiente de capilaridade, entre 10 e 90 minutos, verificam-se dados de similares entre as argamassas com cinzas volantes (50CV-1/3) e as de referência (CA-1/3). Valores elevados de coeficiente de capilaridade entre 10 e 90 minutos (similares ou superiores aos obtidos para as argamassas de referência) foram encontrados para as restantes composições.

Nas argamassas de revestimento, de modo geral, é desejável que a absorção de água não seja elevada, de forma a oferecer melhor proteção ao suporte, e também que estas apresentem uma rápida capacidade de secagem. A Figura 68 ilustra, graficamente, o comportamento das argamassas CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3

e 50CV-1/3 no que se refere à absorção capilar e à secagem.

Figura 68 – Gráfico da absorção e secagem das argamassas, aos 180 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

Da análise do gráfico da Figura 68, observam-se menores valores médios de absorção máxima, às 24h, na composição de cal sem adição (CA-1/3) e com adição de cinzas volantes (50CV-1/3), que parecem oferecer, em uma primeira análise, melhor proteção ao suporte. As restantes formulações, 50M-1/3, 50PC-1/3 e 50SA-1/3, absorvem maior quantidade de água no mesmo período considerado. A velocidade de secagem de cada argamassa analisada é, em geral, similar à velocidade de absorção, conforme é possível visualizar a partir da inclinação das curvas absorção e secagem, obtidas no ensaio realizado aos 180 dias.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As características das argamassas de revestimento que se destinam à conservação de edifícios antigos têm que atender levando-se em consideração um conjunto de exigências relacionadas com os princípios da conservação do patrimônio edificado, conforme abordado no Capítulo 3. Devem ser cumpridos, principalmente, os seguintes critérios: não degradar os elementos pré-existentes, proteger as alvenarias, ser reversíveis, não descaracterizar os materiais do edifício, respeitar estética e arquitetonicamente a edificação, entre outros.

A seguir, serão efetuadas análises comparativas dos resultados dos ensaios realizados para as diversas formulações elaboradas, visando quantificar os parâmetros das características consideradas relevantes para o cumprimento dos requisitos de compatibilidade.

Para melhor sistematização, as análises comparativas dos dados das argamassas elaboradas nesta pesquisa foram estruturadas da seguinte forma:

I) Argamassas formuladas, de referência e com adições, com os requisitos de literatura apresentados no Capítulo 3.

II) Argamassas formuladas com adições e a composição de referência.

6.1 ARGAMASSAS FORMULADAS E OS REQUISITOS DE LITERATURA

As formulações de argamassas com base em cal devem cumprir os requisitos funcionais relacionados, principalmente, às características mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e à compressão) e de comportamento adequado face à ação da água (coeficiente de capilaridade).

Na presente pesquisa, efetuou-se análise comparativa entre os resultados de ensaios das argamassas elaboradas e os parâmetros recomendados pela literatura atual para revestimento de paredes de alvenaria irregular, em particular, os requisitos estabelecidos por Veiga (2004), compilados no Quadro 5 do Capítulo 3 (Compostos possíveis de serem formados na atividade pozolânica). No Quadro 31, comparam-se os resultados dos ensaios, unicamente com os requisitos estabelecidos por Veiga (2004).

Salienta-se que a análise dos resultados quanto ao comportamento à água levou em consideração os valores de coeficiente de capilaridade, determinados

entre os 10 e os 90 minutos (que corresponde ao declive da reta que une os dois tempos), de forma a poder comparar com os valores referidos por Veiga (2004) e, também, os valores determinados aos cinco minutos, quando ocorre a mais rápida absorção de água, especialmente nas argamassas com base em cal, conforme abordado no item 5.9.1.5 desta tese.

Quadro 31 – Análise comparativa das características mecânicas e de comportamento à ação da água, aos 90 dias

Composição		Idade (90 dias)							
		Características mecânicas: Resistência à tração (R_T), Resistência à compressão (R_C), Módulo de Elasticidade (E)						Comportamento à ação da água: Coeficiente de capilaridade (C_C)	
		R_T	Comparação com o requisito	R_C	Comparação com o requisito	E	Comparação com o requisito	C_C (90-10)	Comparação com o requisito
		MPa						Kg/m ² .min ^{1/2}	
Requisitos VEIGA (2004)		-	0,2 - 0,7	-	0,4 - 2,5	-	2000 - 5000	1,0 - 1,5	Reboco exterior
1	CA-1/3	0,9	Superior	1,2	Adequado	5008	Superior	1,1	Adequado
2	CA-1/2	0,2	Adequado	0,6	Adequado	3382	Adequado	2,0	Superior
3	50M-1/2,5	0,6	Adequado	1,9	Adequado	2235	Adequado	1,9	Superior
4	50M-1/3	0,4	Adequado	1,2	Adequado	2000	Adequado	2,0	Superior
5	100PC-1/2	0,3	Adequado	0,6	Adequado	2169	Adequado	2,3	Superior
6	50PC-1/3	0,4	Adequado	0,7	Adequado	3356	Adequado	2,2	Superior
7	100PC-1/4	0,3	Adequado	0,6	Adequado	2836	Adequado	2,2	Superior
8	50SA-1/3	1,5	Superior	1,5	Adequado	1203	Adequado	2,8	Superior
9	50CV-1/3	0,7	Adequado	1,0	Adequado	5653	Superior	1,6	Adequado
10	40M10CV-1/3	0,3	Adequado	1,4	Adequado	2239	Adequado	2,0	Superior
11	25M25CV-1/3	0,4	Adequado	1,1	Adequado	2417	Adequado	2,3	Superior
12	25M25PC-1/3	0,2	Adequado	1,2	Adequado	2069	Adequado	2,6	Superior

Fonte: Elaboração própria (2017).

No que diz respeito ao comportamento mecânico, a maioria das formulações apresentou valores dentro dos limites aceitáveis, com exceção das argamassas de referência CA-1/3 e 50SA-1/3, no que tange a resistência à tração, e as composições CA-1/3 e 50CV-1/3, quanto ao módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios de comportamento à ação da água indicam valores apropriados apenas para as de referência (CA-1/3) e para as composições com cinzas volantes (50CV-1/3). Os demais revestimentos mostram coeficientes de capilaridade superiores ao limite máximo estabelecido.

A partir da análise deste quadro, foram selecionadas cinco argamassas de estudo (uma de referência e quatro com distintas adições), que serão avaliadas por meio de resultados de ensaios complementares, realizados com o objetivo de

aprofundar aspectos de desempenho. Como os resultados de comportamento à água foram, na sua grande maioria, superiores aos requisitos estabelecidos por Veiga, esta característica não será parâmetro para seleção das argamassas de estudo. Vários fatores poderão ter influenciado os valores de coeficiente de capilaridade obtidos, a saber: materiais distintos dos que foram considerados por Veiga; ensaios realizados em condições não controladas de laboratório, diante da inexistência de sala apropriada para este fim; falta de normativas nacionais específicas para argamassas de cal; questões relativas à adaptação das condições mais adequadas para o ensaio mediante a inexistência de normativas; entre outros.

Neste contexto, entre as argamassas de referência, foi escolhida a **CA-1/2**, por apresentar características de resistência mecânica dentro dos limites estabelecidos por Veiga. No que concerne às argamassas com adições, foram selecionadas as seguintes formulações: **50M-1/3; 50SA-1/3; 50PC-1/3 e 50CV-1/3**.

Apesar de os valores de resistências à tração e à compressão da composição de metacaulim 50M-1/2 estarem dentro dos limites, a escolha da **50M-1/3** recaiu em função do menor módulo de elasticidade, por atribuir mais deformabilidade, gerando tensões de retração reduzidas e, por consequência, menor fissuração. As opções pelas argamassas de sílica ativa e cinzas volantes respectivamente, **50SA-1/3 e 50CV-1/3**, justificam-se pelo fato de serem as únicas formulações com incorporação de uma única adição. Quanto às argamassas com pó cerâmico, a escolha pela **50PC-1/3** recaiu por esta ter a mesma proporção ligante / agregado 1:3 e a relação (ligante+adição) / areia 0,5 das outras composições. Apesar de esta composição possuir maior módulo de elasticidade em relação às demais consideradas, os valores estão dentro dos limites considerados por Veiga.

Ressalta-se que, apesar de terem sido apresentados resultados das argamassas binárias (40M10CV-1/3, 25M25CV-1/3 e 25M25PC-1/3), feitas com base na literatura; para esta tese, adotou-se analisar, unicamente, a influência do comportamento individual das adições deixando, para trabalhos futuros, o aprofundamento sobre a influência conjunta de mais de um tipo de adição.

6.2 ARGAMASSAS COM ADIÇÕES E A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA

Depois de definidas as composições para estudo mais aprofundado, apresentam-se, nesta seção, os resultados dos ensaios de caracterização da

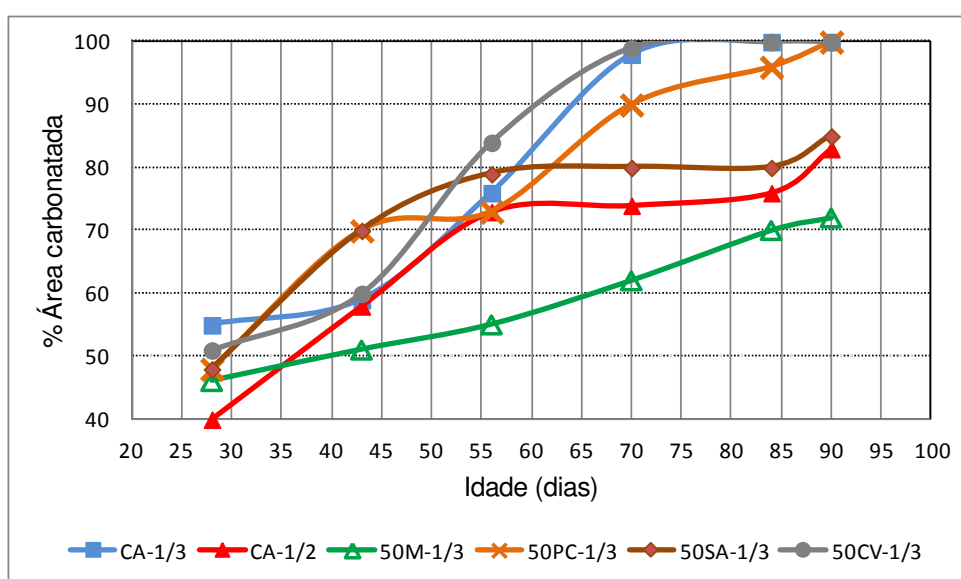
argamassa endurecida, realizados na segunda fase, e as análises comparativas das argamassas com adições selecionadas e a composição de referência.

6.2.1 Resultados dos ensaios da segunda fase

6.2.1.1 Evolução da carbonatação

Os valores de profundidade de carbonatação, obtidos para as composições CA-1/2, CA-1/3, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CV-1/3, encontram-se representados, na Tabela D.11 do Apêndice D. A Figura 69 ilustra uma comparação da evolução dos percentuais de superfície carbonatada, ao longo do tempo.

Figura 69 – Gráfico da análise comparativa de área carbonatada ao longo do tempo



Fonte: Elaboração própria (2018).

A evolução da carbonatação na composição CA-1/3 é mais rápida do que a CA-1/2, o que está de acordo com os resultados de porosidade (item 5.9.2). Nas argamassas com metacaulim 50M-1/3, o processo de carbonatação é mais lento do que o das argamassas de referência, o que pode ser explicado, entre outros fatores, pela predominância das reações pozolânicas sobre as reações de carbonatação nas primeiras idades. As composições com pó cerâmico tendem a carbonatar mais rapidamente do que as que contêm metacaulim, possivelmente, pelo fato de a adição de pó cerâmico ser menos reativa do que o metacaulim, o que irá favorecer as reações de carbonatação, em detrimento das pozolânicas. A argamassa com

sílica ativa mostrou carbonatação lenta e incompleta aos 90 dias, com ritmo de carbonatação semelhante ao da argamassa de referência CA-1/2. A evolução da carbonatação da argamassa com cinzas volantes assemelha-se à da argamassa de referência CA-1/3.

6.2.1.2 Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X

Apresentam-se, na Tabela 15, os resultados da análise química por Fluorescência de Raios X (FRX), efetuada nas argamassas de composição CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CA-1/3, aos 90 dias.

Tabela 15 – Composição química das argamassas, aos 90 dias

Compostos identificados	Composição (%)				
	CA-1/2	50M-1/3	50PC-1/3	50SA-1/3	50CV-1/3
CaO	93,08	59,86	60,62	57,51	57,48
SiO ₂	2,78	21,79	21,85	37,41	23,54
MgO	1,46	1,10	1,32	0,96	1,04
Fe ₂ O ₃	0,86	2,15	4,97	1,35	4,23
Al ₂ O ₃	0,85	12,25	8,31	0,85	9,96
SO ₃	0,41	0,15	0,48	0,35	0,36
SrO	0,23	0,16	0,22	0,15	0,19
K ₂ O	0,11	1,16	1,18	0,93	1,60
TiO ₂	0,09	1,13	0,79	0,11	1,11
Na ₂ O	0,08	0,08	0,10	0,26	0,13
MnO	0,02	0,03	0,05	0,08	0,04
V ₂ O ₅	0,02	0,13	0,10	0,03	0,18
ZnO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07

Fonte: Elaboração própria (2018).

A análise química, expressa na Tabela 15 coloca em evidência a composição quase exclusiva de óxido de cálcio por parte da argamassa de cal aérea, sem adição. No que tange às argamassas com adições, denota-se preponderância de silicatos e aluminatos, especialmente, nas composições com metacaulim (50M-1/3), pó cerâmico (50PC-1/3) e cinzas volantes (50CV-1/3). A argamassa com sílica ativa (50SA-1/3) possui grande quantidade de silicatos e teor bastante reduzido (<1%) de

aluminatos, como era de esperar, devido à própria composição química da adição utilizada. A presença de óxidos de ferro é, relativamente, considerável (>4%) nas composições com pó cerâmico e cinzas volantes.

As Figuras D.6 a D.10 do Apêndice D ilustram os difratogramas obtidos para as composições de CA-1/2, 50M-1/3, 50PC-1/3, 50SA-1/3 e 50CV-1/3, nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias. No Quadro 32 estão dispostas, de forma sintetizada, as fases encontradas nas argamassas objeto de estudo.

Quadro 32 – Síntese das fases identificadas nas argamassas estudadas

Argamassas	Fases identificadas
CA-1/2	Calcita, Portlandita, Quartzo
50M-1/3	Calcita, Portlandita, Quartzo, Hematita, Mulita, Magnetita, Monocarboaluminato, Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
50PC-1/3	Calcita, Portlandita, Quartzo, Monocarboaluminato
50SA-1/3	Calcita, Portlandita, Quartzo, Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
50CV-1/3	Calcita, Portlandita, Quartzo, Silicato de alumínio

Fonte: Elaboração própria (2018).

A análise dos difratogramas evidencia similaridades das fases formadas nas argamassas com ou sem adição. De forma geral, em todas elas, estão presentes a calcita, o quartzo e a portlandita. Nas argamassas com adições, as outras fases detectadas são, principalmente, relacionadas com as reações pozolânicas entre a cal e a adição; resultam, assim, da combinação do hidróxido de cálcio disponível com os elementos reativos, específicos de cada material pozolânico.

As reações de carbonatação desenvolvem-se ao longo do tempo, o que é confirmado pelas proporções de portlandita e calcita: os picos de portlandita (hidróxido de cálcio) vão sendo reduzidos e os de calcita, vão aumentando, como é possível observar a partir da análise dos difratogramas de cada composição, em diferentes idades. Enquanto nas argamassas de cal e areia o hidróxido de cálcio é consumido, exclusivamente, na reação de carbonatação, nas formulações de cal com adições, parte da portlandita é gasta nas reações pozolânicas, nas quais vão sendo formados novos produtos, pela combinação do hidróxido remanescente com alumina, e/ou outras fases presentes.

Na argamassa de referência (CA-1/2), em que a carbonatação é a reação dominante, observa-se entre os compostos identificados, a predominância da calcita (CaCO_3), do quartzo (sílica), proveniente da presença do agregado e da portlandita, Ca(OH)_2 .

Nas composições com metacaulim (50M-1/3), foram identificados a hematita, a mulita, a magnetita, o monocarboaluminato de cálcio e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Os três primeiros compostos (hematita, magnetita e mulita) têm origem na própria adição. A mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), formada a partir da combinação entre sílica e a alumina, em condições de temperaturas acima de 1400°C , é resultante do processo de queima da argila para produção do metacaulim. O silicato de cálcio hidratado é proveniente da reação entre a sílica (SiO_2) presente na adição com o Ca(OH)_2 da cal, e contribui para o aumento substancial da resistência e durabilidade das argamassas. A presença de monocarboaluminato de cálcio hidratado está associada à maior disponibilidade de alumina na mistura, quando ocorre a solubilização da fase amorfa do metacaulim. Nessa composição, foi detectada a esta fase até os 28 dias. Conforme referido no Capítulo 3, fases de monocarboaluminato apresentam comportamento instável, podendo a sua presença, nas argamassas com adições, contribuir para o decréscimo da resistência mecânica.

Na argamassa com pó cerâmico (50PC-1/3), há evidências de monocarboaluminato de cálcio dos sete até os 90 dias. Salienta-se que não foram identificadas fases de C-S-H nesta composição.

Na argamassa com adição de sílica ativa (50SA-1/3), além da calcita, do quartzo e da portlandita, está presente, aos 90 dias, o silicato de cálcio hidratado, fase oriunda da reação da sílica com o hidróxido de cálcio existente e responsável por incremento de resistência em argamassas com adições pozolânicas. Aos 180 dias, evidencia-se, nos difratogramas desta composição, unicamente, o carbonato de cálcio.

Na composição com cinzas volantes (50CV-1/3), observa-se, em todas as idades consideradas, o silicato de alumínio, produto originado pela reação de caráter pozolânico entre a cal e os constituintes mais reativos das cinzas volantes. É de salientar que o silicato de alumínio, além do quartzo e da calcita, constitui um composto presente na composição mineralógica de grande parte das argamassas dos fortes, estudadas no Capítulo 4.

6.2.1.3 Permeabilidade ao vapor

Os resultados de permeabilidade ao vapor, determinados para cada composição estudada, encontram-se registrados nas Tabelas D.12 a D.16 do Apêndice D. Uma síntese dos valores de permeabilidade ao vapor de água e de espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) é apresentada no Quadro 33 e na Tabela D.17 do Apêndice.

Quadro 33 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar de difusão equivalente

Composição	Permeabilidade ao vapor $\times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa)	S_d (m)
CA-1/2	1,65	0,18
50M-1/3	1,81	0,16
50PC-1/3	2,26	0,14
50SA-1/3	1,80	0,17
50CV-1/3	1,62	0,18

Fonte: Elaboração própria (2018).

Os valores indicam permeabilidade ao vapor de água superior das argamassas com adições em relação à composição de referência. As composições menos permeáveis são 50CV-1/3 (com cinzas volantes) e CA-1/2 (de cal aérea e areia). As que contêm sílica ativa (50SA-1/3) e metacaulim (50M-1/3) são mais permeáveis que as anteriores. A argamassa (50PC-1/3) com pó cerâmico apresenta permeabilidade ao vapor superior a todas.

Embora os valores obtidos da camada de difusão de ar equivalente para as argamassas analisadas estejam próximos aos obtidos para a argamassa de referência, nenhum deles cumpre os requisitos mínimos estabelecidos por Veiga et al. (2004): espessuras de camada de ar de difusão equivalente a 0,01 m de reboco (S_d) deve ser inferior a 0,08 m para argamassas a serem usadas em rebocos exteriores e inferiores a 0,1 para rebocos interiores. Esta situação pode ser atribuída ao fato de os requisitos mínimos terem sido estabelecidos, provavelmente, para corpos de prova de dimensões, curas e procedimentos de ensaio distintos do que foi adotado na presente pesquisa.

Ainda sobre os resultados obtidos neste trabalho, faz-se uma pequena observação. Apesar de os valores da espessura da camada de ar equivalente (S_d),

terem sido relativamente superiores aos estabelecidos por Veiga et al. (2004), os parâmetros de permeabilidade ao vapor determinados são da mesma ordem de grandeza dos encontrados pela investigadora Paulina Rodrigues (FARIA, 2004), que classificou as argamassas como sendo de boa permeabilidade ao vapor.

6.2.1.4 Resistência aos cloretos

As Figuras D.11 a D.15 do Apêndice D ilustram o aspecto dos corpos de provas, de cada composição, ao longo dos ciclos de umedecimento e secagem, durante o ensaio de resistência aos cloretos. A Tabela D.18 do Apêndice D mostra os percentuais de cloretos retidos para as composições estudadas. Uma síntese desses resultados é apresentada na Tabela 16.

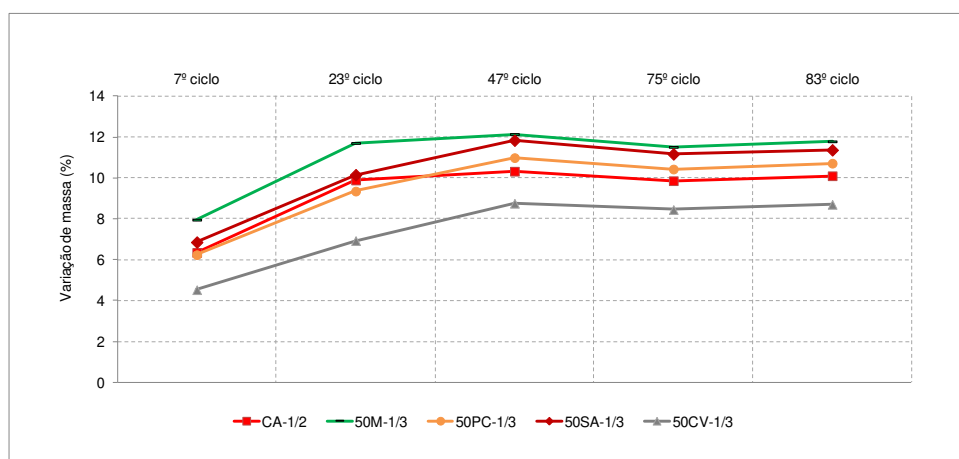
Tabela 16 – Cloretos retidos e variação de massa por ação de cloretos

Composição	Cloretos retidos (%)	Variação de massa média (%)				
		7º Ciclo	23º Ciclo	47º Ciclo	75º Ciclo	83º Ciclo
CA-1/3	3,4	6,3	9,9	10,3	9,9	10,1
50M-1/3	4,0	8,0	11,7	12,1	11,5	11,8
50PC-1/3	3,5	6,2	9,3	11,0	10,4	10,7
50SA-1/3	3,9	6,9	10,1	11,8	11,2	11,4
50CV-1/3	2,8	4,5	6,9	8,8	8,4	8,7

Fonte: Elaboração própria (2018).

Os valores de massa obtidos no ensaio de resistência aos cloretos encontram-se registrados nas Tabelas D.19 a D.23 do Apêndice D. A Figura 70 representa o gráfico da variação média de massa ao longo dos ciclos efetuados no ensaio.

Figura 70 – Gráfico da variação média de massa no ensaio de resistência aos cloretos



Fonte: Elaboração própria (2018).

Da análise da Tabela 16, conclui-se que as menores retenções de cloretos por imersão de 24 horas, em solução saturada em cloreto de sódio, ocorreram nas composições com cinzas volantes. Nas restantes argamassas estudadas, as percentagens situaram-se entre 3,4 e 4,0%.

As argamassas, de um modo geral, apresentaram bom comportamento à ação dos cloretos, sem degradação visível. Até os 83 ciclos não houve perda de massa, o que se verificou foi um incremento, inicialmente e, logo, constância da massa ao longo dos ciclos. A ação dos cloretos é basicamente mecânica, por meio de aumento de volume dos sais durante a sua cristalização/dissolução.

6.2.1.5 Resistência aos sulfatos

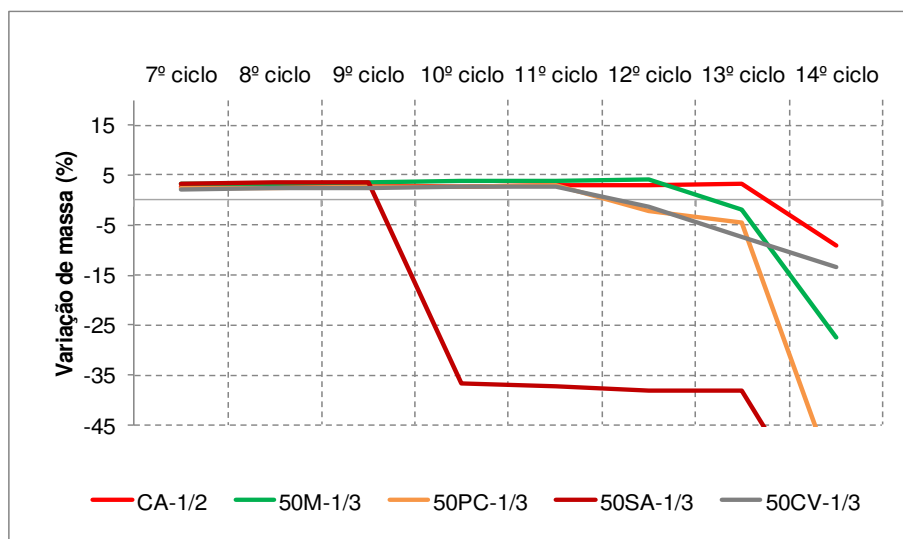
As Figuras D.17 a D.20, do Apêndice D, ilustram o aspecto dos corpos de provas, de cada composição, ao longo dos ciclos de imersão e secagem, durante o ensaio de resistência aos sulfatos. Os valores de variação de massa encontram-se representados, nas Tabelas D.24 a D.28, e, graficamente, na Figura D.21, do Apêndice D. Registram-se, na Tabela 17, as variações médias de massa ocorridas do 1º ao 14º ciclos de secagem/imersão em solução saturada em sulfato de sódio. A Figura 71 representa, graficamente, a variação média de massa ao longo dos ciclos.

Tabela 17 – Variação de massa por ação de sulfatos

Ciclo	Valores médios de variação de massa (%)				
	CA-1/2	50M-1/3	50PC-1/3	50SA-1/3	50CV-1/3
1	0,7	0,8	0,7	0,7	1,3
2	1,2	1,5	1,2	1,3	1,0
3	1,5	2,0	1,5	1,8	1,4
4	1,8	2,4	1,7	2,2	1,6
5	2,1	2,7	1,9	2,6	1,8
6	2,3	2,9	2,1	2,9	2,0
7	2,6	3,2	2,3	3,2	2,2
8	2,8	3,4	2,5	3,4	2,3
9	3,0	3,5	2,6	3,6	2,5
10	2,8	3,7	2,7	-36,7	2,6
11	2,9	3,9	3,0	-37,1	2,7
12	2,9	4,3	-2,3	-38,1	-1,2
13	3,3	-2,0	-4,5	-38,2	-7,2
14	-9,2	-27,3	-56,9	-68,7	-13,4

Fonte: Elaboração própria (2018).

Figura 71 – Gráfico da variação de massa no ensaio de resistência aos sulfatos



Fonte: Elaboração própria (2018).

As argamassas que apresentaram melhor comportamento e, conseqüentemente, maior resistência à ação de sulfatos foram aquelas com cal aérea na composição. As formulações com metacaulim e com pó cerâmico mostraram comportamento intermediário ao ataque por sulfatos e as que contêm sílica ativa foram as que pior resistiram à ação destes sais; no 9º ciclo de ensaio de sulfato começa a ocorrer a degradação da argamassa de sílica ativa. A ação dos sulfatos dá-se por formação de produtos expansivos, oriundos das reações entre os sulfatos e os aluminatos de cálcio e, entre os sulfatos e a portlandita, que conduzem à ruptura e desagregação das argamassas.

6.2.1.6 Resistência de aderência

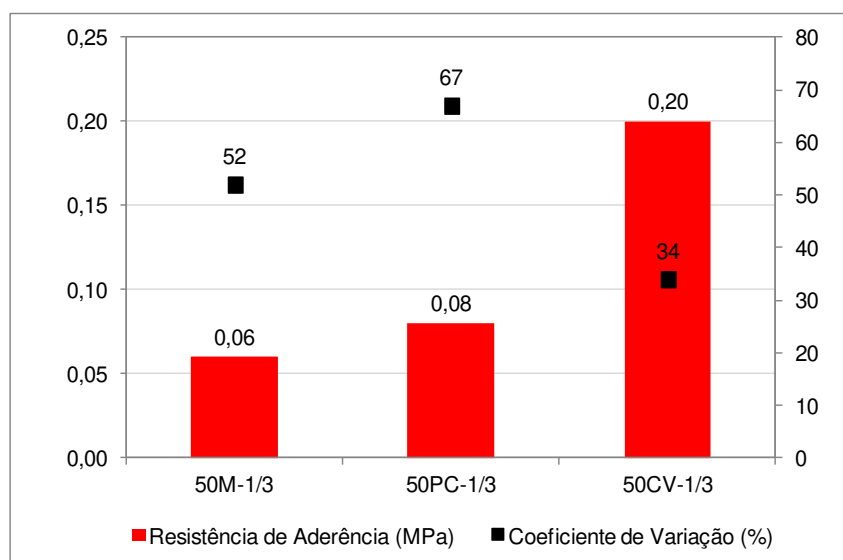
As Tabelas D.29 e D.30 do Apêndice D mostram os valores de resistência de aderência à tração para cada tipo de composição estudada, para as idades de 28 e 90 dias. Os valores médios de teor de umidade, determinados nas alturas de 0,50m e 1,00m, encontram-se registrados na Tabela D.30 do Apêndice D.

Conforme foi possível verificar, os valores de resistência de aderência obtidos, aos 28 dias, para as composições de cinzas volantes e de pó cerâmico, foram muito baixos (< 0,03 MPa) e, portanto, não serão considerados para análise. Os reduzidos valores estão, possivelmente, associados ao uso de corpos de prova de formato quadrado para avaliação destas composições. Estudos (COSTA et al., 2006) já

mostraram que a geometria quadrada não é a mais adequada para o ensaio de aderência devido à concentração de tensões nos cantos, diferentemente do que acontece nos corpos de prova de formato circular, em que a distribuição das tensões é uniforme ao longo da interface argamassa/substrato. Quanto aos resultados médios obtidos, aos 28 dias, para a composição de metacaulim, cerca de 0,08 MPa, nota-se que estão bem próximos dos valores encontrados aos 90 dias, cerca de 0,06 MPa.

A Figura 72 apresenta, graficamente, os valores correspondentes às médias das resistências de aderência e os coeficientes de variação das determinações efetuadas nos painéis experimentais, aos 90 dias.

Figura 72 – Resistência de aderência e coeficientes de variação, aos 90 dias



Fonte: Elaboração própria (2018).

As Figuras D.22 e D.23 do Apêndice D, ilustram as seções de ruptura dos corpos de prova das argamassas dos painéis da Igreja de Monserrate, aos 28 e 90 dias de idade. No Quadro 34, encontram-se indicadas, comparativamente, as formas de ruptura predominantes das argamassas estudadas, segundo a classificação preconizada na *NBR 13528* (2010). Observa-se como ruptura predominante, na maioria das situações analisadas, a do tipo coesiva, ou seja, no interior da argamassa.

Quadro 34 – Classificação das formas de ruptura das argamassas dos painéis da Igreja de Monserrate

Composição	Idade	Classificação		
		NBR 13528 (ABNT, 2010)		Veiga et al., 2004
50M-1/3	28 dias	d+e	Interface chapisco/argamassa ou argamassa	Coesiva ou adesiva
50PC-1/3		d+e	Interface chapisco/argamassa ou argamassa	
50CV-1/3		e	Argamassa	Coesiva
50M-1/3	90 dias	c+d+e	Chapisco/Interface chapisco/argamassa ou argamassa	Coesiva ou adesiva
50PC-1/3		c+e	Chapisco ou argamassa	
50CV-1/3		d+e	Interface chapisco/argamassa ou argamassa	

Fonte: Elaboração própria (2018).

Legenda: c – ruptura no chapisco; d – ruptura na interface chapisco/argamassa; e – ruptura na argamassa

A análise dos dados da Figura 72 permite extrair algumas conclusões sobre a dispersão dos resultados de resistência de aderência. A variabilidade dos dados obtidos em relação à média, aos 90 dias, é alta, principalmente para as argamassas com metacaulim (50M-1/3) e com pó cerâmico (50PC-1/3), que apresentaram coeficientes de variação de 52% e 67%, respectivamente. Das três composições possíveis de avaliar, a que contém cinzas volantes mostra menor variabilidade de resultados, cerca de 34% em relação à média, que pode estar relacionada à melhor característica reológica dessa composição em relação às de metacaulim e pó cerâmico.

A aplicação manual do revestimento constitui uma das possíveis explicações para essa alta variabilidade, uma vez que os procedimentos de lançamento, sarrafeamento e acabamento sofrem muitas variações em função da ergonomia do operador (CARASEK, 2001). Esta mesma autora faz, em seu trabalho de tese (CARASEK, 1996), considerações sobre o aspecto da variabilidade de resultados decorrente da inadequação do procedimento adotado para a realização do ensaio de aderência, especialmente no que tange às argamassas bastante frágeis. As vibrações, geradas durante o corte com a serra copo e o ajuste do equipamento para a execução do ensaio de arrancamento, são fatores que podem induzir tensões laterais ao corpo de prova, reduzindo ou anulando a aderência e produzindo alta variabilidade de resultados.

Nesse contexto, nas situações com baixa quantidade de dados disponíveis para avaliação da aderência e com altos coeficientes de variação, como na do presente trabalho, ao invés de utilização da média dos valores obtidos, optou-se por considerar como mais adequada a análise dos resultados adotando a resistência potencial de aderência, que corresponde à média dos maiores valores obtidos, em cada composição. Este tipo de análise tem respaldo na tese de Carasek (1996) e visa minimizar os efeitos das variabilidades introduzidas pelo procedimento de ensaio e suas interferências negativas na aderência.

Dessa forma, para análise dos dados, foi calculada a média dos dois maiores valores considerados para cada argamassa analisada, aos 90 dias. O Quadro 35 mostra os resultados das resistências potenciais médias para argamassas com metacaulim (50M-1/3), com pó cerâmico (50PC-1/3) e com cinzas volantes (50CV-1/3).

Quadro 35 – Resultados de resistência potencial de aderência à tração, aos 90 dias

Composição	Resistência potencial de aderência, aos 90 dias	
	Dois maiores valores obtidos	Média (MPa)
50M-1/3	0,07-0,10	0,09
50PC-1/3	0,11-0,16	0,14
50CV-1/3	0,26-0,28	0,27

Fonte: Elaboração própria (2018).

Observa-se, no Quadro 35, que a argamassa de cinzas volantes obteve resistência de aderência média superior (0,27 MPa) aos valores médios obtidos nas composições de metacaulim e de pó cerâmico. Considerando os requisitos de Veiga quanto aos valores de resistência mínima de aderência (0,1 - 0,3 MPa), aos 90 dias, as argamassas de revestimento com cinzas volantes podem ser utilizadas quer para o interior, quer para o exterior de edifícios antigos.

No que tange à tipologia de ruptura, verifica-se, na maioria dos casos, a predominância da ruptura coesiva, no interior da argamassa ou (adesiva) na interface argamassa/chapisco (Quadro 34), sendo possível concluir que a aderência entre o chapisco e o substrato foi superior à sua aderência com as argamassas de revestimento aplicadas. Da mesma forma que os valores de aderência, a tipologia

de ruptura das argamassas analisadas é coerente com o estabelecido por Veiga para edifícios antigos, que afirma que a ruptura deve ser coesiva pela argamassa e nunca pelo suporte.

A análise da especificação da norma *NBR 13281* (ABNT, 2005), que prescreve requisitos para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, permite classificar as formulações em função dos limites de resistência de aderência à tração: classe A1, composições de metacaulim e pó cerâmico, já que a resistência potencial de aderência é menor que 0,20 MPa; e classe A2, a composição que contém cinzas volantes, uma vez que a resistência potencial de aderência é superior a 0,20 MPa. Ressalta-se que esta é uma classificação mais representativa para argamassas com base cimentícia.

Em relação ao teor de umidade, verifica-se, a partir dos dados que constam na Tabela D.30 do Apêndice D, que todos os painéis revelaram concentração de água superior nas zonas mais baixas (0,5m do solo), diminuindo à medida que se afasta do solo (cerca de 1,00m). Os revestimentos dos painéis 1 e 4, com argamassas contendo metacaulim e com pó cerâmico, respectivamente, mostram teores de umidade superiores aos dos painéis 2 (referência) e 3 (argamassa com cinzas volantes), que apresentam melhor comportamento neste aspecto. Em geral, os valores determinados indicam revestimentos bastante úmidos (>9%), tendo por base os resultados obtidos para materiais da mesma natureza, em estudos anteriores. Os maiores teores encontrados nas argamassas com metacaulim e com pó cerâmico estão relacionados não só com a umidade de ascensão capilar, mas podem, também, dever-se à reduzida permeabilidade ao vapor de água, que dificulta a evaporação da água oriunda do suporte.

Em síntese, entre as composições estudadas, a que contém cinzas volantes (50 CV-1/3) foi a que apresentou melhor desempenho no ensaio de aderência à tração em relação aos requisitos mínimos estabelecidos por Veiga (2004) para argamassas de revestimento para edifícios antigos. Embora as tensões encontradas sejam baixas, os resultados são satisfatórios por ter-se obtido ruptura coesiva. Esse desempenho pode ter sido atribuído, entre outros fatores, à esfericidade dos grãos das cinzas, que proporcionou uma melhor trabalhabilidade das argamassas, influenciando favoravelmente a extensão de aderência entre a argamassa e o substrato.

6.2.1.7 Esclerômetro de pêndulo

Os resultados deste ensaio, obtidos aos 90 dias, estão registrados na Tabela D.31 do Apêndice D e compilados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de esclerômetro de pêndulo nos painéis da Igreja de Monserrate

Painel	Composição	Índice Esclerométrico		Classificação da resistência superficial RILEM TC 127- MS
		Valor médio	CVar (%)	Argamassa para junta
1	CA-1/2	0	–	Muito fraca (IE<15)
2	50M-1/3	43	11	Normal (35 ≤ IE ≤ 45)
3	50CV-1/3	0	–	Muito fraca (IE<15)
4	50PC-1/3	43	15	Normal (35 ≤ IE ≤ 45)

Fonte: Elaboração própria (2018).

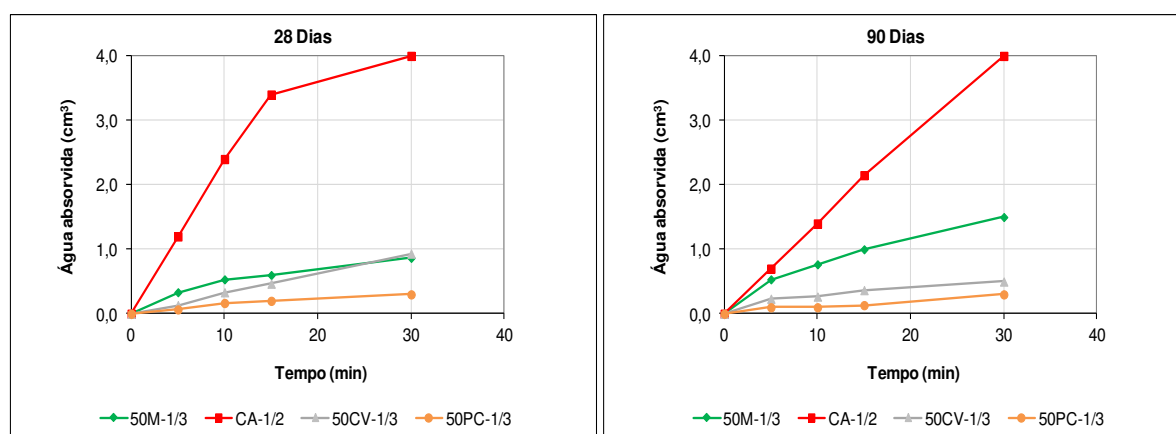
A partir das determinações efetuadas com o esclerômetro do pêndulo (Tabela 18), verificam-se semelhanças entre as argamassas com metacaulim (50M-1/3) e com pó cerâmico (50PC-1/3), mostrando ambos os revestimentos Índice Esclerométrico (IE) médio de 43, com coeficientes de variação de 11% e 15%, respectivamente. São valores relativamente elevados que permitem questionar a eficiência desta técnica de ensaio para avaliar o comportamento das argamassas aplicadas. Ressalta-se, no entanto, que esses resultados de coeficientes de variação estão próximos dos 19%, encontrados por Flores-Colen (2009), em argamassas *in situ*. Apesar disto, os resultados mostram coerência quanto à resistência esperada das distintas argamassas estudadas na presente pesquisa. Segundo os limites estabelecidos pela RILEM, para composições com base cimentícia, as argamassas de referência e com cinzas volantes analisadas são muito fracas para aplicação em juntas. Em contrapartida, as composições com metacaulim e pó cerâmico atendem a este fim.

A comparação com valores obtidos nestes ensaios em estudos anteriores (TAVARES et al., 2008; VEIGA et al., 2009) mostra que os parâmetros obtidos para as argamassas com metacaulim e com pó cerâmico, elaboradas nesta pesquisa, são da mesma ordem de grandeza dos encontrados para argamassas antigas degradadas (pouco coesas), IE = 37, ou de argamassas de cal recente (ainda pouco carbonatada), IE = 50.

6.2.1.8 Permeabilidade à água sob baixa pressão

Os resultados individuais do ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão, obtidos aos 28 e 90 dias, nos painéis experimentais da Igreja de Monserrate estão registrados, respectivamente, nos Quadros D.7 e D.8 do Apêndice D. A Figura 73 ilustra, graficamente, esses resultados.

Figura 73 – Ensaio com tubos de Karsten nos painéis experimentais da igreja



Fonte: Elaboração própria (2018).

As curvas resultantes do ensaio de tubos de Karsten mostram permeabilidade reduzida das argamassas com adições, sobretudo com pó cerâmico, em relação à composição de referência. Uma possível explicação para a taxa de absorção lenta da composição com pó cerâmico é uma parcial saturação devido à secagem deficiente, evidenciada pelo alto teor de umidade (10-12%, conforme indicado na Tabela D.30 do Apêndice D). A caracterização laboratorial no que concerne ao comportamento à água é incongruente com os valores obtidos *in situ*.

A maior permeabilidade à água é fato habitual para composições tradicionais, com ligante majoritariamente à base de cal. Nas argamassas com metacaulim (50M-1/3) e com cinzas volantes (50CV-1/3), a absorção de água é intermediária entre a da argamassa de referência e a que contem pó cerâmico.

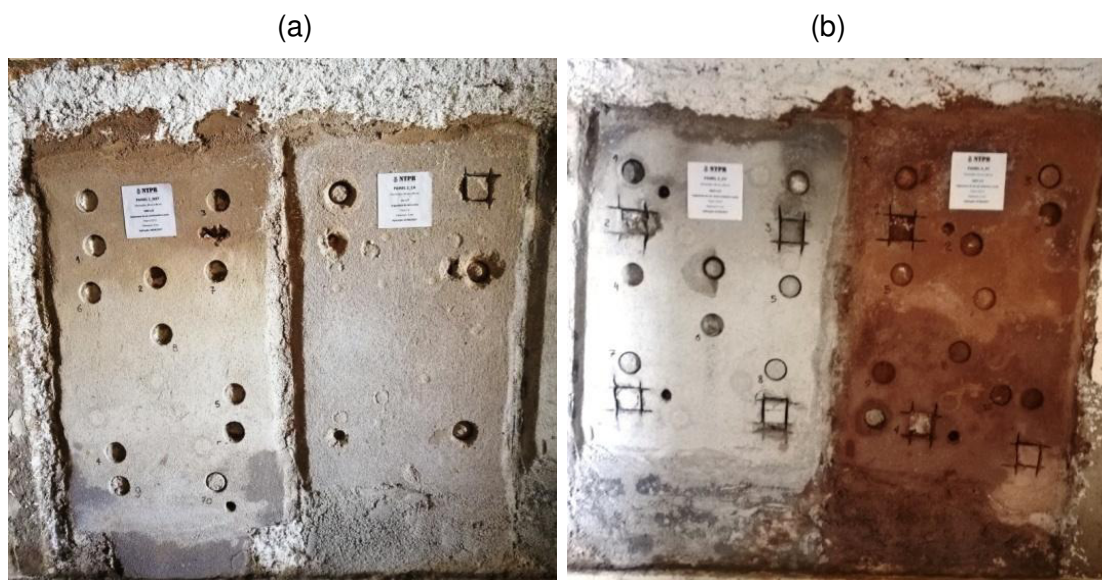
Observou-se, também, ligeira diminuição da absorção de água entre os 28 e 90 dias, possivelmente pela alteração da porosidade e da microestrutura das argamassas devido à formação de novos produtos oriundos das reações (carbonatação e pozolânica). Aos, 90 dias, a argamassa com cinzas volantes mostra valores de absorção de água bastante próximos dos obtidos pelas argamassas com pó cerâmico.

6.2.1.9 Exposição natural: avaliação das características visuais

No que diz respeito à avaliação das características visuais das argamassas aplicadas na Igreja, observou-se, inicialmente, bom aspecto. No entanto, passado algum tempo, no painel com argamassa de pó cerâmico notaram-se algumas manchas de tonalidade escura, cuja origem pode ser atribuída a fatores, tais como: tempos de secagem diferenciados na argamassa, que promovem heterogeneidade no aspecto da argamassa, e/ou a concentração de sais higroscópicos em determinadas áreas, favorecendo a retenção de água em teores mais elevados.

Na Figura 74, visualizam-se os painéis experimentais aplicados na parede da Igreja. No que tange à avaliação da cor das argamassas, verificou-se que, no período observado, desde a aplicação até os seis meses de idade, não houve alterações importantes, admitindo-se estar perante revestimentos com tonalidades estáveis. Para uma avaliação mais segura, sugere-se a verificação desta característica em idades mais avançadas.

Figura 74 (a, b) – Aspecto geral dos painéis experimentais, aos seis meses



Fonte: Foto da Autora (2017).

Não se observaram fissuras nos revestimentos aplicados nos painéis quer durante os primeiros dias (período em que pode ocorrer retração mais significativa da argamassa), quer no período restante de observação.

A Figura 75 ilustra o pormenor do painel experimental de argamassa com pó cerâmico, com seis meses de idade. Particularmente na composição com pó cerâmico, foi registrada a ocorrência de eflorescências, provavelmente, devido à existência de cal livre e também em virtude do contato com a água que sobe pela alvenaria por capilaridade, rica em sulfatos ou cloretos. A alteração das condições ambientais constitui um dos fatores que pode contribuir para a maior dissolução e cristalização dos cristais de sais no interior dos poros dos materiais, dando origem às eflorescências. Apesar disto, é importante ressaltar que é mais favorável para a durabilidade das paredes que os sais cristalizem à superfície dos revestimentos (eflorescências), não no interior das alvenarias (criptoeflorescências).

Figura 75 – Pormenor do painel argamassa de pó cerâmico, aos 6 meses



Fonte: Foto da Autora (2017).

De forma a aferir a tendência para deposição de sais, foram extraídas amostras das argamassas aplicadas nos painéis da igreja, com nove meses de idade, para determinação do teor em sais. Foram realizadas análises qualitativas e quantitativas dos sais no NTPR. A análise quantitativa foi feita por meio do Espectrofotômetro digital para análise de soluções aquosas, modelo B572A, da Micronal.

A partir das análises qualitativas e quantitativas, foi detectada a presença de nitratos, cloretos e sulfatos em todas as argamassas dos painéis conforme a Tabela D.32 do Apêndice D. A ocorrência desses sais está atribuída, provavelmente, à contaminação das espessas paredes da igreja e à proximidade do mar. De modo

geral, verificaram-se teores elevados de íons nitratos e cloretos nas formulações com adições (50M-1/3, 50PC-1/3 e 50 CV-1/3) e baixa concentração destes sais na argamassa de adição (CA-1/2). Os sulfatos estão presentes nas composições com metacaulim e com pó cerâmico e ausentes, ou presentes em teores muito reduzidos, nas argamassas de referência e com cinzas volantes.

Quanto aos protótipos, expostos no ambiente exterior da igreja, decorridos seis e nove meses após a sua confecção, concluiu-se, da observação efetuada, que nenhuma composição apresentou fissuração ou degradação. As Figuras 76 e 77 ilustram as argamassas aplicadas sobre os protótipos de alvenaria, em ensaio de exposição natural, no exterior da Igreja de Monserrate.

Figura 76 – Composições estudadas, em exposição natural, aos 6 meses



Fonte: Foto da Autora (2017).

Figura 77 – Composições estudadas, em exposição natural, aos 9 meses



Fonte: Foto da Autora (2018).

6.2.2 Análises comparativas

As Tabelas 19 e 20 e o Quadro 36 apresentam valores comparativos da argamassa de referência CA-1/2 com as que contêm adições, elaboradas no âmbito desta pesquisa e selecionadas para estudo mais aprofundado: 50M-1/3; 50PC-1/3; 50SA-1/3 e 50CV-1/3.

Para comparação, foi utilizada a argamassa de referência CA-1/2. Na Tabela 19, encontram-se as características determinadas na primeira fase e, na Tabela 20 e no Quadro 36, as características determinadas na segunda fase de caracterização do estado endurecido.

Tabela 19 – Análise comparativa das características determinadas na primeira fase

Composição	Massa específica (pesagem hidrostática)	Porosidade Aberta (vácuo)	Módulo de elasticidade (E)	Resistência à tração (R _T)	Resistência à compressão (R _C)	Coefficiente de capilaridade (5min)	Coefficiente de capilaridade (90-10min)	Água absorvida por unidade de área, em 24h
Idade: 90 dias	Kg/m ³	(%)	MPa		Kg/m ² .min ^{1/2}		kg/m ²	
CA-1/2	1769	30,4	3382	0,2	0,6	1,2	2,0	34
50M-1/3	1771	32,3	2000	0,4	1,2	2,2	2,0	42
50PC-1/3	1798	32,0	3356	0,4	0,7	2,3	2,2	35
50SA-1/3	1748	31,2	1203	1,5	1,5	2,5	2,8	40
50CV-1/3	1806	29,6	5653	0,7	1,0	1,4	1,6	30
Comparação com a composição de referência								
50M-1/3	superior	superior	inferior	superior	superior	superior	similar	superior
50PC-1/3	superior	superior	inferior	superior	superior	superior	superior	superior
50SA-1/3	inferior	superior	inferior	superior	superior	superior	superior	superior
50CV-1/3	superior	inferior	superior	superior	superior	superior	inferior	inferior

Fonte: Elaboração própria (2018).

Tabela 20 – Análise comparativa das características determinadas na segunda fase. Dados obtidos em laboratório

Composição	Carbonatação	Espessura da camada de ar equivalente (S _d)	Permeabilidade ao vapor	Cloretos retidos	Variação de massa no ensaio de resistência aos cloretos			Variação de massa no ensaio de resistência aos sulfatos		
					c.7	c.33	c.55	c.5	c.10	c.14
Idade: 90 dias	%	m	x10 ⁻¹¹ kg/(m.s.Pa)	%	%			%		
CA-1/2	83	0,18	1,65	3,4	6,3	10,2	10,2	2,07	2,81	-9,17
50M-1/3	72	0,16	1,81	4,0	8,0	12,2	12,0	2,7	3,7	-27,4
50PC-1/3	100	0,14	2,26	3,5	6,2	10,9	10,9	1,87	2,75	-56,91
50SA-1/3	85	0,17	1,8	3,9	6,9	12,1	11,7	2,56	-36,68	-68,75
50CV-1/3	100	0,18	1,62	2,8	4,5	8,6	8,8	1,82	2,59	-13,39
Comparação com a composição de referência										
50M-1/3	inferior	inferior	superior	superior	superior	superior	superior	superior	superior	inferior
50PC-1/3	superior	inferior	superior	superior	inferior	superior	superior	inferior	inferior	inferior
50SA-1/3	superior	inferior	superior	superior	superior	superior	superior	superior	ruptura	inferior
50CV-1/3	superior	similar	inferior	inferior	inferior	inferior	inferior	inferior	inferior	inferior

Fonte: Elaboração própria (2018).

Quadro 36 – Análise comparativa das características determinadas na segunda fase. Dados obtidos nos painéis da Igreja de Monserrate (90 dias)

Composição	Resistência de aderência		Resistência superficial	Permeabilidade à água sob baixa pressão
	Valor obtido	Tipo de ruptura	Índice esclerométrico	Diferença de leituras entre o 5º e o 15º min (cm ³)
Idade: 90 dias	MPa	-	IE	
CA-1/2	n.d.	n.d.	0	1,5
50M-1/3	0,09	coesiva/adesiva	43	0,5
50PC-1/3	0,14	coesiva/adesiva	43	0,0
50SA-1/3	Argamassa não aplicada			
50CV-1/3	0,27	coesiva/adesiva	0	0,1
Comparação com a composição de referência				
50M-1/3	Sem valores comparativos		superior	inferior
50PC-1/3			superior	inferior
50SA-1/3			-	-
50CV-1/3			similar	inferior

Fonte: Elaboração própria (2018).

A análise das Tabelas 19 e 20 e do Quadro 36 permite extrair as seguintes considerações:

No que tange à **massa específica**, a maioria das composições apresentou valores superiores ao registrado pela argamassa de referência, excetuando a que contém sílica ativa. A maior compactação das argamassas pode ser atribuída à presença das partículas finas de adição, que preenchem os vazios existentes entre as partículas maiores do agregado. Na composição com sílica ativa, a maior quantidade de água introduzida na mistura fresca (cerca de 19% em relação à massa seca), com fim de garantir trabalhabilidade, terá favorecido à maior perda de água, por evaporação, em relação às demais composições, determinando uma menor densidade.

Quanto à **porosidade**, constata-se valor superior das argamassas com adição de metacaulim, pó cerâmico e sílica ativa em relação ao apresentado pela composição padrão de cal aérea. Contrariamente, as argamassas com cinzas volantes apresentam porosidade inferior à da composição de referência. A maior quantidade de água introduzida nas misturas com adições de metacaulim, pó cerâmico e sílica ativa poderá ter influência no acréscimo da porosidade aberta, parâmetro que se relaciona diretamente com outras características, tais como: resistência mecânica, capilaridade, permeabilidade e resistência aos cloretos.

Relembra-se que na composição com cinzas volantes a quantidade de água usada na mistura foi bastante reduzida.

Os valores médios do **módulo de elasticidade** obtidos pelas composições com adição de metacaulim, pó cerâmico e sílica ativa são inferiores aos registrados pela argamassa de cal aérea. As argamassas com cinzas volantes apresentaram valores superiores aos da composição de referência, indicando alta rigidez. Os elevados valores de módulo de elasticidade obtidos para as formulações de referência e com cinzas volantes poderão estar relacionados a diversos aspectos, entre os quais, eventuais erros que possam ter acontecido por ocasião da realização do ensaio de ultrassom.

Os valores de **resistência à tração por flexão e à compressão** registrados pelas argamassas com qualquer tipo de adição são superiores ao apresentado pela argamassa de cal sem adição.

No que se refere à **velocidade de absorção capilar inicial**, expressa pelo coeficiente de capilaridade, verifica-se, aos cinco minutos, que as argamassas com adição (de metacaulim, pó cerâmico e sílica ativa) absorvem água mais rapidamente que as composições de referência. A velocidade de absorção da composição com cinzas volantes, aos cinco minutos, é similar à da cal aérea. No que respeita a **quantidade total de água absorvida por capilaridade**, as argamassas com adições, excetuando a que contem cinzas volantes, são mais absorventes que a argamassa de referência. Portanto, a argamassa com cinzas volantes absorve água mais lentamente que a composição de referência, além de absorver menor quantidade de água em 24 horas em relação às demais, comportamento que pode estar associado às características de porosidade das composições.

Em termos de **evolução da carbonatação**, verifica-se que a argamassa com metacaulim carbonata mais lentamente que a composição de referência. As demais composições com adições evoluem rapidamente em relação à carbonatação.

Em relação à **permeabilidade ao vapor de água**, inversamente proporcional à **espessura da camada de ar de difusão equivalente**, os resultados parecem indicar uma menor permeabilidade ao vapor da argamassa de referência e da que contem cinzas volantes, e maior permeabilidade (ou facilidade de secagem por evaporação) das argamassas elaboradas com adições de metacaulim, de pó cerâmico e de sílica ativa. Ressalta-se que todas as argamassas apresentaram valores muito superiores aos limites aceitáveis estabelecidos por Veiga ($S_d > 0,08$).

Fatores relacionados à realização do ensaio de permeabilidade ao vapor podem ter influenciado a obtenção dos resultados, entre os quais se destacam as dimensões das cápsulas e dos corpos de prova utilizados, assim como as condições de armazenamento e condicionamento, durante o ensaio, distintas das requeridas pela norma.

Em termos de percentagem de **cloretos retidos**, constata-se uma maior retenção por parte das composições elaboradas com adição de metacaulim, de sílica ativa e de pó cerâmico, comparativamente à argamassa de cal padrão. A composição com cinzas volantes retém menor quantidade de cloretos que a argamassa de referência. Os percentuais de cloretos retidos para as composições analisadas, após imersão durante o período de 24 horas, correlacionam-se diretamente com os valores de porosidade aberta. Composições mais porosas, maior retenção de sais; composições menos porosas, menor retenção de cloretos.

Quanto à **resistência à ação de cloretos**, de modo geral, todas as formulações estudadas, independentemente do tipo de adição, apresentaram muito bom comportamento. Praticamente, não ocorreu perda de massa em nenhuma composição, ao longo dos ciclos de ensaio. As variações de massa registradas, sempre positivas, podem ser atribuídas ao aumento da cristalização dos sais cloretos. As composições elaboradas com metacaulim e sílica ativa apresentam ganho de massa superior à registrada pela argamassa de referência. As argamassas confeccionadas com pó cerâmico registram ganho de massa similar ao apresentado pela argamassa de cal aérea padrão. De todas as formulações analisadas, a que contém cinzas volantes é a que mostra melhor comportamento face à ação dos cloretos, com menor ganho de massa, muito possivelmente devido à sua reduzida porosidade aberta, que implicou em baixa percentagem de cloretos retidos, comparativamente às outras composições estudadas.

No que tange à **resistência à ação dos sulfatos**, a argamassa de referência atinge o término do ensaio (14^o ciclo) com perda de massa inferior às das argamassas com adição, o que traduz o melhor comportamento da primeira comparativamente às demais. Entre estas últimas, sobressaem as composições com cinzas volantes, com superior resistência aos sulfatos, e as que contem sílica ativa com pior comportamento à ação destes sais. As composições com metacaulim e com pó cerâmico mostram comportamento intermediário entre as argamassas analisadas anteriormente. O bom comportamento das argamassas com cinzas

volantes à ação dos sulfatos pode encontrar justificativa em três aspectos: i) na “relativamente” boa resistência mecânica observada, quando comparada à da argamassa de referência; ii) na produção, nestas argamassas, de menor quantidade de compostos suscetíveis de ataque expansivo por sulfatos e, também, iii) na baixa porosidade aberta das argamassas com cinzas, comparativamente à das restantes argamassas analisadas, o que pode indiciar menor retenção de sulfatos. A reduzida resistência à ação dos sulfatos da composição contendo sílica ativa (que se mostra mais resistente mecanicamente que as demais) pode ser atribuída, entre outras causas, à maior retenção de sulfatos devido à elevada porosidade aberta. Adicionalmente, a extensa formação de compostos suscetíveis ao ataque por sulfatos, em decorrência da própria constituição da matéria-prima (de elevada atividade pozolânica e que foi sujeita a forte tratamento térmico) pode justificar o desempenho inferior dessas argamassas face à ação desses sais.

Sob o aspecto da **resistência de aderência**, a análise comparativa com a composição de referência elaborada não foi realizada diante da impossibilidade de realizar incisões no revestimento. A argamassa com cinzas volantes foi a que mostrou melhor resultado, comparativamente às demais composições com adições analisadas. Além de apresentar tipo de ruptura predominantemente coesiva pelo revestimento, pode-se considerar aceitável a resistência potencial de aderência obtida para a argamassa com cinzas volantes, no que tange a suportes antigos.

No que se refere à **resistência superficial**, verifica-se comportamento similar entre as composições de referência e com cinzas volantes, que evidenciam menor coesão superficial (dureza fraca) do que as composições com metacaulim e com pó cerâmico, de “dureza normal”, segundo a classificação estabelecida para argamassa de junta com base cimentícia. Não é de se descartar a influência que o menor grau de carbonatação das argamassas pode exercer nos valores obtidos com o esclerômetro de pêndulo.

Em termos de **permeabilidade à água a baixa pressão**, os valores obtidos (aos 28 e 90 dias) mostram que as argamassas com adições são menos permeáveis do que a composição de referência. Com o avançar da idade, é possível que haja modificação desta característica nas argamassas, em consequência das modificações na microestrutura interna durante as reações pozolânicas e de carbonatação.

6.2.3 Análise global das argamassas estudadas

A análise dos dados obtidos nos ensaios possibilitou uma avaliação global das formulações estudadas conforme as possibilidades de uso em intervenções restaurativas (Tabela 21).

Tabela 21 – Avaliação geral das características das argamassas estudadas

Argamassa com adição	Característica avaliada																	
	Resistência à tração	Resistência a compressão	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de capilaridade	Porosidade	Permeabilidade ao vapor	Resistência aos cloretos	Resistência aos sulfatos	Aderência	Resistência superficial	Permeabilidade à baixa pressão	Aspecto final						
Metacaulim	Atende	Atende	Atende	Não atende	Atende medianamente	Atende	Atende medianamente	Atende medianamente	Atende medianamente	Atende	Atende medianamente	Atende						
Pó Cerâmico	Atende	Atende	Atende	Não atende	Atende medianamente	Atende	Atende medianamente	Atende medianamente	Atende medianamente	Atende	Atende	Não atende						
Cinzas Volantes	Atende	Atende	Não atende	Atende	Atende	Atende medianamente	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende						
Sílica Ativa	Não atende	Atende	Atende	Não atende	Atende medianamente	Atende	Atende medianamente	Não atende	Não avaliada									
Legenda:																		
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black;"></td> <td>Atende</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></td> <td>Atende medianamente</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></td> <td>Não atende</td> </tr> </table>														Atende		Atende medianamente		Não atende
	Atende																	
	Atende medianamente																	
	Não atende																	

Da análise da tabela, é possível concluir que as formulações estudadas atendem parcialmente os requisitos mínimos de referência para uso em edificações antigas. Entre as composições, destaca-se a de cal com adição de cinzas volantes, que apresenta melhor desempenho mecânico, de comportamento à ação da água e aos sais, face às condições climáticas e ambientais características da região de Salvador.

7 CONCLUSÕES

O emprego de argamassas de cal, adicionadas de materiais com características pozolânicas, foi muito habitual entre os antigos construtores, sobretudo, nas situações em que as alvenarias estavam sujeitas a condições particularmente úmidas. O uso de material cerâmico moído, com o fim de conferir propriedades de resistência à ação da água, foi bastante destacado nos tratados escritos desde a época vitruviana (século I a.C.). No Brasil, durante o Período Colonial, referências a esse material em argamassas de cal constam nos documentos de obra dos engenheiros militares como solução para melhor resistir à água, bem como pelo incremento de sua resistência mecânica.

Apesar dessas evidências nota-se, no País, carência de estudo aprofundado sobre formulações à base de cal com adições, que se mostrem mais resistentes e adequadas do que as composições aplicadas, atualmente, nas alvenarias de valor histórico, sujeitas, sobretudo, a situações específicas de umidade. Nesse cenário, propôs-se, neste trabalho, investigar o uso de adições, com características pozolânicas e disponíveis nacionalmente, na produção de argamassas com base em cal, para aplicação em intervenções restaurativas.

Como visto no desenvolvimento desta tese, diversos aspectos necessitaram ser aprofundados para desenvolver formulações com as argamassas em questão, minimamente adequadas às intervenções restaurativas.

Inicialmente, para responder à questão central da pesquisa, relacionada à obtenção de uma argamassa com características de desempenho aceitáveis para aplicação em intervenções restaurativas, foi realizada, ampla **revisão da literatura** sobre diversos aspectos das argamassas com base em cal incorporadas com as referidas adições.

Nesse contexto, todo o conhecimento adquirido sobre os **materiais constituintes das antigas argamassas de cal**, as **adições pozolânicas** (utilizadas habitualmente pelos antigos construtores e de emprego mais recente) e suas **reações com a cal**, além dos aspectos relacionados aos **requisitos que devem cumprir as argamassas de substituição ou de reintegração**, foi de fundamental importância para ampliar o entendimento sobre as novas formulações de cal com adições, especialmente no que concerne às características necessárias ao bom

desempenho visando a sua aplicação em suportes antigos. Do mesmo modo, constituiu relevante contribuição o conhecimento adquirido, nas antigas fontes consultadas, sobre as construções nacionais do Período Colonial, onde, possivelmente, teriam sido usadas argamassas de cal incorporadas de adições.

Como visto ao longo da abordagem sobre os **materiais constituintes das antigas argamassas de cal (item 3.1)**, era constante a preocupação dos antigos tratadistas, desde o arquiteto romano Vitruvio (século I d.C.) aos outros autores que vieram a seguir, em explicitar recomendações sobre a seleção de materiais adequados à elaboração das argamassas de cal, seu modo de preparo e de aplicação. Naquela época, o principal ligante utilizado era a cal aérea, viva ou apagada (extinta). As areias habitualmente usadas para a construção eram de três espécies – de jazida, de rio ou de mar –, sendo a areia de rio destacada por Vitruvio como a mais apropriada para uso em reboco. No que diz respeito às proporções ideais dos componentes das argamassas, Vitruvio sugeria 1:3 (cal extinta : areia de jazida) ou 1:2 (cal extinta : areia de rio). Segundo esse autor, a adição de uma terceira parte de cerâmica moída e peneirada conferia, neste último caso, uma mistura de melhor qualidade.

Da síntese histórica sobre as **adições pozolânicas usadas na Antiguidade na produção das argamassas de cal (item 3.2)**, pôde-se concluir que, ao longo dos séculos, vários tipos de adições foram incorporados ao processo de confecção das argamassas visando melhorar as suas propriedades. Particularmente nas obras hidráulicas e nas situações de difícil acesso de dióxido de carbono do ar (CO_2), necessário à carbonatação da cal, eram incorporadas às misturas adições (naturais ou artificiais) que, combinadas com o hidróxido de cálcio, promoviam o endurecimento da cal aérea e conferiam às argamassas propriedades de resistência à água. Ao longo do tempo, observaram-se distintas técnicas de confecção e recomendações de aplicação de argamassas com o uso de adições, designadas pozolanas. As ditas adições eram constituídas, essencialmente, de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativas. No que se refere à elaboração de misturas de cal com óleo, com o fim de obter argamassa impermeável, era requerido o uso de pozolanas para acelerar o endurecimento, como ensina Villard de Honnecourt, arquiteto do século XIII. Até o início do século XIX, as misturas produzidas com pozolanas naturais ou artificiais eram designadas de argamassas pozolânicas. Nas citações dos autores, constavam, entre as pozolanas produzidas artificialmente, a cerâmica moída, as

cinzas de carvão, a escória de ferro, o carvão fóssil, o pó de carvão vegetal moído (cinzas de madeira), entre outros materiais. No Brasil, relatórios de obra da época colonial e documentos antigos reforçam a hipótese sobre o uso de adição de material cerâmico na elaboração de argamassas de cal. Alguns aspectos foram abordados acerca dos **primeiros conhecimentos referentes às reações pozolânicas (item 3.3)**, revelando que, embora o uso das adições fosse bastante comum na antiguidade, a elucidação científica em relação à causa da hidráulidade das argamassas ocorreu somente no século XIX, a partir das observações atentas do investigador e engenheiro Louis Vicat sobre a correspondência entre as reações oriundas da combinação dos três elementos (cal, sílica e alumina) e o endurecimento progressivo da argamassa dentro d'água.

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre possíveis alternativas de adições para uso em argamassas de cal destinadas ao restauro, foram pesquisados diversos aspectos de **adições pozolânicas de utilização mais recente (item 3.4)**, que têm sido aceitas ou que ainda estão sendo investigadas para o emprego em formulações de argamassas de cal destinadas, principalmente, a paredes de edificações antigas. Incluíram-se, entre as adições para estudo, além do pó cerâmico, o metacaulim, a sílica ativa e as cinzas volantes.

A partir da pesquisa desenvolvida, pôde-se perceber que a inclusão de **adições com características pozolânicas** nas argamassas de cal tem mostrado, de forma genérica, influência positiva nas suas propriedades. As principais observações da literatura consultada sobre esse tema mostraram que: i) a adição de pó cerâmico melhora as propriedades das argamassas de cal destinadas à reabilitação de edificações; ii) nas argamassas com metacaulim, verifica-se melhora das características nos estados fresco e endurecido, principalmente no que concerne ao ganho de resistência nas primeiras idades e na resistência mecânica e à ação da água; nessas argamassas, a garantia de condições de umidade, por período inicial prolongado, favorece a reação pozolânica antes da carbonatação total da cal aérea; iii) a incorporação das cinzas volantes nas composições com base em cal influencia, positivamente, o comportamento no estado fresco – o formato esférico das partículas de cinzas volantes é vantajoso, especialmente sob o ponto de vista da exigência de água para confecção da mistura e da melhora da trabalhabilidade – e no estado endurecido, sob a ótica da melhora da resistência mecânica; iv) a atuação da sílica ativa, especificamente em argamassas de cal, é um tema que carece de

estudo, muito embora seja bem conhecida a sua influência positiva nas propriedades reológicas e no desempenho mecânico de concreto e argamassas de base cimentícia.

Relativamente às **reações pozolânicas (item 3.5)** nas argamassas com base em cal e adição, foi possível compreender melhor a influência dos diversos produtos (fases ou compostos hidratados) resultantes da interação da sílica e da alumina com o hidróxido de cálcio no desempenho da composição, sobretudo no estado endurecido. Entre os principais produtos oriundos de reações pozolânicas presentes nas argamassas de cal com adição de caráter pozolânico, incluem-se os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), os aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H), os sílico-aluminatos de cálcio hidratado (C-A-S-H) e os monocarboaluminatos (C-A-C-H). Constatou-se que, nem sempre, os compostos formados a partir das reações pozolânicas trazem efeitos benéficos às argamassas de cal; por exemplo, fases instáveis, como os monocarboaluminatos, encontradas nas composições de cal com pozolanas artificiais, podem contribuir para o decréscimo da resistência mecânica. Deste estudo, observou-se, ainda, que a rapidez com que se processa a combinação da sílica e da alumina com a cal difere entre os materiais pozolânicos e nela interferem fatores como finura, área superficial específica, composição mineralógica, temperatura de calcinação da adição, entre outros. Por fim, do estudo efetuado, depreendeu-se que constitui aspecto importante para um material pozolânico, avaliar o seu grau ou índice de atividade pozolânica por meio de ensaios mecânicos e técnicas analíticas, que permitam estimar a taxa de combinação com a cal, além de identificar os produtos, ou fases, formados durante as reações pozolânicas.

A seção desta tese específica sobre os **Requisitos que devem cumprir as argamassas destinadas ao restauro (item 3.6)** evidenciou os princípios, bastante destacados na literatura atual, que devem orientar as estratégias de intervenção sobre edificações antigas, com valor cultural. Particularmente no que diz respeito às argamassas de renovação, enfatizam-se aspectos, tais como: i) o uso de componentes mais próximos dos revestimentos originais, para garantir autenticidade; ii) o cumprimento de requisitos funcionais mínimos para atestar compatibilidade, sobretudo quanto às características mecânicas e de comportamento à ação da água; e iii) a avaliação do aspecto estético (aparência) final do revestimento aplicado como fator decisivo para a Conservação do

Patrimônio. Os requisitos funcionais estabelecidos pelos autores para as argamassas de restauro referem-se, principalmente, às características de comportamento mecânico (resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade ou deformabilidade, aderência) e à ação da água (absorção e secagem, permeabilidade ao vapor).

A propósito, essa última abordagem fundamentou o desenvolvimento experimental desta tese em duas linhas de estudo: a primeira é relacionada ao conhecimento da composição de argamassas antigas de fortificações de Salvador, com vista à identificação de eventuais adições que tenham sido usadas na sua confecção; e a segunda, relativa à avaliação de desempenho de argamassas de cal elaboradas com adições pozolânicas para uso em restauro.

As principais conclusões extraídas do estudo experimental realizado estão explicitadas a seguir.

Argamassas das fortificações de Salvador

A caracterização de antigas argamassas de cal de fortificações de Salvador permitiu compreender, de forma global, aspectos da composição e extrair conclusões acerca da utilização de adições de caráter pozolânico nessas argamassas.

Quanto à composição, foi possível constatar, nas argamassas estudadas, a presença de: i) compostos hidratados como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, oriundos das reações de caráter pozolânico entre a cal e o componente pozolânico; ii) compostos de degradação como os cloroaluminatos e os sulfoaluminatos, o que é consistente com o ambiente agressivo onde estão situadas as fortalezas; iii) etringita, composto fortemente expansivo, que provoca deterioração do material; e, ainda, iv) compostos provavelmente responsáveis pela durabilidade das argamassas, como os zeólitos (aluminossilicatos hidratados).

Relativamente às argamassas que apontaram fortes indícios da presença de adições de caráter pozolânico, estas são, em sua maioria, de assentamento, o que era de se esperar, já que devem apresentar melhores propriedades mecânicas e de comportamento à ação da água. Entre as argamassas antigas estudadas, destacou-se um caso particular de revestimento de pavimento exterior, com provável adição pozolânica, o que corroborou as informações da literatura quanto ao uso de materiais desta natureza pelos antigos, objetivando melhorar o desempenho em

situações especiais, como a identificada na fortaleza analisada.

A confirmação das evidências sobre o uso dessas adições, além de constituir dado importante para a historiografia da construção antiga nacional – ligada à história da arte, da ciência e da tecnologia –, será útil para fundamentar eventuais trabalhos de manutenção e conservação das edificações estudadas, particularmente no que diz respeito à formulação de argamassas de cal para reparação, adequadas à aplicação em alvenarias antigas.

Às conclusões extraídas acrescentam-se, ainda, as contribuições que os dados obtidos oferecem para apoiar eventuais trabalhos de conservação nas edificações objeto de estudo ou em outras com características similares. Sob este último aspecto, vale lembrar a atenção especial que tem sido dada, nos últimos anos, por especialistas da área de restauro, à importância do uso de matéria-prima mais próxima da original nas reparações, após avaliação da sua adequabilidade.

Adições usadas nas novas formulações

A análise dos aspectos físicos, químicos, mineralógicos e microestruturais das adições selecionadas (pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa), para elaboração das novas formulações, permitiu explicar características gerais desses materiais, com base nos conceitos abordados na literatura.

A verificação do desenvolvimento da atividade pozolânica contribuiu para avaliar, de forma mais precisa, a função que o material irá desempenhar na argamassa de cal, como material pozolânico (reativo) ou inerte. As conclusões sobre o possível emprego dessas adições nas argamassas de cal destinadas às intervenções de restauro tiveram em conta os requisitos técnicos para classificação como material pozolânico, preconizados pelas normativas nacionais atuais.

Muito embora as adições estudadas não atendam à generalidade dessas exigências específicas (que, na verdade, estão muito mais direcionadas para uso em conjunto com o cimento), concluiu-se que muitos resultados obtidos ficaram próximos dos limites aceitáveis das características satisfatórias, é provável que possam desenvolver atividade pozolânica de forma aceitável em argamassas com base em cal.

Foi possível concluir, também, que o pó cerâmico usado nesta pesquisa, pelas características apresentadas e pelo elevado teor em matéria orgânica (material inerte), exerce função de enchimento nas argamassas (efeito filer). Dessa forma,

eventual aumento de resistência de argamassas elaboradas com essa adição possivelmente está associado ao efeito filer e não, propriamente, ao desenvolvimento de atividade pozolânica.

Argamassas de cal formuladas com adições

O estudo de argamassas de cal, formuladas com diferentes adições pozolânicas, permitiu avaliar aspectos de comportamento e verificar a compatibilidade dessas argamassas em suportes antigos.

De forma geral, as observações realizadas com as argamassas de cal formuladas no presente estudo revelaram melhora no comportamento mecânico, quando incorporadas adições de metacaulim, de pó cerâmico, de sílica ativa ou de cinzas volantes. Quanto ao comportamento à ação da água, as argamassas com metacaulim, pó cerâmico e sílica ativa mostraram desempenho bastante similar: absorvem rapidamente água por capilaridade e são muito absorventes, o que pode ser prejudicial para a proteção ao suporte. Indicam, ainda, permeabilidade ao vapor superior à da composição de referência. Todas as argamassas se comportaram bem em face da ação dos cloretos. Quanto ao comportamento à ação dos sulfatos, a argamassa contendo sílica ativa mostrou pior resultado.

A argamassa de cal com cinzas volantes (50CV-1/3) tem comportamento singular em relação às demais argamassas elaboradas com adições: além da melhora da trabalhabilidade no estado fresco, propiciada pela esfericidade dos grãos das cinzas volantes, mostrou, no estado endurecido, bom desempenho em face da ação da água (no que se refere à absorção de água), boa resistência mecânica, adequada aderência (com ruptura coesiva), além de boa resistência à ação dos sais solúveis. A presença constante de silicato de alumínio, produto originado pela reação de caráter pozolânico entre a cal e os constituintes mais reativos das cinzas volantes, influencia positivamente a durabilidade dessa argamassa; lembrando que o silicato de alumínio constitui um dos compostos presentes na composição de grande parte das argamassas dos fortes estudados nesta pesquisa. Essa argamassa, depois de exposta pelo período de um ano, ao ambiente marinho, não apresentou manchas, fissuras, eflorescências, pulverulência ou qualquer outro tipo de alteração relevante. Um aspecto que precisa ser aprofundado relativamente à argamassa com cinzas volantes, refere-se à característica de deformabilidade, em virtude dos valores elevados valores de módulo de elasticidade que apresentou.

Concluiu-se, deste estudo, que as composições com pó cerâmico, sílica ativa e metacaulim apresentaram desempenho global pouco satisfatório quanto às características pretendidas para utilização e aplicação em alvenarias de edifícios antigos. Sob esse aspecto, a argamassa contendo cinzas volantes mostrou-se mais adequada com: i) resistência mecânica razoável para não se “esfarelar” (ou se romper) quando aplicada, nem transmitir tensões elevadas ao suporte; ii) aderência suficiente para garantir durabilidade, mas não tão elevada que dificulte a sua extração da alvenaria antiga; iii) reduzida absorção de água inicial e baixa quantidade total de água absorvida, oferecendo boa proteção à parede; e iv) bom comportamento aos sais existentes no substrato. Se essa composição, por um lado, mostra baixa facilidade de secagem e de evaporação (aspecto avaliado por meio da permeabilidade ao vapor), por outro, tem como característica absorver pouca água. A elevada rigidez (revelada pelo alto módulo de elasticidade obtido nas experiências de laboratório) precisa ser mais bem avaliada, já que, na prática, a argamassa aplicada em obra mostrou, entre outros aspectos positivos, ausência de fissuras por retração nas primeiras idades, sugerindo amplo potencial para acomodar tensões internas e, portanto, boa capacidade de deformação.

Diante do exposto, considera-se que foram atingidos os objetivos delineados no início da pesquisa que se propunham a: i) analisar a composição de argamassas de antigas fortificações situadas em Salvador, identificando eventuais adições usadas na sua confecção; e ii) propor argamassas de cal, formuladas com adições pozolânicas, adequadas para as intervenções restaurativas.

➤ **Contribuições relevantes da pesquisa**

O trabalho realizado traz contribuições relevantes para o campo da Conservação e do Restauro de bens de interesse histórico e cultural, explicitadas a seguir.

- ✓ Resgata a memória da ciência da construção antiga no Brasil, evidenciando a amplitude e a profundidade das relações com as raízes portuguesas que a influenciaram;
- ✓ Amplia o conhecimento sobre a composição de antigas argamassas de cal, por meio de metodologia de caracterização, que envolve um conjunto de técnicas de análise que permitem confirmar ou esclarecer

informações sobre os compostos presentes;

- ✓ Constitui interessante aporte científico, mas também prático, pela sua aplicabilidade aos profissionais envolvidos com a temática, uma vez que os dados disponibilizados servirão como ferramenta de apoio às ações de intervenções restaurativas, especialmente no que concerne à elaboração de argamassas com base em cal formuladas com adições pozolânicas;
- ✓ Representa um incentivo à adoção de práticas sustentáveis, já que a incorporação de resíduos oriundos de desperdício ou de subprodutos de processos industriais, no setor da construção, contribui para a redução do impacto ambiental associado à sua destinação final.

➤ **Sugestões para trabalhos futuros**

Em consonância com o conhecimento adquirido e as análises efetuadas no âmbito desta tese, como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se linhas de pesquisas, que aprofundam os aspectos estudados e complementam o trabalho desenvolvido, conforme explicitado a seguir.

– Caracterização de argamassas de cal antigas:

- ✓ Continuar a sistematizar o conhecimento sobre as antigas argamassas de cal em relação aos aspectos de composição, características físicas e mecânicas, eventuais produtos de reação/degradação, entre outros, na perspectiva de utilizar esses dados em ações preventivas de conservação e manutenção, especificamente no que se refere à formulação de argamassas de renovação.

– Adições pozolânicas para incorporação em argamassas de cal:

- ✓ Selecionar adições não abordadas no presente trabalho, com disponibilidade de obtenção em território nacional, para avaliar, entre outros aspectos, a sua potencialidade como material pozolânico, a viabilidade econômica de utilização em formulações de argamassas de

cal destinadas ao restauro, além da redução do impacto ambiental;

- ✓ Melhorar o conhecimento sobre as características das cinzas volantes, em virtude dos resultados obtidos nesta pesquisa e da possibilidade de produção e comercialização deste material em território nacional;
- ✓ Ampliar o conhecimento sobre os métodos de determinação da fase vítrea (fase amorfa) do material, uma vez que esta é determinante para avaliar a eficiência da adição como material pozolânico;

– Novas formulações de cal com adições pozolânicas:

- ✓ Ampliar o estudo efetuado nesta tese para as outras dosagens de argamassas de cal com adições pozolânicas;
- ✓ Compreender melhor os aspectos sobre os compostos formados, ao longo do tempo, e a evolução da microestrutura das argamassas, visando o entendimento das alterações registradas, em diferentes idades;
- ✓ Aprofundar o conhecimento sobre o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, com corpos de prova com maiores dimensões, com o intuito de avaliar, com mais precisão, esta característica tão importante para as argamassas destinadas à aplicação em alvenarias antigas;
- ✓ Avaliar outras propriedades que poderão influenciar o comportamento das argamassas em idades mais avançadas e com diferentes condições de exposição;
- ✓ Analisar a influência do modo de preparo, aplicação e condições de cura das argamassas de cal, com adições pozolânicas, com vista a estabelecer recomendações para aplicação em obras de restauro.

Enfim, o presente trabalho, relacionado com a temática das argamassas de cal com adições pozolânicas, não se encerra aqui. As contribuições científicas fornecidas pelo estudo são importantes e representam grande incentivo para o desenvolvimento tecnológico de novos produtos no País. No entanto, ainda são necessários investimentos de modo a possibilitar a continuidade da investigação, por meio de novas tecnologias para aperfeiçoar as formulações de cal e oferecer opções mais adequadas que as adotadas, atualmente, nas intervenções restaurativas.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, P.; SILVA, A. S. *Caracterização de argamassas do período romano e árabe da Vila de Mértola*. Lisboa: LNEC, 2006.
- AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, v.53, n.1, p.15-19, 2011. Disponível em: <DOI:10.1016/j.clay.2011.04.005>. Acesso em: 24 jan. 2016.
- ALBERTI, L. B. *Da Arquitetura*. Organização e tradução de Sergio Romanelli. São Paulo: Hedra, 2009.
- ALMEIDA, D. C. *Desempenho de argamassas com sílica ativa em ambiente marinho*. 2007. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em:< http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/387/1/Dissertacao_David_Costa_de_Almeida_2007_Completa.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.
- ALVES, A., CARASEK H., CASCUDO, O. Influência da umidade do revestimento na resistência superficial avaliada por diferentes métodos de ensaio. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 3., 2010, Lisboa, Portugal. Lisboa:
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C897-00*: Standard Specification for Aggregate for Job-Mixed Portland Cement-Based Plasters, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- ARCOLAO, C. *Le ricette del restauro: malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*. Venezia: Marsilio Editori, 1998.
- ASHURST, J. *Mortars, plasters and renders in conservation*. London: Ecclesiastical Architects and Surveyors Association – EASA. 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NM18*: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). *NBR NM24*: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 45*: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 248*: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5751*: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5752*: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7200*: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211*: Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211*: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7215*: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9776*: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12127*: Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12653*: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13276*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13278*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13279*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13281*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13528*: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13956-1*: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13956-3*: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3:

Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13956-4*: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 4: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15259*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15630*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15839*. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15894-1*: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15894-2*: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 2 Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15894-3*: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 2 Parte 3 Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15895*: Materiais Pozolânicos – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS FABRICANTES DE ARGAMASSAS DA CONSTRUÇÃO (APFAC). Portugal, 2010. Disponível em:< http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2044_2010.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

BAILS, B. *De la arquitectura civil*. Madrid: Imprenta de la Viuda de D. Joaquin Ibarra. 1796.

BAKOLAS, A.; Biscontin G.; Moropoulou A.; Zendri E. Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, n.132, p.151-160, 1998.

BALDINUCCI, F. *Vocabolario toscano dell' art del disegno*. Firenze: Edizione Scelte. 1681.

BARATA, M. S. *Concreto de Alto Desempenho no Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim*. 1998. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARATA, M. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. *Ambiente Construído: Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v.1, n.1, p.69-78, jan./jun. 2002. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/31642>>. Acesso em: 24 jan. 2016.

BARATA, M. S. *Aproveitamento dos resíduos caulínicos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)*. 2007. 396f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Pará, Belém.

BARBARO, D. *I dieci libri dell'architettura di M. Vitruvio*. Tradutti et commentati da Monsignor Barbaro eletto patriarca d'Aquileggia. Venezia: Francesco Marcolini. 1556.

BARBOSA, F.R.; MOTA, J.M.F.; CARNEIRO, A.M.P. A influência do teor de adição de metacaulim nas propriedades no estado endurecido: capilaridade e resistência mecânica de argamassas inorgânicas para recuperação de monumentos históricos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC, 11, 2006, Florianópolis. Florianópolis: ENTAC, 2006. p.3965-3974. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_3965_3974.pdf>. Acesso em: 12 mar 2017.

BARONIO, G.; Binda L.; Lombardini N. The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction and Building Materials*, n. 11, p.33-40, 1997.

BARRETO, M.C.L. *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. 2010. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/4097>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

BRANCO, T.R.S. *Evolução e comparação das características de argamassa de cal aérea com adição de metacaulino*. 2013.179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/9657>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

BELIDOR, B.F. *La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e d'architettura civile di Belidor*. Trad. Luigi Masiere. Mantova: Presso Fratelli Negretti, 1832.

BOLOGNINI, L. *Il muratore reggiano*. Reggio Emilia: Davolio. 1778.

BUENO, B. P. S. *Desenho e desígnio: o Brasil dos Engenheiros Militares (1500-1822)*. São Paulo: EDUSP. 2001.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). *BS1199: Sands for external renderings and internal plastering with lime and Portland cement and floor screeds*. England, 1976.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). *BS EN 1015-19: Methods of test for mortar for masonry. Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars – Part 19*. England, 1999.

CAMPBELL, D. H.; FOLK, R. L. The ancient Egyptian pyramids-concrete or rock. *Concrete International*, v. 13, n.8, p. 29-44, 1991.

CAMOES, A. Betão eco-eficiente com reduzido teor de cimento. In: VELOSA, Ana; ROCHA, Fernando T.; CACHIM, Paulo (Ed.). *Metacaulino em Portugal: produção, aplicação e sustentabilidade*. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2013. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/15304/1/AiresCam%C3%B5es_Semin%C3%A1rio%20Metacaulino_UA.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2018.

CARASEK, H. *Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação*. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. Brasília: PECC/ANTAC, 2001. p. 43-67.

CARASEK, H.; COSTA, E.B.C.; ALVES, A.; MELO, T. Influência da umidade nas propriedades dos revestimentos de argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC, 12., 2008, Fortaleza–CE. Disponível em: < <http://www.infohab.org.br/entac2014/2008/artigos/A1878.pdf> >. Acesso em: 23 abr. 2018.

CARDIM, F. *Tratado da Terra e Gente do Brasil*. São Paulo: EDUSP, 1980.

CATANEO, P. *I quattro primi libri di architettura*. Venesa: Figliuoli di Aldo, 1554

CENNINO CENNINI, A. *Il Libro Dell'arte*. Transcrição e comentários de F. Brunello. Vicenza, Italia: Neri Pozza Editore, 1859.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT (CSTB). Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation: Modalités d'essais. *Cahiers du CSTB*, Paris, v.341, n. 2669-4, juil./ôût, 1993.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC). *Hydrofuges de surface: choix et mise en oeuvre*. Bruxelles, 1982. 24p. (Note D'Information Technique – NIT n. 140)

CERNY, R.; KUNCA, A.; TYDLITAT, V.; DRCHALOVA, J.; ROVNANIKOVA, P. Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, v. 20, n.10, p.849-857, 2006.

CESARIANO, Cesare. *De Architectura: Libri Decem*. Traslato e comentato de Cesare Cesariano. Como, Italia: Gottardo da Ponte, 1521

COSTA, E.; CARASEK, H.; ALMEIDA, S.; ARAÚJO, D. Modelagem numérica do ensaio de resistência de aderência à tração e revestimentos de argamassa. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG – CONPEEX, 3., 2006, Goiânia. *Anais eletrônicos...* Goiânia: UFG, 2006. n.p. 1 CD-ROM.

COUTINHO, A. S. *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1958.

D'AVILER, A. C. *Cours d'architecture*: qui comprend les orders de Vignole, avec les commentaires, les figures & descriptions de ses plus beaux bâtimens, & ceux de Michel-Ange [1699]. Paris: Jean Mariette, 1738.

DE AZEREDO, A. F. N. Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. *Materials and Structures*, v. 1, p. 1-12, 2014.

FARIA, P. *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas*: contribuição para o estudo da influência dos ligantes. 2004. 523f. Tese (Doutoramento em Engenharia)-Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/1129/3/faria_2004.pdf>. Acesso em: 18 abr 2017.

FARIA, P. *Caracterização de argamassas de cal e metacaulino*: procedimentos do projeto Metacal. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Nova de Lisboa (UNL), 2011.

FELIBIÉN, A. *Des principes de l'architecture: de la sculpture, de la peinture, et des autres arts qui en dependent*. Avec un dictionnaire des termes propres à chacun de ces arts. Paris: La Veuve et Jean Baptiste Coignard Fils, 1690.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. Characterization of Fly Ashes: potential reactivity as alkaline cements. *The Science and Technology of Fuel and Energy*. v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

FERREIRA, K.C.; CARDOSO, D.N.P.; SOUZA, J.A.; FELIPE, A.M.P.F. Estudos do comportamento físico, mecânico e reológico de argamassas de assentamento e revestimento com adição de rejeito de construção civil e cinzas volantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014, Cuiabá, MT. *Proceedings...* Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineering_proceedings/cobeq2014/1062-21272-174530.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.

FLORES-COLEN, I. *Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva*. 2009. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

FONSECA, J. J. S. *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza: UEC, 2002.

FORTES-REVILLA, C.; Martinez-Ramirez, S.; Blanco-Varela, M. Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables. *Cement & Concrete Composites*, v.28, n.5, p. 458-467, 2006.

FRÍAS, M.; CABRERA, J. Influence of MK on reaction kinetics: MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. *Cement and Concrete Research*, v.31, n.4, p. 519-527, 2001.

GALVÃO, J. *Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas*: esclerómetro e ultra-sons. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Instituto Superior Técnico da Universidade de Técnica de Lisboa, 2009.

GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA A. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochima Acta*, n. 535, p.36-41, 2002.

GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; FARIA, P.; GRILO, J., BRANCO, T.; VEIGA, R.; VELOSA A. Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. *Cement and Concrete Composites*, n. 45, p. 264-271, 2014.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Org.). *Métodos de Pesquisa*. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil(UAB)/UFRGS/SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOBBO, L. A. *Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland*. 2009. 273f. Tese (Doutoramento em Geociências)-Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Disponível em:< <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-23072009-144653/pt-br.php>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

GLEIZE, P.J.P.; MOTA, E.V.; SILVA, D.A.; ROMAN, H.R. Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). *Cement and Concrete Composites*, n. 31, p. 342-346, 2009.

GLEIZE, P.J.P.; ROMAN, H.R.; MULLER, A. Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n.2, p.171-175, Feb. 2003.

LUKHOVSKY, V. D. *Soil Silicates*. Kiev, USSR: Gostroiizdat Publish. 1959.

GRANIZO, M. L. *Activación alcalina de metacaolin: desarrollo de nuevos materiales cementantes*. 1998. Tesis (Doctorado en Química)-Departamento de Química Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid, 1998. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10486/667803>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

GRILO, J.; SANTOS SILVA, A.; FARIA, P.; GAMEIRO, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 287-294, 2014.

GRISELINI, F. *Dizionario delle Arti e de' Mestieri*. Compilato da Francesco Grisellini e continuato dall' abate Marco Frassadoni. Venezia: Modesto Fenzo, 1768.

GROOT, C.; BARTOS, P.; HUGHES, J. Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair. In: INTERNATIONAL BRICK/BLOCK MASONRY CONFERENCE, 12th., 2000, Madrid. Madrid, 2000. p. 815-827.

GROOT. C; VAN BALEN, K.; ELSEN J.; VAN HEES, R.P.J. RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry: The role of mortar in masonry: an introduction to the requirements for the design of repair mortars. *Materials and Structures*, n.45, p.1287-1294, 2012.

GUZZO, P.G.; D'AMBROSIO, A. *Pompeii: guide to the site*. Italia: Electa Napoli, 2002.

HAYEN, R.; VAN BALEN, K. Bridging theory and practice. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON REPAIR MORTARS FOR HISTORIC MASONRY, 2005, Delft, The Netherlands. *Proceedings...* The Netherlands, 2005. p.123-131. Disponível em: < <http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/pro067-012.pdf> >. Acesso em: 14 abr. 2018.

HONNECOURT, Villard. Album de dessins et croquis: 1201-1300, planche XLI, p.168. Disponível em: < <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b10509412z/f50.image> >. Acesso em: 17 jun. 2017.

HOPPE FILHO, J. *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto*. 2008. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19082008-172648/publico/TESE_DOUTORADO_JUAREZ_HOPPE_FILHO.pdf >. Acesso em: 2 ago. 2016.

HUGHES, J.J.; GROOT C.; VAN BALEN, K.; BICER-SIMSIR B. RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry: Performance requirements for renders and plasters. *Materials and Structures*, n. 45, p.1277-1285, 2012.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION (ISI). *IS1344*: Specification for calcined Clay pozzolana. 1981. Disponível em: <<https://archive.org/stream/gov.in.is.1344.1981/is.1344.1981#page/n7> >. Acesso em: 15 jan. 2018.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) *Métodos de ensaio para pedra natural*: determinação da resistência à cristalização de sais. Lisboa: IPQ, 2001. NP EN 12370:2001.

JAPIASSÚ, P. *Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos*. 2011. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. Disponível em:< <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/1339> >. Acesso em: 24 set. 2017.

JAPIASSÚ, P.; CARVALHO, P. E. F.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Argamassas com cal e metacaulim para a reabilitação de revestimentos de azulejo histórico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 10., 2013, Fortaleza. Fortaleza: SBTSA, 2013. Disponível em: <<http://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/541-argamassas-com-cal-e-metacaulim-para-reabilitacao-de-revestimentos-de-azulejo-historico?start=20>>. Acesso em: 18 set. 2016.

KULAKOWSKI, M. P. *Argamassa com adição de sílica ativa para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos*. 1994. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LORRIOT, A.-J. *Mémoire sur une découverte importante dans l'art de bâtir faite par le Sr. Lorient, mécanicien dans lequel l'on rend publique, par ordre de sa majesté, la méthode de composer un ciment ou mortier propre à une infinité d'ouvrages, tant pour la construction que pour la décoration*. Paris: L'Imprimerie Michel Lambert. 1774.

MAGALHÃES, A.; VEIGA, M. do R.; COSTA, D. Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio *in situ*: avaliação da resistência mecânica. In: ENCONTRO SOBRE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS – ENCORE, 3., 26-30 maio, Lisboa. *Anais...* Lisboa: ENCORE, 2003. p. 419-427.

MAGALHÃES, A.C.; VEIGA, M.R. e SANTOS SILVA, A. Argamassas antigas: produtos resultantes de reações químicas ao longo do tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS – SBTA, 9., 2011, Belo Horizonte. *Anais...*Belo Horizonte: SBTA, 2011.

MAGALHÃES, A. C.; MUÑOZ, Rosana; OLIVEIRA, Mário Mendonça de. O uso da mistura de cal viva e cal extinta nas argamassas antigas: o método Lorient.. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO LUSO-BRASILEIRA, 1., 2013, Vitória do Espírito Santo. *Anais...* Vitória-ES: CIHCLB, 2013.

MAGALHAES, A. C. ; MUÑOZ, R. ; ANDRADE, L. S. Argamassas de cal aérea com metacaulim para uso em alvenarias antigas: um estudo experimental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 12., 2017, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBTA, 2017.

MAGALHAES, A. C.; MUÑOZ, R. Formulações de Argamassas de Cal com Adições: técnicas tradicionais de confecção e aplicação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO LUSO-BRASILEIRA, 2., 2016, Porto, Portugal. *Anais...* Porto, 2016.

MAGALHAES, A. C.; MUÑOZ, R. O uso de adições em argamassas de cal para restauro. In: CONGRESO IBEROAMERICANO, 5.; JORNADA DE TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO, 13., 2017, La Plata. Locval: COIBRECOPA, 2017.

MALINOWSKI, R. Ancient mortars and concretes: aspects of their durability. In: HALL, A.; SMITH, N. (Org.). *History of technology*. UK: Continuum International Publishing, 1982. v.7, p.89-101.

MARGALHA, M. G. *Ligantes aéreos minerais: processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*. 2010. 426 f. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil)-Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

MARGON, P.V. *Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagens por curvas granulométricas*. 2002. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85898/196522.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 jan 2017.

MARTINI, Francesco di Giorgio. *Trattati di architettura civile militare di Francesco di Giorgio Martini architetto senese del secolo XV [1456]*. Transcrição de Cavaliere Cesare Saluzzo. Torino, Italia: Tipografia Chirio e Mina, 1861.

MARTIN, R. *Manuel d'Architecture Grecque*. Paris: A. Et J. Picard, 1965. v. 1, p.422.

MASSAZZA F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. (Ed.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London: Arnold, 1998. p. 471-631.

MATEUS, João Mascarenhas. *Técnicas tradicionais de construção de alvenarias: a literatura técnica de 1750 a 1900 para a conservação de edifícios históricos*. Lisboa: Livros Novos Horizontes, 2002.

MATIAS, Gina Maria Lourenço. *Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica*. 2014. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, jul. 2014.

- MATTEINI, M.; MOLES, A. *Ciencia y restauración: método de investigación*. Madrid: Editorial Nerea, 2001.
- MEDINA, E. A. *Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994.
- METZ, D. *Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo-RS, 2011.
- MILIZIA, Francesco. *Principj di architettura civile [1781]*. Bassano: Remondini di Venezia. 1785. t.I e II.
- MORAES, K. A. M. *Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável*. 2010. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5226>>. Acesso em: 10 fev. 2016.
- MOROPOULOU, A.; BAKOLAS A.; BISBIKOU K. Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, *Thermochimica Acta*, n.269/270, p. 779-795, 1995.
- MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E. Reverse Engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON REPAIR MORTARS FOR HISTORIC MASONRY, 2005, Delft, The Netherlands. *Proceedings...* The Netherlands, 2005. p. 278-291.
- MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; BISBIKOU, K. Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, n.1, p. 45-58, 2006.
- MOURA, P. G. T. *Reabilitação com argamassa projetada em construções históricas de pedra no litoral paraibano*. 2013. 160f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)-Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/15155/1/Tese%20PAULO%20GERMANO%20TOSCANO%20MOURA.pdf>>. Acesso em: 31 dez 2017.
- OLIVEIRA, M. M. *As fortificações portuguesas de Salvador quando cabeça do Brasil*. Salvador. Fundação Gregório de Mattos: OMAR G., 2004.
- OLIVEIRA, M. M. *Estabilização do Oratório da Cruz do Pascoal: Parecer Técnico*. Salvador: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), 2014.
- OLIVEIRA, M. M. From Vitruvius's ceramic powder additives to modern restoration. In: FIRST HISTORICAL MORTARS CONFERENCE, 2008, Lisboa. Lisboa: LNEC, 2008. v. 1, p. 795-806.
- OLIVEIRA, M. M. de; BARRETO, L. R. Estudo de argamassas antigas de cal: argamassa com aditivo de pó cerâmico. In: SEMINÁRIO ESTUDANTIL DE PESQUISA (SEMEP), 25.; SEMINÁRIO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO (SEMPPG), 7., 2006, Salvador. Salvador: EDUFBA, 2006.

OLIVEIRA, M. M. de; MELO, V. R. O pó cerâmico: seus efeitos aditivos na argamassa. In: SEMINÁRIO ESTUDANTIL DE PESQUISA(SEMEP), 26.; SEMINÁRIO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO (SEMPPG), 8., 2007, Salvador. Salvador: EDUFBA, 2007.

PÁSCOA, L. S. N. *Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2012.

PELOUZE, J.; FRÉMY, E. *Technologie du Bâtiment*, ou Étude complète des matériaux de toute espèce employés dans l'art de bâtir. Paris: Librairie d'Architecture de B. Bance, 1863.

PEREIRA, J. O. Contribuição para o conhecimento das propriedades pozolânicas da fracção fina resultante da produção de areia de origem granítica. 2010. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Faculdade de Engenharia Geotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010. Disponível em: <<http://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/2604>>. Acesso em: 18 mar 2017.

PLINIO SECONDO, C. *Historia naturale*. Trad. Geronimo de Huerta. Madrid: Juan de Gonzalez, 1629.

PLINIO SECONDO, C. *Historia naturale*. Trad. Ludovico Domenichi. Venezia: Gabriel Giolito de Ferrari, 1561-1568.

PYTEL, Z.; MALOLEPSZY J. Hydration of metakaolin in the presence of calcium ions and other activators under hydrothermal conditions. *Science of Cement and Concrete*, Cracow, p. 20-21, June 2001.

QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F.; A.C.V. COELHO; CINCOTTO, M.A. Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v.9, n.1, p.1-7, fev.2015.

QUATRÈMERE DE QUINCY, Antoine Chrysostome. *Dizionario storico di architettura* [1842]. Mantova: F.lli Negretti, 1844.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLÈRE, A. M.; DRON, R. Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. In: 7th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. Paris, France, 1980. v.3.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX (RILEM): Commission 25-PEM. Protection et érosion des Monuments: Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Recommandations provisoires. *Matériaux et constructions*, v.13, n.75, 1980.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX (RILEM). TC 127-MS: Tests for masonry materials and structures. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v. 30, p.323-328, July 1997. .

ROCHA, G. G. N. *Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade*. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8DJH7D>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

RONDELET, J. B. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: Firmin Didot Frères Libraires, 1834. v.1.

- RUSCONI, G. A. *I Dieci Libri D'Architettura di Gio: Antonio Rusconi: Secondo i precetti di Vitruvio, nuovamente ristampati, & accresciuti della Pratica degli'Horologi Solari*. Venezia: Appresso il Nicolini, 1660.
- SANTIAGO, C. C. *Argamassas tradicionais de cal*. Salvador: EDUFBA, 2007.
- SANTIAGO, C. C. O restauro de argamassa de cal no Brasil. *Revista Construindo*, Belo Horizonte, v. 4, n.1, p. 67-79, jan./jun. 2012. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/1696>>. Acesso em: 16 nov. 2017.
- SANTOS SILVA, A. Caracterização de argamassas antigas: casos paradigmáticos. *Cadernos Edifícios*, Lisboa, LNEC, n. 2, p. 87-101, out. 2002.
- SANTOS SILVA, A.; CANDEIAS, A. E.; PAIS, A.C.; NOGUEIRA, P.M. Caracterização de argamassas do Conjunto Monumental do Castelo de Viana do Alentejo. *Conservar Património*, n.1, p. 21-32, 2005.
- SANTOS SILVA A.; GAMEIRO A.; GRILO J.; VEIGA, R.; VELOSA A. Long-term behavior of lime-metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition. *Applied Clay Science*, v 88/89, p.49-55, Feb. 2014.
- SCAMOZZI, Vincenzo. *L'idea della architettura universal* [1615]. Trad. Stefano Tisozzi e Luigi Masieri. Milano: Borroni e Scotti, 1838.
- SCHULER, A. *Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado*. 1998. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/159059>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- SHI, C.; DAY, R. L. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part I, Reaction kinetics. *Cement and Concrete Research*, n.30, p. 91-98, 2000.
- SILVA, V. S. *Argamassas de revestimento com o emprego de materiais pozolânicos*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- SILVA, R. P.; BARROS, M.M.S.B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V.M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS – SBTA, 6., Florianópolis, 2005. Anais...Florianópolis: SBTA, 2005.
- SILVA-NIGRA, D. C. Francisco de Frias da Mesquita, engenheiro-mor do Brasil. *Revista do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional*, SPHAN, v.9, p. 45, 1946.
- SILVEIRA, D.; CORDOVA, F. A pesquisa científica. In: GERHARDT, T.; SILVEIRA, D. (Org.). *Métodos de Pesquisa*. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009. p.31-42.
- SILVOSO, M.M.; HAINFELLNER, K.P.; CHAVES, C.B.; MARTINHO, R.O. Desenvolvimento e análise experimental de argamassas de cal com adições de pozolanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC, 16., 2016, São Paulo. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016_paper_693.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2016.

SIQUEIRA, J. S. de. *Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas*. 2011. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/2594/1/Dissertacao_ReciclagemResiduoCinzas.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2016.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. *Cerâmica*, v.58, n.346, p.275-279, 2012.

SMEATON J. *A narrative of the building and a description of the Construction of the Eddystone lighthouse with stone*. London, 1971.

SOUZA, R. C. de; FELIPE, A. M. P. F.; FRANÇA, G. F. de; COUTINHO, P. A. A.; SOUZA, J. A. S. Estudo da influência da adição de cinza volante e resíduo da construção civil nas propriedades da argamassa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2015, Campinas. *Proceedings...* Campinas: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015. v.1, p. 2317-2322, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/chemeng-cobeqic2015-427-34046-261960>>. Acesso em: 23 set. 2018.

SOUZA, J. S. C. *Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas*. 2013. 227f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/12850/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Juliana_Santa_Cruz_Souza_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 fev. 2016.

SOUZA, J.S.C.; SILVA, C.F.C.; CARNEIRO, A.M.P. *Comparação de propriedades de argamassas com metacaulim para restauração de obras históricas*. 2013. Disponível em: <http://www.academia.edu/3467134/COMPARA%C3%87%C3%83O_DE_PROPRIEDADES_DE_ARGAMASSAS_COM_METACAILIM_PARA_RESTAURA%C3%87%C3%83O_DE_OBRAS_HIST%C3%93RICAS>. Acesso em: 23 ago. 2017.

TAVARES, M.; VEIGA, M. R.; FRAGATA, A.; AGUIAR, J. Consolidation of renderings simulating stone in the façade of LNEC's building. *Stone Consolidation in Cultural Heritage*, Lisboa, LNEC, v.6/7, May 2008. (PDF). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287195062_Consolidation_of_renderings_simulating_stone_in_the_facade_of_LNEC's_building>. Acesso em: 11 de abril 11 de 2018.

TEUTONICO, Jeanne Marie. *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. Roma: ICCROM, 1988.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Considerações sobre os produtos de hidratação em argamassas históricas. *Engenharia Civil: Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho*, n.36, p.17-28, 2010.

THOMAS, M. D. A. *Optimizing the use of fly ash in concrete*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association (PCA), 2007. p. 1-24. Disponível em: <https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2018

VASARI, G. *Le vite de'piu eccelenti pittori et scultori italiani: da Cimabue insino a'tempi nostril*. Trad. Luciano Bellosi e Aldo Rossi. Torino, Italia: Einaudi. 1986.

VASKE, N.R.; CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto. *Ambiente Construído*, v. 8, n.3, p.77-95, jul./set. 2008. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/ambiente_construido/article/viewFile/5366/4347>. Acesso em: 20 jun. 2016.

VEIGA, M. R. Argamassas de cal para revestimento para revestimento de paredes antigas: características do revestimento aplicado. In: VELOSA, Ana; ROCHA, Fernando T.; CACHIM, Paulo (Ed.). *Metacaulino em Portugal: produção, aplicação e sustentabilidade*. Portugal: Universidade de Aveiro, 2013.

VEIGA, M. R. Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. Comunicação ao SEMINÁRIO SAIS SOLÚVEIS EM ARGAMASSAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS: DANOS, PROCESSOS E SOLUÇÕES. Lisboa: LNEC, 2005. Disponível em: <http://www.academia.edu/868156/COMPORTAMENTO_DE_REBOCOS_PARA_EDIF%C3%8DCIOS_ANTIGOS_EXIG%C3%8ANCIAS_GERAIS_E_REQUISITOS_ESPEC%C3%8DFICOS_PARA_EDIF%C3%8DCIOS_ANTIGOS>. Acesso em: 12 set. 2016.

VEIGA, M.R. Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos: métodos e materiais. Programa de Investigação e de Pós-Graduação elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC. Lisboa, 2009.

VEIGA, M. R.; AGUIAR, J.; SANTOS SILVA, A.; CARVALHO, F. *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, jul. 2004. (Coleção Edifícios, CED 9).

VEIGA, M.R.; VELOSA, A.L.; MAGALHÃES, A.C. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 318-327, Jan. 2009.

VEIGA, M.R.; FRAGATA, A.; TAVARES M.L.; MAGALHÃES A.C.; FERREIRA N. Inglesinhos Convent: compatible renders and other measures to mitigate water capillary rising problems. *Journal of Building Appraisal*, v, 5, n. 2, p. 171-185, Oct. 2009.

VEJMEJKOVA, E.; KEPPERT, M.; KERNER, Z.; ROVNANIKOVA, P.; CERNY, R. Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, v.31, p.22-28, 2012.

VELOSA, A. Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas. 2006. 467f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade de Aveiro, Portugal, 2006. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2407/1/2007001119.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016.

VELOSA, A.; ROCHA, F.; CACHIN, P. *Metacaulino em Portugal: produção, aplicação e sustentabilidade*. Portugal: Universidade de Aveiro, 2013.

VELOSA, A.; VEIGA, M. R.; ROCHA, F.. Utilização de metacaulim em argamassas para a conservação de edifícios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS (SBTSA), 8., Curitiba, 2009. Disponível em: <<https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/403-utilizacao-de-metacaulim-em-argamassas-para-conservacao-de-edificios?start=40>>. Acesso em: 22 set. 2016.

VICAT, L-J. *A practical and scientific treatise on calcareous mortars and cements: artificial and natural*. London: Jonh Weale Architectural Library, 1837.

VICAT, L-J. *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. Paris: Goujon Libraire, 1818.

VICAT, L-J. *Recherches sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer, et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action*. 2^{ème} éd. rev. et aug. Paris: Impr. de Maisonville (Grenoble), 1858.

VICAT, L-J. *Recherches sur les propriétés diverses que peuvent acquérir les pierres à ciments et à chaux hydrauliques par l'effet d'une incomplète cuisson: précédées d'observations sur les chaux anomales qui forment le passage des chaux éminemment hydrauliques au ciment*. Paris: Carilian-Goeury et V. Dalmont Editeurs, 1840.

VIEIRA, F.P.; KULAKOWISKI, M.P.; DAL MOLIN, D.; VILELA, A.C. Durabilidade e resistência mecânica de concretos e argamassas com adição de sílica ativa. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. 1997, São Leopoldo-RS. *Anais...* São Leopoldo: ANTAC, 1997. p. 107-116.

VITRÚVIO, M. P. *Os Dez Livros de Arquitectura*. Tradução H. Rua. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1998.

ZAMPIERI, V.A. *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. 1989. 212f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-15092015-145928/en.php>>. Acesso em: 22 set. 2016.

APÉNDICES

APÊNDICE A

Tipologias de pesquisa científica

Seguem algumas informações, quanto às características dos principais tipos de pesquisa científica, usadas para classificar a que foi adotada neste trabalho.

Quanto à abordagem:

- Qualitativa – há preocupação com aspectos da realidade que não podem ser quantificados. Foca na compreensão e explicação da dinâmica de um tema.
- Quantitativa — centra na objetividade. Os resultados podem ser quantificados e são tomados como se constituíssem um retrato real de todo o objeto central da pesquisa. Juntamente à pesquisa qualitativa, permite compilar mais informações do que se poderia conseguir isoladamente.

Quanto à natureza:

- Básica – pretende fornecer conhecimentos novos, úteis para o avanço da Ciência, sem aplicação prática prevista.
- Aplicada - objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos.

Quanto aos objetivos:

- Exploratória – visa a formulação de questões ou de um problema para proporcionar maior familiaridade do pesquisador com o fato. Envolve, muitas vezes, levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas experientes no problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão. Geralmente, assume a forma de pesquisa bibliográfica e estudo de caso (GIL, 2008).
- Descritiva – nela descrevem-se fatos, características de determinadas populações ou fenômenos a partir de uma série de informações coletadas por meio de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como questionários, entrevistas e observação sistemática (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).

- Explicativa – tipo pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade. Nela explica-se o porquê coisas, por meio dos resultados oferecidos. A preocupação central é identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (GIL, 2008).

Quanto aos procedimentos:

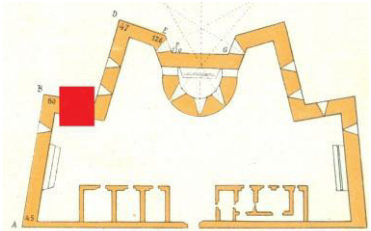

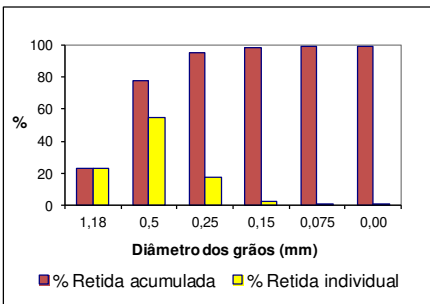
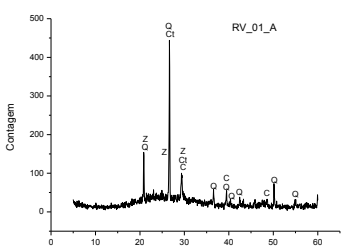
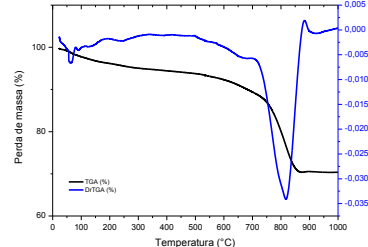
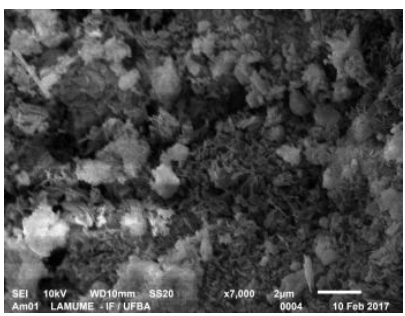
- Experimental – requer planejamento rigoroso que inclui a formulação exata do problema e das hipóteses, a delimitação das variáveis que atuam no fenômeno /objeto de estudo e a definição de formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).
- Bibliográfica – desenvolve-se com base em bibliografia já analisada e publicada sobre o tema de estudo por meio de publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, artigos científicos, teses, entre outros. Não se trata de mera repetição do que foi escrito sobre determinado assunto, mas sim do exame do tema sob um novo enfoque, com fins de chegar a conclusões inovadoras (LAKATOS; MARCONI, 2003).
- Documental – a fonte de coleta de dados está restrita a documentos diversificados e dispersos, escritos ou não, sem tratamento analítico tais como: tabelas estatísticas, jornais, revistas, relatórios, documentos oficiais, cartas, filmes, fotografias, pinturas, tapeçarias, relatórios de empresas, vídeos de programas de televisão, entre outros, constituindo o que se denomina de fontes primárias (LAKATOS; MARCONI, 2003).
- De campo – deseja-se obter informações sobre um problema, para o qual se procura uma resposta, ou acerca de uma hipótese, que se queira comprovar, ou ainda, descobrir novos fenômenos ou as relações entre eles. Requer, previamente, realização de pesquisa bibliográfica e/ou documental para saber em que estado se encontra atualmente o problema, e coleta de dados junto a pessoas, sobre opiniões dominantes acerca do assunto.
- *Ex-post-facto* – os dados são coletados após a ocorrência dos eventos. Tem por objetivo investigar possíveis relações de causa e efeito entre um determinado fato identificado pelo pesquisador e um fenômeno que ocorre posteriormente (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009). É utilizada quando há

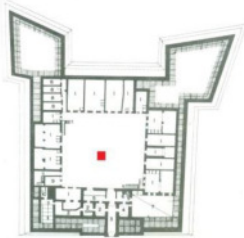

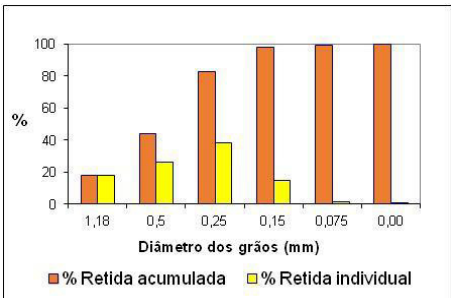
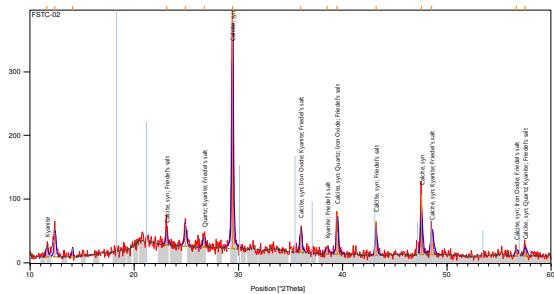
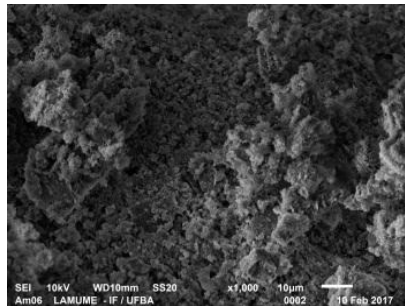
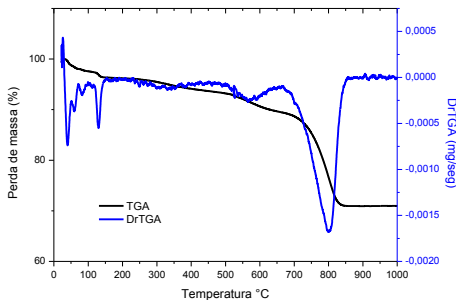
impossibilidade de aplicação da pesquisa experimental, uma vez que nem sempre é possível manipular as variáveis necessárias para o estudo da causa e do seu efeito (FONSECA, 2002).

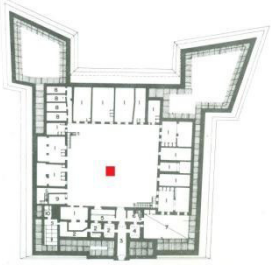

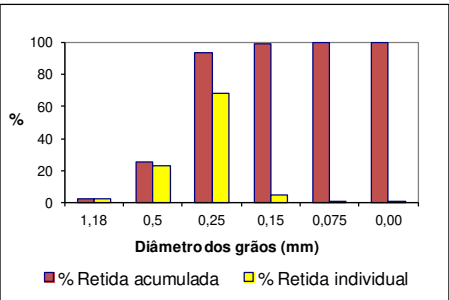
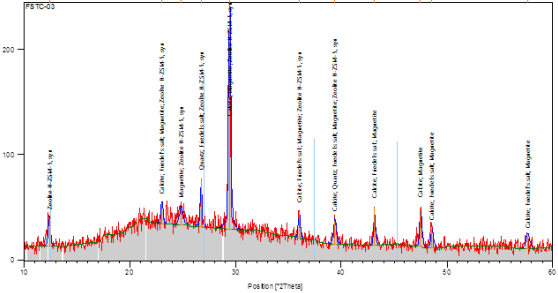
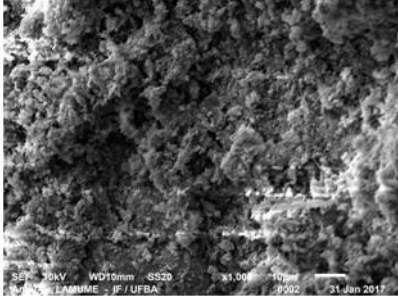
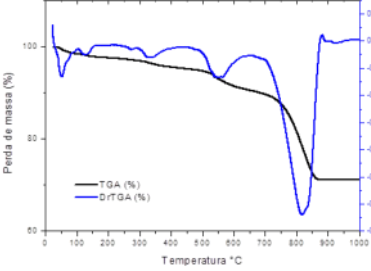
- De levantamento – a coleta de dados é realizada por meio de questionários ou entrevistas a um grupo significativo de pessoas acerca do problema estudado para, em seguida, mediante análise quantitativa, extraírem-se conclusões acerca dos dados recolhidos. Designada também por censo.
- Com *survey* – consiste na busca de informação diretamente com um grupo de interesse a respeito dos dados que se deseja obter, útil em pesquisas exploratórias e descritivas. É mantido o sigilo sobre a identificação da pessoas questionadas (GERHARDT; SILVEIRA, 2008; SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).
- Estudo de caso – caracteriza-se pelo estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento. Pretende-se conhecer o “como” e o “porquê” de uma determinada situação que se supõe ser única em muitos aspectos, procurando descobrir o que há nela de mais essencial e característico. O pesquisador não pretende intervir sobre o objeto a ser estudado, mas revelá-lo tal como ele o percebe (FONSECA, 2002, p.33, apud SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).
- Participante – caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com o objeto de pesquisa ou as pessoas investigadas.
- Ação – constitui uma investigação social relacionada a uma ação social ou à resolução de um problema coletivo em que o pesquisador e os participantes, representativos da situação ou do problema, envolvem-se de modo cooperativo ou participativo (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).
- Etnográfica – caracteriza-se pelo estudo de um grupo ou povo, com o objetivo de recolher informação direta e verbal dos nativos, que possibilite caracterizar e registrar a sua visão do mundo.

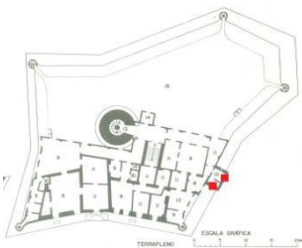

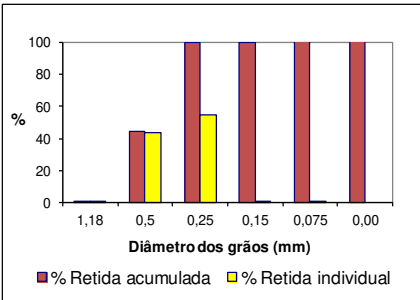
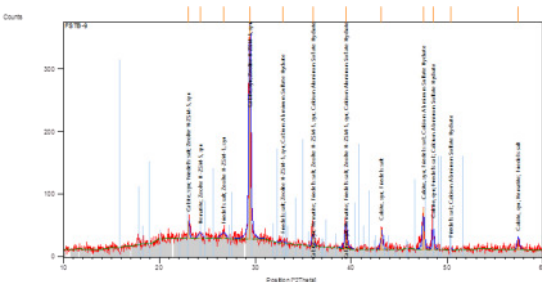
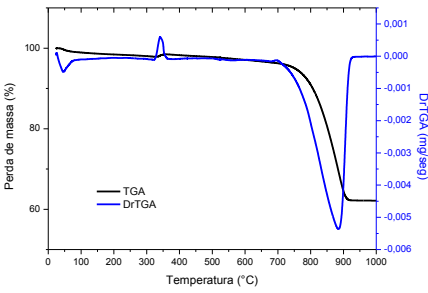
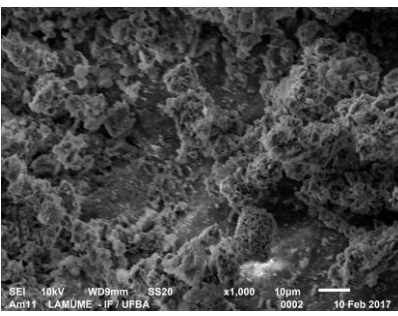
APÊNDICE B

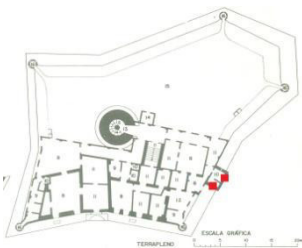

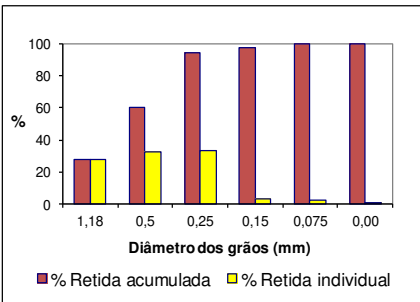
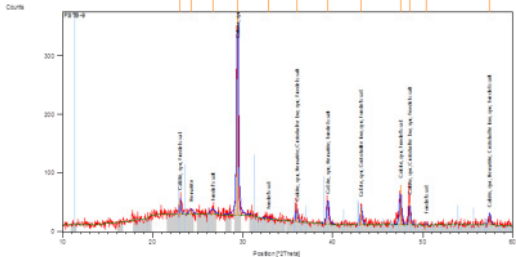
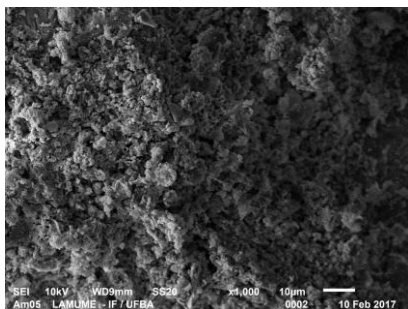
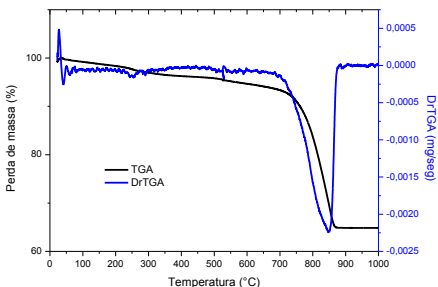
Fichas de caracterização das argamassas dos fortes

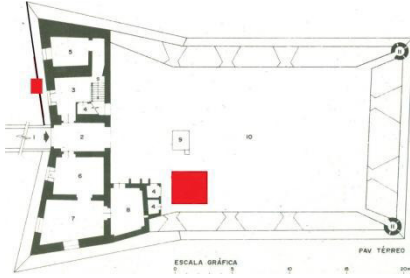

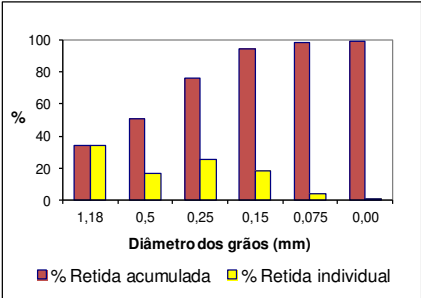
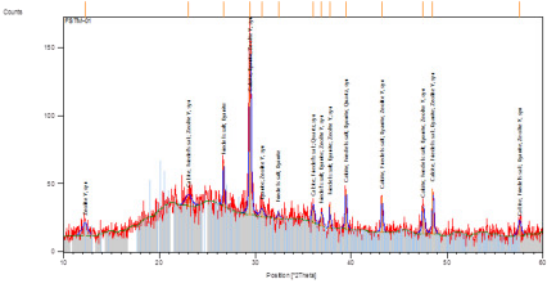
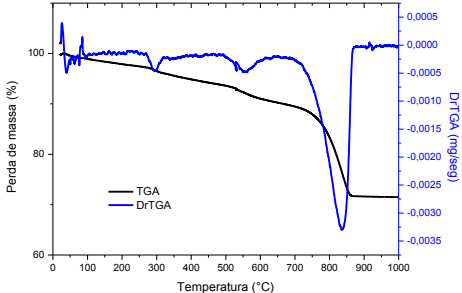
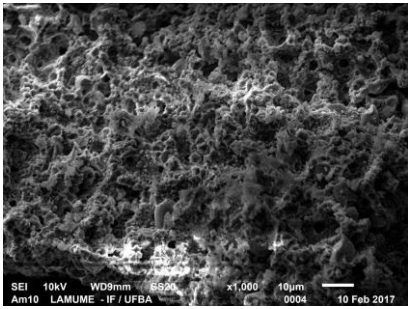
Ficha 1	FORTE DO RIO VERMELHO	Identificação da amostra	RV1A								
		Argamassa de assentamento da muralha									
Planta: 		Imagem: 									
Análise granulométrica		Composição simplificada da argamassa									
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td style="text-align: right;">5,50%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td style="text-align: right;">40,10%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td style="text-align: right;">54,39%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td style="text-align: right;">1:0,14:0,99</td> </tr> </table>		FINOS (argila e/ou silte)	5,50%	GROSSOS	40,10%	LIGANTE	54,39%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,14:0,99
FINOS (argila e/ou silte)	5,50%										
GROSSOS	40,10%										
LIGANTE	54,39%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,14:0,99										
		Cor dos finos (Munsell)									
		HUE 7.5 YR 6/4 – Light Brown									
Composição química (FRX)											
Principais compostos presentes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O			
	66,38	18,29	6,32	2,93	2,47	1,09	0,31	0,25			
Análise mineralógica (DRX)											
Compostos cristalinos identificados	Quartzo	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)									
	Calcita										
Análise termogravimétrica (TG/DTG)											
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Análise microestrutural						
Perdas de massa (%)	4,1	1,1	0,7	23,2							
					Figura 1 – Morfologia da argamassa (1000x) 						

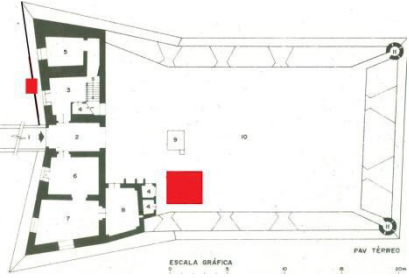

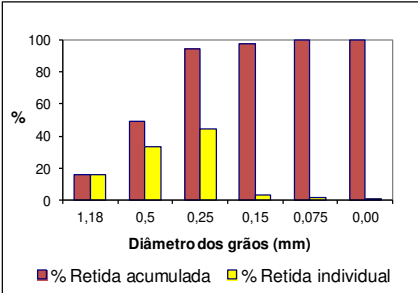
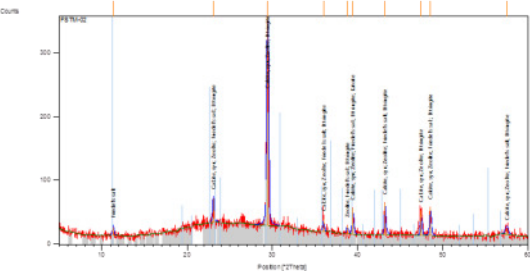
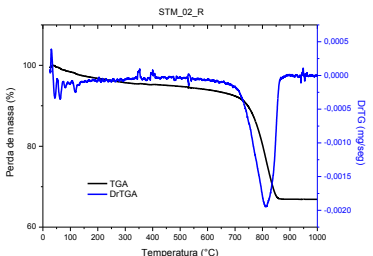
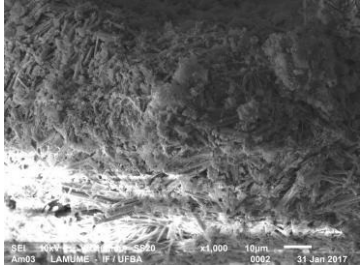
Ficha 2		FORTE SANTO ANTÔNIO ALÉM DO CARMO		Identificação da amostra		STC2A									
Planta:				Argamassa de assentamento – parede da cisterna											
Imagem:															
Análise granulométrica				Composição simplificada da argamassa											
 <p>Diâmetro dos grãos (mm)</p> <p>■ % Retida acumulada ■ % Retida individual</p>				<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>9,68%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>56,13%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>34,18%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,38:2,22</td> </tr> </table>				FINOS (argila e/ou silte)	9,68%	GROSSOS	56,13%	LIGANTE	34,18%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,38:2,22
FINOS (argila e/ou silte)	9,68%														
GROSSOS	56,13%														
LIGANTE	34,18%														
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,38:2,22														
				Cor dos finos (Munsell) HUE 10 YR 7/6 – Yellow											
Composição química (FRX)															
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O						
		35,87	26,22	21,63	7,06	1,17	4,19	0,34	0,22						
Análise mineralógica (DRX)															
Compostos cristalinos identificados		Quartzo													
		Calcita													
Óxido de ferro															
Silicato de alumínio (cianita)															
		Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)													
Análise termogravimétrica (TG/DTG)				Análise microestrutural											
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)										
Perdas de massa (%)	3,8	1,8	0,9	22,3											
															

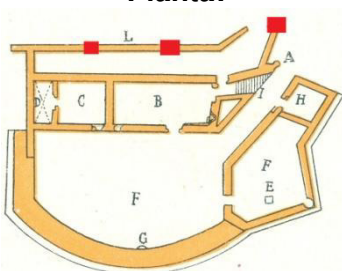

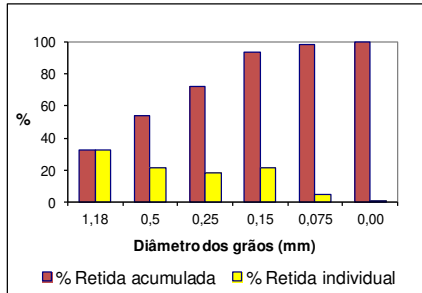
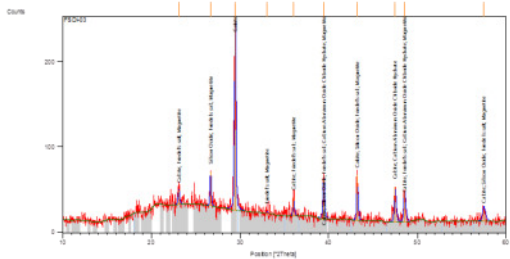
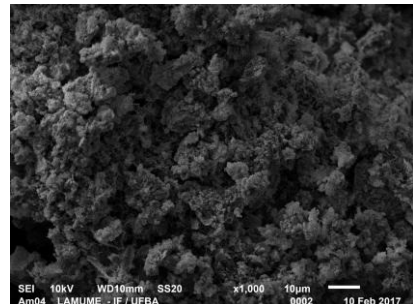
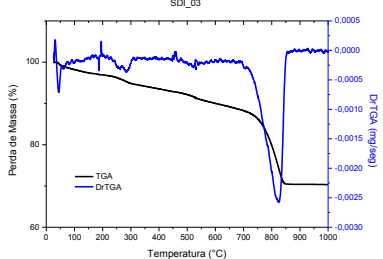
Ficha 3	FORTE SANTO ANTÔNIO ALÉM DO CARMO				Identificação da amostra				STC3R													
	Planta:					Argamassa de revestimento - teto da cisterna					Imagem:											
																						
Análise granulométrica					Composição simplificada da argamassa																	
					<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>2,87%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>64,57%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>32,55%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,12:2,69</td> </tr> </table>					FINOS (argila e/ou silte)	2,87%	GROSSOS	64,57%	LIGANTE	32,55%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,12:2,69					
FINOS (argila e/ou silte)	2,87%																					
GROSSOS	64,57%																					
LIGANTE	32,55%																					
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,12:2,69																					
					Cor dos finos (Munsell)																	
					HUE 10 YR 5/6 – Yellowish Brown																	
Composição química (FRX)																						
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O													
		54,60	18,99	11,88	8,36	1,43	0,87	0,33	0,64													
Análise mineralógica (DRX)																						
Compostos cristalinos identificados		Quartzo																				
		Calcita																				
		Óxido de ferro																				
		Silicato de alumínio (zeólita)																				
		Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)																				
Análise termogravimétrica (TG/DTG)						Análise microestrutural																
Intervalos de temperatura (°C)		25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)																
Perdas de massa (%)		2,6	1,8	0,8	23,5																	
																						

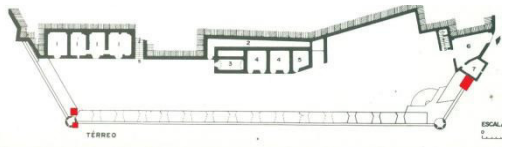

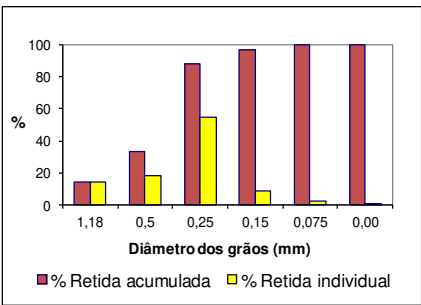
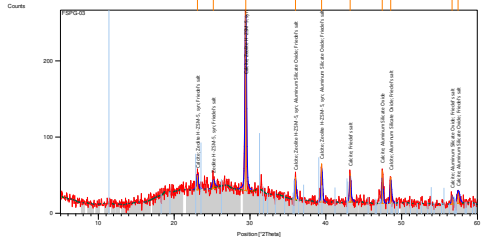
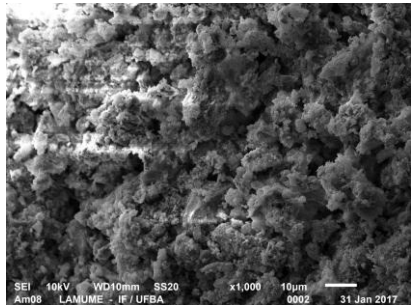
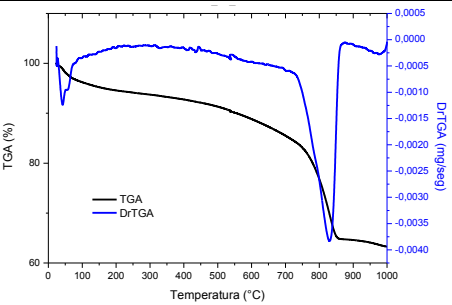
Ficha 4	FORTE SANTO ANTÔNIO DA BARRA		Identificação da amostra		STB8A										
	Planta:		Argamassa de assentamento da parede do sótão				Imagem:								
															
Análise granulométrica			Composição simplificada da argamassa												
			<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>2,77%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>51,01%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>46,21%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,08:1,5</td> </tr> </table>					FINOS (argila e/ou silte)	2,77%	GROSSOS	51,01%	LIGANTE	46,21%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,08:1,5
FINOS (argila e/ou silte)	2,77%														
GROSSOS	51,01%														
LIGANTE	46,21%														
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,08:1,5														
			Cor dos finos (Munsell) HUE 10 YR 4/5 – Yellowish Brown												
Composição química (FRX)															
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O						
		68,53	19,91	4,08	2,52	1,69	0,40	0,15	0,37						
Análise mineralógica (DRX)															
Compostos cristalinos identificados		Calcita													
		Óxido de ferro													
		Silicato de alumínio (zeólita)													
		Aluminossilicato													
		Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)													
		Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)													
Análise termogravimétrica (TG/DTG)				Análise microestrutural											
Intervalos de temperatura (°C)		25→250	250→400	400→500	500→900										
Perdas de massa (%)		1,7	0,0	0,4	33,3										
				Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000) 											

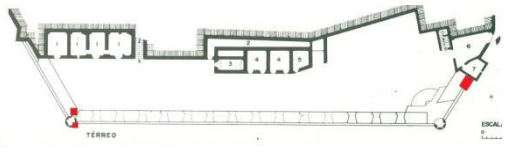

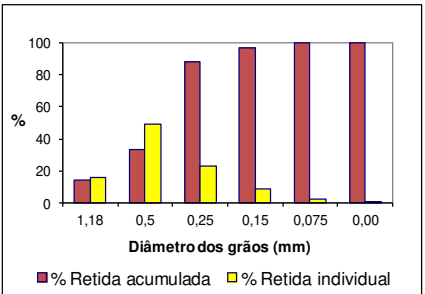
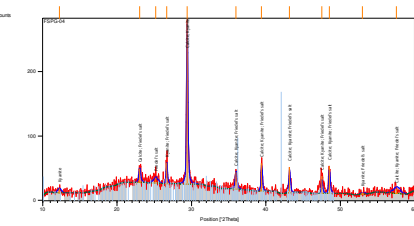
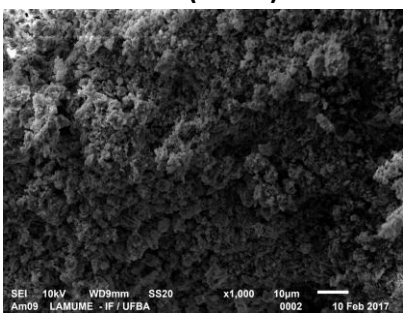
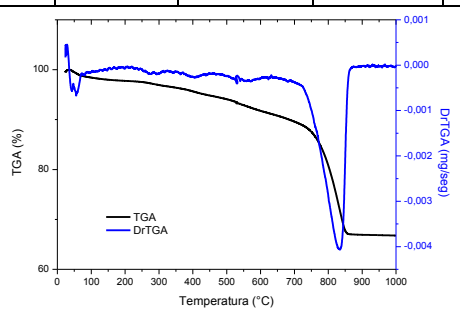
Ficha 5	FORTE SANTO ANTÔNIO DA BARRA		Identificação da amostra		STB9A									
			Argamassa de assentamento do sótão											
Planta: 			Imagem: 											
Análise granulométrica			Composição simplificada da argamassa											
			<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td></td> </tr> </table>				FINOS (argila e/ou silte)		GROSSOS		LIGANTE		Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	
FINOS (argila e/ou silte)														
GROSSOS														
LIGANTE														
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)														
			Cor dos finos (Munsell)											
Composição química (FRX)														
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O					
		56,51	16,29	11,00	10,66	0,89	0,58	0,16	0,71					
Análise mineralógica (DRX)														
Compostos cristalinos identificados	Quartzo													
	Calcita													
	Óxido de ferro													
	Silicato de alumínio (cianita)													
	Aluminossilicato													
	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)													
Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)														
Análise termogravimétrica (TG/DTG)				Análise microestrutural										
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)									
Perdas de massa (%)	1,6	1,4	0,4	31,0										
														

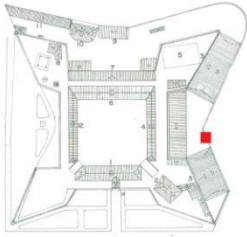

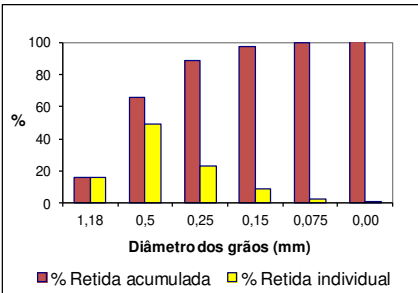
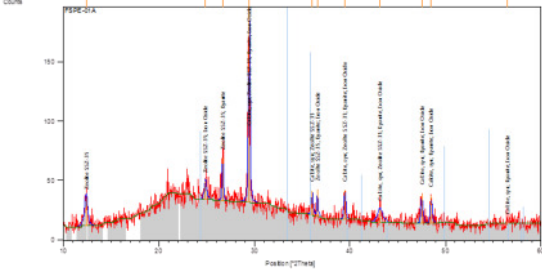
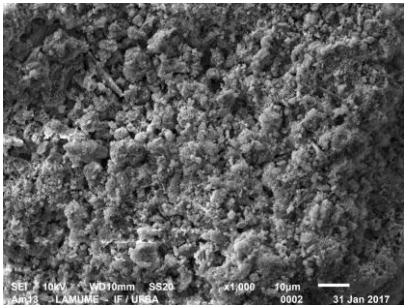
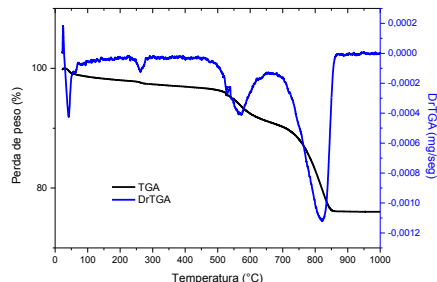
Ficha 6	FORTE SANTA MARIA	Identificação da amostra		STM1R																		
		Argamassa de revestimento da base da muralha																				
Planta: 		Imagem: 																				
Análise granulométrica 		Composição simplificada da argamassa <table border="1" data-bbox="831 712 1385 909"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>15,98%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>32,76%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>51,26%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,42:0,86</td> </tr> </table>			FINOS (argila e/ou silte)	15,98%	GROSSOS	32,76%	LIGANTE	51,26%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,42:0,86										
FINOS (argila e/ou silte)	15,98%																					
GROSSOS	32,76%																					
LIGANTE	51,26%																					
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,42:0,86																					
		Cor dos finos (Munsell) HUE 5 YR 6/8 – Reddish Yellow																				
Composição química (FRX) <table border="1" data-bbox="245 1037 1441 1122"> <thead> <tr> <th>Principais compostos presentes (%)</th> <th>CaO</th> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>MgO</th> <th>SO₃</th> <th>Na₂O</th> <th>K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>36,13</td> <td>21,40</td> <td>17,02</td> <td>16,93</td> <td>5,02</td> <td>0,89</td> <td>0,15</td> <td>0,38</td> </tr> </tbody> </table>					Principais compostos presentes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O		36,13	21,40	17,02	16,93	5,02	0,89	0,15	0,38
Principais compostos presentes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O														
	36,13	21,40	17,02	16,93	5,02	0,89	0,15	0,38														
Análise mineralógica (DRX) <table border="1" data-bbox="245 1160 853 1473"> <thead> <tr> <th rowspan="7">Compostos cristalinos identificados</th> <th>Quartzo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Calcita</th> </tr> <tr> <th>Silicato de alumínio (cianita)</th> </tr> <tr> <th>Silicato de alumínio (zeólita)</th> </tr> <tr> <th>Aluminossilicato</th> </tr> <tr> <th>Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)</th> </tr> <tr> <th>Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)</th> </tr> </tbody> </table> 					Compostos cristalinos identificados	Quartzo	Calcita	Silicato de alumínio (cianita)	Silicato de alumínio (zeólita)	Aluminossilicato	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)	Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)										
Compostos cristalinos identificados	Quartzo																					
	Calcita																					
	Silicato de alumínio (cianita)																					
	Silicato de alumínio (zeólita)																					
	Aluminossilicato																					
	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)																					
	Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)																					
Análise termogravimétrica (TG/DTG) <table border="1" data-bbox="245 1529 997 1731"> <thead> <tr> <th>Intervalos de temperatura (°C)</th> <th>25→250</th> <th>250→400</th> <th>400→500</th> <th>500→900</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Perdas de massa (%)</td> <td>2,3</td> <td>2,6</td> <td>1,3</td> <td>22,0</td> </tr> </tbody> </table>			Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Perdas de massa (%)	2,3	2,6	1,3	22,0	Análise microestrutural Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)									
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900																		
Perdas de massa (%)	2,3	2,6	1,3	22,0																		
																						

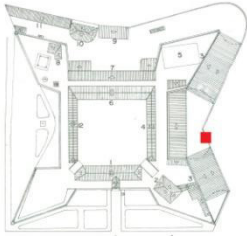

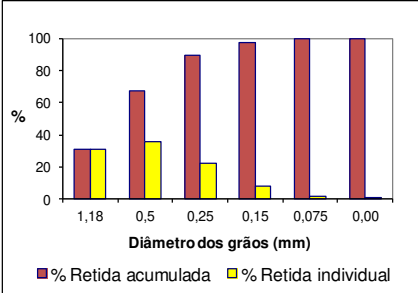
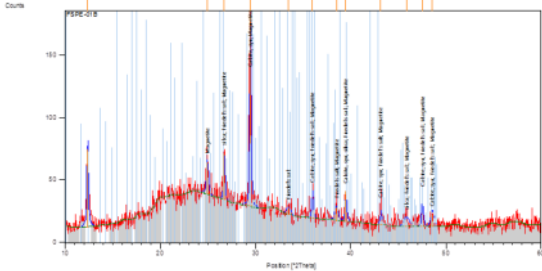
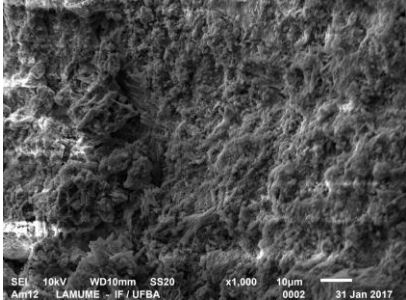
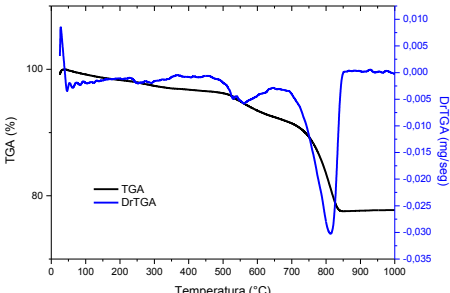
Ficha 7	FORTE SANTA MARIA	Identificação da amostra	STM2R								
<p>Planta:</p> 		<p>Imagem:</p> 									
Análise granulométrica		Composição simplificada da argamassa									
		<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>3,67%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>24,10%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>72,23%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,07:0,45</td> </tr> </table>		FINOS (argila e/ou silte)	3,67%	GROSSOS	24,10%	LIGANTE	72,23%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,07:0,45
FINOS (argila e/ou silte)	3,67%										
GROSSOS	24,10%										
LIGANTE	72,23%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,07:0,45										
		<p>Cor dos finos (Munsell) HUE 7.5YR 5/6 – Strong Brown</p>									
Composição química (FRX)											
Principais compostos presentes (%)	CaO 62,10	SiO ₂ 16,32	Al ₂ O ₃ 9,40								
	Fe ₂ O ₃ 6,44	MgO 1,70	SO ₃ 1,73								
	Na ₂ O 0,05	K ₂ O 0,10									
Análise mineralógica (DRX)											
Compostos cristalinos identificados	Calcita Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel) Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) Óxido de silício Aluminato de cálcio hidratado (katoite)										
Análise termogravimétrica (TG/DTG)		Análise microestrutural									
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→900								
Perdas de massa (%)	3,6	1,0	27,9								
		<p>Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)</p> 									

Ficha 8	FORTE SÃO DIOGO				Identificação da amostra		FSDI3A									
	Planta: 				Argamassa de assentamento da muralha Imagem: 											
Análise granulométrica 				Composição simplificada da argamassa <table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>12,25%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>24,22%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>63,52%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,26:0,52</td> </tr> </table>					FINOS (argila e/ou silte)	12,25%	GROSSOS	24,22%	LIGANTE	63,52%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,26:0,52
FINOS (argila e/ou silte)	12,25%															
GROSSOS	24,22%															
LIGANTE	63,52%															
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,26:0,52															
				Cor dos finos (Munsell) HUE 10 YR 6/6 – Brownish Yellow												
Composição química (FRX)																
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O							
		39,50	24,60	18,12	9,03	4,66	0,79	0,98	0,87							
Análise mineralógica (DRX)																
Compostos cristalinos identificados	Calcita															
	Óxido de ferro															
	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)															
	Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)															
	Óxido de silício															
Análise termogravimétrica (TG/DTG)					Aluminato de cálcio hidratado (katoite)											
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000) 											
Perdas de massa (%)	3,7	2,7	1,4	21,7												
																

Ficha 9	FORTE SÃO PAULO DA GAMBOA	Identificação da amostra									
		SPG3A									
Planta: 		Imagem: 									
Análise granulométrica 		Composição simplificada da argamassa <table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>5,14%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>26,5%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>68,35%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,1:0,52</td> </tr> </table>		FINOS (argila e/ou silte)	5,14%	GROSSOS	26,5%	LIGANTE	68,35%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,1:0,52
FINOS (argila e/ou silte)	5,14%										
GROSSOS	26,5%										
LIGANTE	68,35%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,1:0,52										
		Cor dos finos (Munsell) HUE 7.5YR 5/6 – Strong Brown									
Composição química (FRX)											
Principais compostos presentes (%)		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O		
		58,58	16,88	11,46	5,44	2,35	0,78	1,93	0,54		
Análise mineralógica (DRX)											
Compostos cristalinos identificados		Calcita Silicato de alumínio (zeólita) Aluminossilicato Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)									
Análise termogravimétrica (TG/DTG)			Análise microestrutural								
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000) 						
Perdas de massa (%)	5,9	1,4	1,4	26,7							
											

Ficha 10	FORTE SÃO PAULO DA GAMBOA	Identificação da amostra									
		SPG4A		Argamassa de assentamento da muralha							
Planta: 		Imagem: 									
Análise granulométrica		Composição simplificada da argamassa									
		<table border="1"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>10,37%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>38,40%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>51,22%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,27:1,01</td> </tr> </table>		FINOS (argila e/ou silte)	10,37%	GROSSOS	38,40%	LIGANTE	51,22%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,27:1,01
FINOS (argila e/ou silte)	10,37%										
GROSSOS	38,40%										
LIGANTE	51,22%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,27:1,01										
		Cor dos finos (Munsell)									
		HUE 5 YR 5/6 – Yellowish Red									
Composição química (FRX)											
Principais compostos presentes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O			
	59,24	15,57	9,44	7,10	4,77	0,85	0,37	0,88			
Análise mineralógica (DRX)											
Compostos cristalinos identificados	Calcita										
	Óxido de ferro										
	Silicato de alumínio (cianita)										
	Aluminossilicato										
	Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)										
	Óxido de silício										
Análise termogravimétrica (TG/DTG)		Análise microestrutural									
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000) 						
Perdas de massa (%)	2,0	1,9	1,6	27,2							
											

Ficha 11	FORTE SÃO PEDRO	Identificação da amostra	SPE1A								
<p>Planta:</p> 		<p>Imagem:</p> 									
<p>Análise granulométrica</p> 		<p>Composição simplificada da argamassa</p> <table border="1" data-bbox="831 674 1385 869"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>15,2%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>51,51%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>33,28%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,6:2,09</td> </tr> </table> <p>Cor dos finos (Munsell) HUE 7.5 YR 7/6 – Reddish Yellow</p>		FINOS (argila e/ou silte)	15,2%	GROSSOS	51,51%	LIGANTE	33,28%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,6:2,09
FINOS (argila e/ou silte)	15,2%										
GROSSOS	51,51%										
LIGANTE	33,28%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,6:2,09										
<p>Composição química (FRX)</p>											
<p>Principais compostos presentes (%)</p>		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O		
		34,48	32,28	19,81	8,45	2,15	0,63	0,11	0,56		
<p>Análise mineralógica (DRX)</p>											
<p>Compostos cristalinos identificados</p>		<p>Calcita Óxido de ferro Silicato de alumínio (zeólita) Aluminossilicato Óxido de silício</p>									
<p>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</p>				<p>Análise microestrutural</p>							
<p>Intervalos de temperatura (°C)</p>	25→250	250→400	400→500	500→900	<p>Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)</p>						
<p>Perdas de massa (%)</p>	2,1	0,8	0,6	20,3							
											

Ficha 12	FORTE SÃO PEDRO	Identificação da amostra	SPE2A								
<p>Planta:</p> 		<p>Imagem:</p> 									
<p>Análise granulométrica</p>		<p>Composição simplificada da argamassa</p>									
 <p>Diâmetro dos grãos (mm)</p> <p>■ % Retida acumulada ■ % Retida individual</p>		<table border="1" data-bbox="831 678 1386 875"> <tr> <td>FINOS (argila e/ou silte)</td> <td>13,87%</td> </tr> <tr> <td>GROSSOS</td> <td>65,28%</td> </tr> <tr> <td>LIGANTE</td> <td>20,62%</td> </tr> <tr> <td>Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)</td> <td>1:0,91:4,29</td> </tr> </table> <p>Cor dos finos (Munsell)</p> <p>HUE 10 YR 8/4 – Very Pale Brown</p>		FINOS (argila e/ou silte)	13,87%	GROSSOS	65,28%	LIGANTE	20,62%	Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,91:4,29
FINOS (argila e/ou silte)	13,87%										
GROSSOS	65,28%										
LIGANTE	20,62%										
Traço aproximado em massa (Ligante: Finos: Areia)	1:0,91:4,29										
<p>Composição química (FRX)</p>											
Principais compostos presentes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O			
	34,03	34,84	24,41	3,28	0,91	0,47	0,11	0,64			
<p>Análise mineralógica (DRX)</p>											
Compostos cristalinos identificados	<p>Quartzo</p> <p>Calcita</p> <p>Óxido de ferro</p> <p>Cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel)</p>										
<p>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</p>											
Intervalos de temperatura (°C)	25→250	250→400	400→500	500→900	<p>Análise microestrutural</p> <p>Figura 1 – Morfologia da argamassa (x1000)</p> 						
Perdas de massa (%)	1,3	1,2	0,6	18,6							
 <p>TGA (%)</p> <p>DTGA (mg/seg)</p> <p>Temperatura (°C)</p>				<p>SEI 10kV WD10mm SS20 x1,000 10µm 0002 31 Jan 2017</p>							

APÊNDICE C

Fichas de caracterização e avaliação das adições

Ficha C.1 – Metacaulim

CARACTERIZAÇÃO	Parâmetro avaliado		Resultado obtido	
	Massa unitária	0,55 g/cm ³		
	Massa específica	2,62 g/cm ³		
	Distribuição granulométrica a laser	D _{10%}	4,78 µm	
		D _{50%}	14,48 µm	
		D _{90%}	39,07 µm	
		D _{MÁXIMO}	52,56 µm	
	Área superficial específica por BET	32,74 m ² /g		
	Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)	SiO ₂	56,38%	
		Al ₂ O ₃	33,94%	
		Fe ₂ O ₃	3,51%	
		CaO	0,08%	
		MgO	0,88%	
		SO ₃	0,04%	
		K ₂ O	3,02%	
		TiO ₂	1,91%	
		Na ₂ O	0,04%	
		SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	93,83%	
	Difratometria de Raios X (DRX)	Fase cristalina	Quartzo, muscovita, hematita, silicato de alumínio	
		Fase vítrea	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Aglomerado de partículas irregulares com superfície rugosa			
Perda ao fogo	4,3% (CV = 7%)			
Teor de umidade	0,50%			
Material retido na peneira 45µm	10% (valor aproximado, obtido a partir do gráfico de distribuição granulométrica a laser)			
Índice de desempenho com cimento	7 dias	100,83% (CV= 7,2%)		
Atividade pozolânica com a cal		10,20 MPa (CV= 3,7%)		
Método Chapelle modificado	677 mg de Ca(OH) ₂ /g de metacaulim			
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS POZOLÂNICAS	Característica	Requisitos		Conformidade
	Área superficial específica por BET	NBR15895-1	≥15m ² /g	Atende
	SiO ₂	NBR12653 (ABNT, 2014)	44% ≤ valor ≤ 65%	Atende
	Al ₂ O ₃		32% ≤ valor ≤ 46%	Atende
	SO ₃		≤ 1%	Atende
	Perda ao fogo	NBR15895-1 (ABNT,2010)	≤ 4%	Valor próximo do limite máximo
	Teor de umidade		≤ 2%	Atende
	Material retido na peneira 45µm		≤ 10%	Atende
	Índice de desempenho com cimento Portland, aos 7 dias		≥ 105%	Valor inferior ao limite mínimo
	Atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias		Sem exigência	Atende a NBR12653 (ABNT, 2014)
Consumo de mg de Ca(OH) ₂ /g de material pozolânico (Método Chapelle modificado)	≥750 mg de (CaOH) ₂ por g de material		Valor próximo do limite mínimo	

Ficha C.2 – Pó cerâmico

CARACTERIZAÇÃO	Parâmetro avaliado		Resultado obtido			
	Massa unitária		0,63 g/cm ³			
	Massa específica		2,76 g/cm ³			
	Distribuição granulométrica a laser	D _{10%}	1,45µm			
		D _{50%}	8,22µm			
		D _{90%}	35,06µm			
		D _{MÁXIMO}	49,75µm			
	Área superficial específica por BET		27,36 m ² /g			
	Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)	SiO ₂	53,39%			
		Al ₂ O ₃	20,39%			
		Fe ₂ O ₃	8,29%			
		CaO	9,82%			
		MgO	1,81%			
		SO ₃	1,36%			
		K ₂ O	2,81%			
		TiO ₂	1,26%			
		Na ₂ O	0,24%			
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		82,07%			
Difratometria de Raios X (DRX)	Fase cristalina	Quartzo, carbonato de cálcio, óxido de ferro, óxido de alumínio				
	Fase vítrea	SiO ₂ , Al ₂ O ₃				
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)		Partículas irregulares com superfície rugosa				
Perda ao fogo		10,44% (CV = 4%)				
Teor de umidade		0,10%				
Material retido na peneira 45µm		6,45% (valor aproximado, obtido a partir do gráfico de distribuição granulométrica a laser)				
Índice de desempenho com cimento	28 dias	101,74% (CV=4,0%)				
Atividade pozolânica com a cal	7 dias	4,1 MPa (CV= 2,8%)				
Método Chappelle modificado		231 mg de Ca(OH) ₂ /g de pó cerâmico				
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS POZOLÂNICAS	Característica		Requisitos		Conformidade	
	Área superficial específica por BET		NBR12653 (ABNT, 2014)	Não especificado	Atende a NBR 15894-1:2010 e a NBR 13956-1:2012	
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃			≥ 70%	Atende	
	SO ₃			≤ 4%	Atende	
	Perda ao fogo			≤ 6%	Valor superior ao limite máximo	
	Teor de umidade			≤ 3%	Atende	
	Material retido na peneira 45µm			≤ 20%	Atende	
	Índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias			≥ 90%	Atende	
	Atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias			≥ 6 MPa	Valor inferior ao limite mínimo	
	Consumo de mg de Ca(OH) ₂ /g de material pozolânico (Método Chappelle modificado)		Raverdy et al. (1980)	≥436 mg de (CaOH) ₂ por g de material	Valor inferior ao limite mínimo	

Ficha C.3 – Cinzas volantes

CARACTERIZAÇÃO	Parâmetro avaliado		Resultado obtido	
	Massa unitária		0,90 g/cm ³	
	Massa específica		1,95 g/cm ³	
	Distribuição granulométrica a laser	D _{10%}	5,13µm	
		D _{50%}	26,52µm	
		D _{90%}	76,61µm	
		D _{MÁXIMO}	101,4µm	
	Área superficial específica por BET		23,61 m ² /g	
	Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)	SiO ₂	57,73%	
		Al ₂ O ₃	26,68%	
		Fe ₂ O ₃	6,43%	
		CaO	1,80%	
		MgO	0,73%	
		SO ₃	0,46%	
		K ₂ O	3,66%	
		TiO ₂	1,65%	
		Na ₂ O	0,37%	
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		90,84%	
	Difratometria de Raios X (DRX)	Fase cristalina	Quartzo, Mulita, Hematita	
		Fase vítrea	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Partículas esféricas, com superfície lisa e homogênea, com dimensões variáveis			
Perda ao fogo	1,9% (CV = 11%)			
Teor de umidade	0,30%			
Material retido na peneira 45µm	14% (valor aproximado, obtido a partir do gráfico de distribuição granulométrica a laser)			
Índice de desempenho com cimento	28 dias	88,64% (CV= 5,1%)		
Atividade pozolânica com a cal	7 dias	3,9 MPa (CV= 3,3%)		
Método Chapelle modificado	411 mg de Ca(OH) ₂ /g de cinzas volantes			
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS POZOLÂNICAS	Característica		Requisitos	Conformidade
	Área superficial específica por BET		Não especificado	Atende a NBR 15894-1:2010 e a NBR 13956-1:2012
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		≥ 70%	Atende
	SO ₃		≤ 5%	Atende
	Perda ao fogo		≤ 6%	Atende
	Teor de umidade		≤ 3%	Atende
	Material retido na peneira 45µm		≤ 20%	Atende
	Índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias		≥ 90%	Valor próximo do limite mínimo
	Atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias		≥ 6 MPa	Valor inferior ao limite mínimo
	Consumo de mg de Ca(OH) ₂ /g de material pozolânico (Método Chapelle modificado)		Raverdy et al. (1980) ≥436 mg de (CaOH) ₂ por g de material	Valor próximo do limite mínimo

Ficha C.4 – Sílica ativa

CARACTERIZAÇÃO	Parâmetro avaliado		Resultado obtido			
	Massa unitária		0,49 g/cm ³			
	Massa específica		2,17 g/cm ³			
	Distribuição granulométrica a laser	D _{10%}	6,09 µm			
		D _{50%}	21,07 µm			
		D _{90%}	55,73 µm			
		D _{MÁXIMO}	75,45 µm			
	Área superficial específica por BET		26,09 m ² /g			
	Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX)	SiO ₂	93,05%			
		Al ₂ O ₃	0,15%			
		Fe ₂ O ₃	1,38%			
		CaO	0,45%			
		MgO	1,14%			
		SO ₃	0,48%			
		K ₂ O	2,14%			
		TiO ₂	-			
		Na ₂ O	1,06%			
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		94,58%			
	Difratometria de Raios X (DRX)	Fase cristalina	-			
		Fase vítrea	SiO ₂			
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)		Partículas irregulares com superfície rugosa				
Perda ao fogo		3,09% (CV = 13%)				
Teor de umidade		0,10%				
Material retido na peneira 45µm		11% (valor aproximado, obtido a partir do gráfico de distribuição granulométrica a laser)				
Índice de desempenho com cimento	7 dias	104,44% (CV=14,8%)				
Atividade pozolânica com a cal		8,9 MPa (CV= 2,4%)				
Método Chapelle modificado		998 mg de Ca(OH) ₂ /g de sílica ativa				
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS POZOLÂNICAS	Característica		Requisitos		Conformidade	
	Área superficial específica por BET		NBR13956-1 (ABNT,2012)	15 m ² /g ≤ BET ≤ 30 m ² /g	Atende	
	SiO ₂			≥ 85%	Atende	
	Al ₂ O ₃			Sem exigência	-	
	SO ₃			Sem exigência	-	
	Perda ao fogo			≤ 6%	Atende	
	Teor de umidade			≤ 3%	Atende	
	Material retido na peneira 45µm			≤ 10%	Valor superior ao limite máximo	
	Índice de desempenho com cimento Portland, aos 7 dias			≥ 105%	Valor próximo do limite mínimo	
	Atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias			Sem exigência	Atende a NBR12653 (ABN, 2014)	
	Consumo de mg de Ca(OH) ₂ /g de material pozolânico (Método Chapelle modificado)			≥750 mg de (CaOH) ₂ por g de material	Atende	

APÊNDICE D

Resultados dos ensaios das argamassas estudadas

Quadro D.1 – Massa específica das argamassas estudadas, aos 28, 90 e 180 dias

ARGAMASSA		Massa Específica (método geométrico)			Massa Específica (método pesagem hidrostática)		
		28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias
1	CA-1/3	1686	1705	1678	1686	1716	1717
2	CA-1/2	1740	1804	1793	1743	1769	1777
3	50M-1/2,5	1746	1757	1778	1753	1767	1775
4	50M-1/3	1734	1758	1745	1763	1771	1779
5	100PC-1/2	1740	1763	1815	1776	1782	1790
6	50PC-1/3	1773	1822	1786	1787	1798	1800
7	100PC-1/4	1784	1779	1795	1795	1800	1790
8	50SA-1/3	1772	1734	1742	1715	1748	1757
9	50CV-1/3	1812	1783	1785	1795	1806	1814
10	40M10CV-1/3	1778	1760	1801	1757	1779	1773
11	25M25CV-1/3	1787	1786	1803	1772	1777	1792
12	25M25PC-1/3	1777	1780	1775	1761	1775	1790

Quadro D.2 – Quociente entre as resistências mecânicas das argamassas

Composição		Resistência à tração (MPa)		Resistência à compressão (MPa)		Rt/Rc	
		90 dias	180 dias	90 dias	180 dias	90 dias	180 dias
C.1	CA-1/3	0,9	0,7	1,2	1,0	0,8	0,6
C.2	CA-1/2	0,2	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5
C.3	50M-1/2,5	0,6	0,5	1,9	1,7	0,3	0,3
C.4	50M-1/3	0,4	0,5	1,2	1,0	0,3	0,5
C.5	100PC-1/2	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4	0,4
C.6	50PC-1/3	0,4	0,4	0,7	0,7	0,5	0,6
C.7	100PC-1/4	0,3	0,3	0,6	0,7	0,5	0,5
C.8	50SA-1/3	1,5	0,8	1,5	1,1	1,0	0,8
C.9	50CV-1/3	0,7	0,6	1,0	0,9	0,7	0,7
C.10	40M10CV-1/3	0,3	0,3	1,4	1,1	0,2	0,3
C.11	25M25CV-1/3	0,4	0,3	1,1	0,8	0,3	0,3
C.12	25M25PC-1/3	0,2	0,2	1,2	0,9	0,2	0,2

Quadro D.6 – Síntese dos resultados de absorção de água por capilaridade

Composição	Idade (dias)								
	Absorção capilar, em 24h (kg/m ²)			Coeficiente de capilaridade (Kg/m ² .min ^{1/2})					
				Aos 5 min			Entre 10 e 90 min		
	28	90	180	28	90	180	28	90	180
CA-1/3	31,3	26,5	21,3	2,6	1,5	0,6	1,2	1,1	1,0
CA-1/2	34,6	33,6	32,7	1,9	1,2	0,6	2,1	2,0	2,0
50M-1/2,5	44,3	43,2	41,7	1,9	2,2	1,5	1,7	1,9	1,9
50M-1/3	43,2	42,3	42,0	1,9	2,2	2,2	1,7	2,0	2,0
100PC-1/2	37,3	36,7	37,2	2,6	2,7	2,4	2,1	2,3	2,7
50PC-1/3	36,8	35,4	36,2	2,7	2,4	2,5	2,2	2,2	2,3
100PC-1/4	37,0	35,7	36,6	2,8	2,7	2,4	2,2	2,2	2,1
50SA-1/3	40,3	39,7	39,7	2,5	2,5	2,6	2,5	2,8	3,1
50CV-1/3	30,6	29,8	29,2	1,7	1,4	0,3	1,6	1,6	1,3
40M10CV-1/3	38,1	35,5	37,0	2,3	1,6	2,9	2,0	2,0	2,0
25M25CV-1/3	36,7	36,1	35,7	1,9	2,4	2,6	2,4	2,3	2,3
25M25PC-1/3	39,3	39,2	38,5	2,6	2,4	3,4	2,2	2,6	2,4

Quadro D.7 – Resultados obtidos, aos 28 dias, no ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão

Composição	50M - 1/3				CA - 1/2				50 CV-1/3				50PC -1/3			
	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)
	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
5	0,5	0,3	0,2	0,3	1,6	1,2	0,8	1,2	0	0,3	0,1	0,1	0	0,2	0	0,1
10	0,8	0,5	0,3	0,5	2,9	2,5	1,8	2,4	0,2	0,6	0,2	0,3	0	0,3	0,2	0,2
15	1	0,5	0,3	0,6	4	3,7	2,5	3,4	0,2	0,9	0,3	0,5	0	0,4	0,2	0,2
30	1,4	0,8	0,4	0,9	4	4	4	4,0	0,5	1,8	0,5	0,9	0,1	0,6	0,2	0,3

Quadro D.8 – Resultados obtidos, aos 90 dias, no ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão

Composição	50M - 1/3				CA - 1/2				50 CV-1/3				50PC -1/3			
	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)	Água Absorvida (cm ³)			Média (cm ³)
	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
5	0,6	0,3	0,7	0,5	0,7	0,7	n.d	0,7	0,5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	0,1
10	0,8	0,3	1,2	0,8	1,4	1,4	n.d	1,4	0,6	0	0,2	0,3	0,3	0	0	0,1
15	1,1	0,3	1,6	1,0	2,1	2,2	n.d	2,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,4	0	0	0,1
30	1,7	0,5	2,3	1,5	4	4	n.d	4,0	1,2	0,1	0,2	0,5	0,8	0	0	0,3

n.d. - valor não determinado devido à perda de água entre o tubo e a superfície do revestimento.

Figura D.1 – Gráfico da massa específica, pelo método geométrico

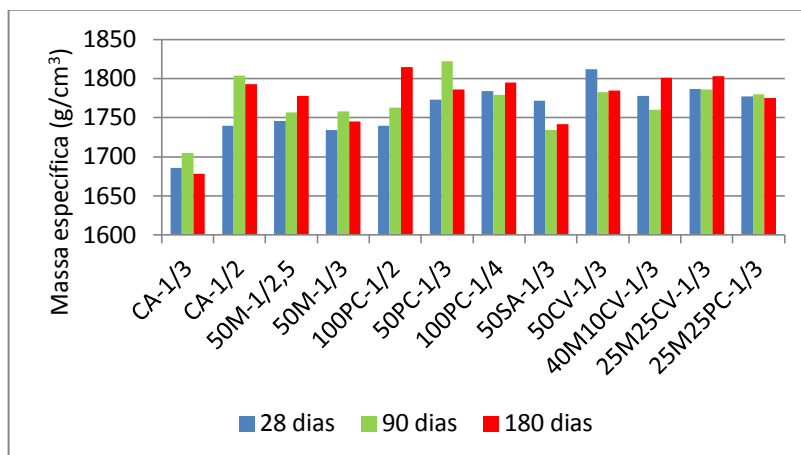


Figura D.2 – Gráfico da massa específica, por pesagem hidrostática

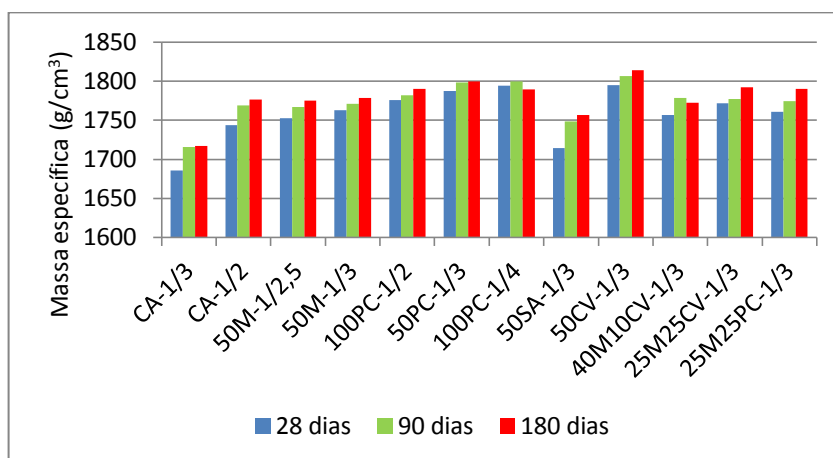


Figura D.3 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, aos 28 dias

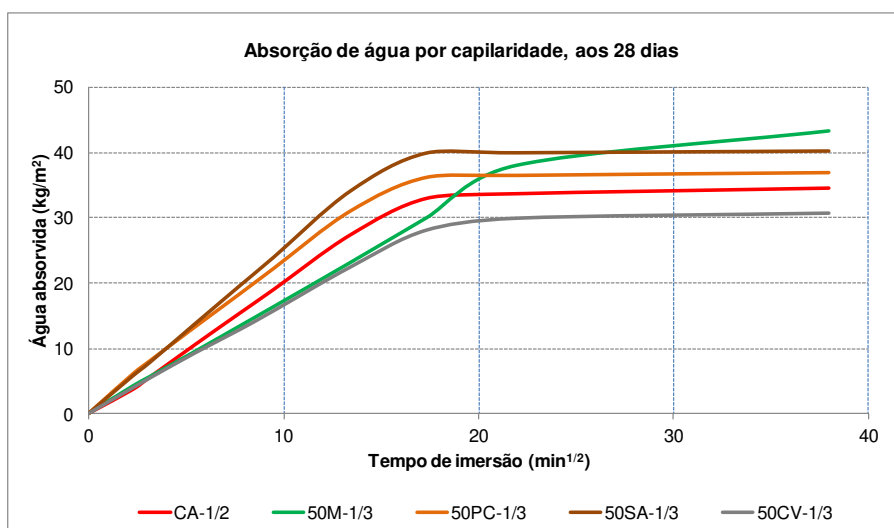


Figura D.4 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, aos 90 dias

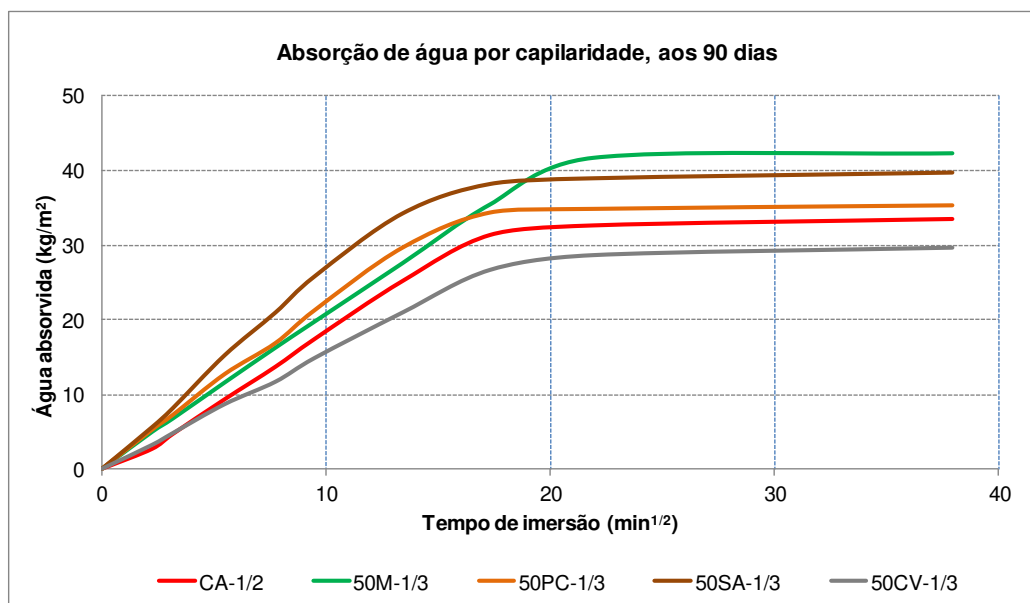


Figura D.5 – Gráfico da absorção de água por capilaridade e secagem, aos 180 dias

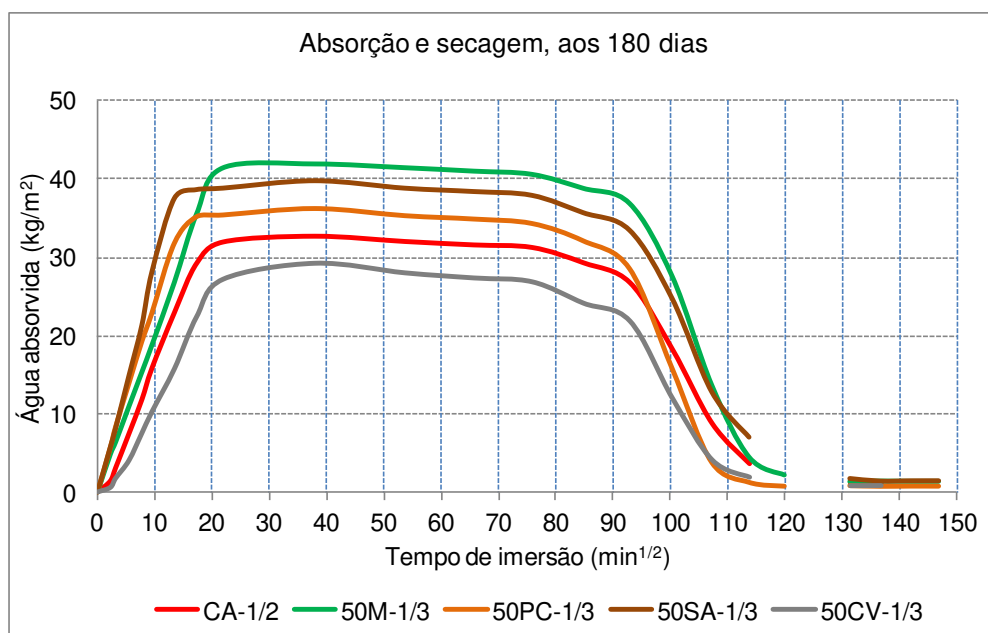


Figura D.6 – Difratomogramas da argamassa CA-1/2, aos 7, 28, 90 e 180 dias

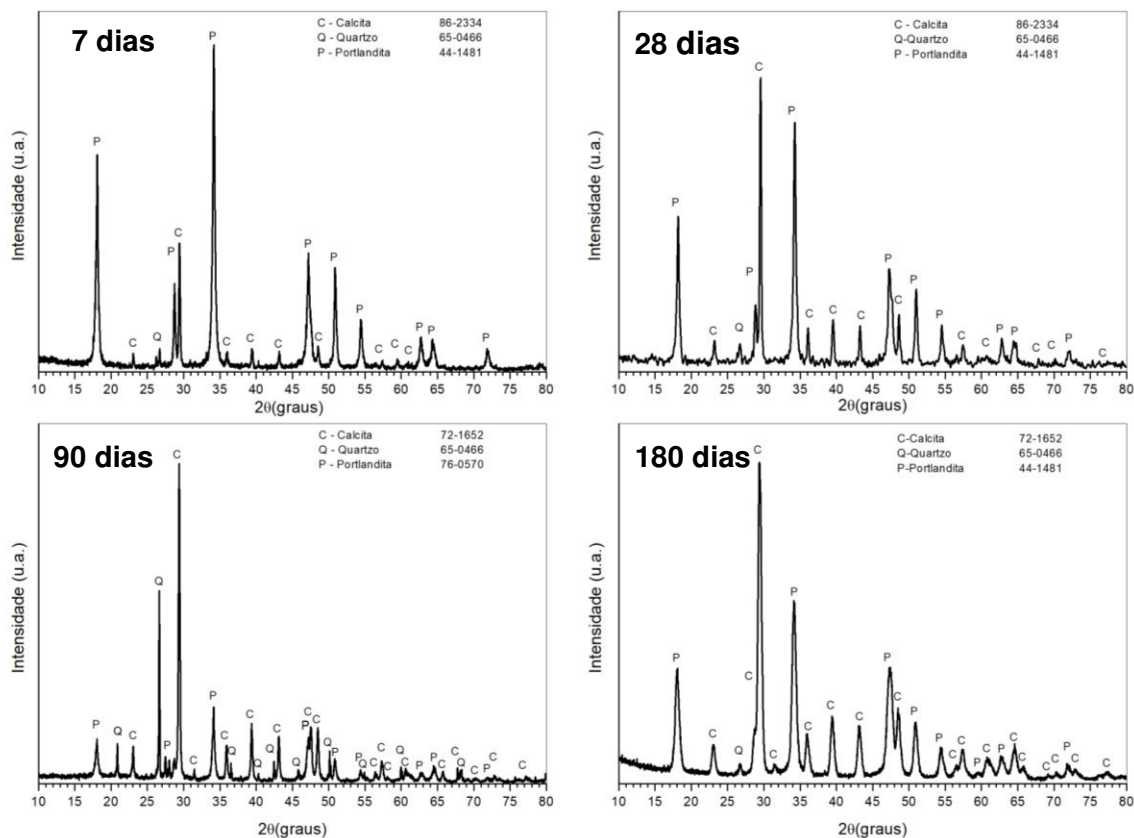


Figura D.7 – Difratomogramas da argamassa 50M-1/3, aos 7, 28, 90 e 180 dias

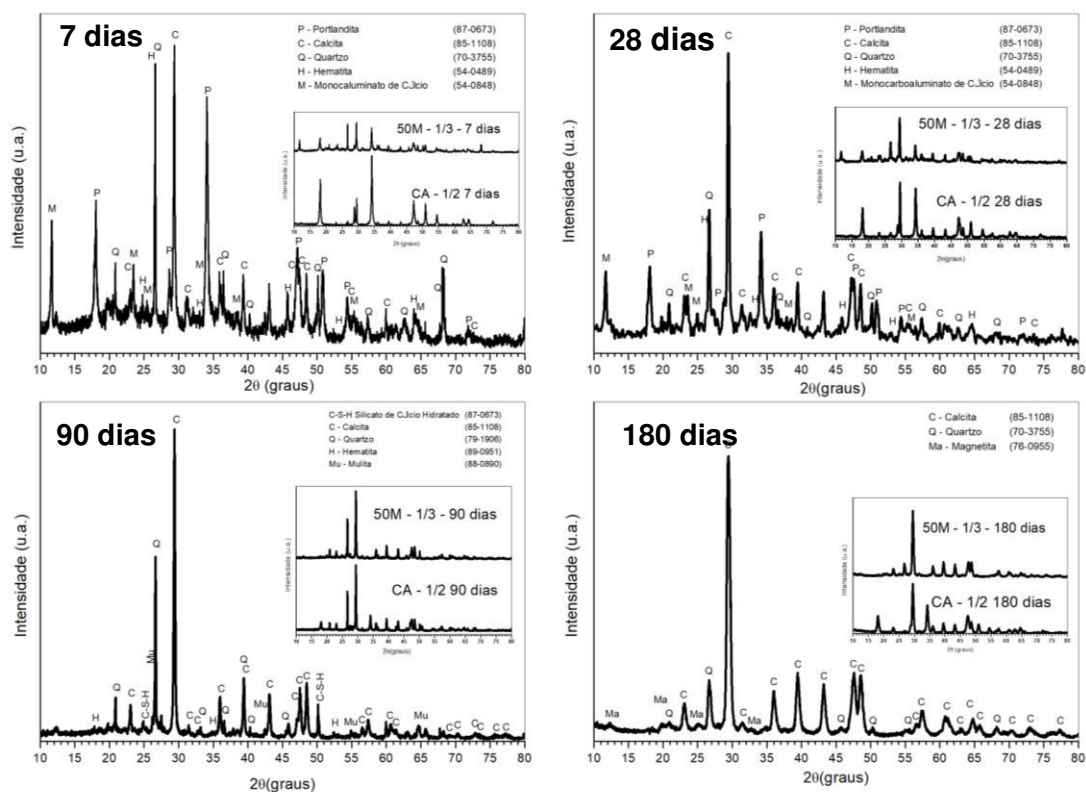


Figura D.8 – Difratomogramas da argamassa 50PC-1/3, aos 7, 28, 90 e 180 dias

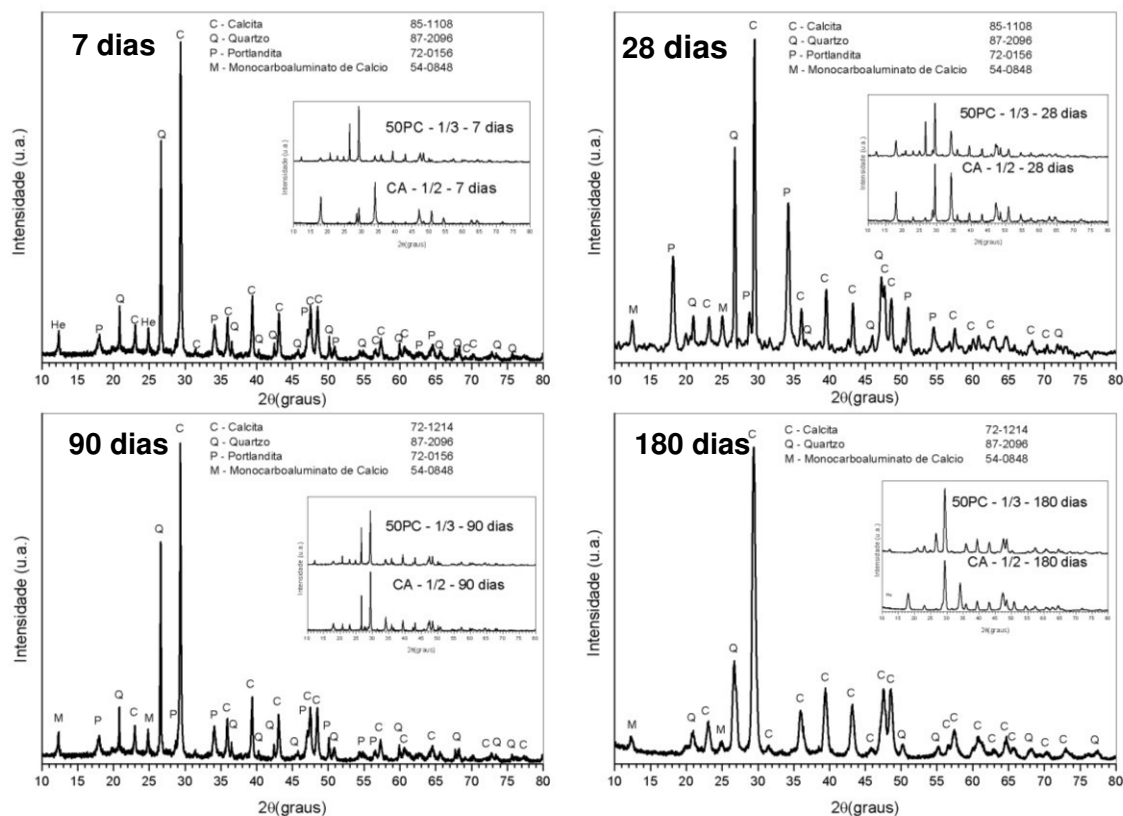


Figura D.9 – Difratomogramas da argamassa 50SA-1/3, aos 7, 28, 90 e 180 dias

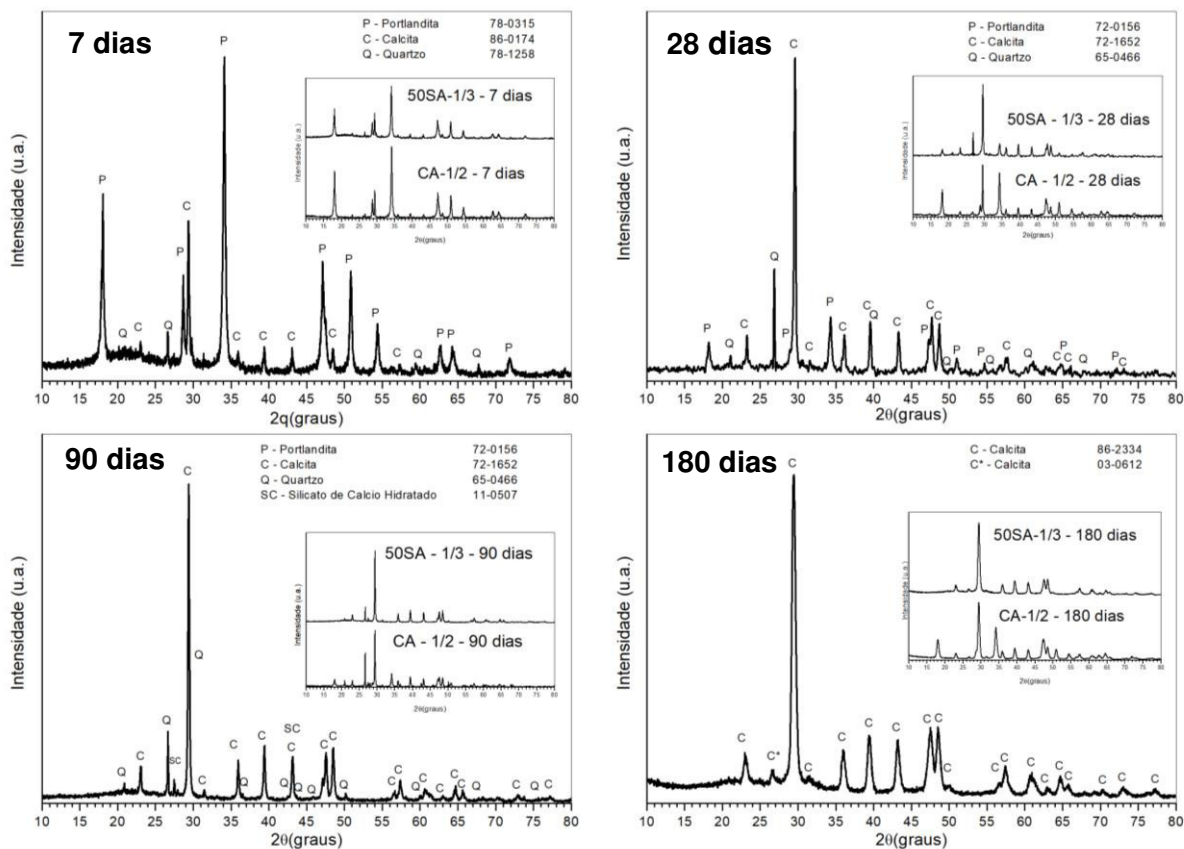


Figura D.10 – Difractogramas da argamassa 50CV-1/3, aos 7, 28, 90 e 180 dias

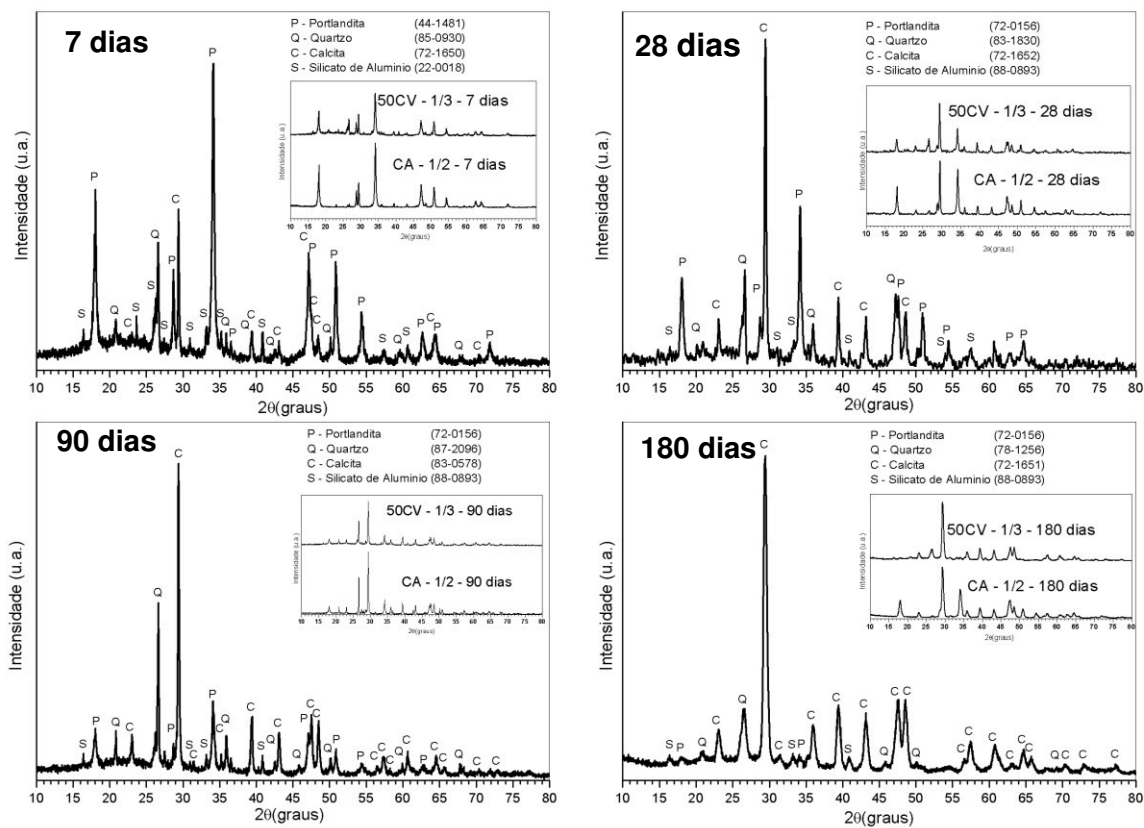


Figura D.11 – Ensaio de resistência aos cloretos. Corpos de prova de CA-1/2: evolução ao longo dos ciclos de umedecimento/secagem

1° CICLO (12/03/18)



23° CICLO (28/03/18)



47° CICLO (09/04/18)



75° CICLO (23/04/18)



Figura D.12 – Ensaio de resistência aos cloretos. Corpos de prova de 50M-1/3: evolução ao longo dos ciclos de umedecimento/secagem

1° CICLO (12/03/18)



23° CICLO (28/03/18)



47° CICLO (09/04/18)



75° CICLO (23/04/18)



Figura D.13 – Ensaio de resistência aos cloretos. Corpos de prova de 50PC-1/3: evolução ao longo dos ciclos de umedecimento/secagem

1° CICLO (12/03/18)



23° CICLO (28/03/18)



47° CICLO (09/04/18)



75° CICLO (23/04/18)



Figura D.14 – Ensaio de resistência aos cloretos. Corpos de prova de 50SA-1/3: evolução ao longo dos ciclos de umedecimento/secagem

1° CICLO (12/03/18)



23° CICLO (28/03/18)



47° CICLO (09/04/18)



75° CICLO (23/04/18)



Figura D.15 – Ensaio de resistência aos cloretos. Corpos de prova de 50CV-1/3: evolução ao longo dos ciclos de umedecimento/secagem

1° CICLO (12/03/18)



23° CICLO (28/03/18)



47° CICLO (09/04/18)



75° CICLO (23/04/18)



Figura D.16 – Ensaio de resistência aos sulfatos. Corpos de prova de CA-1/2: evolução ao longo dos ciclos de imersão e secagem



Figura D.17 – Ensaio de resistência aos sulfatos. Corpos de prova de 50M-1/3: evolução ao longo dos ciclos de imersão e secagem

11° CICLO (06/03/18)



12° CICLO (07/03/18)



13° CICLO (08/03/18)



14° CICLO (08/03/18)



Figura D.18 – Ensaio de resistência aos sulfatos. Corpos de prova de 50PC-1/3: evolução ao longo dos ciclos de imersão e secagem

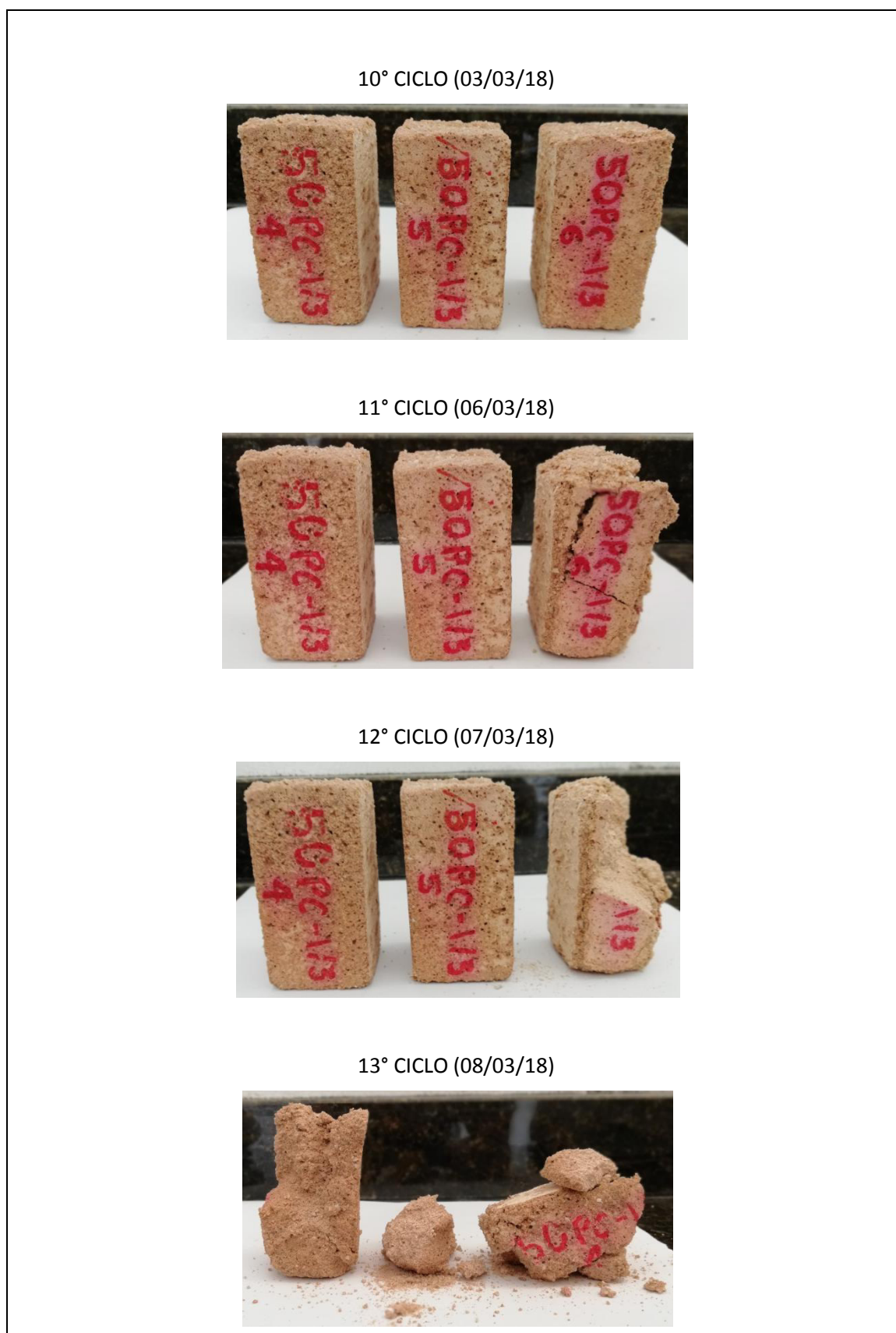


Figura D.19 – Ensaio de resistência aos sulfatos. Corpos de prova de 50SA-1/3: evolução ao longo dos ciclos de imersão e secagem

10° CICLO (03/03/18)



11° CICLO (06/03/18)



12° CICLO (07/03/18)



13° CICLO (08/03/18)



Figura D.20 – Ensaio de resistência aos sulfatos. Corpos de prova de 50CV-1/3: evolução ao longo dos ciclos de imersão e secagem

10° CICLO (03/03/18)



11° CICLO (06/03/18)



12° CICLO (07/03/18)



13° CICLO (08/03/18)



Figura D.21 – Gráfico da variação média de massa dos corpos de prova por ação de sulfatos

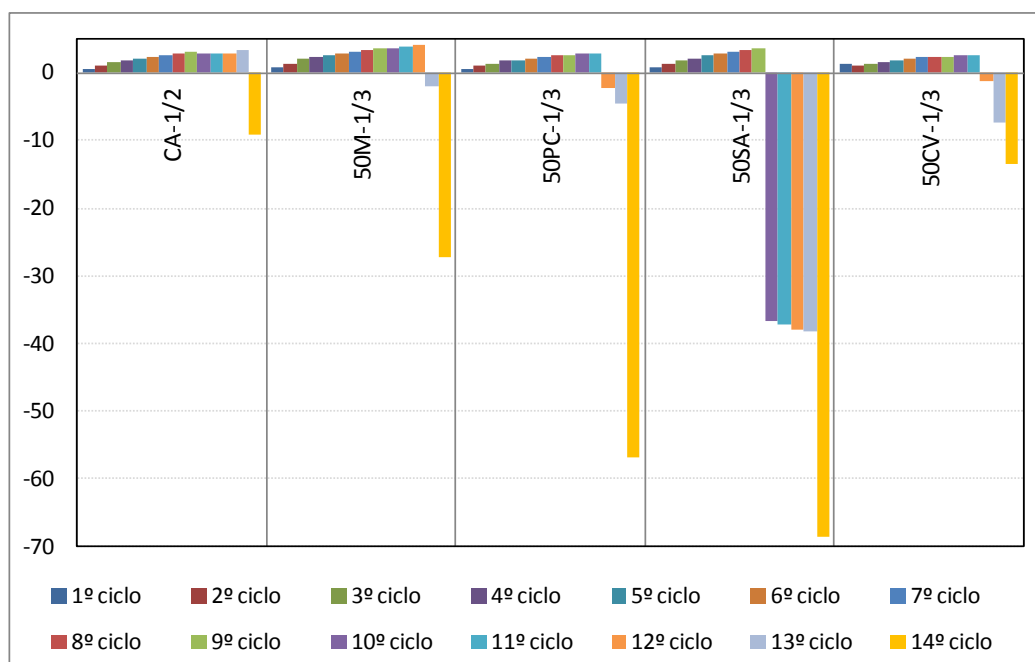


Figura D.22 – Seções de ruptura dos corpos de prova das argamassas dos Painéis da Igreja de Monserrate, aos 28 dias

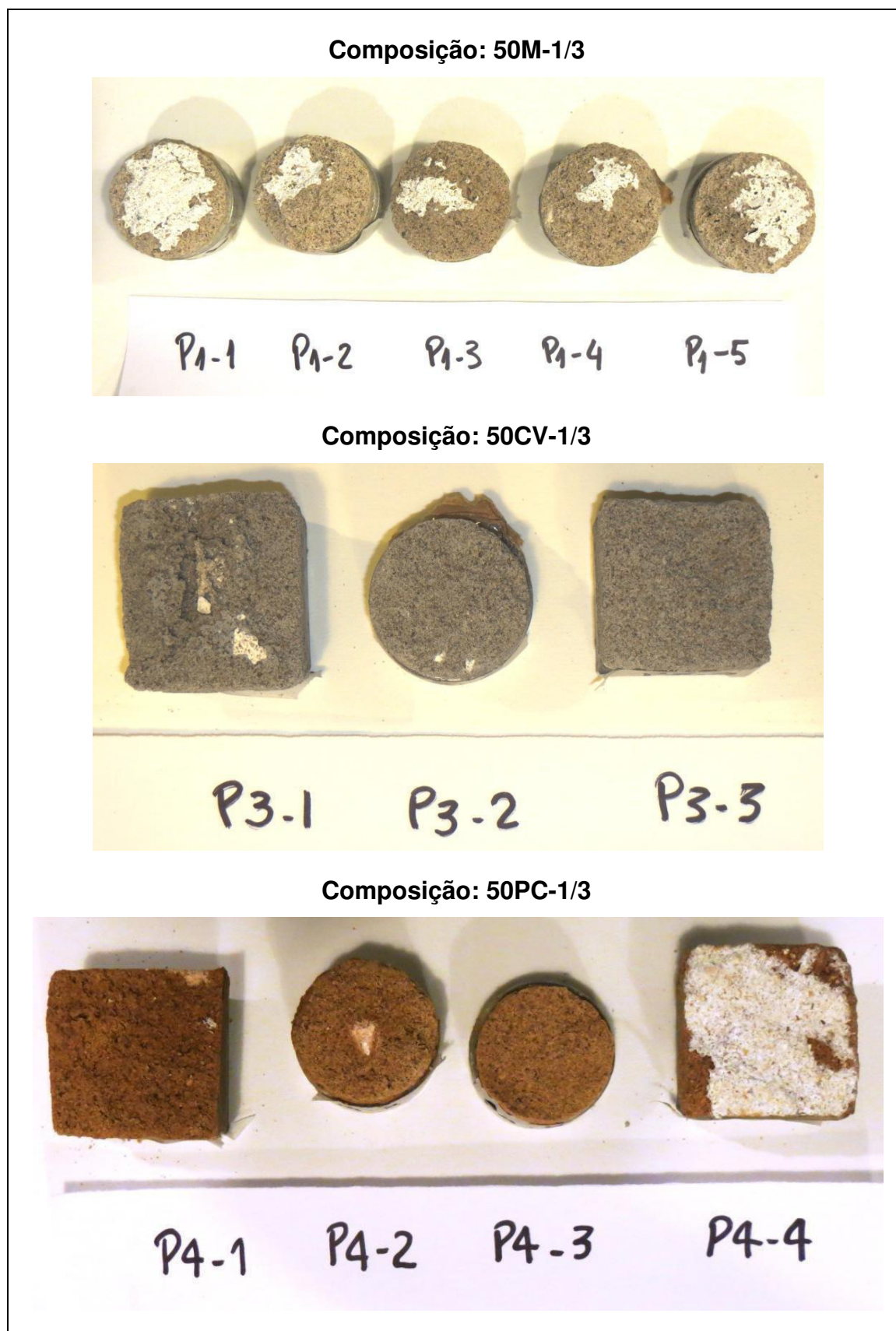


Figura D.23 – Seções de ruptura dos corpos de prova das argamassas dos Painéis da Igreja de Monserrate, aos 90 dias

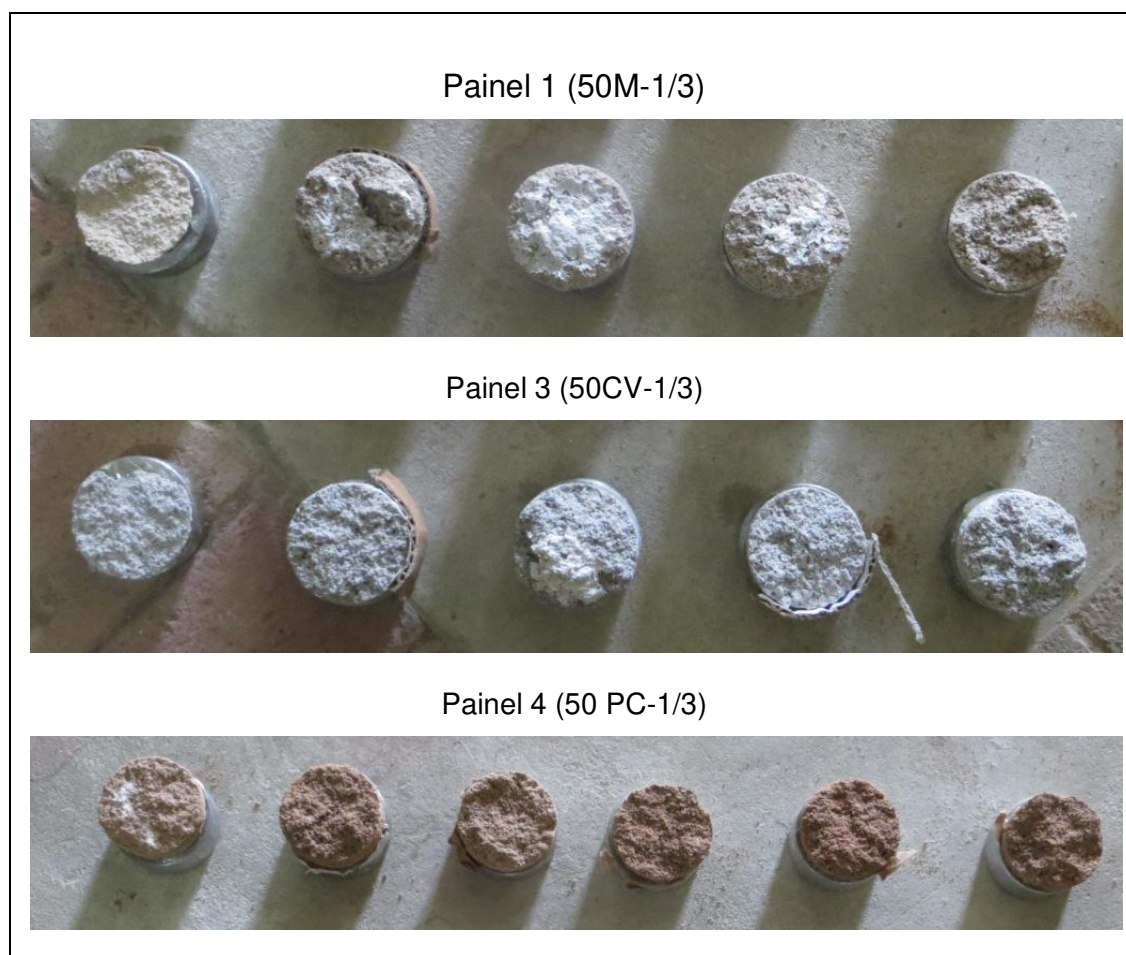


Tabela D.1 – Resultados de índice de vazios ou porosidade aberta (método da pesagem hidrostática), aos 28, 90 e 180 dias

COMPOSIÇÃO		28 dias	DesvPad	CV(%)	90 dias	DesvPad	CV(%)	180 dias	DesvPad	CV(%)
1	CA-1/3	22	0,4	1,9	19	0,3	1,7	17	0,5	3,2
2	CA-1/2	22	0,1	0,6	22	0,0	0,1	21	0,1	0,6
3	50M-1/2,5	28	0,2	0,8	27	0,2	0,8	27	0,3	1,1
4	50M-1/3	27	0,2	0,7	26	0,1	0,4	26	0,1	0,3
5	100PC-1/2	24	0,0	0,1	26	0,2	0,6	25	0,1	0,3
6	50PC-1/3	23	2,5	10,9	24	0,2	0,7	24	0,2	0,8
7	100PC-1/4	23	0,1	0,5	24	0,2	0,8	25	0,1	0,3
8	50SA-1/3	26	0,3	1,2	26	0,1	0,5	26	0,2	0,7
9	50CV-1/3	19	0,3	1,7	19	0,2	0,9	19	0,4	2,2
10	40M10CV-1/3	24	0,4	1,8	22	1,1	4,8	24	0,4	1,8
11	25M25CV-1/3	23	0,3	1,1	24	0,4	1,7	25	0,3	1,3
12	25M25PC-1/3	25	0,4	1,7	25	0,4	1,7	26	0,4	1,4

Tabela D.2 – Resultados de porosidade aberta, aos 90 dias (método à vácuo)

COMPOSIÇÃO		Porosidade aberta (%)					MÉDIA (%)	DesvPad	CV (%)
		1	2	3	4	5			
C.1	CA-1/3	35,3	35,4	34,1	-	-	35	0,7	2,0
C.2	CA-1/2	30,8	31,6	30,4	29,7	31,3	31	0,7	2,4
C.3	50M-1/2,5	32,4	32,6	32,1	32,2	32,8	32	0,3	1,0
C.4	50M-1/3	32,4	32,9	32,3	32,4	-	32	0,2	0,8
C.5	100PC-1/2	32,0	32,5	32,2	31,6	33,7	32	0,8	2,5
C.6	50PC-1/3	32,3	31,5	32,0	31,4	31,5	32	0,4	1,2
C.7	100PC-1/4	30,5	32,3	30,7	31,0	31,5	31	0,7	2,3
C.8	50SA-1/3	31,3	31,5	31,2	30,7	31,1	31	0,3	1,0
C.9	50CV-1/3	29,8	28,7	29,6	29,3	29,6	29	0,4	1,5
C.10	40M10CV-1/3	31,4	31,3	32,4	31,5	32,7	32	0,7	2,1
C.11	25M25CV-1/3	29,7	30,5	30,8	29,0	-	30	0,8	2,7
C.12	25M25PC-1/3	31,6	31,3	31,7	31,4	-	31	0,2	0,6

Tabela D.3 – Resultados de Módulo de Elasticidade, aos 28 dias

COMPOSIÇÃO	Valores médios de tempo (μ s)	Velocidade (Km/Seg)	Massa (g)	Densidade (Kg/m ³)	Média	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)
1 CA-1/3	178	0,90	429,6	1678	1674	1226	1263	40,4	3,2
	173	0,93	433,0	1691		1306			
	174	0,92	423,3	1654		1255			
2 CA-1/2	120	1,34	442,7	1729	1753	2779	2896	119,0	4,1
	118	1,35	450,3	1759		2892			
	116	1,38	453,6	1772		3017			
3 50M-1/2,5	113	1,41	446,1	1742	1742	3120	3039	73,3	2,4
	116	1,38	451,4	1763		3019			
	115	1,39	440,1	1719		2978			
4 50M-1/3	118	1,36	463,8	1812	1788	2999	2761	237,4	8,6
	123	1,30	462,7	1807		2759			
	126	1,27	447,0	1746		2524			
5 100PC-1/2	143	1,12	447,8	1749	1746	1984	2147	167,5	7,8
	131	1,22	443,8	1734		2319			
	137	1,16	449,0	1754		2138			
6 50PC-1/3	115	1,39	453,2	1770	1773	3100	3263	486,3	14,9
	104	1,54	454,1	1774		3810			
	119	1,34	454,3	1775		2879			
7 100PC-1/4	115	1,39	453,7	1772	1764	3086	2865	213,0	7,4
	124	1,29	451,5	1764		2661			
	119	1,34	449,6	1756		2848			
8 50SA-1/3	171	0,93	448,3	1751	1747	1376	1444	108,6	7,5
	170	0,94	445,1	1739		1386			
	160	1,00	448,1	1750		1569			
9 50CV-1/3	79	2,02	452,8	1769	1800	6513	6245	288,6	4,6
	83	1,93	454,4	1775		5940			
	83	1,94	475,3	1857		6282			
10 40M10CV-1/3	113	1,41	462,0	1805	1808	3235	3004	227,7	7,6
	119	1,35	468,5	1830		2995			
	122	1,31	458,4	1790		2780			
11 25M25CV-1/3	121	1,32	453,9	1773	1784	2792	2795	12,0	0,4
	122	1,31	459,9	1796		2785			
	121	1,32	456,7	1784		2808			
12 25M25PC-1/3	130	1,23	455,2	1778	1764	2412	2560	128,6	5,0
	124	1,29	451,2	1762		2650			
	124	1,29	448,5	1752		2616			

Tabela D.4 – Resultados de Módulo de Elasticidade, aos 90 dias

COMPOSIÇÃO		Valores médios de tempo (μ s)	Velocidade (Km/Seg)	Massa (g)	Densidade (Kg/m^3)	Média	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)
1	CA-1/3	88	1,83	434,3	1696	1701	5098	5008	246,2	4,9
		91	1,75	437,7	1710		4730			
		87	1,84	434,3	1696		5197			
2	CA-1/2	113	1,41	453,3	1771	1786	3180	3382	346,5	10,2
		114	1,41	456,5	1783		3184			
		105	1,53	462,0	1804		3782			
3	50M-1/2,5	127	1,26	449,6	1756	1764	2498	2235	235,7	10,5
		141	1,14	450,9	1761		2042			
		137	1,16	454,1	1774		2166			
4	50M-1/3	139	1,15	463,1	1809	1785	2154	2000	133,5	6,7
		146	1,09	461,2	1801		1938			
		145	1,10	446,4	1744		1909			
5	100PC-1/2	137	1,17	451,8	1765	1763	2173	2169	8,8	0,4
		136	1,18	447,9	1750		2175			
		138	1,16	454,2	1774		2159			
6	50PC-1/3	-	-	-	-	1774	-	3356	81,3	2,4
		111	1,44	454,1	1774		3299			
		109	1,46	454,3	1775		3413			
7	100PC-1/4	120	1,34	453,7	1772	1764	2845	2836	274,3	9,7
		126	1,27	451,5	1764		2557			
		114	1,40	449,6	1756		3105			
8	50SA-1/3	191	0,84	450,1	1758	1757	1112	1203	127,2	10,6
		187	0,86	446,9	1746		1149			
		174	0,92	452,4	1767		1349			
9	50CV-1/3	84	1,91	452,8	1769	1779	5789	5653	161,2	2,9
		85	1,89	455,3	1779		5694			
		87	1,84	458,0	1789		5475			
10	40M10CV-1/3	134	1,19	463,3	1810	1812	2315	2239	164,7	7,4
		134	1,19	468,5	1830		2352			
		142	1,13	459,5	1795		2050			
11	25M25CV-1/3	128	1,25	456,4	1783	1788	2519	2417	88,7	3,7
		133	1,21	461,3	1802		2356			
		131	1,22	455,9	1781		2376			
12	25M25PC-1/3	147	1,09	454,1	1774	1760	1896	2069	162,4	7,8
		139	1,15	450,1	1758		2094			
		135	1,19	447,4	1748		2218			

Tabela D.5 – Resultados de Módulo de Elasticidade, aos 180 dias

COMPOSIÇÃO		Valores médios de tempo (μ s)	Velocidad e (Km/Seg)	Massa (g)	Densidade (Kg/m ³)	Média	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)
1	CA-1/3	86	1,87	432,3	1689	1686	5322	5337	13,2	0,2
		86	1,87	436,4	1705		5341			
		85	1,89	426,1	1664		5347			
2	CA-1/2	117	1,36	450,0	1758	1778	2937	3178	312,7	9,8
		116	1,38	454,8	1776		3065			
		108	1,48	460,4	1799		3531			
3	50M-1/2,5	147	1,09	447,2	1747	1777	1856	1783	331,6	18,6
		171	0,94	460,8	1800		1421			
		141	1,14	456,5	1783		2072			
4	50M-1/3	161	1,00	463,7	1811	1784	1619	1649	186,6	11,3
		150	1,07	460,8	1800		1848			
		165	0,97	446,0	1742		1479			
5	100PC-1/2	149	1,08	449,4	1755	1751	1831	1811	60,7	3,3
		147	1,09	444,9	1738		1859			
		153	1,05	450,6	1760		1743			
6	50PC-1/3	112	1,43	449,7	1757	1789	3225	3408	210,7	6,2
		108	1,49	469,3	1833		3638			
		110	1,45	455,2	1778		3360			
7	100PC-1/4	128	1,25	451,3	1763	1763	2466	2559	179,4	7,0
		129	1,24	449,4	1755		2445			
		121	1,32	453,2	1770		2766			
8	50SA-1/3	211	0,76	451,5	1764	1761	910	938	77,7	8,3
		214	0,75	448,6	1752		878			
		199	0,80	452,4	1767		1026			
9	50CV-1/3	83	1,94	452,5	1767	1776	5976	6101	174,0	2,9
		81	1,98	454,9	1777		6300			
		83	1,94	456,4	1783		6028			
10	40M10CV-1/3	146	1,10	461,6	1803	1802	1952	1892	144,7	7,6
		145	1,10	466,4	1822		1998			
		154	1,04	456,2	1782		1727			
11	25M25CV-1/3	Não determinado								
12	25M25PC-1/3	Não determinado								

Tabela D.6 – Resultados de Módulo de Elasticidade, aos 365 dias

COMPOSIÇÃO		Valores médios de tempo (μ s)	Velocidad e (Km/Seg)	Massa (g)	Densidade (Kg/m ³)	Média	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)
2	CA-1/2	106	1,52	450,6	1760	1768	3640	3855	408,6	10,6
		106	1,52	445,4	1740		3599			
		98	1,63	461,7	1804		4327			
4	50M-1/3	160	1,00	465,6	1819	1792	1644	1514	124,9	8,3
		173	0,93	462,8	1808		1395			
		164	0,98	448,2	1751		1502			
6	50PC-1/3	108	1,48	460,9	1800	1791	3530	3631	133,8	3,7
		107	1,49	457,2	1786		3579			
		104	1,53	457,2	1786		3782			
8	50SA-1/3	213	0,75	453,1	1770	1767	902	982	99,8	10,2
		206	0,78	449,8	1757		950			
		193	0,83	454,3	1775		1094			
9	50CV-1/3	84	1,90	453,4	1771	1779	5758	5908	167,3	2,8
		82	1,95	455,8	1780		6088			
		84	1,91	457,4	1787		5876			

Tabela D.7 – Resultados de resistência à tração e à compressão, aos 28 dias

COMPOSIÇÃO	Resistência à tração (MPa)			CV (%)	Resistência à compressão (MPa)				
	Média	DesvPad			Média	DesvPad	CV (%)		
C1	CA-1/3	0,6 0,4 -	0,5	0,1	20,2	0,7 0,6 0,7	0,7	0,02	3,1
C2	CA-1/2	0,3 0,3 0,4	0,3	0,1	16,7	0,3 0,5 0,4	0,4	0,11	30,0
C3	50M-1/2,5	0,8 0,8 0,8	0,8	0,0	4,9	2,4 2,4 2,4	2,4	0,02	0,9
C4	50M-1/3	0,5 0,5 0,7	0,6	0,1	22,9	1,7 1,7 1,8	1,7	0,1	3,7
C5	100PC-1/2	0,3 0,3 0,3	0,3	0,0	7,7	0,4 0,4 0,4	0,4	0,01	1,3
C6	50PC-1/3	0,3 0,7 0,2	0,4	0,2	61,4	0,8 0,8 0,9	0,8	0,02	2,0
C7	100PC-1/4	0,2 0,4 0,4	0,4	0,0	7,9	0,8 0,9 0,9	0,9	0,05	5,2
C8	50SA-1/3	0,2 0,9 0,7 0,8	0,8	0,1	11,8	2,8 3,0 3,3 2,9	3,0	0,19	6,3
C9	50CV-1/3	0,7 0,8 0,8	0,7	0,0	6,6	0,9 0,9 0,7	0,9	0,09	10,9
C10	40M10CV-1/3	0,5 - 0,8	0,7	0,4	64,4	1,7 1,8 1,8	1,8	0,07	3,7
C11	25M25CV-1/3	0,8 - -	0,8	-	-	1,4 1,3 1,3	1,3	0,04	3,1
C12	25M25PC-1/3	0,7 - -	0,7	-	-	1,5 1,4 1,5	1,4	0,05	3,7

Tabela D.8 – Resultados de resistência à tração e à compressão, aos 90 dias

COMPOSIÇÃO	Resistência à tração (MPa)			Resistência à compressão (MPa)			Média	DesvPad	CV (%)
	Média	DesvPad	CV (%)	Média	DesvPad	CV (%)			
C1	CA-1/3	-			1,2				
		0,9	0,9	0,1	8,0	1,2	1,2	0,1	4,6
		1,0				1,1			
C2	CA-1/2	0,2				0,5			
		0,2	0,2	0,0	6,9	0,7	0,6	0,1	15,5
		0,2				0,5			
C3	50M-1/2,5	0,6				1,8			
		0,5	0,6	0,1	9,8	1,9	1,9	0,1	7,2
		0,6				2,1			
C4	50M-1/3	0,4				1,3			
		0,3	0,4	0,0	7,1	1,1	1,2	0,1	11,0
		0,4				1,1			
C5	100PC-1/2	0,2				0,6			
		0,3	0,3	0,0	17,8	0,6	0,6	0,0	7,7
		0,3				0,7			
C6	50PC-1/3	0,4				0,6			
		0,3	0,4	0,0	10,0	0,7	0,7	0,1	10,8
		0,4				0,8			
C7	100PC-1/4	0,3				0,7			
		0,3	0,3	0,0	9,1	0,5	0,6	0,1	14,6
		0,3				0,6			
C8	50SA-1/3	1,4				1,3			
		1,4	1,5	0,1	9,1	1,6	1,5	0,2	10,0
		1,6				1,6			
C9	50CV-1/3	0,7				1,2			
		0,7	0,7	0,1	10,0	0,9	1,0	0,1	11,8
		0,8				1,0			
C10	40M10CV-1/3	0,3				1,2			
		0,3	0,3	0,0	11,8	1,7	1,4	0,2	14,7
		0,3				1,3			
		0,4				1,4			
C11	25M25CV-1/3	0,3				1,0			
		0,3	0,4	0,1	15,1	1,1	1,1	0,1	9,2
		0,4				1,2			
		-				1,2			
C12	25M25PC-1/3	0,2				1,1			
		0,2	0,2	0,0	0,0	1,3	1,2	0,1	10,1
		0,2				1,3			

Tabela D.9 – Resultados de resistência à tração e à compressão, aos 180 dias

COMPOSIÇÃO		Resistência à tração (MPa)			Resistência à compressão (MPa)			Média	DesvPad	CV (%)
		Média	DesvPad	CV (%)	Média	DesvPad	CV (%)			
C1	CA-1/3	0,7	0,7	0,0	5,4	1,1	1,0	0,1	8,0	
		0,6				1,0				
		0,7				1,0				
C2	CA-1/2	0,4	0,4	0,1	17,6	0,7	0,8	0,1	10,3	
		0,3				0,8				
		0,3				0,0				
C3	50M-1/2,5	0,5	0,5	0,0	5,4	1,7	1,7	0,0	0,9	
		0,5				1,7				
		0,5				1,7				
C4	50M-1/3	-	0,5	0,0	7,1	1,0	1,0	0,0	4,5	
		0,5				0,9				
		0,5				1,0				
		0,5				0,9				
C5	100PC-1/2	0,2	0,2	0,0	5,6	0,5	0,5	0,0	1,1	
		0,3				0,5				
		0,2				0,5				
C6	50PC-1/3	0,4	0,4	0,0	11,8	0,8	0,7	0,1	9,2	
		0,4				0,6				
		0,4				0,8				
C7	100PC-1/4	0,3	0,3	0,0	11,5	0,8	0,7	0,1	12,4	
		0,3				0,7				
		0,4				0,6				
C8	50SA-1/3	1,2	0,8	0,2	20,2	1,1	1,1	0,0	1,9	
		0,7				1,1				
		0,9				1,0				
C9	50CV-1/3	0,6	0,6	0,1	13,9	0,9	0,9	0,1	6,3	
		0,7				1,0				
		0,7				0,9				
		0,6				1,0				
C10	40M10CV-1/3	0,3	0,3	0,0	13,1	1,0	1,1	0,0	2,4	
		0,2				1,1				
		0,3				1,1				
C11	25M25CV-1/3	0,2	0,3	0,0	8,9	0,8	0,8	0,1	8,4	
		0,3				0,8				
		0,3				0,8				
		0,2				0,9				
C12	25M25PC-1/3	0,2	0,2	0,0	11,1	0,9	0,9	0,1	15,4	
		0,2				0,7				
		0,2				1,0				

Tabela D.10 – Resultados de resistência à tração e à compressão, aos 365 dias

COMPOSIÇÃO	Resistência à tração (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)	Resistência à compressão (MPa)	Média	DesvPad	CV (%)	
									C2
C4	50M-1/3	0,2 0,2 0,2 -	0,2	0,0	0,0	0,8 0,8 1,0 0,8	0,8	0,1	12,6
C6	50PC-1/3	0,4 0,4 0,3	0,3	0,0	10,1	0,8 0,8 0,8	0,8	0,0	4,3
C8	50SA-1/3	0,1 0,1 0,2	0,1	0,0	16,7	0,9 1,3 1,1	1,1	0,2	15,5
C9	50CV-1/3	1,0 1,2 0,9	1,0	0,1	12,4	2,0 1,6 1,7	1,8	0,2	12,2

Tabela D.11 – Resultados obtidos no ensaio de carbonatação

Idade de ensaio	28 DIAS			28 DIAS+2 SEMANAS (43DIAS)			28 DIAS+4 SEMANAS (56DIAS)			28 DIAS+6 SEMANAS (70DIAS)			28 DIAS+8 SEMANAS (84DIAS)			90 DIAS		
	Valor medido		Área carbonatada	Valor medido		Área carbonatada	Valor medido		Área carbonatada	Valor medido		Área carbonatada	Valor medido		Área carbonatada	Valor medido		Área carbonatada
	mm	mm ²	%	mm	mm ²	%	mm	mm ²	%	mm	mm ²	%	mm	mm ²	%	mm	mm ²	%
CA-1/3	7			7			14			18			20			20		
	5	872	55	3	940	59	6	1220	76	17	1575	98	20	1600	100	20	1600	100
	7			12			7			17			20			20		
	7			6			14			18			20			20		
CA-1/2	4			9			9			9			9			8		
	7	643	40	6	925	58	11	1160	73	11	1180	74	12	1220	76	15	1328	83
	4			5			7			8			12			9		
	3			8			11			11			8			15		
50M-1/3	4			9			7			6			10			10		
	6	730	46	1	820	51	5	872	55	6	984	62	10	1120	70	9	1159	72
	6			5			7			8			8			9		
	5			9			7			10			8			10		
50PC-1/3	6			8			9			11			16			17		
	6	760	48	9	1117	70	9	1160	73	15	1446	90	16	1536	96	20	1597	100
	5			9			9			17			17			18		
	5			10			11			12			15			21		
50SA-1/3	2			8			12			11			11			10		
	7	763	48	10	1116	70	10	1258	79	12	1277	80	12	1277	80	17	1366	85
	7			9			10			10			10			13		
	6			9			11			11			11			9		
50CV-1/3	7			8			13			18			20			20		
	6	817	51	8	952	60	12	1345	84	17	1580	99	20	1600	100	20	1600	100
	6			4			13			18			20			20		
	5			9			10			18			20			20		

Tabela D.12 – Resultados de permeabilidade ao vapor - composição CA-1/2

Tempo (dias)	Corpo de prova								Fluxo (G)			
	1		2		3		4		1	2	3	4
	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	(kg/s)*10 ⁻⁹			
0	110,52	0,00	101,91	0,00	123,00	0,00	112,21	0,00	-	-	-	-
1	110,41	0,11	101,63	0,28	122,72	0,28	111,97	0,24	1,3	3,2	3,2	2,8
2	110,25	0,16	101,35	0,28	122,39	0,33	111,72	0,25	1,9	3,2	3,8	2,9
3	110,14	0,11	101,17	0,18	122,20	0,19	111,55	0,17	1,3	2,1	2,2	2,0
4	110,01	0,13	100,93	0,24	121,91	0,29	111,30	0,25	1,5	2,8	3,4	2,9
5	109,86	0,15	100,67	0,26	121,61	0,30	111,05	0,25	1,7	3,0	3,5	2,9
6	109,71	0,15	100,41	0,26	121,31	0,30	110,80	0,25	1,7	3,0	3,5	2,9
7	109,60	0,11	100,21	0,20	121,07	0,24	110,60	0,20	1,3	2,3	2,8	2,3
8	109,43	0,17	99,93	0,28	120,77	0,30	110,37	0,23	2,0	3,2	3,5	2,7
9	109,30	0,13	99,75	0,18	120,53	0,24	110,19	0,18	1,5	2,1	2,8	2,1
10	109,17	0,13	99,49	0,26	120,28	0,25	109,95	0,24	1,5	3,0	2,9	2,8
11	109,04	0,13	99,27	0,22	120,05	0,23	109,73	0,22	1,5	2,5	2,7	2,5
12	108,90	0,14	99,06	0,21	119,79	0,26	109,51	0,22	1,6	2,4	3,0	2,5
13	108,75	0,15	98,84	0,22	119,53	0,26	109,29	0,21	1,7	2,5	3,0	2,5
14	108,56	0,19	98,58	0,26	119,19	0,34	109,07	0,22	2,2	3,0	3,9	2,5
15	108,37	0,19	98,27	0,31	118,88	0,31	108,83	0,24	2,2	3,6	3,6	2,8
16	108,17	0,20	97,94	0,33	118,57	0,31	108,58	0,25	2,3	3,8	3,6	2,9
17	108,01	0,16	97,64	0,30	118,24	0,33	108,35	0,23	1,9	3,5	3,8	2,7
18	107,86	0,15	97,39	0,25	117,98	0,26	108,12	0,23	1,7	2,9	3,0	2,7
19	107,69	0,17	97,14	0,25	117,72	0,26	107,89	0,23	2,0	2,9	3,0	2,7
20	107,52	0,17	96,85	0,29	117,41	0,31	107,64	0,25	2,0	3,4	3,6	2,9
21	107,36	0,16	96,60	0,25	117,11	0,30	107,41	0,23	1,9	2,9	3,5	2,7
Média	-	0,16	-	0,23	-	0,25	-	0,22	1,9	2,7	2,9	2,6
Composição CA-1/2								DesvPad	0,1	0,3	0,2	0,1
								CV (%)	5	10	5	4

Tabela D.13 – Resultados de permeabilidade ao vapor - composição 50M-1/3

Tempo (dias)	Corpo de prova								Fluxo (G)			
	1		2		3		4		1	2	3	4
	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	(kg/s)*10 ⁻⁹			
0	111,17	0,00	109,70	0,00	101,27	0,00	103,67	0,00	-	-	-	-
1	110,82	0,35	109,40	0,30	100,97	0,30	103,36	0,31	4,1	3,5	3,5	3,6
2	110,56	0,26	109,18	0,22	100,69	0,28	103,11	0,25	3,0	2,5	3,2	2,9
3	110,26	0,30	108,95	0,23	100,44	0,25	102,83	0,28	3,5	2,7	2,9	3,2
4	110,08	0,18	108,75	0,20	100,27	0,17	102,66	0,17	2,1	2,3	2,0	2,0
5	109,82	0,26	108,52	0,23	100,06	0,21	102,44	0,22	3,0	2,7	2,4	2,5
6	109,56	0,26	108,29	0,23	99,85	0,21	102,22	0,22	3,0	2,7	2,4	2,5
7	109,29	0,27	108,07	0,22	99,59	0,26	101,98	0,24	3,1	2,5	3,0	2,8
8	109,06	0,23	107,87	0,20	99,40	0,19	101,73	0,25	2,7	2,3	2,2	2,9
9	108,79	0,27	107,60	0,27	99,16	0,24	101,53	0,20	3,1	3,1	2,8	2,3
10	108,57	0,22	107,39	0,21	98,96	0,20	101,36	0,17	2,5	2,4	2,3	2,0
11	108,32	0,25	107,15	0,24	98,73	0,23	101,11	0,25	2,9	2,8	2,7	2,9
12	108,07	0,25	106,96	0,19	98,55	0,18	100,94	0,17	2,9	2,2	2,1	2,0
13	107,82	0,25	106,77	0,19	98,37	0,18	100,77	0,17	2,9	2,2	2,1	2,0
14	107,58	0,24	106,50	0,27	98,07	0,30	100,46	0,31	2,8	3,1	3,5	3,6
15	107,29	0,29	106,22	0,28	97,77	0,30	100,18	0,28	3,4	3,2	3,5	3,2
16	107,00	0,29	105,94	0,28	97,47	0,30	99,90	0,28	3,4	3,2	3,5	3,2
17	106,74	0,26	105,73	0,21	97,23	0,24	99,61	0,29	3,0	2,4	2,8	3,4
18	106,46	0,28	105,46	0,27	97,01	0,22	99,36	0,25	3,2	3,1	2,5	2,9
19	106,18	0,28	105,22	0,24	96,76	0,25	99,09	0,27	3,2	2,8	2,9	3,1
20	105,90	0,28	104,98	0,24	96,51	0,25	98,82	0,27	3,2	2,8	2,9	3,1
21	105,61	0,29	104,74	0,24	96,21	0,30	98,57	0,25	3,4	2,8	3,5	2,9
Média	-	0,28	-	0,25	-	0,24	-	0,27	3,2	2,9	2,8	3,1
Composição 50M-1/3								DesvPad	0,1	0,2	0,2	0,2
								CV (%)	4	6	6	6

Tabela D.14 – Resultados de permeabilidade ao vapor - composição 50PC-1/3

Tempo (dias)	Corpo de prova								Fluxo (G)			
	1		2		3		4		1	2	3	4
	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	(kg/s)*10 ⁻⁹			
0	104,38	0,00	111,50	0,00	105,88	0,00	110,96	0,00	-	-	-	-
1	104,26	0,12	111,35	0,15	105,72	0,16	110,82	0,14	1,4	1,7	1,9	1,6
2	103,94	0,32	111,07	0,28	105,49	0,23	110,56	0,26	3,7	3,2	2,7	3,0
3	103,63	0,31	110,80	0,27	105,25	0,24	110,29	0,27	3,6	3,1	2,8	3,1
4	103,31	0,31	110,53	0,27	105,01	0,24	110,01	0,27	3,7	3,1	2,8	3,2
5	103,06	0,25	110,31	0,22	104,80	0,21	109,81	0,20	2,9	2,5	2,4	2,3
6	102,72	0,34	110,06	0,25	104,51	0,29	109,50	0,31	3,9	2,9	3,4	3,6
7	102,48	0,24	109,83	0,23	104,25	0,26	109,31	0,19	2,8	2,7	3,0	2,2
8	102,18	0,30	109,57	0,26	103,96	0,29	108,96	0,35	3,5	3,0	3,4	4,1
9	101,93	0,25	109,34	0,23	103,75	0,21	108,75	0,21	2,9	2,7	2,4	2,4
10	101,64	0,29	109,07	0,27	103,48	0,27	108,48	0,27	3,4	3,1	3,1	3,1
11	101,36	0,29	108,80	0,27	103,22	0,27	108,20	0,27	3,2	3,1	3,0	3,2
12	101,03	0,33	108,49	0,31	102,92	0,30	107,87	0,33	3,8	3,6	3,5	3,8
13	100,76	0,27	108,22	0,27	102,66	0,26	107,58	0,29	3,1	3,1	3,0	3,4
14	100,48	0,27	107,95	0,27	102,40	0,26	107,29	0,29	3,2	3,1	3,0	3,4
15	100,20	0,28	107,68	0,27	102,09	0,31	107,02	0,27	3,2	3,1	3,6	3,1
16	99,87	0,33	107,41	0,27	101,83	0,26	106,73	0,29	3,8	3,1	3,0	3,4
17	99,54	0,33	107,10	0,31	101,53	0,30	106,44	0,29	3,8	3,6	3,5	3,4
18	99,22	0,33	106,80	0,31	101,23	0,30	106,15	0,29	3,7	3,5	3,5	3,4
19	98,91	0,31	106,50	0,30	100,97	0,26	105,84	0,31	3,6	3,5	3,0	3,6
Média	-	0,29	-	0,29	-	0,27	-	0,29	3,3	3,4	3,1	3,4
Composição 50PC-1/3							DesvPad	0,2	0,2	0,2	0,2	
							CV (%)	7	6	6	5	

Tabela D.15 – Resultados de permeabilidade ao vapor - composição 50SA-1/3

Tempo (dias)	Corpo de prova								Fluxo (G)			
	1		2		3		4		1	2	3	4
	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	(kg/s)*10 ⁻⁹			
0	105,89	0,00	100,59	0,00	98,32	0,00	99,78	0,00	-	-	-	-
1	105,73	0,16	100,43	0,16	98,17	0,15	99,62	0,16	1,9	1,9	1,7	1,9
2	105,57	0,16	100,27	0,16	98,02	0,15	99,46	0,16	1,9	1,9	1,7	1,9
3	105,41	0,16	100,11	0,16	97,87	0,15	99,31	0,16	1,9	1,9	1,7	1,7
4	105,14	0,27	99,84	0,27	97,60	0,27	99,05	0,26	3,1	3,1	3,1	3,0
5	104,86	0,27	99,56	0,27	97,34	0,27	98,79	0,26	3,2	3,2	3,0	3,0
6	104,63	0,23	99,34	0,22	97,09	0,25	98,55	0,24	2,7	2,5	2,9	2,8
7	104,37	0,26	99,10	0,24	96,85	0,24	98,32	0,23	3,0	2,8	2,8	2,7
8	104,11	0,26	98,88	0,22	96,64	0,21	98,12	0,20	3,0	2,5	2,4	2,3
9	103,85	0,26	98,61	0,27	96,39	0,25	97,89	0,23	3,0	3,1	2,9	2,7
10	103,62	0,23	98,41	0,20	96,18	0,21	97,70	0,19	2,7	2,3	2,4	2,2
11	103,33	0,29	98,14	0,27	95,92	0,26	97,46	0,24	3,4	3,1	3,0	2,8
12	103,05	0,29	97,87	0,27	95,67	0,26	97,22	0,24	3,2	3,1	2,9	2,8
13	102,77	0,28	97,59	0,28	95,42	0,25	96,98	0,24	3,2	3,2	2,9	2,8
14	102,50	0,27	97,35	0,24	95,19	0,23	96,76	0,22	3,1	2,8	2,7	2,5
15	102,23	0,27	97,11	0,24	94,96	0,23	96,54	0,22	3,1	2,8	2,7	2,5
16	101,96	0,27	96,86	0,25	94,71	0,25	96,31	0,23	3,1	2,9	2,9	2,7
17	101,68	0,28	96,61	0,25	94,46	0,25	96,07	0,24	3,2	2,9	2,9	2,8
18	101,40	0,28	96,36	0,25	94,21	0,25	95,83	0,24	3,2	2,9	2,9	2,8
19	101,13	0,28	96,12	0,25	93,97	0,25	95,59	0,24	3,1	2,8	2,8	2,8
Média	-	0,27	-	0,25	-	0,24	-	0,23	3,2	2,8	2,8	2,7
Composição 50SA-1/3							DesvPad	0,1	0,1	0,1	0,1	
							CV (%)	2	2	4	4	

Tabela D.16 – Resultados de permeabilidade ao vapor - composição 50CV-1/3

Tempo (dias)	Corpo de prova								Fluxo (G)			
	1		2		3		4		1	2	3	4
	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	Massa (g)	DM	(kg/s)*10 ⁻⁹			
0	120,04	0,00	107,58	0,00	109,44	0,00	110,49	0,00	-	-	-	-
1	119,81	0,23	107,32	0,26	109,22	0,22	110,28	0,21	2,7	3,0	2,5	2,4
2	119,55	0,26	107,05	0,27	108,97	0,25	110,04	0,24	3,0	3,1	2,9	2,7
3	119,30	0,26	106,79	0,27	108,73	0,25	109,81	0,24	3,0	3,1	2,9	2,7
4	119,04	0,26	106,52	0,27	108,48	0,25	109,57	0,24	3,0	3,1	2,9	2,7
5	118,84	0,20	106,27	0,25	108,25	0,23	109,36	0,21	2,3	2,9	2,7	2,4
6	118,58	0,26	106,00	0,27	107,99	0,26	109,11	0,25	3,0	3,1	3,0	2,9
7	118,35	0,23	105,75	0,25	107,78	0,21	108,89	0,22	2,7	2,9	2,4	2,5
8	118,12	0,23	105,50	0,25	107,57	0,24	108,67	0,22	2,7	2,9	2,4	2,5
9	117,89	0,23	105,25	0,25	107,33	0,24	108,44	0,23	2,7	2,9	2,8	2,6
10	117,65	0,23	105,00	0,25	107,09	0,24	108,22	0,23	2,7	2,9	2,8	2,6
11	117,41	0,24	104,74	0,26	106,81	0,24	107,98	0,23	2,8	3,0	3,2	2,7
12	117,19	0,22	104,51	0,23	106,59	0,22	107,77	0,21	2,5	2,7	2,5	2,4
13	116,97	0,22	104,28	0,23	106,37	0,22	107,55	0,22	2,5	2,7	2,5	2,5
14	116,75	0,22	104,04	0,24	106,14	0,23	107,33	0,22	2,5	2,8	2,7	2,5
15	116,53	0,22	103,78	0,26	105,89	0,25	107,12	0,21	2,5	3,0	2,9	2,4
16	116,33	0,20	103,58	0,20	105,70	0,19	106,92	0,20	2,3	2,4	2,2	2,3
17	116,14	0,20	103,37	0,20	105,51	0,19	106,72	0,20	2,2	2,4	2,2	2,3
18	115,94	0,20	103,17	0,20	105,32	0,19	106,52	0,20	2,3	2,4	2,2	2,3
19	115,76	0,18	102,89	0,28	105,06	0,26	106,31	0,21	2,1	3,2	3,0	2,4
20	115,52	0,24	102,61	0,28	104,80	0,26	106,10	0,21	2,8	3,2	3,0	2,4
21	115,21	0,31	102,47	0,14	104,48	0,32	105,93	0,17	3,6	1,6	3,7	2,0
Média	-	0,22	-	0,24	-	0,23	-	0,21	2,5	2,8	2,7	2,5
Composição 50CV-1/3							DesvPad	0,1	0,2	0,2	0,1	
							CV (%)	5	6	6	4	

Tabela D.17 – Síntese de resultados de permeabilidade ao vapor

Composição	CP	Espessura (m)	Varição de massa (kg)	Fluxo (G) (kg/s) x 10 ⁻⁹	Permeância (kg/m ² .s.Pa)	Permeabilidade (kg/m.s.Pa)	Sd (m)	Valor Médio	DesvPad	CV (%)
CA-1/2	2	15,00	0,23	2,71	1,10E-09	1,6E-11	0,18	0,18	0,01	6
	3	15,10	0,25	2,87	1,16E-09	1,8E-11	0,17			
	4	14,90	0,22	2,57	1,04E-09	1,5E-11	0,19			
50M-1/3	1	14,80	0,28	3,22	1,31E-09	1,9E-11	0,15	0,16	0,01	7
	2	15,40	0,25	2,86	1,16E-09	1,8E-11	0,17			
	3	14,50	0,24	2,78	1,13E-09	1,6E-11	0,17			
	4	15,00	0,27	3,08	1,25E-09	1,9E-11	0,16			
50PC-1/3	1	16,00	0,29	3,34	1,37E-09	2,2E-11	0,14	0,14	0,01	4
	2	16,60	0,29	3,37	1,38E-09	2,3E-11	0,14			
	3	14,60	0,27	3,14	1,28E-09	1,9E-11	0,15			
	4	16,80	0,29	3,36	1,38E-09	2,3E-11	0,14			
50SA-1/3	1	15,60	0,27	3,18	1,30E-09	2,0E-11	0,15	0,17	0,01	7
	2	15,40	0,25	2,85	1,16E-09	1,8E-11	0,17			
	3	15,20	0,24	2,81	1,14E-09	1,7E-11	0,17			
	4	15,40	0,23	2,68	1,08E-09	1,7E-11	0,18			
50CV-1/3	1	15,30	0,22	2,49	1,00E-09	1,5E-11	0,19	0,18	0,01	7
	2	15,50	0,24	2,84	1,15E-09	1,8E-11	0,17			
	3	15,30	0,23	2,70	1,09E-09	1,7E-11	0,18			
	4	14,90	0,21	2,45	9,88E-10	1,5E-11	0,20			

Tabela D.18 – Ensaio de resistência aos cloretos: percentual de cloretos retidos

Composição	Corpo de prova	Massa seca (g)		Massa de cloretos retidos (g)	Média (g)	Desvio Padrão	Cloretos retidos (%)	Média (%)	Desvio Padrão
		Antes da solução (M ₀)	Após solução (M ₁)						
CA-1/3	C.2-1	221,14	228,73	7,6	7,5	0,08	3,43	3,4	0,06
	C.2-2	218,96	226,39	7,4			3,39		
	C.2-3	227,39	234,94	7,6			3,32		
50M-1/3	C.4-1	224,77	233,87	9,1	9,0	0,08	4,05	4,0	0,11
	C.4-2	227,89	236,84	9,0			3,93		
	C.4-3	217,07	226,05	9,0			4,14		
50PC-1/3	C.6-1	225,82	233,71	7,9	7,7	0,14	3,49	3,5	0,04
	C.6-2	225,07	232,77	7,7			3,42		
	C.6-3	221,48	229,09	7,6			3,44		
50SA-1/3	C.8-1	220,9	229,48	8,6	8,6	0,10	3,88	3,9	0,06
	C.8-2	214,1	222,55	8,5			3,95		
	C.8-3	215,95	224,59	8,6			4,00		
50CV-1/3	C.9-1	226,85	233,28	6,4	6,3	0,20	2,83	2,8	0,04
	C.9-2	224,39	230,78	6,4			2,85		
	C.9-3	218,82	224,88	6,1			2,77		

Tabela D.19 – Resultados de resistência aos cloretos: CA-1/2

Ciclo	CA-1/2						Média (%)	Desvpad
	1		2		3			
	Massa (g)	Varição (%)	Massa (g)	Varição (%)	Massa (g)	Varição (%)		
1	228,29	-	225,96	-	234,49	-	-	-
7	242,82	6,4	239,58	6,0	250,09	6,7	6,3	0,3
11	245,13	7,4	241,58	6,9	252,55	7,7	7,3	0,4
12	243,18	6,5	239,92	6,2	250,6	6,9	6,5	0,3
13	240,68	5,4	237,55	5,1	248,12	5,8	5,5	0,3
19	249,46	9,3	246,01	8,9	257,26	9,7	9,3	0,4
23	250,89	9,9	247,29	9,4	258,3	10,2	9,8	0,4
33	251,74	10,3	249,06	10,2	258,01	10,0	10,2	0,1
37	251,71	10,3	249,1	10,2	258,06	10,1	10,2	0,1
41	251,58	10,2	249,01	10,2	257,93	10,0	10,1	0,1
47	251,84	10,3	249,38	10,4	258,21	10,1	10,3	0,1
51	251,61	10,2	249,25	10,3	258,07	10,1	10,2	0,1
55	251,64	10,2	249,3	10,3	257,98	10,0	10,2	0,2
61	250,42	9,7	248,45	10,0	257,37	9,8	9,8	0,1
65	248,54	8,9	246,71	9,2	255,62	9,0	9,0	0,2
69	250,35	9,7	248,33	9,9	257,21	9,7	9,8	0,1
75	250,49	9,7	248,42	9,9	257,35	9,7	9,8	0,1
79	250,67	9,8	248,64	10,0	257,52	9,8	9,9	0,1
83	251,04	10,0	248,78	10,1	257,75	9,9	10,0	0,1
89	251,05	10,0	248,75	10,1	257,65	9,9	10,0	0,1
93	250,96	9,9	248,64	10,0	257,51	9,8	9,9	0,1

Tabela D.20 – Resultados de resistência aos cloretos: 50M-1/3

50M-1/3								
Ciclo	1		2		3		Média (%)	Desvpad
	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)		
1	233,48	-	236,44	-	225,67	-		
7	252,82	8,3	254,2	7,5	243,86	8,1	8,0	0,4
11	255,76	9,5	256,82	8,6	246,66	9,3	9,2	0,5
12	253,26	8,5	254,77	7,8	244,38	8,3	8,2	0,4
13	250,37	7,2	251,19	6,2	240,47	6,6	6,7	0,5
19	260,14	11,4	260,92	10,4	251,19	11,3	11,0	0,6
23	261,55	12,0	262,55	11,0	252,85	12,0	11,7	0,6
33	262,28	12,3	265,43	12,3	252,95	12,1	12,2	0,1
37	262,27	12,3	265,46	12,3	252,92	12,1	12,2	0,1
41	262,08	12,2	265,25	12,2	252,66	12,0	12,1	0,2
47	262,23	12,3	265,25	12,2	252,59	11,9	12,1	0,2
51	262,06	12,2	265,11	12,1	252,3	11,8	12,1	0,2
55	261,91	12,2	264,92	12,0	252,21	11,8	12,0	0,2
61	260,37	11,5	263,6	11,5	251,05	11,2	11,4	0,1
65	258,23	10,6	261,47	10,6	249,06	10,4	10,5	0,1
69	260,15	11,4	263,52	11,5	251,27	11,3	11,4	0,1
75	260,59	11,6	263,78	11,6	251,32	11,4	11,5	0,1
79	260,86	11,7	264,16	11,7	251,6	11,5	11,6	0,1
83	261,45	12,0	264,56	11,9	251,51	11,5	11,8	0,3
89	261,62	12,1	264,56	11,9	251,41	11,4	11,8	0,3
93	261,47	12,0	264,32	11,8	250,66	11,1	11,6	0,5

Tabela D.21 – Resultados de resistência aos cloretos: 50PC-1/3

50PC-1/3								
Ciclo	1		2		3		Média (%)	Desvpad
	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)		
1	233,31	-	232,38	-	228,69	-		
7	248,01	6,3	245,25	5,5	244,42	6,9	6,2	0,7
11	250,81	7,5	247,4	6,5	246,69	7,9	7,3	0,7
12	248,55	6,5	245,53	5,7	244,57	6,9	6,4	0,7
13	246,17	5,5	242,19	4,2	242,22	5,9	5,2	0,9
19	254,64	9,1	249,85	7,5	250,84	9,7	8,8	1,1
23	255,96	9,7	251,23	8,1	252,08	10,2	9,3	1,1
33	258,89	11,0	257,52	10,8	253,8	11,0	10,9	0,1
37	258,96	11,0	257,46	10,8	253,88	11,0	10,9	0,1
41	258,82	10,9	257,32	10,7	253,71	10,9	10,9	0,1
47	259,09	11,0	257,58	10,8	253,99	11,1	11,0	0,1
51	258,94	11,0	257,42	10,8	253,85	11,0	10,9	0,1
55	258,94	11,0	257,45	10,8	253,9	11,0	10,9	0,1
61	257,39	10,3	256,14	10,2	252,53	10,4	10,3	0,1
65	255,7	9,6	254,65	9,6	251	9,8	9,6	0,1
69	257,46	10,4	256,14	10,2	252,91	10,6	10,4	0,2
75	257,59	10,4	256,47	10,4	252,73	10,5	10,4	0,1
79	257,87	10,5	256,77	10,5	253,03	10,6	10,6	0,1
83	258,32	10,7	256,96	10,6	253,25	10,7	10,7	0,1
89	258,52	10,8	257,04	10,6	253,21	10,7	10,7	0,1
93	258,32	10,7	256,82	10,5	253,04	10,6	10,6	0,1

Tabela D.22 – Resultados de resistência aos cloretos: 50SA-1/3

50SA-1/3								
Ciclo	1		2		3		Média (%)	Desvpad
	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)		
1	229,09	-	222,17	-	224,18	-		
7	244,65	6,8	236,96	6,7	240,14	7,1	6,9	0,2
11	248,15	8,3	240,15	8,1	242,96	8,4	8,3	0,2
12	244,9	6,9	237,24	6,8	239,78	7,0	6,9	0,1
13	240,7	5,1	233,17	5,0	234,67	4,7	4,9	0,2
19	251,05	9,6	242,68	9,2	245,71	9,6	9,5	0,2
23	252,5	10,2	244,18	9,9	247,32	10,3	10,1	0,2
33	256,37	11,9	248,96	12,1	251,68	12,3	12,1	0,2
37	255,88	11,7	248,9	12,0	251,37	12,1	12,0	0,2
41	255,38	11,5	248,63	11,9	250,97	12,0	11,8	0,3
47	255,52	11,5	248,76	12,0	251,11	12,0	11,8	0,3
51	255,3	11,4	248,47	11,8	250,83	11,9	11,7	0,2
55	254,98	11,3	248,41	11,8	250,72	11,8	11,7	0,3
61	253,24	10,5	246,86	11,1	248,79	11,0	10,9	0,3
65	251,61	9,8	245,5	10,5	247,34	10,3	10,2	0,3
69	253,33	10,6	246,96	11,2	249,31	11,2	11,0	0,3
75	253,8	10,8	247,42	11,4	249,62	11,3	11,2	0,3
79	254,01	10,9	247,73	11,5	249,93	11,5	11,3	0,4
83	254,3	11,0	247,96	11,6	250,07	11,5	11,4	0,3
89	254,32	11,0	247,94	11,6	249,93	11,5	11,4	0,3
93	254	10,9	247,69	11,5	249,36	11,2	11,2	0,3

Tabela D.23 – Resultados de resistência aos cloretos: 50CV-1/3

50CV-1/3								
Ciclo	1		2		3		Média (%)	Desvpad
	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)	Massa (g)	Variação (%)		
1	232,86	-	230,39	-	224,47	-		
7	242,9	4,3	240	4,2	235,9	5,1	4,5	0,5
11	244,9	5,2	242,13	5,1	237,8	5,9	5,4	0,5
12	243,02	4,4	240,31	4,3	235,84	5,1	4,6	0,4
13	240,6	3,3	237,89	3,3	233,45	4,0	3,5	0,4
19	247,24	6,2	244,11	6,0	240,34	7,1	6,4	0,6
23	248,54	6,7	245,34	6,5	241,45	7,6	6,9	0,6
33	253,04	8,7	250,31	8,6	243,49	8,5	8,6	0,1
37	253,16	8,7	250,39	8,7	243,63	8,5	8,6	0,1
41	253,18	8,7	250,62	8,8	243,68	8,6	8,7	0,1
47	253,44	8,8	250,56	8,8	243,92	8,7	8,8	0,1
51	253,44	8,8	250,61	8,8	243,94	8,7	8,8	0,1
55	253,52	8,9	250,61	8,8	243,95	8,7	8,8	0,1
61	252,13	8,3	249,09	8,1	242,07	7,8	8,1	0,2
65	251,32	7,9	248,38	7,8	241,22	7,5	7,7	0,2
69	252,73	8,5	249,64	8,4	242,66	8,1	8,3	0,2
75	252,97	8,6	249,93	8,5	242,93	8,2	8,4	0,2
79	253,2	8,7	250,12	8,6	243,17	8,3	8,5	0,2
83	253,53	8,9	250,54	8,7	243,61	8,5	8,7	0,2
89	253,68	8,9	250,77	8,8	243,83	8,6	8,8	0,2
93	253,6	8,9	250,7	8,8	243,83	8,6	8,8	0,1

Tabela D.24 – Resultados de resistência aos sulfatos: CA-1/2

Ciclo	Massa (g)			Variação de massa (g)						Média (%)	Desvpad
	1	2	3	1	%	2	%	3	%		
0	217,28	227,80	214,28	-	-	-	-	-	-	-	-
1	218,69	229,33	215,77	1,41	0,65	1,53	0,67	1,49	0,70	0,67	0,06
2	219,72	230,49	216,81	2,44	1,12	2,69	1,18	2,53	1,18	1,16	0,13
3	220,47	231,31	217,65	3,19	1,47	3,51	1,54	3,37	1,57	1,53	0,16
4	221,06	231,95	218,32	3,78	1,74	4,15	1,82	4,04	1,89	1,82	0,19
5	221,62	232,56	218,84	4,34	2,00	4,76	2,09	4,56	2,13	2,07	0,21
6	222,17	233,14	219,32	4,89	2,25	5,34	2,34	5,04	2,35	2,32	0,23
7	222,86	233,90	219,91	5,58	2,57	6,10	2,68	5,63	2,63	2,62	0,29
8	223,31	234,35	220,21	6,03	2,78	6,55	2,88	5,93	2,77	2,81	0,33
9	223,81	234,88	220,58	6,53	3,01	7,08	3,11	6,30	2,94	3,02	0,40
10	224,32	235,33	218,33	7,04	3,24	7,53	3,31	4,05	1,89	2,81	1,88
11	225,14	236,08	217,34	7,86	3,62	8,28	3,63	3,06	1,43	2,89	2,90
12	225,73	236,52	216,20	8,45	3,89	8,72	3,83	1,92	0,90	2,87	3,85
13	228,39	237,11	216,02	11,11	5,11	9,31	4,09	1,74	0,81	3,34	4,97
14	187,21	194,05	216,76	-30,07	-13,84	-33,75	-14,82	2,48	1,16	-9,17	19,94

Tabela D.25 – Resultados de resistência aos sulfatos: 50M-1/3

Ciclo	Massa (g)			Variação de massa (g)						Média (%)	Desvpad
	1	2	3	1	%	2	%	3	%		
0	216,27	220,44	225,39	-	-	-	-	-	-	-	-
1	217,92	222,15	227,25	1,65	0,76	1,71	0,78	1,86	0,83	0,79	0,11
2	219,35	223,63	228,77	3,08	1,42	3,19	1,45	3,38	1,50	1,46	0,15
3	220,39	224,80	230,01	4,12	1,91	4,36	1,98	4,62	2,05	1,98	0,25
4	221,18	225,76	231,00	4,91	2,27	5,32	2,41	5,61	2,49	2,39	0,35
5	221,67	226,44	231,61	5,40	2,50	6,00	2,72	6,22	2,76	2,66	0,42
6	222,14	227,02	232,20	5,87	2,71	6,58	2,98	6,81	3,02	2,91	0,49
7	222,79	227,79	232,96	6,52	3,01	7,35	3,33	7,57	3,36	3,24	0,55
8	222,89	228,09	233,36	6,62	3,06	7,65	3,47	7,97	3,54	3,36	0,71
9	223,20	228,48	233,81	6,93	3,20	8,04	3,65	8,42	3,74	3,53	0,77
10	223,58	228,96	234,25	7,31	3,38	8,52	3,86	8,86	3,93	3,73	0,81
11	224,25	229,58	234,11	7,98	3,69	9,14	4,15	8,72	3,87	3,90	0,59
12	224,83	230,20	235,33	8,56	3,96	9,76	4,43	9,94	4,41	4,27	0,75
13	225,44	231,03	191,73	9,17	4,24	10,59	4,80	-33,66	-14,93	-1,96	25,15
14	196,49	-	122,72	-19,78	-9,15	-	-	-102,67	-45,55	-27,35	54,47

Tabela D.26 – Resultados de resistência aos sulfatos: 50PC-1/3

Ciclo	Massa (g)			Variação de massa (g)						Média (%)	Desvpad
	1	2	3	1	%	2	%	3	%		
0	222,24	220,31	220,14	-	-	-	-	-	-	-	-
1	223,77	221,80	221,59	1,53	0,69	1,49	0,68	1,45	0,66	0,67	0,04
2	224,81	222,86	222,65	2,57	1,16	2,55	1,16	2,51	1,14	1,15	0,03
3	225,49	223,55	223,29	3,25	1,46	3,24	1,47	3,15	1,43	1,45	0,06
4	226,04	224,07	224,07	3,80	1,71	3,76	1,71	3,93	1,79	1,73	0,09
5	226,43	224,49	224,17	4,19	1,89	4,18	1,90	4,03	1,83	1,87	0,09
6	226,84	224,92	224,60	4,60	2,07	4,61	2,09	4,46	2,03	2,06	0,08
7	227,33	225,39	225,10	5,09	2,29	5,08	2,31	4,96	2,25	2,28	0,07
8	227,78	225,88	225,54	5,54	2,49	5,57	2,53	5,40	2,45	2,49	0,09
9	228,07	226,20	225,93	5,83	2,62	5,89	2,67	5,79	2,63	2,64	0,05
10	228,24	226,42	226,25	6,00	2,70	6,11	2,77	6,11	2,78	2,75	0,06
11	228,87	226,95	226,68	6,63	2,98	6,64	3,01	6,54	2,97	2,99	0,06
12	229,35	227,52	190,57	7,11	3,20	7,21	3,27	-29,57	-13,43	-2,32	21,21
13	229,62	227,75	175,88	7,38	3,32	7,44	3,38	-44,26	-20,11	-4,47	29,83
14	124,53	55,39	105,88	-97,71	-43,97	-164,92	-74,86	-114,26	-51,90	-56,91	35,02

Tabela D.27 – Resultados de resistência aos sulfatos: 50SA-1/3

Ciclo	Massa (g)			Variação de massa (g)						Média (%)	Desvpad
	1	2	3	1	%	2	%	3	%		
0	210,61	218,82	211,73	-	-	-	-	-	-	-	-
1	212,10	220,28	213,35	1,49	0,71	1,46	0,67	1,62	0,77	0,71	0,09
2	213,24	221,59	214,66	2,63	1,25	2,77	1,27	2,93	1,38	1,30	0,15
3	214,24	222,70	215,71	3,63	1,72	3,88	1,77	3,98	1,88	1,79	0,18
4	215,14	223,63	216,68	4,53	2,15	4,81	2,20	4,95	2,34	2,23	0,21
5	215,85	224,34	217,39	5,24	2,49	5,52	2,52	5,66	2,67	2,56	0,21
6	216,44	225,02	218,07	5,83	2,77	6,20	2,83	6,34	2,99	2,87	0,26
7	217,29	225,85	218,84	6,68	3,17	7,03	3,21	7,11	3,36	3,25	0,23
8	217,65	226,23	219,16	7,04	3,34	7,41	3,39	7,43	3,51	3,41	0,22
9	218,07	226,63	219,54	7,46	3,54	7,81	3,57	7,81	3,69	3,60	0,20
10	105,98	227,29	75,71	-104,63	-49,68	8,47	3,87	-136,02	-64,24	-36,68	76,00
11	103,39	228,10	74,84	-107,22	-50,91	9,28	4,24	-136,89	-64,65	-37,11	77,26
12	96,67	228,94	74,41	-113,94	-54,10	10,12	4,62	-137,32	-64,86	-38,11	79,24
13	95,43	230,04	74,14	-115,18	-54,69	11,22	5,13	-137,59	-64,98	-38,18	80,23
14	64,22	-	67,78	-146,39	-69,51	-	-	-143,95	-67,99	-68,75	83,82

Tabela D.28 – Resultados de resistência aos sulfatos:50CV-1/3

Ciclo	Massa (g)			Variação de massa (g)						Média (%)	Desvpad
	1	2	3	1	%	2	%	3	%		
0	228,32	226,41	230,34	-	-	-	-	-	-	-	-
1	229,58	227,75	231,74	1,26	0,55	1,34	0,59	1,40	0,61	1,33	0,07
2	230,59	228,79	232,74	2,27	0,99	2,38	1,05	2,40	1,04	1,03	0,07
3	231,30	229,59	233,55	2,98	1,31	3,18	1,40	3,21	1,39	1,37	0,13
4	231,88	230,21	234,17	3,56	1,56	3,80	1,68	3,83	1,66	1,63	0,15
5	232,24	230,66	234,62	3,92	1,72	4,25	1,88	4,28	1,86	1,82	0,20
6	232,60	231,11	235,11	4,28	1,87	4,70	2,08	4,77	2,07	2,01	0,27
7	233,11	231,64	235,64	4,79	2,10	5,23	2,31	5,30	2,30	2,24	0,28
8	233,29	231,86	235,86	4,97	2,18	5,45	2,41	5,52	2,40	2,33	0,30
9	233,58	232,13	236,16	5,26	2,30	5,72	2,53	5,82	2,53	2,45	0,30
10	233,86	232,47	236,49	5,54	2,43	6,06	2,68	6,15	2,67	2,59	0,33
11	233,81	232,67	236,75	5,49	2,40	6,26	2,76	6,41	2,78	2,65	0,49
12	223,89	215,87	237,35	-4,43	-1,94	-10,54	-4,66	7,01	3,04	-1,18	8,91
13	206,15	212,07	217,27	-22,17	-9,71	-14,34	-6,33	-13,07	-5,67	-7,24	4,93
14	200,38	182,09	211,12	-27,94	-12,24	-44,32	-19,58	-19,22	-8,34	-13,39	12,74

Tabela D.29 – Resultados obtidos, aos 28 dias, no ensaio de aderência nos painéis da Igreja de Monserrate

CP	Painel	Composição	Nº de incisões	Nº de determinações	Largura (mm)	Compr. (mm)	Diâmetro (mm)	Área da seção (mm ²)	Carga de ensaio (kN)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	DesvPad CV (MPa)	DesvPad CV (%)	Forma de Ruptura
1					-	-	-	-	s/ leitura	-	-	-	-	D 80% Chapisco / 20% Argamassa
2					-	-	-	-	0,15	0,08	-	-	-	E 20% Chapisco / 80% Argamassa
3	1	50M1/3	5	4	-	-	50	1964	0,12	0,06	0,08	0,02	24	E 20% Chapisco / 80% Argamassa
4					-	-	-	-	0,20	0,10	-	-	-	E 10% Chapisco / 80% Argamassa
5					-	-	-	-	0,13	0,07	-	-	-	D 50% Chapisco / 50% Argamassa
-	2	CA-1/2												
Impossibilidade de realizar incisões face à desagregação da argamassa														
1					-	-	50	1964	s/leitura	-	-	-	-	E 10% Chapisco / 90% Argamassa
2	3	50CV-1/3	3	1	50	50	-	2500	s/leitura	-	0,03	-	-	E 100%Argamassa
3					50	50	-	2500	0,08	0,03	-	-	-	E 100%Argamassa
1					50	50	-	2500	0,10	0,04	-	-	-	E 100%Argamassa
2					-	-	50	1964	0,07	0,04	0,03	0,01	27	E 5% Chapisco / 95% Argamassa
3	4	50PC-1/3	4	4	-	-	50	1964	0,06	0,03	-	-	-	E 100%Argamassa
4					50	50	-	2500	0,05	0,02	-	-	-	D 90% Chapisco / 10% Argamassa

Tabela D30 – Resultados obtidos, aos 90 dias, no ensaio de aderência nos painéis da Igreja de Monserrate

CP	Painel	Composição	Nº de incisões	Nº de determinações	Diâmetro		Carga de ensaio		Resistência		Média		DesvPad	CV	Teor de umidade (%)			
					(mm)	(mm ²)	(kN)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)			0,50m do solo	1,00m do solo		
1							0,05	50	0,03									
2							0,13	130	0,07									
3	1	50MI/3	5	4	1964	50	0,09	90	0,05	0,06	0,03				14	10		
4							0,19	190	0,10									
5							s/leitura	-	-									
-	2	CA-1/2					Impossibilidade de realizar incisões face à desagregação da argamassa										10	9
1							0,54	540	0,28									
2							0,36	360	0,18									
3	3	50CV-1/3	5	5	1964	50	0,20	200	0,10	0,20	0,07				10	7		
4							0,52	520	0,26									
5							0,38	380	0,19									
1							0,22	220	0,11									
2							0,06	60	0,03									
3	4	50PC-1/3	5	5	1964	50	0,32	320	0,16	0,08	0,05				12	10		
4							0,10	100	0,05									
5							0,10	100	0,05									

Tabela D.31 – Resultados obtidos, aos 90 dias, no ensaio de esclerômetro do pêndulo nos painéis da Igreja de Monserrate

Painel	Composição	Valores individuais					Valor médio	DesvPad	CV (%)
1	CA-1/2	0	0	0	0	0	0	0	-
		0	0	0	0	0			
		0	0	0	0	0			
2	50M-1/3	40	46	45	40	48	43	5	11
		40	45	44	41	45			
		47	30	44	50	43			
3	50CV-1/3	0	0	0	0	0	0	0	-
		0	0	0	0	0			
		0	0	0	0	0			
4	50PC-1/3	49	44	38	49	46	43	7	15
		38	50	47	43	46			
		53	33	37	35	33			

Tabela D.32 – Resultados do ensaio de sais solúveis obtidos nas argamassas dos painéis da Igreja de Monserrate, aos 9 meses

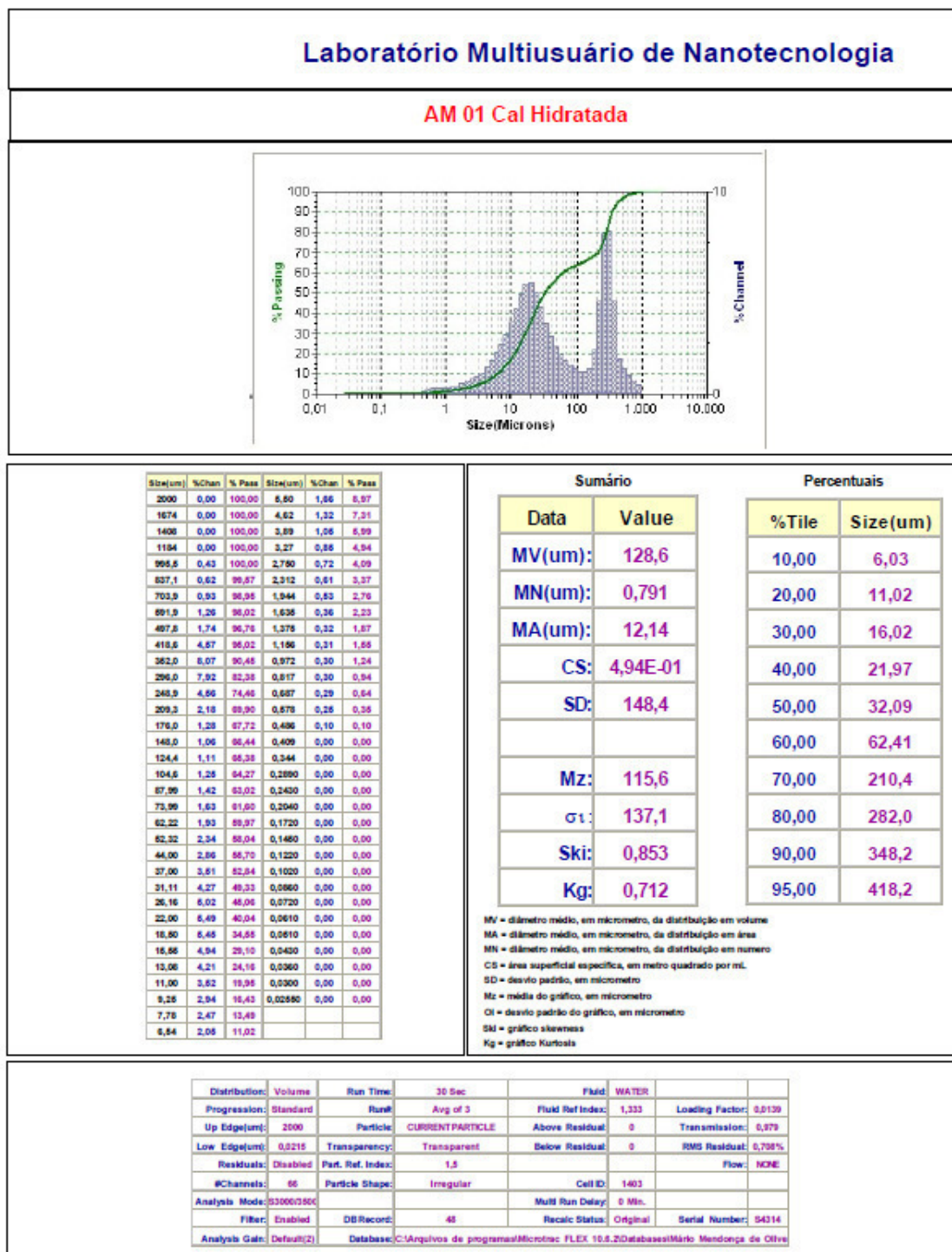
TESTES	Qualitativo				Quantitativo (%)				
	Painel	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Composição	50M-1/3	CA-1/2	50CV-1/3	50PC-1/3	50M-1/3	CA-1/2	50CV-1/3	50PC-1/3	
NITRATO	+++	++	+++	+++	0,005	0,004	0,005	0,005	
CLORETO	+++	++	+++	+++	0,29	0,06	0,29	0,29	
SULFATO	+	-	-	+	0,02	0,007	0,007	0,01	

ANEXOS

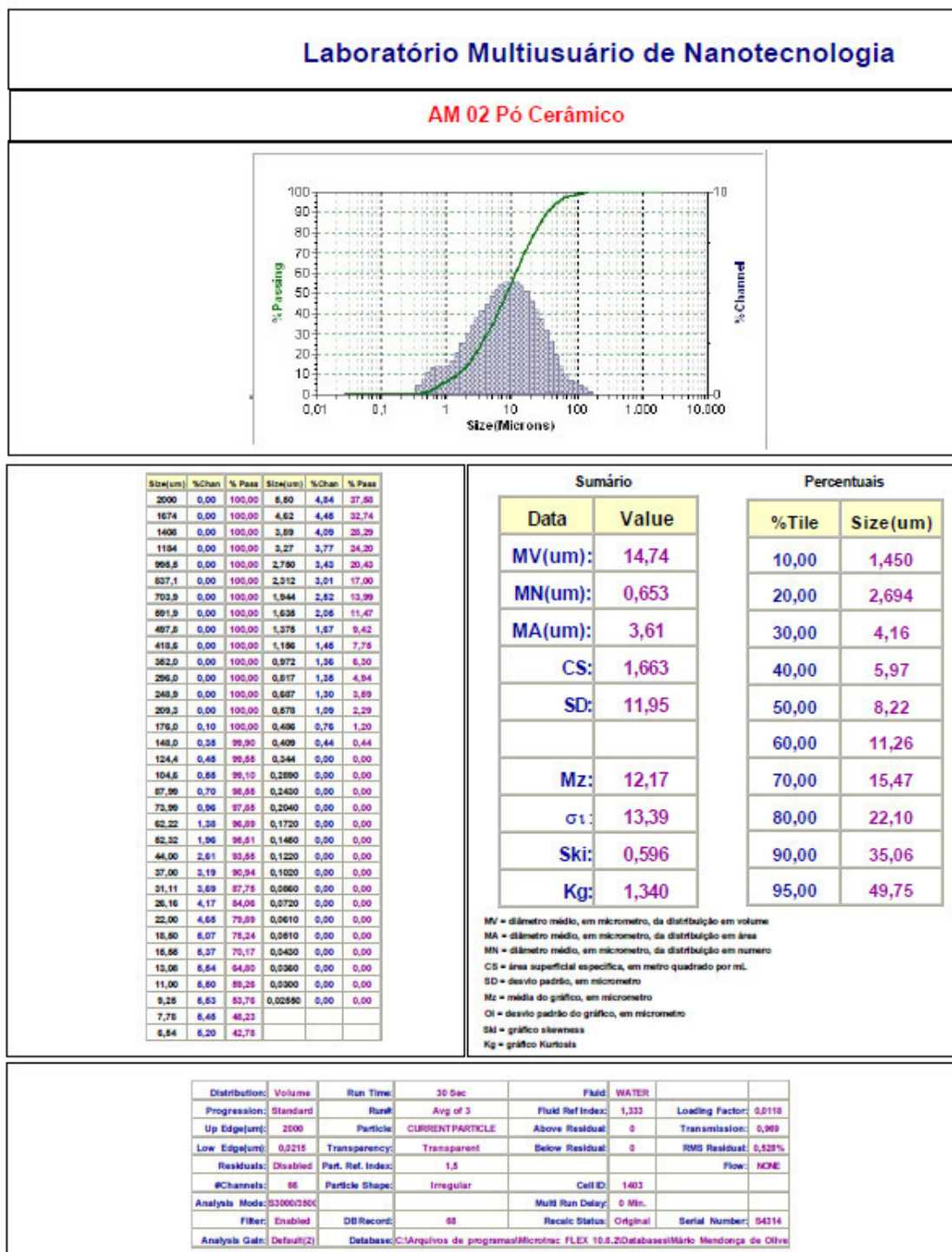
ANEXO A

Dados de distribuição granulométrica a laser dos materiais usados na pesquisa

A.1



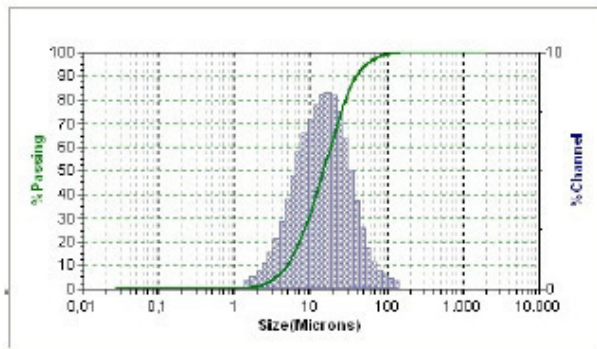
A.2



A.3

Laboratório Multiusuário de Nanotecnologia

AM 03 Metacaulim



Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass
2000	0,00	100,00	5,50	3,78	13,13
1674	0,00	100,00	4,62	2,87	9,56
1400	0,00	100,00	3,89	2,12	6,48
1194	0,00	100,00	3,27	1,58	4,36
995,8	0,00	100,00	2,790	1,11	2,81
827,1	0,00	100,00	2,312	0,78	1,70
702,9	0,00	100,00	1,944	0,54	0,92
591,9	0,00	100,00	1,636	0,38	0,38
497,8	0,00	100,00	1,376	0,00	0,00
418,6	0,00	100,00	1,156	0,00	0,00
362,0	0,00	100,00	0,972	0,00	0,00
296,0	0,00	100,00	0,817	0,00	0,00
248,9	0,00	100,00	0,687	0,00	0,00
209,3	0,00	100,00	0,579	0,00	0,00
176,0	0,00	100,00	0,486	0,00	0,00
148,0	0,37	100,00	0,409	0,00	0,00
124,4	0,48	99,63	0,344	0,00	0,00
104,6	0,69	99,17	0,289	0,00	0,00
87,99	0,79	98,88	0,249	0,00	0,00
73,99	1,14	97,79	0,204	0,00	0,00
62,22	1,70	96,68	0,172	0,00	0,00
52,32	2,68	94,98	0,146	0,00	0,00
44,00	3,69	92,40	0,122	0,00	0,00
37,00	5,02	88,71	0,102	0,00	0,00
31,11	6,36	83,69	0,086	0,00	0,00
26,16	7,47	77,34	0,072	0,00	0,00
22,00	8,18	69,67	0,061	0,00	0,00
18,80	8,28	61,69	0,061	0,00	0,00
16,86	8,20	53,43	0,042	0,00	0,00
13,06	7,77	46,23	0,036	0,00	0,00
11,00	7,22	37,46	0,030	0,00	0,00
9,28	6,67	30,24	0,028	0,00	0,00
7,78	6,76	23,67			
6,84	4,79	17,92			

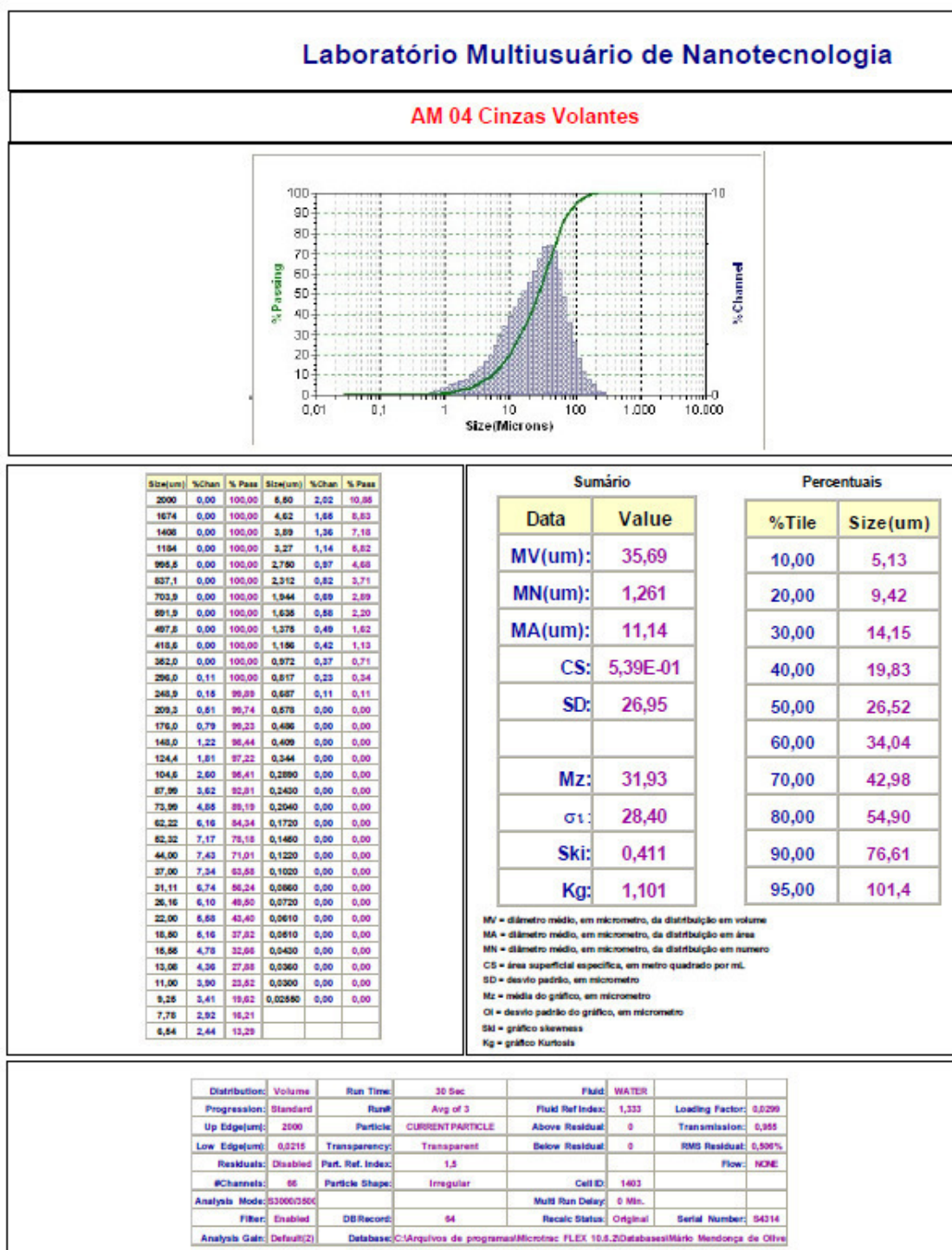
Sumário	
Data	Value
MV(um):	19,60
MN(um):	3,21
MA(um):	10,00
CS:	6,00E-01
SD:	12,65
Mz:	17,34
σ :	13,76
Ski:	0,445
Kg:	1,208

Percentuais	
%Tile	Size(um)
10,00	4,78
20,00	6,98
30,00	9,20
40,00	11,66
50,00	14,48
60,00	17,85
70,00	22,06
80,00	28,03
90,00	39,07
95,00	52,56

MV = diâmetro médio, em micrometro, da distribuição em volume
 MA = diâmetro médio, em micrometro, da distribuição em área
 MN = diâmetro médio, em micrometro, da distribuição em número
 CS = área superficial específica, em metro quadrado por mL
 SD = desvio padrão, em micrometro
 Mz = média do gráfico, em micrometro
 σ = desvio padrão do gráfico, em micrometro
 Ski = gráfico skewness
 Kg = gráfico Kurtosis

Distribution:	Volume	Run Time:	35 Sec	Fluid:	WATER		
Progression:	Standard	Run#:	Avg of 3	Fluid Ref Index:	1,333	Loading Factor:	0,038
Up Edge(um):	2500	Particle:	CURRENT PARTICLE	Above Residual:	0	Transmission:	0,996
Low Edge(um):	0,0215	Transparency:	Transparent	Below Residual:	0	RMS Residual:	0,432%
Residuals:	Disabled	Part. Ref. Index:	1,5			Flow:	NONE
#Channels:	66	Particle Shape:	Irregular	Cell ID:	1403		
Analysis Mode:	03000(350)			Multi Run Delay:	9 Min.		
Filter:	Enabled	DB Record:	40	Recalc Status:	Original	Serial Number:	04314
Analysis Gain:	Default(2)	Database:	C:\Arquivos de programas\Micronac\FLEX 10.0.2\Database\Mário Mendonça de Oliveira				

A.4



A.5

