

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DO MECANISMO DE ADERÊNCIA DE
AZULEJOS E ARGAMASSAS DE CAL EM
REVESTIMENTOS HISTÓRICOS**

PAMMILA JAPIASSÚ

D0040C11
GOIÂNIA
2011

PAMMILA JAPIASSÚ

**ESTUDO DO MECANISMO DE ADERÊNCIA DE
AZULEJOS E ARGAMASSAS DE CAL EM
REVESTIMENTOS HISTÓRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal
de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0040C11
GOIÂNIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação e Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Japiassú, Pammila.

Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal [manuscrito] / Pammila Japiassú. - 2011.

287 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek; Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, tabelas, abreviaturas e siglas.

Apêndices. Anexos.

1. Fachadas de azulejos 2. Reabilitação 3. Argamassas de cal 4. Metacaulim 5. Mecanismo de aderência. I. Título.

PAMMILA JAPIASSÚ

**ESTUDO DO MECANISMO DE ADERÊNCIA DE AZULEJOS E ARGAMASSAS DE
CAL EM REVESTIMENTOS HISTÓRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal
de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

Aprovada em ____ / ____ / ____.

Prof^a. Dr^a. Helena Carasek (Presidente)
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (Co-orientador)
Universidade Federal de Goiás

Prof^a. Dr^a. Maria Carolina Gomes de Oliveira Brandstetter (Membro Interno)
Universidade Federal de Goiás

Prof^a. Dr^a. Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa (Membro Externo)
Universidade de Aveiro

*Aos meus pais, Coraci e José
Roberto, com todo amor.*

AGRADECIMENTOS

Inúmeras pessoas ou instituições contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho, sendo impossível listar todas elas. Os agradecimentos principais são direcionados:

- À Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Programa de Pós-Graduação Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG GECON), em especial, ao departamento de Construção Civil.
- À minha orientadora professora Helena Carasek pela dedicação, pelos ensinamentos, apoio e orientações fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho. A ela meus profundos agradecimentos.
- Ao meu co-orientador professor Oswaldo Cascudo pelo apoio e pelas importantes sugestões e contribuições que permitiram o aperfeiçoamento desta pesquisa.
- Aos demais professores do PPG GECON pelos ensinamentos: Tatiana, Daniel, Lilian e, em especial, a Maria Carolina pela contribuição dada ao desenvolvimento desta pesquisa.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro essencial para o desenvolvimento da pesquisa.
- Ao Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo (ACRA) da Câmara Municipal de Ovar, em Portugal, pela disponibilização das amostras históricas de azulejo e argamassa de fachadas desta cidade.
- À Universidade de Aveiro, em nome de Ana Velosa, pela parceria no desenvolvimento do Projeto Azulejar.
- Ao laboratório de Materiais de Construção (MACO) da UFG, em especial, aos senhores Agnaldo, Deusair e Emanuel pela prestatividade e pelo apoio em várias etapas da pesquisa.
- Ao laboratório de solos da UFG, em nome dos senhores João Pires e João Lima Júnior pela ajuda e solicitude em vários momentos da parte experimental da pesquisa.

- Ao Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LAMMAR) da UFG pela realização das análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) em nome da Dr^a Tatiane dos Santos pela prestatividade e orientações.
- Ao Laboratório de Química da UFG pelas análises de área superficial da cal e do metacaulim, em nome dos técnicos Gustavo e Rangel.
- À Furnas em nome de Heloísa Helena, Renato Batista, Moacir, Armelin e Donizete, do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS (LABS.C -DCT.C) pela realização do ensaio de difração de raios X nas argamassas históricas e pela disponibilidade do aparelho de módulo de elasticidade.
- À Furnas em nome de Elizabeth Leopoldina, Emerson e Aloísio, do Laboratório de Química e Departamento de Apoio Técnico, pelos ensaios de porosimetria dos azulejos.
- À Furnas, em nome de Moacir Andrade e Alexandre de Castro, pelo fornecimento de metacaulim utilizado na produção das argamassas de reabilitação.
- Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT pela realização dos ensaios de difração de raios X, análise termogravimétrica, análise petrográfica e análise química (reconstituição de traço) nas amostras de argamassas históricas, em nome de Mírian de Oliveira, Valdecir Quarcioni, Fabiano Chotoli, Ademir Nunes, Eli Toledo e Jilson Cardoso.
- Ao Laboratório de materiais da Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada, em especial aos senhores Denilson, César, Ricardo, Frank e Alves pela prestatividade e pelo apoio na realização de diversos ensaios de caracterização das argamassas de reabilitação e de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos.
- Ao Laboratório de Argamassa da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC), não só pela realização de ensaios de resistência à tração e à compressão, como pelo apoio e solicitude dos senhores Paulo, Divino e Thiago em várias etapas da pesquisa.
- Ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), em especial, à senhora Beatriz (IPHAN - Goiás) e ao Superintendente do Rio de Janeiro Carlos Fernando, que se prontificaram em ajudar.
- A professora Rosina Trevisan (UFRJ), ao arquiteto Jorge Astorga e à professora Thais Sanjad pelo material textual, pela disponibilidade e pela prestatividade em ceder informações relevantes a pesquisa.
- A Wanessa, pela amizade, pelo apoio e pelo compartilhamento tanto dos momentos bons como dos difíceis ao longo do mestrado.

- Ao grupo da iniciação científica: Marina, Nathália e, em especial, a Patrícia e a Nayara pela amizade, prestatividade e essencial contribuição dada ao desenvolvimento desta pesquisa.
- A Leiliane, Byanna, Francielle, Ana Domitila do mestrado pela amizade, pelos momentos de estudo e descontração ao longo do mestrado.
- Aos meus familiares, em especial, meus pais Coraci e José Roberto, meus irmãos Felipe e Júnior e a minha querida avó Lenir por todo amor, apoio e carinho.
- Ao Claudio, pelo amor, companherismo, pela paciência, pela força e apoio nos momentos mais difíceis e por todos os momentos bons que vivenciamos.
- Por fim, agradeço a Deus por todas as bênçãos realizadas em minha vida.

RESUMO

Os azulejos históricos em fachada são uma importante expressão cultural luso-brasileira, que deve ser conservada e preservada. A perda de aderência dos azulejos à argamassa de assentamento é uma das manifestações patológicas mais graves desse tipo de revestimento. No entanto, apesar dessa importância, ainda existe uma carência de estudos sobre o mecanismo de aderência entre esses componentes históricos. Nesse sentido, essa dissertação se propôs a realizar uma pesquisa exploratória e experimental, cujo objetivo principal é dar contribuição ao entendimento do mecanismo de aderência dos azulejos antigos à argamassa à base de cal aérea de fachada de edificações históricas. Para tanto, foram analisadas amostras de revestimentos cerâmicos históricos de fachada, entre o final século XIX e início do século XX, de edificações de Ovar, em Portugal. No intuito de reproduzir o mecanismo de aderência histórico, foram analisados também revestimentos cerâmicos aplicados em laboratório estudando argamassas de reabilitação. Na primeira etapa, foram caracterizados os azulejos e as argamassas históricas de três casos, bem como realizado o estudo interface entre esses dois materiais. Na segunda etapa, foram produzidos revestimentos cerâmicos em laboratório utilizando azulejos (similares aos históricos) e quatro tipos de argamassas de reabilitação, compostas por cal aérea, metacaulim e areia, variando o teor de pozolana em 0%, 5%, 10% e 15%, de substituição da cal em volume. Nesta etapa, foram caracterizados o azulejo, as matérias-primas da argamassa, assim como argamassa no estado fresco e endurecido. Por fim, ainda foi estudada a interface entre o azulejo e a argamassa de reabilitação, visando compará-la com a histórica. Observou-se na análise dos revestimentos cerâmicos históricos que os valores de resistência de aderência e de extensão de aderência estavam mais relacionados à granulometria dos agregados do que à relação aglomerante/agregado das argamassas de assentamento. No caso dos revestimentos cerâmicos moldados em laboratório, constatou-se a influência do teor de metacaulim nas argamassas reabilitação na resistência de aderência. Foi observada também uma possível influência da muratura do tardo do azulejo na aderência dos revestimentos cerâmicos. Pelas análises no MEV foi identificada a morfologia de produtos de carbonatação e de possíveis reações pozolânicas nas argamassas estudadas, que contribuem para o aumento da resistência de aderência dessas.

Palavras-chave: Fachadas de azulejos. Reabilitação. Argamassas de cal. Metacaulim. Mecanismo de aderência.

ABSTRACT

The historical glazed tiles facades are an important luso-brazilian cultural expression that must be conserved and preserved. The bonding loss of glazed tiles to laying mortars is one of the most critical pathologic manifestations of this kind of coating. However, despite this importance, there's still a lack of studies about the bonding mechanism between this historical components. Accordingly, this dissertation proposed to perform an experimental and exploratory research, which the main objective is to give some contribution to the understanding of the ancient tile's bonding mechanism to the aerial lime-based mortar of historical buildings facade. For this, were analyzed samples of facade historical ceramic coating, between the late XIX and early XX century, of Ovar's buildings, in Portugal. In order to reproduce the historical bonding mechanism, were also analyzed ceramic coating applied in laboratory studying mortars of rehabilitation. In the first stage, were analyzed the ceramic coating and the mortars historic of three cases, as well was performed the interface's study between this two materials. In the second stage, were produced ceramic coatings in laboratory using tiles (similar to the historical ones) and four types of mortars of rehabilitation, composed by aerial lime, metakaolin and sand, varying the content of pozolana in 0%, 5%, 10% e 15%, replacement of lime in volume. In this stage, were characterized the tile, the raw materials of the mortar, and mortar in the fresh and hardened. Finally, yet was studied the interface between the glazed tile and the mortar of rehabilitation, in order to compare this one to the historical one. It was observed in the analysis of the historical ceramic coatings that the values of bond strength and of extension of bond were more related to the agregates granulometry than to the binder/aggregate of the laying mortars. In the case of the ceramic coatings molded in laboratory, it was found the influence of the metakaolin content in the rehabilitation mortars in bond strength. It was also observed a possible influence of the shape of the tile's back surface in the bonding of ceramic coatings. By the analysis in the SEM was identified the morphology of the products of carbonation and possible pozzolanic reactions in the studied mortars, that contributing to the increased bond strength of these materials.

Keywords: Glazed tiles facades. Rehabilitation. Lime mortars. Metakaolin. Bond mechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Linha do tempo dos diversos materiais estudados.....	41
Figura 2. 2 – Fachada revestida de azulejos em Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).	44
Figura 2. 3 – Fachada revestida de azulejos em São Luiz do Maranhão, Brasil (CERAMICANORIO, 2010).....	45
Figura 2. 4 – Exemplo de parede e revestimento cerâmico de fachada empregados em edificações na cidade de Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).	48
Figura 2. 5 – Meda: calcinação ao ar livre. (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).	58
Figura 2. 6– Ciclo da cal aérea: produção e utilização.....	59
Figura 2. 7 – Uso inadequado de argamassa de cimento em fachada de azulejos em Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).....	74
Figura 3. 1 – Organograma das amostras estudadas de azulejos com argamassa e de argamassa portuguesas.	80
Figura 3. 2 – Organograma das amostras estudadas somente de azulejos históricos portugueses.....	80
Figura 3. 3 – Organograma dos ensaios e análises para os revestimentos cerâmicos históricos, com identificação dos locais onde foram realizados.....	81
Figura 3. 4 – Método do registro fotográfico.....	82
Figura 3. 5 – Porosímetro modelo Pore Master da marca Quanta Chrome utilizado no ensaio: (a) vista geral e (b) vista do seu interior.....	86
Figura 3. 6 – Penetrômetro com a amostra de azulejo: (a) vista antes e (b) vista depois de ser inserido no porosímetro.	86
Figura 3. 7 – Ensaio de absorção de água por fervura dos azulejos: (a) realização do ensaio e (b) detalhe da estrutura criada para que os azulejos fossem mantidos na posição vertical dentro do recipiente.	87
Figura 3. 8 – Adequação do anteparo de isopor para execução do ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) vista lateral e (b) vista superior do recipiente.	93

Figura 3. 9 – Forma utilizada para o cálculo da área da superfície de contato na altura referente a 5 mm da lâmina de água no programa Autocad: (a) amostra PT-VO-A8 e (b) amostra PT-VO-A9.	94
Figura 3. 10 – Ensaio de absorção total nas argamassas do Caso 1: (a) vista lateral e (b) vista superior do recipiente.	95
Figura 3. 11 – (a) Delimitação da área de argamassa aderida e (b) divisão das nove zonas de aderência e (c) posicionamento da amostra para análise das zonas de argamassa aderida.....	97
Figura 3. 12 – Forma de análise das amostras na lupa estereoscópica.	98
Figura 3. 13 – Cortadeira de precisão modelo Minitom da marca Struers.	99
Figura 3. 14 – Secção plana transversal da amostra com riscos alternados (a) amostra PT-VO-A3-F2-1 do Caso 1 e (b) amostra PT-SO-A2-F3-3 do Caso 3.....	99
Figura 3. 15 – (a) Configuração do corpo-de-prova de aderência de revestimento cerâmico histórico pronto para ser ensaiado e (b) nivelamento do equipamento de modo que o eixo do equipamento ficasse ortogonal em relação superfície do corpo-de-prova.....	101
Figura 3. 16 – Microscópio eletrônico de Varredura Jeol JSM-6610 do LAMMAR: (a) imagem geral e (b) imagem do seu interior.	103
Figura 3. 17– Equipamento <i>Sputtering</i> , modelo <i>Desk V</i> , da Danton <i>Vacuum</i> utilizado para a metalização das amostras: (a) imagem geral e (b) detalhe da tela de diferencia de potencial.	104
Figura 3. 18 – (a) Torrões esbranquiçados, provavelmente de cal nas argamassas, na amostra PT-VO-A6 do Caso 1e (b) diferenças de colorações da argamassa na própria amostra PT-AS-SI3 do Caso 2.....	105
Figura 3. 19 – Tardoz dos azulejos (a) do Caso 1 e (b) dos Casos 2 e 3.....	105
Figura 3. 20 – Distribuição do tamanho dos poros dos azulejos históricos.....	109
Figura 3. 21– Curvas de absorção de água ao longo do tempo dos azulejos históricos.....	111
Figura 3. 22– Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 1.....	113
Figura 3. 23– Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 2.....	114
Figura 3. 24– Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 3.....	114
Figura 3. 25 – Aspecto geral das argamassas (a) do Caso 1, (b) do Caso 2 e (c) do Caso 3; sendo indicado em azul as microfissuras e vazios na pasta.	118

Figura 3. 26 – Absorção por capilaridade das argamassas do PT – Caso 1.	120
Figura 3. 27 – Argamassa histórica do Caso 1 após fratura e a aspersão de fenolftaleína.	121
Figura 3. 28 – (a) Amostra PT-VO-A3 do Caso 1 e (b) amostra PT-SO-A3 do Caso 3 com, respectivamente, a menor e a maior percentual de área de argamassa aderida no tardo do azulejo.	122
Figura 3. 29 – Resultados da quantificação de azulejos com aderência de argamassa em determinada zona e(b) configuração da argamassa no tardo das amostras analisadas por caso.	123
Figura 3. 30 – Interface entre azulejo e argamassa do Caso 1: (a) presença de falhas de aderência na região de relevo e (b) ausência dessas na região plana da muratura do tardo do azulejo.	124
Figura 3. 31 – Falhas de aderência entre azulejo e argamassa do Caso 2: (a) na região de relevo e (b) na região plana da muratura do tardo do azulejo.	124
Figura 3. 32 – Interface entre azulejo e argamassa do Caso 3: (a) presença de falhas de aderência na região de relevo e (b) ausência dessas na região plana da muratura do tardo do azulejo.	125
Figura 3. 33 – Micrografias de uma região da argamassa histórica do Caso 1 com predominância de cristais de carbonatos.	128
Figura 3. 34 – Espectro EDS no ponto 1 da argamassa histórica do Caso 1.	128
Figura 3. 35 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa histórica do Caso 1.	129
Figura 3. 36 – Aspectos morfológicos do pó (a) de gesso comercial e (b) da gipsita (SILVA, 2010).	129
Figura 3. 37 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 1 com predominância de sulfato e cálcio.	130
Figura 3. 38 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa histórica do Caso 1.	130
Figura 3. 39 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 2 com predominância de cristais com morfologia distinta.	131
Figura 3. 40 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa do Caso 2.	131
Figura 3. 41 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 2.	132
Figura 3. 42 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 2 com predominância de cristais de morfologia distinta.	132

Figura 3. 43 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa do Caso 2.	133
Figura 3. 44 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 2.	133
Figura 3. 45 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 3.	134
Figura 3. 46 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa histórica do Caso 3.	134
Figura 3. 47 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 3.	134
Figura 4. 1– Organograma dos ensaios e análises dos revestimentos cerâmicos novos aplicados em laboratório e os locais onde foram realizados.	138
Figura 4. 2 – Amostras dos materiais utilizados para a produção das argamassas: cal, metacaulim e areia.	139
Figura 4. 3 – Etapas da realização do ensaio de massa unitária da areia: (a) medição de massa do recipiente, (b) preenchimento com o material, (c) arrasamento e (d) medição de massa do recipiente com o material.....	141
Figura 4. 4 – Curva granulométrica da areia.	143
Figura 4. 5 – Etapas da realização do ensaio de consistência pela penetração do cone: (a) preenchimento do copo, (b) adensamento da argamassa, (c) golpes na parte externa do copo e (d) medição da penetração do cone.	144
Figura 4. 6 – Etapas da realização do ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa: (a) preenchimento do molde tronco-cônico, (b) acionamento da manivela da mesa para índice de consistência e (c) medição do diâmetro do espalhamento.....	144
Figura 4. 7 – Etapas da realização do ensaio de retenção de água: (a) sucção do excesso de água do papel filtro, (b) medição de massa do conjunto prato/papel filtro após sucção, (c) medição de massa do conjunto prato/ papel filtro/ argamassa antes da sucção e (d) sucção realizada neste conjunto.	145
Figura 4. 8 – Corpos-de-prova prismáticos após moldagem: (a) os de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm e (b) os de dimensões 25 mm x 25 mm x 285 mm.	146
Figura 4. 9 – (a) Máquina para resistência à tração na flexão e compressão, (b) ensaio de resistência à tração na flexão e (c) ensaio de resistência à compressão.	147
Figura 4. 10 – (a) Corpos-de-prova do ensaio de retração linear, (b) aparelho comparador com a barra de referência e (c) aparelho comparador com um corpo-de-prova.	147
Figura 4. 11 – Formas de medição dimensional: (a) sentido da medição da largura, da altura e (b) do comprimento dos corpos-de-prova.	148

Figura 4. 12 – (a) Calibração do equipamento com a barra de referência, (b) aplicação do gel para ultrassom nas extremidades do corpo-de-prova e (c) realização do ensaio de módulo de elasticidade.....	148
Figura 4. 13 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) vista geral e (b) detalhe do suporte utilizado com e sem corpo-de-prova.	149
Figura 4. 14 – Imersão dos corpos-de-prova para a realização do ensaio de absorção total.	150
Figura 4. 15 – Etapas da realização do ensaio de carbonatação: (a) aplicação do esforço vertical no centro do revestimento cerâmico e (b) superfície de um corpo-de-prova após fratura e aspersão de fenolftaleína.....	151
Figura 4. 16 – (a) Disposição de dois corpos-de-prova de revestimento cerâmico sobre a camada de regularização e (b) visão geral de todos os corpos-de-prova moldados para o estudo da interface.	152
Figura 4. 17 – Divisão e identificação dos quadrantes no azulejo de reposição: (a) vista da face esmaltada e (b) vista do tardo.	153
Figura 4. 18 – Etapas anteriores à mistura da argamassa: (a) separação dos materiais de acordo com o proporcionamento e (b) mistura manual dos materiais secos.	154
Figura 4. 19 – (a) Interrupção no processo de mistura para a remoção do material aderido as laterais da cuba e (b) aspecto da argamassa de assentamento, com 24% de teor água, após o período de mistura.	154
Figura 4. 20 – Etapas da moldagem da camada de argamassa de regularização: (a)ajuste da altura da forma com auxílio das cantoneiras metálicas e (b) aplicação da argamassa sobre a superfície do bloco cerâmico.....	155
Figura 4. 21 – Etapas da moldagem da camada de argamassa de regularização: (a) rasamento com régua metálica e (b) alisamento com desempenadeira de madeira.	155
Figura 4. 22 – Eixos de referência traçadas com grafite na camada de regularização.	156
Figura 4. 23 – Etapas da moldagem do revestimento cerâmico: (a)materiais e ferramentas utilizadas e (b) limpeza prévia da camada de regularização.	156
Figura 4. 24 – Etapas da moldagem do revestimento cerâmico: (a) borrifadas de água sobre a camada de regularização e (b) preenchimento da fôrma com argamassa.	157
Figura 4. 25 – Etapas da moldagem do revestimento cerâmico: (a) assentamento do azulejo sobre a argamassa e (b) retirada do excesso de argamassa das laterais durante a permanência do peso de 2 kg sobre o revestimento cerâmico.....	157

Figura 4. 26 – (a) Configuração dos corpos-de-prova após a colagem da pastilha metálica sobre a superfície esmaltada do azulejo e (b) aplicação do esforço de tração até a ruptura do corpo-de-prova.	159
Figura 4. 27 – Distribuição do tamanho dos poros dos azulejos históricos e de reposição.	161
Figura 4. 28 – Curvas de absorção de água ao longo do tempo dos azulejos de reposição e dos azulejos históricos.	162
Figura 4. 29 – Relação entre as resistências médias à compressão e à tração na flexão e o teor de metacaulim das argamassas.	165
Figura 4. 30 – Relação entre as resistências médias à compressão e à tração na flexão das argamassas.	165
Figura 4. 31 – Variação dimensional média das argamassas ao longo do tempo.	166
Figura 4. 32 – Relação entre a retração média aos 90 dias e o teor de metacaulim das argamassas.	167
Figura 4. 33 – Variação de massa média das argamassas ao longo do tempo.	168
Figura 4. 34 – Relação entre a densidade de massa aparente aos 28 dias e o teor de metacaulim das argamassas.	169
Figura 4. 35 – Relação entre os valores médios de módulo de elasticidade e o teor de metacaulim das argamassas.	170
Figura 4. 36 – Absorção por capilaridade ao longo do tempo das argamassas.	172
Figura 4. 37 – Relação entre o coeficiente de capilaridade e o teor de metacaulim.	173
Figura 4. 38 – Relação ente a resistência de aderência à tração e o teor de metacaulim das argamassas nas idades de 45 dias e 90 dias.	177
Figura 4. 39 – Relação entre a resistência de aderência à tração, nas idades de 45 dias e 90 dias, e resistência à tração na flexão das argamassas.	178
Figura 4. 40 – (a) Regiões definidas do tardo do azulejo de reposição, sendo indicas em cinza as áreas de superfície em relevo, e (b) identificação das regiões do tardo de acordo com o resultado de resistência de aderência.	179
Figura 4. 41– Micrografias de uma região de superfície de um agregado recoberta pela pasta de calda argamassa A.	181
Figura 4. 42 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa A.	181
Figura 4. 43 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa A.	182

Figura 4. 44 – Micrografia da argamassa A de uma região com predominância de calcita.	182
Figura 4. 45 – Região de interface entre o agregado e a pasta de cal: (a) imagem SEI e (b) imagem BSE.....	183
Figura 4. 46 – (a) Morfologia de um tipo de metacaulim (VELOSA, 2006) e (b) indícios de produtos de reação pozolânica de uma argamassa à base de cal com adição de metacaulim (VELOSA, ROCHA, VEIGA, 2009).....	183
Figura 4. 47 – Micrografias de uma região da argamassa C com predominância de cristais de calcita.	184
Figura 4. 48 – Espectro Eds do ponto 1 da argamassa C.	184
Figura 4. 49 – Micrografias de uma região de superfície de um agregado recoberta pela pasta da argamassa C.....	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Classificação química de argamassas antigas (MOROPOULOU <i>et al.</i> , 2005 <i>apud</i> VELOSA, 2006)	55
Tabela 2. 2 – Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas (MOROPOULOU <i>et al.</i> , 2005 <i>apud</i> VELOSA, 2006).....	56
Tabela 2. 3 – Exigências químicas da cal hidratada (adaptada de NBR 7175, ABNT, 2003b).	63
Tabela 2. 4 – Exigências físicas da cal hidratada (adaptada de NBR 7175, ABNT, 2003b).	63
Tabela 2. 5 – Calcário e cales cálcicas – composição teórica percentual obtidas de matérias primas puras (adaptada de CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).....	64
Tabela 2. 6 – Dolomito e cales dolomíticas – composição teórica percentual obtidas de matérias primas puras (adaptada de CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).	64
Tabela 2. 7 – Exigências físicas e químicas do metacaulim (adaptada da NBR 15894-1, ABNT, 2010).....	66
Tabela 2. 8– Silicatos, aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados formados a partir da reação do metacaulim com o hidróxido de cálcio (VELOSA, 2006, p. 37, 39, adaptada).	67
Tabela 2. 9 – Resumo dos fatores que influenciam na reação pozolânica.	67
Tabela 2. 10 – Proporcionamentos de argamassas de cal aérea e metacaulim utilizados em pesquisas recentes.	69
Tabela 2. 11 – Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição – características mecânicas (VEIGA, 2005).	72
Tabela 2. 12 – Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição – características não-mecânicas (VEIGA, 2005).	72
Tabela 3. 1 – Identificação dos casos pelo endereço das edificações e padrão de nomenclatura utilizado.	79
Tabela 3. 2– Amostras de azulejos históricos ensaiados por tipo de ensaio.	83
Tabela 3. 3 – Amostras de argamassas históricas ensaiadas por tipo de ensaio.....	89
Tabela 3. 4 – Constituintes dos materiais de referência utilizados no cálculo.	92

Tabela 3. 5– Amostras de azulejo com argamassa históricas ensaiadas por tipo de ensaio.	96
Tabela 3. 6 – Identificação mineralógica dos azulejos históricos portugueses de acordo com sua predominância.	106
Tabela 3. 7 – Porosidade total dos azulejos históricos.....	109
Tabela 3. 8 – Distribuição dos poros pelo volume de mercúrio intrudido dos azulejos históricos.	109
Tabela 3. 9 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por fervura dos azulejos históricos.	110
Tabela 3. 10 – Resultados médios de absorção ao longo do tempo dos azulejos históricos.	110
Tabela 3. 11 – Identificação mineralógica das argamassas históricas portuguesas.....	112
Tabela 3. 12 – Fenômenos envolvidos nos eventos térmicos, respectivas temperaturas das curvas de TG/DTG.....	115
Tabela 3. 13 – Perdas de massas envolvidas no processo de decomposição térmica.....	115
Tabela 3. 14 – Características da pasta das argamassas históricas.	116
Tabela 3. 15 – Características dos agregados das argamassas históricas.	116
Tabela 3. 16 – Características dos vazios das argamassas históricas.....	117
Tabela 3. 17 – Resultados de reconstituição do traço das argamassas históricas.	119
Tabela 3. 18 – Resultados médios de absorção de água por capilaridade do PT – Caso 1	120
Tabela 3. 19 – Resultados médios da área de argamassa aderida no tardo do azulejo. ...	122
Tabela 3. 20 – Resultados médios de extensão de aderência das amostras de revestimentos cerâmicos históricas.	123
Tabela 3. 21 – Resultados potenciais médios de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses do Caso 2 e do Caso 3.	126
Tabela 4. 1 – Nomenclatura e proporcionamento das argamassas de reabilitação, em volume e em massa.....	140
Tabela 4. 2 – Resultados do ensaio de massa unitária dos materiais.	141
Tabela 4. 3 – Resultados médios do ensaio de granulometria de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003c).	142

Tabela 4. 4 – Identificação mineralógica do azulejo de reposição de acordo com sua predominância.....	160
Tabela 4. 5 – Distribuição dos poros pelo volume de mercúrio intrudido de mercúrio dos azulejos históricos portugueses e do azulejo de reposição.....	161
Tabela 4. 6 – Resultados médios de absorção ao longo do tempo dos azulejos de reposição.....	162
Tabela 4. 7 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.....	163
Tabela 4. 8 – Resultados médios de resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas.....	164
Tabela 4. 9 – Variação dimensional média das argamassas em várias idades.....	166
Tabela 4. 10 – Valores médios de variação de massa das argamassas em várias idades.....	168
Tabela 4. 11 – Resultados médios do ensaio de densidade aparente no estado endurecido por argamassa.....	169
Tabela 4. 12 – Resultados médios de módulo de elasticidade dinâmico através de propagação de onda ultra-sônica das argamassas.....	170
Tabela 4. 13 – Resultados médios de absorção de água por capilaridade das argamassas.....	171
Tabela 4. 14 – Coeficiente de capilaridade médio das argamassas.....	172
Tabela 4. 15 – Resultados médios de absorção de água por imersão após 24 horas por argamassa.....	173
Tabela 4. 16 – Resultados médios da profundidade carbonatada das argamassas aos 28 dias e 90 dias.....	174
Tabela 4. 17 – Valores de referência de argamassas de reabilitação e resultados médios das argamassas no estado endurecido estudadas.....	175
Tabela 4. 18 – Resultados médios de resistência de aderência à tração potenciais e tipos de rupturas dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico por argamassa aos 45 dias.	176
Tabela 4. 19 – Resultados médios de resistência de aderência à tração potenciais e tipos de rupturas dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico por argamassa aos 90 dias.	176
Tabela 4. 20 – Resistência de aderência à tração média de acordo com a região do tardo do azulejo.	179

Tabela 4. 21 – Características dos revestimentos cerâmicos históricos e novos.	186
Tabela A. 1 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-VO-A3.....	201
Tabela A. 2 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-DAS-Z2-A4.	202
Tabela A. 3 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-AS-SI2.	203
Tabela A. 4 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-AS-SI3.	204
Tabela A. 5 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-SO-A1.....	205
Tabela A. 6 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-SO-A2.....	206
Tabela A. 7 – Ficha catalográfica da amostra de azulejo com argamassa PT-SO-A3.....	207
Tabela A. 8 – Ficha catalográfica da amostra de argamassa PT-VO-A6.....	208
Tabela A. 9 – Ficha catalográfica da amostra de argamassa PT-VO-A8.....	209
Tabela A. 10 – Ficha catalográfica da amostra de argamassa PT-VO-A9.....	210
Tabela A. 11 – Ficha catalográfica da amostra de argamassa PT-AS-Z1-A1.....	211
Tabela B. 1 – Resultado do ensaio de massa unitária da cal de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).....	212
Tabela B. 2 – Resultado do ensaio de massa unitária do metacaulim de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).	212
Tabela B. 3 – Resultado do ensaio de massa unitária da areia de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).....	213
Tabela B. 4 – Resultados do ensaio de granulometria de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003c).	214
Tabela C. 1 – Resultados do ensaio de absorção de água por fervera dos azulejos históricos.	215
Tabela C. 2 – Resultados do ensaio de absorção ao longo do tempo dos azulejos do PT-Caso 1.....	216
Tabela C. 3 – Resultados do ensaio de absorção ao longo do tempo dos azulejos do PT-Caso 1.....	217
Tabela C. 4 – Resultados do ensaio de absorção ao longo do tempo dos azulejos do PT-Caso 3.....	218

Tabela D. 1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do PT – Caso 1.	219
Tabela D. 2 – Coeficiente de capilaridade do PT – Caso 1.	219
Tabela D. 3 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão após 24 horas das argamassas do Caso 1.	219
Tabela E. 1 – Resultados da área de argamassa aderida no tardo do azulejo.	220
Tabela E. 2 – Quantificação dos azulejos pela presença de argamassa aderida em determinada zona.	221
Tabela E. 3 – Resultados da análise de extensão de aderência dos revestimentos cerâmicos portugueses.	222
Tabela E. 4 – Resultados de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses por corpos-de-prova.	223
Tabela E. 5 – Resultados médios de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses por amostra.	223
Tabela E. 6– Resultados médios de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses por caso.	224
Tabela E. 7 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses.	224
Tabela E. 8 – Resultados médios de resistência de aderência à tração potenciais dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses por caso.	224
Tabela F. 1 – Resultados do ensaio de absorção de água por fervura dos azulejos de reposição.	225
Tabela F. 2 – Resultados do ensaio de absorção ao longo do tempo dos azulejos de reposição.	226
Tabela G. 1 – Resultados do ensaio do índice de consistência pela penetração do cone das argamassas referentes aos ensaios de caracterização no estado plástico e endurecido (21% de água/materiais secos).	227
Tabela G. 2 – Resultados do ensaio do índice de consistência pela penetração do cone da argamassa de regularização (21% de água/materiais secos).	227
Tabela G. 3 – Resultados do ensaio do índice de consistência pela penetração do cone das argamassas de assentamento das placas cerâmicas (24% de água/materiais secos).	228

Tabela G. 4 – Resultados do ensaio do índice de consistência por espalhamento na mesa (flowtable) das argamassas com 21% de água/materiais secos.	228
Tabela G. 5 – Resultados do ensaio de retenção de água das argamassas com 21% de água/materiais secos.	228
Tabela H. 1 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa A....	229
Tabela H. 2 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa B....	229
Tabela H. 3 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa C....	229
Tabela H. 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa D....	230
Tabela H. 5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa A.....	230
Tabela H. 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa B.....	230
Tabela H. 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa C.	230
Tabela H. 8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa D.	231
Tabela H. 9 – Resultados das dimensões dos corpos-de-provas das argamassas relativos à idade 0 após a desenforma.....	231
Tabela H. 10 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 1 após a desenforma.	232
Tabela H. 11 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 4 após a desenforma.	232
Tabela H. 12 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 7 após a desenforma.	233
Tabela H. 13 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 14 após a desenforma.	233
Tabela H. 14 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 21 após a desenforma.	234
Tabela H. 15 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 28 após a desenforma.	234
Tabela H. 16 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 60 após a desenforma.	235
Tabela H. 17 – Resultados de variação dimensional das argamassas relativos à idade 90 após a desenforma.	235

Tabela H. 18 – Resultados da medição de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 0 após a desenforma.	236
Tabela H. 19 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 1 após a desenforma.	236
Tabela H. 20 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 4 após a desenforma.	237
Tabela H. 21 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 7 após a desenforma.	237
Tabela H. 22 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 14 após a desenforma.....	238
Tabela H. 23 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 21 após a desenforma.....	238
Tabela H. 24 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 28 após a desenforma.....	239
Tabela H. 25 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 60 após a desenforma.....	239
Tabela H. 26 – Resultados de variação de massa dos corpos-de-prova das argamassas relativos à idade 90 após a desenforma.....	240
Tabela H. 27 – Resultados do ensaio de densidade aparente no estado endurecido por argamassa.....	240
Tabela H. 28 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através de propagação de onda ultra-sônica da argamassa A.....	241
Tabela H. 29 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através de propagação de onda ultra-sônica da argamassa B.....	241
Tabela H. 30 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através de propagação de onda ultra-sônica da argamassa C.....	242
Tabela H. 31 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através de propagação de onda ultra-sônica da argamassa D.....	242
Tabela H. 32 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade da argamassa A.....	243
Tabela H. 33– Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade da argamassa B.	243

Tabela H. 34 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade da argamassa C.....	244
Tabela H. 35 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade da argamassa D.....	244
Tabela H. 36 – Coeficiente de capilaridade por argamassa.	245
Tabela H. 37 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão após 24 horas por argamassa.....	245
Tabela H. 38 – Resultados da profundidade carbonatada das argamassas aos 28 dias....	245
Tabela H. 39 – Resultados da profundidade carbonatada das argamassas aos 90 dias....	245
Tabela I. 1 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento A aos 45 dias.....	246
Tabela I. 2 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento A aos 90 dias.....	247
Tabela I. 3 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento B aos 45 dias.....	247
Tabela I. 4 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento B aos 90 dias.....	248
Tabela I. 5 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento C aos 45 dias.....	248
Tabela I. 6 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento C aos 90 dias.....	249
Tabela I. 7 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento D aos 45 dias.....	249
Tabela I. 8 – Resultados de resistência de aderência à tração dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento D aos 90 dias.....	250
Tabela I. 9 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento A aos 45 dias.	250
Tabela I. 10 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento A aos 90 dias.	251
Tabela I. 11 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento B aos 45 dias.	251

Tabela I. 12 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento B aos 90 dias.	251
Tabela I. 13 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento C aos 45 dias.	252
Tabela I. 14 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento C aos 90 dias.	252
Tabela I. 15 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento D aos 45 dias.	252
Tabela I. 16 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico referente à argamassa de assentamento D aos 90 dias.	253
Tabela AA. 1 – Caracterização físico-química do metacaulim (dados fornecidos por FURNAS).....	254
Tabela AB. 1 – Difractometria de Raios-X do azulejo do PT – Caso 1 (fornecida por Furnas).	255
Tabela AB. 2 – Difractometria de Raios-X do azulejo do PT – Caso 2 (fornecida por Furnas).	256
Tabela AB. 3 – Difractometria de Raios-X do azulejo do PT – Caso 3 (fornecida por Furnas).	257
Tabela AB. 4 – Dados gerais da porosimetria por intrusão de mercúrio dos azulejos históricos (fornecidos por Furnas).....	258
Tabela AB. 5 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostraPT-VO-A3-F1-A do Caso 1 (fornecidos por Furnas).....	258
Tabela AB. 6 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostraPT-VO-SI1-P2 do Caso 1 (fornecidos por Furnas).	260
Tabela AB. 7 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostraPT-VO-A3-F1-B do Caso 1.....	261
Tabela AB. 8 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra PT-AS-SI2-F1-P2 do Caso 2 (fornecidos por Furnas).....	262
Tabela AB. 9 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra PT-SO-A1-P2 do Caso 3 (fornecidos por Furnas).	263

Tabela AB. 10 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra PT-VO-A3-F1-A do Caso 1 (fornecidos por Furnas).	264
Tabela AB. 11 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra PT-VO-SI1-P2 do Caso 1 (fornecidos por Furnas).....	266
Tabela AB. 12 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra PT-VO-A3-F1-B do Caso 1 (fornecidos por Furnas).	268
Tabela AB. 13 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra PT-AS-SI2-F1-P2 do Caso 2 (fornecidos por Furnas).....	270
Tabela AB. 14 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra PT-SO-A1-P2 do caso 3 (fornecidos por Furnas).	272
Tabela AC. 1 – Resultado da análise por difração de raios-X do material <0,150mm (fornecido pelo IPT).	275
Tabela AC. 2 – Difratomia de Raios-X da argamassa do PT - Caso 1 (fornecida por Furnas).	276
Tabela AC. 3 – Difratomia de Raios-X da argamassa do PT - Caso 2 (fornecida por Furnas).	277
Tabela AC. 4 – Difratomia de Raios-X da argamassa do PT - Caso 3 (fornecida por Furnas).	278
Tabela AC. 5 – Descrição petrográfica da argamassa PT-Caso 1 (fornecida pelo IPT).	279
Tabela AC. 6 – Descrição petrográfica da argamassa PT -Caso 2 (fornecida pelo IPT). ...	280
Tabela AC. 7 – Descrição petrográfica da "argamassa PT-Caso 3" (fornecida pelo IPT)...	281
Tabela AC. 8 – Resultados de análise química das argamassas.....	282
Tabela AD. 1.– Difratomia de Raios-X do azulejo de reposição brasileiro (fornecida por Furnas).	283
Tabela AD. 2 – Dados gerais da porosimetria por intrusão de mercúrio dos azulejos de reposição (fornecidos por Furnas).	284
Tabela AD. 3 – Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio da amostra BR-ARE-A1 do azulejo de reposição (fornecidos por Furnas).	284
Tabela AD. 4 – Resultados da distribuição dos tamanhos dos poros pelo volume de intrusão da amostra BR-ARE-A1 do azulejo de reposição (fornecidos por Furnas).	286

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
ACRA	Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSE	Elétrons retroespalhados
C	Coefficiente de capilaridade
C	Central
CI	Central inferior
CP	Corpo de Prova
CREF	Coefficiente de resistência à evolução da fendilhação
CS	Central superior
CSAF	Coefficiente de segurança à abertura da 1ª fenda
d. C.	Depois de Cristo
DRX	Difração de raios X
DTG	Termogravimetria Derivada
E	Módulo de elasticidade
EDS	Espectrômetro de Dispersão de Energia
Fr Max	Força máxima induzida por retração restringida
FURNAS	FURNAS Centrais Elétricas S.A .

G	Energia de rotura à tração
H	Intensidade de molhagem
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LAMMAR	Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução
LDC	Lateral direita central
LDI	Lateral direita inferior
LDS	Lateral direita superior
LEC	Lateral esquerda central
LEI	Lateral esquerda inferior
LES	Lateral esquerda superior
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
M	Atraso na molhagem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PPG GECON	Programa de Pós-Graduação Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil
PT	Portugal
PUC	Pontifícia Universidade Católica
Rt	Resistência à tração
Rc	Resistência à compressão
S	Período de umedecimentos

SE	Elétrons secundários
SI	Sem identificação
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TG	Termogravimetria
UFG	Universidade Federal de Goiás
SD	Espessura da camada de ar de difusão equivalente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	35
INTRODUÇÃO	35
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	35
1.2 OBJETIVOS	37
1.3 METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA	37
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	38
CAPÍTULO 2	40
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
2.1 REVESTIMENTOS CERÂMICOS HISTÓRICOS DE FACHADA	42
2.1.1 Breve histórico dos azulejos	42
2.1.2 A origem do uso de azulejos em fachada.....	45
2.1.3 Características da base dos revestimentos cerâmicos históricos luso-brasileiras	47
2.1.4 Revestimentos cerâmicos históricos: execução e camadas constituintes..	49
2.2 ARGAMASSAS HISTÓRICAS DE CAL	51
2.2.1 Histórico das argamassas antigas	51
2.2.2 Materiais pozolânicos das argamassas antigas.....	53
2.2.3 Constituição e proporcionamento das argamassas antigas.....	54
2.2.4 Características químicas, físicas e mecânicas das argamassas antigas .	55
2.3 CAL	56
2.3.1 Breve histórico da cal aérea	57
2.3.2 Produção da cal aérea e suas reações	58
2.3.3 Composição e características da cal aérea	62
2.4 METACAULIM	64

2.4.1	Processo de obtenção do metacaulim.....	65
2.4.2	Composição e características do metacaulim.....	66
2.4.3	Argamassas de cal aérea e metacaulim.....	67
2.5	ARGAMASSAS PARA REABILITAÇÃO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS	71
2.5.1	Requisitos gerais das argamassas de reabilitação.....	71
2.5.2	Requisitos das argamassas de reabilitação de assentamento de azulejos	75
CAPÍTULO 3.....		78
ANÁLISE DO REVESTIMENTO CERÂMICO HISTÓRICO DE FACHADA.....		78
3.1	AMOSTRAS	78
3.2	MÉTODOS	81
3.2.1	Caracterização visual das amostras	82
3.2.2	Caracterização dos azulejos históricos	83
3.2.2.1	Difração de raios X	84
3.2.2.2	Porosimetria por intrusão de mercúrio	85
3.2.2.3	Absorção de água total por fervura e absorção de água ao longo do tempo	87
3.2.3	Caracterização das argamassas históricas	88
3.2.3.1	Difração de raios X	89
3.2.3.2	Análise termogravimétrica	90
3.2.3.3	Análise petrográfica	90
3.2.3.4	Reconstituição de traço	91
3.2.3.5	Absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e absorção total por imersão	93
3.2.3.6	Carbonatação	95
3.2.4	Estudo da interface	96
3.2.4.1	Determinação da área de aderência de argamassa no tardo do azulejo	96
3.2.4.2	Avaliação da extensão de aderência na lupa estereoscópia.....	97

3.2.4.3	Determinação da resistência de aderência à tração	100
3.2.4.4	Avaliação da microestrutura no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	102
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
3.3.1	Caracterização visual das amostras	104
3.3.2	Caracterização dos azulejos históricos	106
3.3.2.1	Difração de raios X	106
3.3.2.2	Porosimetria por intrusão de mercúrio	108
3.3.2.3	Absorção de água total por fervura e absorção de água ao longo do tempo	110
3.3.3	Caracterização das argamassas históricas	111
3.3.3.1	Difração de raios X	112
3.3.3.2	Análise termogravimétrica	113
3.3.3.3	Análise petrográfica	115
3.3.3.4	Reconstituição de traço	119
3.3.3.5	Absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e absorção total por imersão	120
3.3.3.6	Profundidade carbonatada	121
3.3.4	Estudo da interface	121
3.3.4.1	Área de aderência de argamassa no tardo do azulejo	121
3.3.4.2	Extensão de aderência	123
3.3.4.3	Resistência de aderência à tração	126
3.3.4.4	Microestrutura das argamassas históricas	127
CAPÍTULO 4.....		135
ANÁLISE DO REVESTIMENTO CERÂMICO APLICADO EM LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO		135
4.1	PANORAMA GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	135
4.1.1	Variável estudada	135
4.1.2	Condições fixas	136

4.1.2.1	Materiais.....	136
4.1.2.2	Teor de água da argamassa.....	136
4.1.2.3	Mistura da argamassa	136
4.1.2.4	Espessura das camadas de argamassa	136
4.1.2.5	Cura dos corpos-de-prova	136
4.1.2.6	Determinação da resistência de aderência.....	137
4.1.2.7	Resistência de aderência potencial	137
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	137
4.2.1	Azulejos empregados.....	138
4.2.2	Argamassas empregadas	139
4.2.2.1	Proporcionamento e materiais constituintes	139
4.2.2.2	Caracterização das matérias-primas das argamassas novas	140
4.2.2.3	Caracterização das argamassas novas no estado plástico.....	143
4.2.2.4	Caracterização das argamassas novas no estado endurecido	145
4.2.3	Preparação dos corpos de prova para o ensaio de aderência	151
4.2.3.1	Preparação dos blocos cerâmicos.....	152
4.2.3.2	Preparação das placas cerâmicas.....	152
4.2.3.3	Preparação da mistura da argamassa	153
4.2.3.4	Moldagem da camada de argamassa de regularização.....	154
4.2.3.5	Assentamento das placas cerâmicas.....	155
4.2.3.6	Transferência do revestimento cerâmico para o substrato-padrão.....	158
4.2.4	Estudo da interface	158
4.2.4.1	Determinação da resistência de aderência à tração	158
4.2.4.2	Avaliação da microestrutura no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	159
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	159
4.3.1.	Caracterização dos azulejos de reposição	159
4.3.1.1	Difração de raios X.....	160

4.3.1.2	Porosimetria por intrusão de mercúrio	160
4.3.1.3	Absorção de água total por fervura e ao longo do tempo.....	162
4.3.2.	Caracterização das argamassas novas no estado plástico	163
4.3.3.	Caracterização das argamassas novas no estado endurecido.....	164
4.3.3.1.	Resistência à tração na flexão e à compressão.....	164
4.3.3.2.	Retração linear por secagem.....	166
4.3.3.3.	Densidade de massa aparente	169
4.3.3.4.	Módulo de elasticidade	170
4.3.3.5.	Absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e absorção total por imersão	171
4.3.3.6.	Profundidade carbonatada	174
4.3.3.7.	Compatibilização das argamassas no estado endurecido com os parâmetros de argamassas de reabilitação	174
4.3.4.	Estudo da interface	175
4.3.4.1.	Resistência de aderência à tração.....	176
4.3.4.2.	Estudo da microestrutura das argamassas.....	180
4.3.4.3.	Comparação entre o mecanismo de aderência do conjunto azulejo/argamassa novo e histórico	186
CAPÍTULO 5.....		189
CONSIDERAÇÕES FINAIS		189
5.1	CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS	189
5.2	CONCLUSÕES	189
5.2.1	Caracterização dos azulejos históricos e novos.....	190
5.2.2	Caracterização das argamassas de assentamento históricas e de reabilitação	190
5.2.3	Mecanismo de aderência dos revestimentos cerâmicos históricos e de reabilitação	191
5.3	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	192
REFERÊNCIAS		194
APÊNDICE A – FICHAS CATALOGRÁFICA DAS AMOSTRAS		201

APÊNDICE B – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS DAS ARGAMASSAS NOVAS	212
APÊNDICE C – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AZULEJOS HISTÓRICOS	215
APÊNDICE D – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS.....	219
APÊNDICE E – RESULTADOS DO ESTUDO DA INTERFACE DOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS HISTÓRICOS.....	220
APÊNDICE F – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AZULEJOS DE REPOSIÇÃO	225
APÊNDICE G – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS NOVAS NO ESTADO PLÁSTICO	227
APÊNDICE H – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS NOVAS NO ESTADO ENDURECIDO	229
APÊNDICE I – RESULTADOS DO ESTUDO DA INTERFACE DOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS NOVOS.....	246
ANEXO A – DADOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DAS ARGAMASSAS NOVAS	254
ANEXO B – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AZULEJOS HISTÓRICOS ..	255
ANEXO C – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS	275
ANEXO D – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AZULEJOS DE REPOSIÇÃO	283

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os revestimentos, em especial, os de fachada, tem um papel importante na durabilidade da edificação, uma vez que se constituem em uma camada protetora contra os agentes de agressões a qual as vedações verticais estão submetidas, tais como, os agentes climáticos e atmosféricos. Muito além da sua função de proteção, os revestimentos são utilizados também com fins estéticos, representando em muitos casos expressões riquíssimas da cultura de determinados povos.

Os revestimentos cerâmicos foram amplamente utilizados em fachadas de edifícios tanto no Brasil como em Portugal no final do século XIX e início do século XX. É um fato que a identidade cultural no campo da arquitetura desses países foi significativamente enriquecida por essa prática de ornamentação de fachadas com azulejos. A arte expressa nos azulejos históricos de fachada representa, em vários exemplares, os paradigmas estéticos registrados nas memoráveis composições florais e geométricas da arquitetura luso-brasileira.

Devido à relevância desses revestimentos cerâmicos históricos de fachada, é necessário que sejam estabelecidas medidas de manutenção e, quando necessário, de restauração com a finalidade de conservá-los e preservá-los, e, assim, prolongar a vida útil. Cabe destacar-se que, existem alguns princípios que devem reger as soluções para a preservação dessas edificações históricas que são: a compatibilidade, a reversibilidade e a intervenção mínima (LOURENÇO, 2009). Para o desenvolvimento de técnicas adequadas à manutenção e preservação dessas importantes edificações do patrimônio histórico é fundamental o conhecimento aprofundado de seus materiais e sistemas construtivos.

A aderência desses revestimentos cerâmicos aos substratos sobre os quais eles são aplicados é uma propriedade de íntima relação com a sua durabilidade e com o adequado desempenho que se espera deles. Abreu (2005) mostra que dentre as anomalias deste tipo de revestimento, o descolamento é considerado o mais grave delas, uma vez que quando a peça cerâmica descola da base, além de perder suas funções, ainda favorece a exposição

do revestimento de argamassa aos agentes de degradação externos. Vários motivos podem estar relacionados com a perda de aderência, tais como a baixa qualidade da argamassa de assentamento ou a expansão dimensional da placa cerâmica, gerada por diferenças térmicas, quando esta não é neutralizada pelo painel (OLIVEIRA, 2001).

Apesar desse tipo de manifestação patológica afetar gravemente a integridade de edifícios representativos do patrimônio histórico, existe uma carência de estudos sobre o mecanismo de aderência entre o azulejo e a argamassa de assentamento. Existem pesquisas brasileiras, como as de Carasek (1996), Scartezini (2002) e Carvalho Júnior (2005), sobre o mecanismo de aderência, entretanto, o objeto de estudo desses autores foi a análise de argamassas à base de cimento aplicadas sobre substratos porosos, tais como, alvenaria de blocos de concreto e cerâmicos. No caso de estudos com argamassas que contem apenas cal como aglomerante, sem cimento, não se dispõem de estudos com ênfase no mecanismo de aderência.

Para o entendimento do mecanismo de aderência entre a argamassa e um outro material é necessário estudar o que ocorre na superfície dos diferentes materiais (argamassa e material poroso) e na região de interface originada pela junção desses (PAES; GONÇALVES, 2005). No caso do revestimento cerâmico, portanto, é importante analisar tanto a superfície do azulejo quanto da argamassa de assentamento e a região de interface entre esses. Além da interface azulejo/argamassa, nos revestimentos cerâmicos interessa também a ligação entre a argamassa de assentamento e a base.

Diante desse panorama, o presente trabalho propõe-se a estudar e bem caracterizar os sistemas de revestimento cerâmico de fachada da região de Ovar, em Portugal, no final do século XIX e início do século XX, preocupando-se, particularmente, em analisar a interface argamassa/azulejo. A partir da compreensão e entendimento da aderência entre azulejo e argamassa de cal dos revestimentos históricos estudados, ao nível da ciência dos materiais, é possível reproduzir esse tipo de sistema nos dias de hoje, resguardando um tipo de aderência similar ao que ocorria nos séculos anteriores. Dessa forma, este estudo pode contribuir com análises para o desenvolvimento de soluções de restauração de fachadas históricas de azulejos. Apesar de não contemplar o estudo de amostras de revestimento cerâmico histórico de fachadas brasileiras, uma vez que não foi possível a obtenção no tempo destinado ao desenvolvimento desta pesquisa, acredita-se que as análises obtidas das amostras portuguesas servem de referência para os casos brasileiros, já que a influência azulejar, tanto dos materiais como no modo de construir, ao longo dos séculos foi presente em ambos os países.

Este trabalho faz parte do Projeto Azulejar, coordenado pela Universidade de Aveiro, em Portugal, e desenvolvido em parceria com várias instituições, dentre elas a Universidade Federal de Goiás (UFG). Dentro desse projeto são desenvolvidas diversas pesquisas referentes ao estudo do comportamento das fachadas de azulejos históricos, com enfoque tanto na caracterização dos materiais históricos (azulejo e argamassa) quanto no desenvolvimento de materiais compatíveis com o sistema de revestimento cerâmicos dessas fachadas. Dentro do grupo de pesquisa da UFG, foi contemplado, até o momento, o desenvolvimento de duas dissertações, esta e de Corrêa (2011), e de quatro trabalhos de iniciação científica (BORBA; CASCUDO, 2011; CARVALHO; CARASEK, 2011; DIAS; CARASEK, 2011; MALAGONI; CASCUDO, 2011).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é dar contribuições ao entendimento do mecanismo de aderência da placa cerâmica (azulejo) à argamassa essencialmente constituída de cal (sem emprego de cimento Portland) correntemente utilizada nos revestimentos históricos do século XIX. Nesse sentido, alguns objetivos específicos foram traçados:

- Comparar o mecanismo de aderência existente nos revestimentos históricos estudados com o gerado na ligação de uma argamassa de reabilitação de cal com metacaulim e azulejos, em idades iniciais após a aplicação;
- Propor traços de argamassas de reabilitação que apresentem características e propriedades semelhantes às das argamassas de assentamento de azulejos históricos; e
- Gerar parâmetros para futuras análises, como, por exemplo, para eventuais estudos envolvendo modelagem numérica, por meio de uma caracterização consistente dos azulejos e das argamassas de assentamento históricas, bem como da interface entre esses dois materiais.

1.3 METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA

A fim de alcançar os objetivos citados anteriormente, foi desenvolvida uma pesquisa experimental e de caráter exploratório contemplando o estudo tanto de amostras de revestimento cerâmico de fachada quanto de um revestimento composto pela ligação de argamassas de reabilitação (novas) à base de cal com metacaulim e azulejos. Para tanto, o programa experimental foi dividido em duas fases principais.

A primeira fase consiste na avaliação de amostras retiradas de fachadas de edificações históricas da cidade de Ovar, em Portugal, de azulejos assentados com argamassas de cal. Inicialmente, foi realizada a caracterização dos materiais que compõem as amostras dos revestimentos históricos (azulejo e argamassa de assentamento). Essa caracterização tem o objetivo de levantar dados para o estudo da interface entre o azulejo e argamassa à base de cal. Nesse estudo a presente pesquisa deve realizar seu principal objetivo: contribuir com a compreensão do mecanismo de aderência dos materiais em questão.

Já a segunda fase consiste na avaliação de revestimentos cerâmicos aplicados em laboratório visando contribuir com o desenvolvimento de argamassas de reabilitação para serem utilizadas na restauração de edificações históricas. No intuito de reproduzir o mecanismo de aderência existente nas amostras, foram moldados corpos-de-prova compostos por azulejo/argamassa de reabilitação. Nessa etapa, primeiramente, foi feita a caracterização dos materiais e das argamassas de reabilitação. Na fase final dessa etapa, foi estudada a interface entre a argamassa e o azulejo visando compará-la com a interface entre os azulejos e as argamassas históricas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação consta com cinco capítulos. Após a apresentação deste, segue o segundo capítulo, onde são discutidos alguns temas relativos tanto aos materiais como aos componentes do revestimento cerâmico histórico com base na literatura existente. Os aspectos levantados ofereceram subsídios para o desenvolvimento desta pesquisa.

O estudo experimental desenvolvido nesta pesquisa foi organizado em 2 capítulos, sendo o Capítulo 3 relativo a análise dos revestimentos cerâmicos históricos de fachada e o Capítulo 4 referente a análise do revestimento cerâmico aplicado em laboratório para avaliação de argamassas de reabilitação. Em cada um desses capítulos é abordado tanto o detalhamento da metodologia como a apresentação e discussão de resultados.

No terceiro capítulo, primeiramente, é delineado e caracterizado o grupo de amostras históricas analisadas. Em seguida, são descritas as avaliações relativas aos azulejos, às argamassas e ao estudo da interface do conjunto azulejo/argamassa histórico. Por último, são apresentados e discutidos os resultados relativos a cada uma dessas avaliações.

Inicialmente no Capítulo 4 são expostas a variável e as condições fixas estabelecidas para a realização da parte experimental. Depois são apresentadas as características das matérias-primas utilizadas na produção dos corpos-de-prova, bem como as composições das

argamassas avaliadas. Na sequência são descritas os ensaios e avaliações realizadas tanto de caracterização dos azulejos e das argamassas quanto da interface do conjunto azulejo/argamassa de reabilitação. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados alcançados, sempre buscando relacioná-los com parâmetros de resultados históricos. No final deste capítulo é feita uma comparação entre o mecanismo de aderência do revestimento cerâmico histórico com o obtido pela ligação entre azulejo e argamassa de reabilitação produzidos em laboratório.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas na pesquisa e sugestões para a realização de futuros trabalhos sobre o tema.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo inicialmente será realizada uma abordagem geral dos revestimentos cerâmicos antigos, visando entender como esses se configuravam, principalmente durante o século XIX. Na seqüência serão expostos alguns aspectos sobre as argamassas históricas de cal, tais como o seu histórico, os seus constituintes, assim como o proporcionamento desses na formulação de argamassas. Posteriormente, serão enfocados alguns aspectos sobre a cal, tais como o histórico e sua composição química. Após abordagem sobre a cal, será explanado sobre o metacaulim, onde será exposto tanto as características do material quanto as reações deste com a cal aérea na produção de argamassas. Por fim, serão apresentados os requisitos das argamassas de reabilitação de edificações históricas tendo como enfoque as argamassas de assentamento de azulejos de fachada.

O histórico dos diversos materiais estudados é abordado em várias subseções da revisão bibliográfica. Visando ter um panorama geral desses materiais ao longo do tempo, foi elaborada uma linha do tempo contemplando as principais datas referentes aos primeiros registros do seu uso em construção civil e do início da fabricação de cada um dos materiais ligados a revestimentos cerâmicos. Essa linha do tempo está apresentada a seguir na Figura 2. 1.

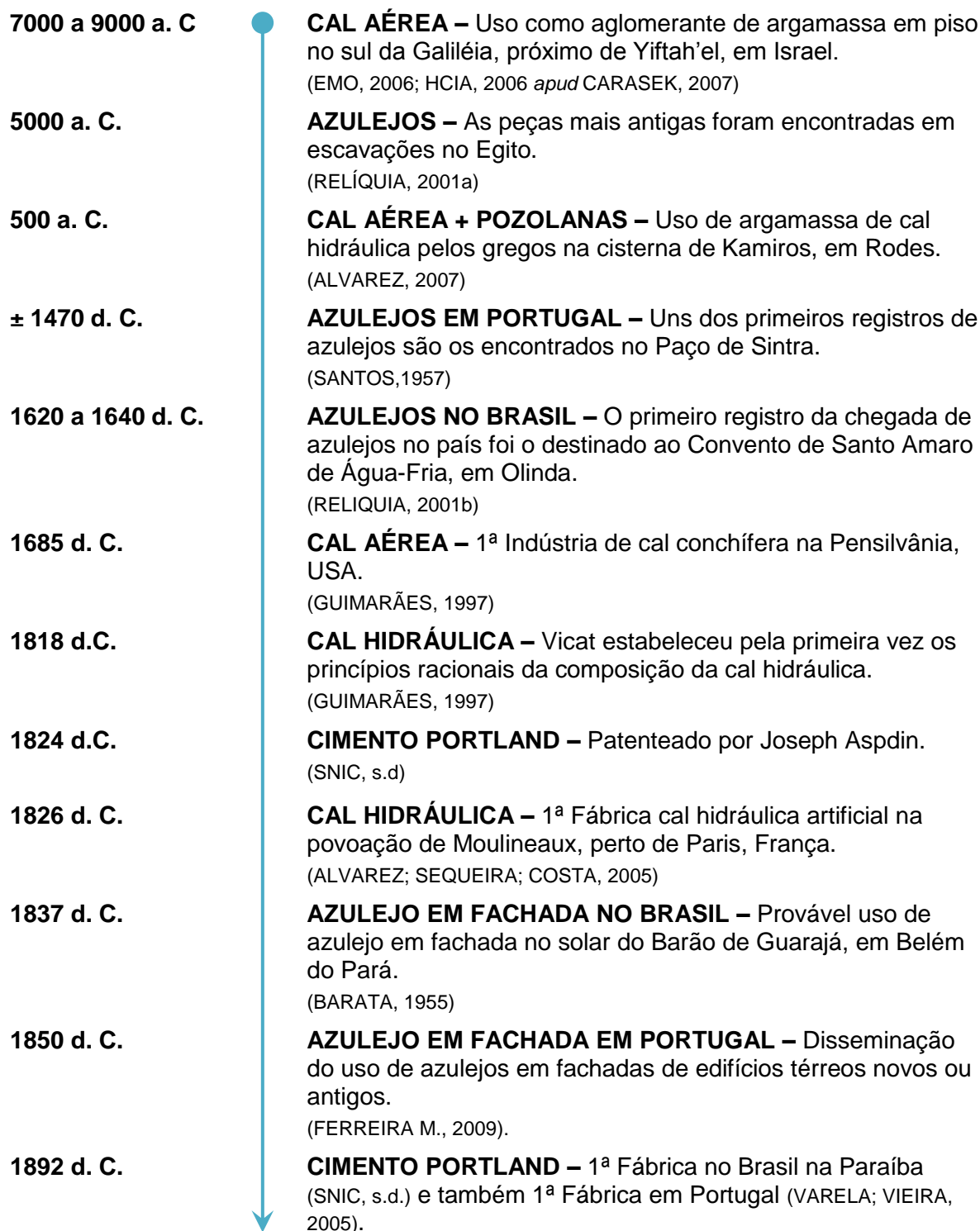


Figura 2. 1 – Linha do tempo dos diversos materiais estudados.

2.1 REVESTIMENTOS CERÂMICOS HISTÓRICOS DE FACHADA

O revestimento é um conjunto de camadas que recobre as vedações e a estrutura de um edifício com as funções de protegê-las contra a ação de agentes de degradação; complementar as funções de vedação e se constituir no acabamento final exercendo funções estéticas, de valorização econômica e outras relacionadas com o uso do edifício. O revestimento cerâmico, segundo a NBR 13816 (ABNT, 1997a, p. 1), é um “conjunto formado pelas placas cerâmicas, pela argamassa de assentamento e pelo rejunte”. Esse revestimento pode ser utilizado tanto em piso como em paredes.

A presente pesquisa tem enfoque nos revestimentos cerâmicos destinados ao uso em fachadas de edificações históricas portuguesas do século XIX. Visando a compreensão desse revestimento cerâmico é necessário entender inicialmente o contexto histórico da sua aplicação, compreender os seus principais componentes (placa cerâmica, rejunte e argamassa de assentamento), o processo de execução deste revestimento, assim como também o conjunto como um todo que compõem as paredes antigas.

2.1.1 Breve histórico dos azulejos

A história da cerâmica vitrificada inicia-se no antigo Egito, se espalhando posteriormente para a Mesopotâmia e Oriente Próximo, e, só depois da expansão islâmica, foi introduzida na Europa (LETIZIA; RUFFINELLI, 2009).

As peças mais antigas de azulejos datam de 5000 a. C. e foram encontradas em escavações no Egito (RELÍQUIA, 2001a). Na antiguidade já eram utilizados azulejos¹ ou algo similar a este em revestimento de paredes. Como mostra Morais (1988, p.126), arqueólogos identificaram paredes revestidas com “baixos-relevos, pintura e tijolos coloridos vidrados” em edificações egípcias e mesopotâmicas. O autor ainda mostra que também era tradição dos assírios e neobabilônicos também revestirem “as paredes de seus palácios e templos com placas de barro colorido e esmaltado”.

O azulejo passa a ser utilizado na península Ibérica em Andalúzia e produzido em Sevilha, Valência, Málaga e Toledo entre o século XIII e XIV. A história do azulejo em Portugal inicia-se no século XV. Santos (1957, p.27), ao tratar sobre os azulejos do Paço de Sintra, delimita

¹ “Segundo a maioria das definições, a palavra azulejo, originada do árabe, significa uma placa pintada e vidrada “A palavra azulejo deriva do árabe *az-zullaiju*, que significa pedra lisa ou polida. Alguns etimologistas vinculam o vocábulo azulejo ao persa *lazaward* ou *lâpis-lazuli* ou, ainda, a *zallaja*, que quer dizer liso ou escorregadio” (MORAIS, 1988, p. 126).

o período dos primeiros azulejos utilizados nessa edificação, ao citar a existência de um documento publicado pelo Dr. José Saraiva, “que o rei encomendara um retábulo² do Espírito Santo a Nuno Gonçalvez pouco antes de 1470”. No final do século XV, em 1498, o rei D. Manuel I, entra em contato diretamente com a azulejaria de Sevilha e a azulejaria provinda dessa região é usada amplamente até início do XVI (MUSEU NACIONAL DO AZULEJO, 2010). Somente no século XVI Portugal inicia sua produção de azulejo, que no século seguinte passa a ser intensa. Durante o século XVIII, Portugal passa por um momento de crise econômica e Lisboa, após ser afetada por um terremoto, e tenta se reconstruir (MUSEU NACIONAL DO AZULEJO, 2010).

No início do século XIX alguns acontecimentos provocaram uma grave crise econômica e política que afetaram a produção dos azulejos no país, a saber, as invasões francesas, a independência do Brasil e a guerra civil entre absolutistas e liberais (1832 – 1834). A recuperação dessa crise iniciou-se em 1840 quando surgiram as fábricas de produção de azulejo (ALMASQUÉ; VELOSO, 2010). Além de serem produzidos em série, os azulejos passam a ser utilizados em fachadas como pode ser observado na Figura 2. 2. As fachadas principalmente do Norte, tais como Porto, Ovar, Aveiro, e, posteriormente, as do Sul foram cobertas com os azulejos semi-industriais³ produzidos nas fábricas portuguesas (ALMASQUÉ; VELOSO, 2010).

²Retábulo é uma construção de madeira, de mármore, ou de outro material, com lavores, que fica por trás e/ou acima do altar e que, normalmente, encerra um ou mais painéis pintados ou em baixo-relevo.

³Azulejo semi-industrial: “Azulejo de padrão produzido no século XIX em que a decoração era feita usando técnicas semi-industrializadas nomeadamente a estampilha ou a estampagem” (ALMASQUÉ; VELOSO, 2010, s. p.).

“A técnica da estampilha consistia na aplicação sobre o azulejo, já coberto pelo vidrado branco, de uma estampilha ou ‘escantilhão em papel encerado’ com os recortes correspondentes aos desenhos, sobre o qual se passava, então, uma trincha com a cor respectiva” (FERREIRA M., 2009, p. 26).

“A técnica da estampagem (ou decalcomania), de inspiração inglesa, era executada através da prensagem mecânica de uma estampa de papel numa das faces do azulejo, sobre o qual era aplicada uma camada de vidrado transparente, através do qual se vê a estampa colocada (FERREIRA M., 2009, p. 26).



Figura 2. 2 – Fachada revestida de azulejos em Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).

O uso de azulejos no Brasil deve-se a influência portuguesa no país, sendo que a maioria dos azulejos utilizados durante o período colonial e imperial era importada de Portugal. O primeiro registro de uso de azulejos no país foi aproximadamente entre as décadas 1620 a 1640, período referente à chegada de placas cerâmicas vidradas de Portugal destinadas ao Convento de Santo Amaro de Água-Fria, do Engenho Fragoso, em Olinda (RELIQUIA, 2001b). Segundo Alcântara (2001), o uso de tal revestimento está geralmente associado às regiões que se destacavam economicamente na época. Assim, como mostra a autora (2001, p. 3), “os azulejos mais antigos que possuímos em quantidade significativa são do século XVII e estão concentrados na região Nordeste, devido à economia açucareira, à agroindústria, aos engenhos, à riqueza”.

No início do século XIX, em 1822, o Brasil conquista sua independência e somente a partir da década de 1840 volta a importar os azulejos portugueses. Apesar de Portugal ser seu principal fornecedor, outros países como Espanha, Holanda, França e, posteriormente, a Inglaterra, Bélgica e Alemanha tornaram-se também exportadores de azulejos para os brasileiros. O azulejo produzido nesse período é o semi-industrial, que foi utilizado principalmente como revestimento de acabamento de fachadas (ALCÂNTARA, 2001), como pode ser visto na Figura 2. 3. Segundo Barata (1955, p. 39), esse azulejo se caracteriza pela policromia ou uso do azul e branco, pela composição geométrica ou floral estilizada. Somente no final do século XIX inicia-se vagarosamente a produção brasileira de azulejos (ALCÂNTARA, 2001).



Figura 2. 3 – Fachada revestida de azulejos em São Luiz do Maranhão, Brasil (CERAMICANORIO, 2010).

2.1.2 A origem do uso de azulejos em fachada

Existem divergências entre os autores sobre a origem da aplicação de azulejos em frontispícios. Barata (1955) defende serem os construtores portugueses os disseminadores do uso de azulejos em fachada. Já Simões (1965, p. 35), historiador português, afirma serem os construtores brasileiros os precursores e os difusores dessa técnica, sendo que o uso de azulejos em paredes externas em Portugal era esporádico como transcrito a seguir.

Na verdade foram os construtores brasileiros quem, pela primeira vez, recorreu ao azulejo para revestimento e proteção das fachadas de templos e sobrados. Tais aplicações não foram utilizadas em Portugal a não ser, esporadicamente, em muros e paredes exteriores de jardins e pátios, sempre com uma manifesta intenção decorativa e voltados discretamente para os interiores.

Simões (1965) ressalta que os construtores brasileiros desde o século XVIII já reconheciam no uso de azulejo uma forma de valorizar esteticamente as fachadas e, principalmente, de conservar e impermeabilizar a edificação contra as ações do clima úmido e quente, típicas do país. Segundo o autor antes da independência do Brasil, em 1822, esse tipo de aplicação de azulejo já era presente no país. Eram utilizados nesta época azulejos brancos para revestirem edifícios religiosos (FERREIRA M., 2009).

Barata (1955) afirma ser possível o uso de azulejo em fachada no Brasil já em 1837, no solar do Barão de Guarajá, em Belém no estado do Pará. Segundo o autor (1955, p. 225), “caso não seja posterior à construção – coisa improvável – o seu azulejamento português será desse período”. Cavalcanti e Cruz (2002⁴ *apud* FERREIRA M., 2009) vão ao encontro à

⁴ CAVALCANTI, S. T. H.; CRUZ, A. M. E. **O azulejo na arquitetura civil de Pernambuco, século XIX**. Editora Metalivros, 2002, p. 26.

hipótese de Barata (1955) ao afirmar que o primeiro registro de carregamentos de azulejos de padrão⁵ originados de Lisboa em Pernambuco é datado de 1837, o que poderia confirmar o uso de azulejos de fachada naquela década.

Diferentemente do Brasil, onde ainda na primeira metade do século XIX os azulejos de fachadas eram propagados na sua cultura, em Portugal, como mostra Ferreira M. (2009, p. 20), a disseminação do uso de azulejos em fachadas de edifícios térreos novos ou antigos em várias regiões de Portugal ocorreu “entre a segunda metade do século XIX e os princípios do século XX”. Vários fatores podem ter contribuído para a intensificação do uso desse revestimento em frontispícios, como os apresentados por Alcântara (1974, p. 113) a seguir.

Na península Ibérica, a utilização de azulejos sempre foi interpretada como sinal de progresso material. A rápida difusão do azulejamento de fachadas, na segunda metade dos oitocentos, expressaria não só uma significativa ampliação do parque industrial e do mercado consumidor, mas, também, uma tentativa de ‘enobrecer’ as propriedades (casas e armazéns) das camadas da pequena e média burguesia urbana, que ascendiam econômica e socialmente e que, dessa forma, procuravam exibir seu novo ‘status’.

Assim como Alcântara (1974), Ferreira M. (2009) destaca o crescimento da burguesia urbana como um das mais prováveis motivos da intensificação do uso de azulejos em fachada. As relações comerciais com o mercado brasileiro teriam levado a emigração para este país e, por conseguinte, ao retornarem a Portugal, trariam a tendência do uso de azulejos de fachadas. O aumento do mercado consumidor, por sua vez, colaborou para o crescimento de fábricas, em especial, “das regiões do Porto e de Vila Nova de Gaia, de onde saiu uma grande variedade de azulejos-padrão e de ornamentos cerâmicos para as fachadas de edifícios, na sua grande maioria, urbanos” (FERREIRA M., 2009, p. 20).

Simões (1965, p. 36) enfatiza a importância dos brasileiros nesse período para o desenvolvimento industrial e para a disseminação da aplicação de azulejos em fachadas em Portugal:

São comerciantes e capitalistas brasileiros quem fomentam muitas das indústrias de Portugal, particularmente as que se desenvolvem depois de 1850 no norte do País, zona que mantém o ritmo migratório com o Brasil. São ainda os “brasileiros”

⁵ Azulejo de padrão: “Composição ornamental formada pela repetição regular de um ou mais azulejos. Consoante o número de elementos necessários para formar o padrão, este pode ser classificado em 2x2,4x4, até 12x12. Os azulejos de tapete do século XVII e os azulejos semi-industriais de fachada produzidos no século XIX são azulejos de padrão” (ALMASQUÉ, VELOSO, 2010).

regressados a Portugal ou que aqui empregam seus cabedais em investimentos imobiliários quem traz a moda da fachada azulejada característica específica da chamada “casa de brasileiro”.

Ferreira M. (2009) mostra que esse período de intensificação de uso de azulejo em fachada em Ovar coincide com a forte emigração dos seus cidadãos para terras brasileiras. Diante dessa coincidência, a autora se propôs a investigar a relação entre a emigração oitocentista portuguesa na cidade de Ovar para o Brasil com a intensificação do uso de azulejos em fachada naquela cidade. A investigadora comprovou a existência de uma intensa emigração de cidadãos ovarenses para algumas regiões brasileiras como Pará, Manaus, Rio de Janeiro, regiões que se destacam pela aplicação de azulejo em fachada. Entretanto, segundo a autora, isso não é suficiente para comprovar a influência brasileira no uso de azulejos em fachada em Ovar, sendo necessária uma pesquisa mais aprofundada, a partir de entrevistas e levantamentos documentais na região, visando um melhor esclarecimento da questão.

Independente da comprovação da origem brasileira ou portuguesa do uso de azulejos em fachada, é notória a influência azulejar entre Portugal e Brasil, em especial, nesse período, de modo que esse tipo de revestimento de fachada tornou-se representativo na cultura de ambos os países.

2.1.3 Características da base dos revestimentos cerâmicos históricos luso-brasileiras

As paredes antigas são comumente definidas como as construídas anteriormente ao advento do concreto armado, no século XX. Essas paredes se caracterizavam pelo uso de materiais mais porosos e deformáveis do que os utilizados nos dias de hoje e desempenhavam sua função resistente e de proteção através da sua espessura. Os materiais utilizados na produção dessas paredes eram os disponíveis na sua época e região. Além dessas diferenças regionais e temporais, os materiais empregados variavam também em relação ao tipo de edificação e o uso a qual se destinavam (VEIGA, 2008).

No Brasil durante o período colonial e imperial foram empregados vários sistemas construtivos de paredes nas edificações. Segundo Reis Filho (1970), nas edificações mais simples as paredes eram de pau-a-pique, adobe ou taipa de pilão, já nas edificações mais importantes eram utilizados principalmente a pedra e o barro, sendo raro o uso de tijolos ou pedra em conjunto com a cal. No final do século XIX, com a industrialização da produção

dos tijolos, esses se tornaram o principal componente das alvenarias portantes (RIBEIRO, 2006).

As paredes antigas de Portugal eram construídas predominantemente de alvenaria simples de pedra, devido à predominância desse material no país. Nos locais onde havia escassez de pedra era utilizado outros sistemas construtivos tais como o adobe e a taipa. As argamassas de assentamento eram constituídas por terra com certo teor de argila, barro ou mistura de areia e cal, de acordo com a disponibilidade do material na região. Posteriormente, assim como no Brasil, a alvenaria de tijolos cerâmicos tornou-se o principal material de construção de paredes (TOMAR, s.d.). Foram utilizados vários tipos de revestimentos de acabamento portugueses tais como a pintura de cal, os fingidos⁶, os grafitos⁷, os esgrafitos⁸, os baixo-relevos e os alto-relevos (estuques) (VEIGA *et al.*, 2004). O uso do azulejo tem um lugar de destaque nas artes decorativas portuguesas a partir do século XVI e se mantém até os dias atuais (INSTITUTO CAMÕES; MUSEU NACIONAL DO AZULEJO, 2000-2005; ALMASQUÉ; VELOSO, 2010). A seguir na Figura 2. 4 está ilustrado um tipo de parede e revestimento de assentamento de azulejos de fachada presente na cidade de Ovar, em Portugal.



Figura 2. 4 – Exemplo de parede e revestimento cerâmico de fachada empregados em edificações na cidade de Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).

⁶Fingidos: simulação de materiais mais ricos, como a pedra ou a madeira, através da pintura (VEIGA *et al.*, 2004).

⁷Grafitos: inscrições decorativas realizadas através de incisão nos revestimentos de cal, utilizando punções ou outros instrumentos (VEIGA *et al.*, 2004).

⁸Esgrafitos: decorações realizadas através da remoção de partes de uma ou mais camadas de revestimentos previamente realizadas com pasta de cal e agregados finos sobre rebocos, geralmente de diferentes cores e em jogo de claro e escuro (VEIGA *et al.*, 2004).

2.1.4 Revestimentos cerâmicos históricos: execução e camadas constituintes

A descrição tanto das camadas constituintes como do método de execução dos revestimentos cerâmicos históricos de fachada é pouco abordada na literatura. Não foram encontradas informações específicas do revestimento cerâmico de fachada, em Portugal, entre o final do século XIX e início do século XX, objeto de estudo desta pesquisa. Vale destacar-se que Ferreira M. (2009) também teve dificuldades em levantar informações, sejam elas orais ou documentais, sobre as técnicas tradicionais utilizadas tanto na preparação como na aplicação da argamassa de assentamento de azulejos do município de Ovar referente ao mesmo período.

Veiga e Tavares (2002) fazem uma descrição dos revestimentos de argamassa das paredes antigas, no entanto, sem o uso de placa cerâmica como camada de acabamento. Segundo as autoras, os revestimentos das paredes antigas eram geralmente constituídos pelas camadas de regularização e proteção, que eram constituídas pelo emboço, reboco e esboço; e as camadas de proteção, acabamento e decoração, que eram constituídas geralmente pelo barramento (massas finas de cal e pó de pedra), pintura e ornamentação. As camadas de regularização e proteção eram constituídas geralmente por argamassas de cal e areia, com adições minerais e orgânicas (VEIGA; TAVARES, 2002). A espessura formada pelo conjunto das três camadas (emboço, reboco e esboço) tinha entre 15 mm e 30 mm, sendo comuns espessuras superiores a essas devido à irregularidade da base (VEIGA, 2006). Cada uma dessas camadas era composta por várias subcamadas, as quais possuíam granulometria decrescente das camadas internas para as externas. Nesse sentido, a porosidade e deformabilidade cresciam em direção das camadas externas (VEIGA; TAVARES, 2002).

Em relação ao revestimento cerâmico histórico, Durbin (2005) faz uma descrição das características desse revestimento e do método de assentamento de azulejos na região da Grã-Bretanha no período entre o século XVII ao XIX, a qual está descrita a seguir.

Entre os séculos XVII e XVIII, era utilizado apenas um tipo de argamassa constituinte do revestimento cerâmico. O azulejo era assentado com uma argamassa de cal ou gesso de 1 cm a 2 cm de espessura aplicada em tijolo ou pedra. O azulejo possuía espessura de 6 mm a 7 mm e era caracterizado por ser altamente poroso e leve. O teor de areia dessas argamassas era muito baixo e que as mesmas tinham uma propensão para a retração e a fissuração, sendo freqüente a identificação de partes frágeis e com falhas (DURBIN, 2005).

O método de assentamento dos azulejos nesse período era sofisticado e seguia as seguintes etapas: umidificação da base, aplicação da argamassa de cal em uma espessura de cerca de 15 mm e, por fim, a peça cerâmica seca era empurrada sobre massa de reboco ainda molhada. Quando o revestimento cerâmico era aplicado em pisos, o rejunte era obtido ao pressionar o azulejo durante o seu processo de assentamento. O rejunte não possuía espessuras regulares exigindo maior cautela na locação das peças cerâmicas (DURBIN, 2005).

Em meados do século XIX (1840), os azulejos passaram a ser produzidos em série. As peças cerâmicas produzidas sofriam algumas variações dependendo do fabricante, o que afetava fortemente a qualidade e a precisão destas. Os fabricantes publicavam recomendações sobre o método de fixação de seus azulejos, entretanto essas informações eram vagas, aumentando a probabilidade de erros na execução do revestimento. Nesse período houve o crescimento da fabricação de tijolos e, em 1845, começou a ser produzido o cimento Portland, cuja consolidação no mercado ocorreu a partir de 1880. Antes de 1860 era comum para a fixação e rejuntamento dos azulejos tanto o uso de argamassa de cal como de cimento, entretanto a partir de 1870 torna-se predominante o uso de argamassa de cimento para tal fim (DURBIN, 2005).

O método predominante de fixação de azulejos no período entre 1870 e 1950 era composto por três fases principais. A primeira fase consistia na aplicação da pasta de cimento sobre o substrato. Posteriormente, numa segunda fase, é feita a aplicação de uma camada de argamassa de aproximadamente 2,5 cm de espessura composta por uma parte de cimento para duas partes de areia, que eram misturadas até obter uma consistência firme. A essa argamassa podia ser adicionada até 10% de cal. A terceira fase é a aplicação da mesma argamassa para fixação do azulejo que também era utilizada para o rejunte (DURBIN, 2005).

Vale ressaltar que Durbin (2005) descreve a execução do revestimento cerâmico de uma região específica, cujo contexto se caracterizava, dentre outros, pela consolidação do mercado do cimento já em 1860. No caso do Brasil, por exemplo, a primeira fábrica de cimento, como mostra SNIC (s.d.), foi inaugurada em 1892, localizada na Paraíba, entretanto a consolidação da fase industrial do cimento propriamente dita no país ocorreu no período da Primeira Guerra Mundial, no século XX. Em Portugal, a primeira fábrica consolidada de cimento Portland, denominada “Tejo”, também surgiu em 1892 localizada em Alhandra (VARELA; VIEIRA, 2005). O crescimento desse setor industrial no país ocorre nas primeiras décadas do século XX, período onde são instaladas novas indústrias cada vez mais modernas (POMBO, 1996). Devido ao desenvolvimento tardio da fabricação deste

produto nesses países, pode-se deduzir que uso do cimento nas argamassas de assentamento de placas cerâmicas se desenvolveu tardiamente em relação à Grã-Bretanha descrita por Durbin (2005). Em Portugal, por exemplo, essa transição deve ter ocorrido somente por volta de 1950.

2.2 ARGAMASSAS HISTÓRICAS DE CAL

Argamassas históricas são comumente definidas como sendo as anteriores ao advento do cimento Portland, em 1824. Anteriormente ao uso desse ligante era utilizada a cal como aglomerante predominante na produção de argamassas.

2.2.1 Histórico das argamassas antigas

De acordo com Carasek (2007), os primeiros registros de emprego de argamassa como material de construção são da pré-história, há cerca de 11.000 anos. No sul da Galiléia, próximo de Yiftah'el, em Israel, foi descoberto em 1985, quando de uma escavação para abrir uma rua, o que hoje é considerado o registro mais antigo de emprego de argamassa pela humanidade: um piso polido de 180 m², feito com pedras e uma argamassa de cal e areia, o qual se estima ter sido produzido entre 7.000 a. C. e 9.000 a. C. (*European Mortar Industry Organization*⁹ – EMO, 2006; *Hellenic Cement Industry Association*¹⁰ – HCIA, 2006 *apud* CARASEK, 2007). O segundo registro mais antigo é de 5.600 a. C., em uma laje de 25 cm de espessura, também executada com argamassa de cal, no pátio da Vila de Lepenske-Vir, hoje Iugoslávia (VENUAT *apud* GUIMARÃES, 1997). Já a cal aérea como aglomerante de argamassa aplicada sobre superfícies de paredes foi encontrada no palácio de Knossos por volta de 1700 a. C. (TORRACA, 2009). A partir daí existem vários registros do emprego de argamassas de cal e gesso pelos egípcios, gregos, etruscos e romanos.

Tempos depois, ainda na antiguidade, se utilizavam pozolanas juntamente com a cal aérea nas argamassas, o que lhes conferiam um endurecimento mais rápido e uma resistência maior.

Alvarez (2007) destaca a habilidade dos gregos em utilizar argamassas de cal e pozolanas em construções que exigiam resistência hidráulica como aquedutos, cisternas e portos. Um

⁹EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANIZATION – EMO. **History**. Disponível em: <<http://www.euomortar.com>>. Acesso em: 13 nov. 2006.

¹⁰HELLENIC CEMENT INDUSTRY ASSOCIATION – HCIA. **History of cement and concrete**. Grécia, 2006. Disponível em: <<http://www.hcia.gr>>. Acesso em: 29 jan. 2007.

exemplo do uso de argamassa de cal hidráulica pelos gregos é a cisterna de Kamiros, em Rodes, na Grécia, construída em 500 a. C., com capacidade de 60 m³. Amostras de argamassas dessa cisterna mostram o uso de agregados silicosos e calcários de curvas granulométricas diferentes, além da cal e de terras vulcânicas (ALVAREZ, 2007).

O uso de pozolanas naturais pelos romanos data de cerca de 300 a. C. que coincide com o uso de argamassas de cal para fins estruturais em Roma (TORRACA, 2009). O uso de argamassas com pozolanas permitiram construções de porte e vão maiores como pode ser observado no trecho a seguir:

As argamassas com pozolanas permitiram construções de outro porte, dada a introdução na arquitetura romana das abóbadas e dos arcos abobadados, feitos com a ajuda de moldes de madeira. Os espaços interiores dos edifícios aumentaram grandemente, assistindo-se à construção de edifícios públicos de grande dimensão, tais como aquedutos, arcos triunfais pontes, basílicas, banhos públicos, teatros, mercados, templos e palácios (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005, p.4).

A cal aérea passou a ser utilizada em menor proporção nas argamassas quando houve a decadência do Império Romano, já que esse aglomerante era o material mais caro. Desta forma, passaram a ser produzidas argamassas de pior qualidade contendo mais argila e areia e menos cal. Tal situação se estendeu até a Idade Média (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Durante a Idade Média destacou-se a invasão dos árabes na Europa. Os árabes no século VIII d. C. trouxeram para a região novidades na tecnologia da argamassa e disseminaram o uso e a tecnologia do gesso na Europa. O gesso, o qual era obtido no Norte da África, passou a ser utilizado na argamassa às vezes misturado com um tipo de cola, obtendo um resultado similar ao estuque (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Já durante a Idade Moderna, em especial no século XVII, em algumas regiões como da Alemanha, Holanda e, posteriormente a Grã-Bretanha, houve o desenvolvimento de argamassas com o uso de turfa, um tipo de pozolana, extraída da Renânia, na Alemanha. Tal produto, também conhecido por *Trass* ou *Tarra*, foi utilizado em argamassas para construções portuárias e na consolidação de diques. A turfa foi considerada as novas pozolanas daquele período (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

A partir da metade do século XVIII foram realizados vários estudos de aglomerantes que pudessem endurecer em contato com a água e tivessem cada vez mais resistência. Em 1756, Smeaton iniciou sua pesquisa sobre as causas do endurecimento da argamassa hidráulica daquele período, ainda constituídas por cal e pozolana (ALVAREZ; SEQUEIRA;

COSTA, 2005). Em 1776, observou que quando calcinava alguns calcários impuros do condado de Clamorghan obtinham compostos com propriedades hidráulicas (GUIMARÃES, 1997; NEWMAN; CHOO, 2003; ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005). Em 1791, John Smeaton publicou os resultados de suas experiências (GUIMARÃES, 1997).

Pouco tempo depois, em 1812, Collet-Descotils, professor francês da *École des Mines*, de Paris, conclui que durante o processo de calcinação dos calcários silicosos ocorre a dissolução da sílica e a sua combinação com a cal, tal produto obtido conferia-lhe propriedades hidráulicas (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Segundo Guimarães, entre 1806 e 1818, Vitalis e Vicat estabeleceram pela primeira vez os princípios racionais da composição da cal hidráulica, concluindo que a presença de silicatos e aluminatos eram os responsáveis pelas propriedades hidráulicas de tais cales. Além disso, como mostra Ashurst (1997), Vicat introduziu o termo “cal hidráulica”, que anteriormente era denominada de “cal aquática” por Smeaton e outros, e classificou as cales de acordo com a sua hidraulicidade. Após o desenvolvimento dos princípios racionais da cal hidráulica, em 1826, na França surge a primeira fábrica de cal hidráulica artificial, onde era calcinada uma mistura composta de calcário e argila (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Paralelamente ao início da fabricação da cal hidráulica, Joseph Aspdin, em 1824, desenvolveu e patenteou o cimento Portland. O termo “Portland” deve-se à semelhança com as pedras da Ilha de Portland, localizada na Inglaterra (SNIC, s.d.). Aspdin descreveu seu processo de fabricação que ocorreria primeiramente pela mistura de cal com argila em forma de pasta, posteriormente pela calcinação dos pedaços secos do material em um forno vertical que, após a calcinação, eram moídos (NEWMAN; CHOO, 2003).

A partir da segunda metade do século XIX, o cimento foi produzido em escala comercial e passou a ser o aglomerante predominante nas argamassas até os dias atuais.

2.2.2 Materiais pozolânicos das argamassas antigas

A origem do termo pozolana deve-se ao solo do povoado de Pozzuoli, na Baía de Nápoles, na Itália, ser formado pelo depósito de cinzas vulcânicas provenientes da erupção do Vesúvio (MALHOTRA; MEHTA, 1996; ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; KANAN; 2008). Essas cinzas vulcânicas eram constituídas por partículas de pequena e média dimensão de material silicoso lançadas ao ar pela erupção do vulcão (TORRACA, 2009).

As cinzas vulcânicas integradas à composição das argamassas tiveram um papel decisivo no tempo das civilizações greco-romanas. Além das cinzas vulcânicas era utilizada a pedra

pome como pozolana de baixa densidade, pelos gregos, e o pó de tijolo como pozolana artificial, pelos romanos, em argamassas à base de cal. Segundo KANAN (2008), o uso de pó de tijolo se sustentou na Itália até o século XX, com o uso telhas cerâmicas trituradas misturada à cal em argamassas.

2.2.3 Constituição e proporcionamento das argamassas antigas

Alvarez, Sequeira e Costa (2005) mostram que a partir do *Tratado de Vitruvius* pode-se estabelecer a constituição das argamassas utilizadas nas obras de grande porte romanas. Tais argamassas eram constituídas basicamente por cal apagada, areia vulcânica ativa (*harenafossicia*), pozolana artificial obtida a partir de telhas moídas (*testa*) e argila caolítica calcinada a aproximadamente de 800°C (*carbunculus*). Além dessa composição de argamassas de cal aérea e pozolanas, os romanos desenvolveram várias outras formulações. Os mesmos autores destacam três tipos de composição principais das argamassas, a saber:

- *Opus cementicium*, composição comumente utilizada pelos arquitetos romanos, era formada por cal, areia e pozolana, ou pedaços de tijolo ou turfa.
- *Coccio pisto*, resultante de uma mistura de cal com pedaços de tijolo.
- *Opus Signinum*, uma argamassa na qual era utilizado um tipo de areia proveniente do norte de Roma denominada *Carbunculus*. Caracterizava-se pela sua grande dureza. Por isso era usada preferencialmente em cisternas, tanques de água e fontes.

Segundo Gibbons (1997), nas argamassas de cal aérea antigas existiriam dois tipos de proporcionamento de materiais que eram comumente utilizados na sua produção. O primeiro seria composto por uma parte de cal virgem ou duas partes de cal em pasta, para uma de areia e uma de pozolana. O segundo proporcionamento, também citado por Torraca (2009), seria composto por uma parte de cal virgem ou duas partes de cal em pasta para até duas e meia partes de pozolana ou de *trass* (um tipo de pozolana) sem adição de areia. Torraca (2009) explica que o uso da areia era facultativo, uma vez que parte considerável das pozolanas comportava-se como material inerte, ou seja, não reagia com a cal, o que reduzia a retração. O autor destaca que tal proporcionamento era utilizado bastante na tecnologia romana, sendo que tal prática se mantém até os dias de hoje na Itália.

2.2.4 Características químicas, físicas e mecânicas das argamassas antigas

Para avaliar as argamassas históricas, assim como para propor argamassas novas para a reabilitação de edificações antigas, é necessário compreender as características químicas, físicas e mecânicas do revestimento de argamassa histórico. Nesse sentido, é importante ter parâmetros dessas argamassas antigas. Moropoulou *et al.* (2005¹¹ *apud* VELOSA, 2006) propuseram uma metodologia de análise térmica de argamassas, onde é possível mensurar a quantidade de CO₂, de água adsorvida (aquela interligada aos materiais) e estrutural (combinada quimicamente com os compostos). Os autores associam os valores obtidos de dióxido de carbono a quantificação de carbonato de cálcio (CaCO₃). Os autores ainda estabeleceram uma classificação química das argamassas históricas, com exclusão das argamassas de cal e argila, a qual está apresentada na Tabela 2. 1.

Tabela 2. 1 – Classificação química de argamassas antigas (MOROPOULOU *et al.*, 2005 *apud* VELOSA, 2006)

Tipo de argamassa	Água de adsorção (%)	Água estrutural (%)	CO ₂ (%)	CO ₂ / Água estrutural (intervalo de valores)
Argamassa de cal	<1	<3	>32	7,5-10
Argamassa de cal e cimento Portland	>1	4-12	18-34	1,5-9
Argamassa de cal hidráulica	>1	3,5-6,5	24-34	4,5-9,5
Argamassa com pozolanas naturais	4,5-5,5	5-14	12-20	<3
Argamassa com pozolanas artificiais	1-4	3,5-8,5	22-29, 10-19	3-6

Moropoulou *et al.* (2005 *apud* VELOSA, 2006) compilaram os resultados de algumas propriedades físicas e mecânicas de diversas argamassas pesquisadas, com constituintes e proporcionamentos diferentes, conforme apresentado na Tabela 2. 2. Velosa (2006), entretanto, ressalta que as características das argamassas antigas são diversas de acordo com sua constituição, que está relacionada com a localização da edificação e exposição dessas.

¹¹MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E. Reverse Engineering: A proper methodology for compatible restoration mortars, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005.

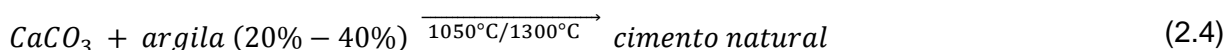
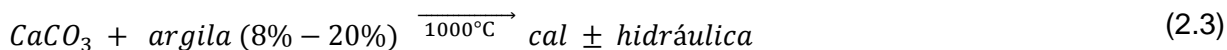
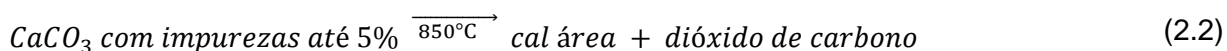
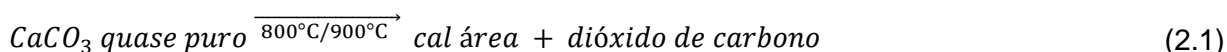
Tabela 2. 2 – Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas (MOROPOULOU *et al.*, 2005 *apud* VELOSA, 2006)

Tipo de argamassa	Volume (mm ³ /g)	Densidade aparente (g/cm ³)	Dimensão média poro (µm)	Superfície Específica (m ² /g)	Porosidade total (%)	Resistência tração (MPa)	Traço em massa (Lig.: Agr.)
Argamassa de cal	170-230	1,5-1,8	0,8-3,3	1,3-3,3	30-45	<0,35	1:4-1:1
Argamassa de cal e cimento Portland	105-241	1,8-1,9	0,03-6,5	1,7-10,6	20-43	0,6-0,7	1:2-1:1
Argamassa de cal hidráulica	90-230	1,7-2,1	0,1-3,5	2,5-13,5	18-40	0,35-0,55	1:4-1:1
Argamassa com pozolanas naturais	160-265	1,6-1,9	0,1-1,5	3-14	30-42	>0,60	1:5-1:1
Argamassa com pozolanas artificiais	170-280	1,5-1,9	0,1-0,8	3,5-9	30-40	>0,55	1:3

2.3 CAL

A cal é um aglomerante obtido pela calcinação dos calcários, formados predominantemente pelo CaCO₃. Além dos calcários, pode existir sempre uma parcela de argila, seja ela pequena ou grande. De acordo com a proporção do calcário e da argila, a matéria-prima recebe denominações diferentes. Quando possui aproximadamente 100% de CaCO₃ é denominado calcário, quando possui uma concentração de argila inferior a 50% é chamado de calcário margoso e, por último, quando possui concentração de calcário inferior a 50% é denominado de marga calcária (COUTINHO, 2002).

A calcinação dessas diferentes matérias primas dá origem a aglomerantes diferentes. Assim, a partir da calcinação do calcário é obtida a cal aérea, já a do calcário margoso dá origem tanto as cales mais ou menos hidráulicas, de acordo com o teor da argila, como aos cimentos naturais (COUTINHO, 2002). A seguir são apresentadas essas reações e os respectivos teores de argilas necessários para a obtenção de tais aglomerantes (COUTINHO, 2002).



Alguns aspectos da cal aérea, que é o aglomerante em estudo, tais como o histórico, a produção, a composição e microestrutura, são abordados na seqüência.

2.3.1 Breve histórico da cal aérea

Existem indícios de uso de cal ao longo da trajetória da existência humana, entretanto seu uso em construções, como mostra Guimarães (1997), passou a ser freqüente nas edificações do Egito, posteriormente nas da Grécia, depois nas de Roma e, por fim, em outras regiões mediterrâneas e suas regiões próximas. A trajetória do uso da cal aérea coincide com a história das argamassas antigas, uma vez que foi o principal aglomerante utilizado, comumente, em conjunto com pozolanas, em argamassas nas construções até meados do século XIX, conforme já apresentado anteriormente.

Apesar de ser utilizada em várias localidades e desde a antiguidade, somente em 1685, como mostra Guimarães (1997), foi instalada a primeira indústria de cal aérea a partir de conchas marinhas em Plymouth Meeting, distrito de Montgomery, na Pensilvânia, EUA. A partir de então, a cal aérea passou a ser produzida em grande escala. Ainda segundo o mesmo autor, no final do século XIX houve uma evolução industrial da cal devido à consolidação dos princípios científicos, tanto da fabricação da cal virgem quanto da cal hidratada.

O uso da cal aérea como aglomerante principal de argamassas reduziu com o surgimento da cal hidráulica, dos cimentos naturais e, posteriormente, do cimento Portland entre o final do século XVIII e o início do século XIX.

2.3.2 Produção da cal aérea e suas reações

Existem reservas dessas rochas presentes em quase todos os continentes, sendo que só no território brasileiro existem mais de 40 bilhões de toneladas de reservas de rochas calcárias e dolomitas espalhadas por toda a sua extensão. Devido ao processo de fabricação da cal ser possível em vários níveis tecnológicos, tanto em fornos rudimentares como em fornos altamente sofisticados, permitiu que a cal fosse disseminada e conhecida mundialmente (GUIMARÃES, 1997).

A fabricação da cal era comum em vários povos da antiguidade tais como chineses, egípcios, etruscos, fenícios, gregos, incas e romanos. A cal virgem era produzida em medas (tipos de fornos mais antigos), as quais eram constituídas pelo calcário, sendo que na parte superior as pedras maiores eram dispostas em forma de abóbodas e internamente eram preenchidas pelas pedras menores, como pode ser visto na Figura 2. 5. Os primeiros combustíveis utilizados foram a lenha e galhos de árvores (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

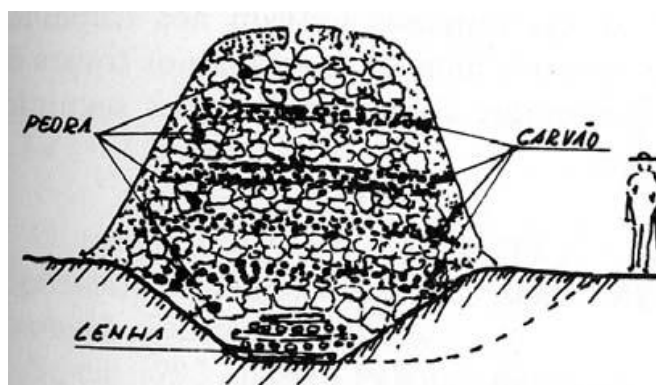


Figura 2. 5 – Meda: calcinação ao ar livre. (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Os fornos passaram por várias modificações ao longo do tempo. Guimarães (1997) apresenta essa evolução na sua obra e mostra que a maioria das alterações nos fornos tinha como objetivo a economia de combustível, a eficiência térmica e a qualidade da cal. Algumas dessas modificações são abordadas no trecho a seguir:

Transformaram-se em estruturas de grande porte, encravadas ou não na meia encosta dos terrenos; ganharam revestimentos, chaminés para melhor tiragem; aparelhos para tiragem forçada; interdependência entre os focos de calor, de descarga de cal e de cinza; e novos combustíveis passaram a ser usados (GUIMARÃES, 1997, p.44).

Independentemente do forno utilizado no processo industrial atual de produção da cal é composto pelas seguintes etapas de acordo com Cincotto, Quarcione e John (2007):

- Extração da matéria-prima e britagem;
- Seleção da faixa granulométrica ótima e transporte para o forno;
- Calcinação e controle do grau de calcinação;
- Moagem adequada para cada tipo de hidratador;
- Armazenamento da cal virgem;
- Hidratação e moagem;
- Ensacamento e distribuição para comercialização.

Apesar de existirem processos de fabricação da cal cada vez mais sofisticados, ainda pode-se observar nos dias de hoje a produção de cal ocorrer de forma rudimentar em várias localidades.

Os principais processos que compõem o ciclo da cal são a calcinação, a hidratação e a carbonatação dos quais são obtidos, respectivamente, a cal virgem, a cal hidratada e a calcita. Na Figura 2. 6 está apresentado esquematicamente o ciclo de transformações da matéria prima e da cal. O detalhamento maior de cada processo será abordado a seguir.

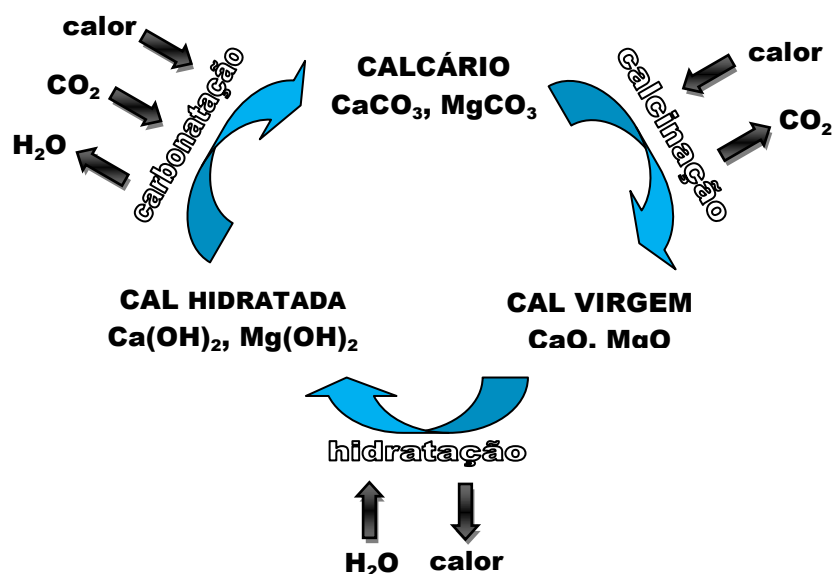


Figura 2. 6– Ciclo da cal aérea: produção e utilização.

a. Calcinação

O processo de calcinação (queima ou dissociação térmica) dos calcários resulta na produção de cal e dióxido de carbono. Existem divergências entre os autores quanto a temperatura de calcinação (COUTINHO, 2002; ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; KANAN, 2008; TORRACA, 2009), mas, de modo geral, esta ocorreria entre 700°C a 900°C. Alguns autores (GUIMARÃES, 1997; CINCOTTO, QUARCIONE, JOHN, 2007) fazem a distinção entre as temperaturas de dissociação da calcita e do dolomito. Cincotto, Quarcione e John (2007) a temperatura de dissociação dos calcários tem início em 660°C e é finalizado a 900°C, já o dolomito varia de acordo com a etapa da reação, sendo que na primeira etapa esta se inicia em ~250°C e finaliza em 380°C e na segunda etapa inicia em 660°C e finaliza em 900°C. Os mesmos autores mostram que devido a esse processo de calcinação os óxidos de magnésio sempre estarão super calcinados, o que justifica sua menor reatividade se comparada ao óxido de cálcio.

Essas reações de calcinação da calcita e do dolomito são reversíveis e estão apresentadas a seguir.



Existem vários fatores que influenciam o processo de calcinação tais como a disposição e a granulometria do material, assim como a distribuição de calor no forno. Por esses motivos alguns carbonatos de cálcio não se dissociam por completo, ou seja, apresentam calcinação apenas superficial enquanto no núcleo mantém-se como carbonato (GUIMARÃES, 1997).

Cincotto, Quarcione e John (2007) indicam três parâmetros que devem ser considerados para um controle do processo de calcinação:

- As pedras devem ser aquecidas até a temperatura de dissociação dos carbonatos;
- Essa temperatura mínima deve ser mantida por um tempo necessário para que haja a dissociação atinja o interior da pedra;
- O dióxido de carbono deve ser retirado do ambiente do forno.

b. Hidratação

A reação de hidratação da cal virgem pode ocorrer na presença de água ou vapor de água e caracteriza-se por ser exotérmica e expansiva (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007). Essa reação pode ser representada pelas seguintes equações:



A quantidade de água utilizada na reação influencia no aspecto final do seu produto, desta forma pode-se obter o aspecto de pasta, lama, leite ou solução saturada. O calor liberado é intenso e varia de acordo com o tipo de cal: 272 kcal/kg para as cales cálcicas e 211 kcal/kg. Outra diferença referente ao tipo de cal é que o processo de hidratação do óxido de cálcio é mais rápido que o do óxido de magnésio (GUIMARÃES, 1997).

c. Carbonatação

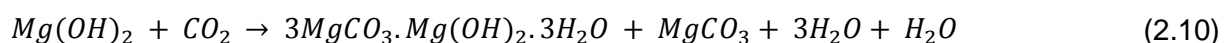
Pode-se atribuir o endurecimento da argamassa a duas fases principais, a saber, a evaporação da água de amassamento (secagem) e a reação de carbonatação da cal hidratada (GUIMARÃES, 1997; COUTINHO, 2002;).

A primeira fase resulta na contração de volume da pasta (KANAN, 2008; TORRACA, 2009), permitindo, assim, sua consolidação e a liberação dos poros para a penetração do CO₂ (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007; TORRACA, 2009).

Na segunda fase ocorre a reação de carbonatação, a qual está apresentada a seguir, onde o CO₂ substitui a água do hidróxido de cálcio presente na argamassa fresca obtendo-se o carbonato de cálcio (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005), produto que confere a argamassa aumento de resistência mecânica.



O processo de carbonatação do hidróxido de magnésio, segundo Guimarães (1997), ocorre muito lentamente transformando-se em carbonatos básicos, do tipo da lansfordita, hidromagnesita (3MgCO₃·Mg(OH)₂·3H₂O), artinita e nesqueonita (MgCO₃·3H₂O). A reação aproximada da carbonatação do hidróxido de magnésio está apresentada a seguir.



Os produtos da carbonatação – carbonatos, anidros ou básicos – apresentam volume maior que a estrutura dos hidróxidos, provocando expansões que, por sua vez, geram a compactação e maior rigidez dos entrelaçamentos entre os componentes formados (GUIMARÃES, 1997).

Alguns fatores influenciam na velocidade da reação de carbonatação, a saber, a temperatura, a estrutura porosa e a umidade da pasta (COUTINHO, 2002). A reação inicia-se 24 horas após o amassamento da pasta e dura cerca de seis meses (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

A penetração do CO₂ ocorre inicialmente de modo superficial e posteriormente penetra na rede de poros formados pela evaporação da água (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

2.3.3 Composição e características da cal aérea

A composição química da cal é influenciada tanto pela composição da matéria prima utilizada na produção da cal quanto pelas condições do seu processo de produção (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

A matéria-prima são as rochas carbonatadas cálcio-magnésiana, cuja constituição é formada aproximadamente 50% pelos minerais: calcita (carbonato de cálcio, CaCO₃, ortorombico), aragonita (carbonato de cálcio, CaCO₃, romboédrico) e dolomita (CaCO₃.MgCO₃ – carbonato de cálcio e carbonato de magnésio – romboédrico). O restante da constituição da rocha é composto pelos minerais secundários (impurezas): quartzo, alguns silicatos argilosos, óxidos metálicos de ferro e manganês, matéria orgânica, fosfatos, sulfetos, sulfatos, fluoretos e brucita. A calcita e a dolomita são comumente compostas pelos seguintes elementos-traços: alumínio, titânio, potássio, bário, estrôncio, chumbo, cádmio, vanádio, cromo, cobalto, níquel, cobre, gálio, zircônio, molibdênio e estanho (GUIMARÃES, 1997).

A cal virgem, segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003a, p. 2), é um “produto obtido pela calcinação de carbonatos de cálcio e magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxido de cálcio e óxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio.” Além desses compostos, há a presença de carbonatos de cálcio e magnésio, uma vez que nem todos os carbonatos são transformados em óxidos (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

Os produtos da calcinação recebem denominações de acordo com a quantidade de CaO e MgO. É denominada de cal cálcica quando possui altos teores de óxido de cálcio; de cal dolomítica, quando a relação de CaO/MgO é igual; e de cal magnesiana quando possui teor de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a dolomítica (GUIMARÃES, 1997).

A cal hidratada, segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003b), é um “pó seco obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio”. Além da presença de hidróxidos de cálcio e hidróxidos de magnésio e, em pequena quantidade, pelos óxidos não hidratados (livres), há ainda a presença de carbonatos de cálcio e magnésio (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

A NBR 7175 (ABNT, 2003b) classifica as cales hidratadas em três tipos, de acordo com o teor de óxidos totais na base não voláteis, teores de impurezas e teores de anidrido carbônico, em CH I, CH II e CH III. Essa norma especifica algumas exigências químicas e físicas para tais cales que estão dispostas na Tabela 2. 3 e na Tabela 2. 4 a seguir.

Tabela 2. 3 – Exigências químicas da cal hidratada (adaptada de NBR 7175, ABNT, 2003b).

Requisitos		Critérios limite		
		CH I	CH II	CH III
Anidrido carbônico	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e de magnésio não hidratados (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base não voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Tabela 2. 4 – Exigências físicas da cal hidratada (adaptada de NBR 7175, ABNT, 2003b).

Requisitos		Critérios limite		
		CH I	CH II	CH III
Finura (resíduo)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retração de água		≤ 75%	≤ 75%	≤ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110%	≥ 110%	≥ 110%

A composição teórica das espécies químicas puras do calcário, da cal virgem e da cal hidratada está apresentada na Tabela 2. 5 e na Tabela 2. 6. A referência de tais valores

serve para a comparação com os obtidos em análise química, desta forma, pode-se analisar o grau de pureza do produto (CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

Tabela 2. 5 – Calcário e cales cálcicas – composição teórica percentual obtidas de matérias primas puras (adaptada de CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

Espécie Química	Calcário	Cal virgem	Cal hidratada
CaO	56	100	75,7
CO ₂	44	0	0
H ₂ O	0	0	24,3

Tabela 2. 6 – Dolomito e cales dolomíticas – composição teórica percentual obtidas de matérias primas puras (adaptada de CINCOTTO; QUARCIONE; JOHN, 2007).

Espécie Química	Calcário	Cal virgem	Cal hidratada
CaO	30,4	58,2	42,4
MgO	21,8	41,8	30,4
CO ₂	47,8	0	0
H ₂ O	0	0	27,2

A cal virgem possui estrutura cristalina, cujos cristais pertencem ao sistema cúbico, cuja aresta tem 4,797 ângstrons no óxido de cálcio e 4,203 ângstrons no óxido de magnésio. Já a cal hidratada possui o sistema cristalino hexagonal, cujas arestas básicas tem 3,5844 ângstrons no hidróxido de cálcio e 3,11 ângstrons no hidróxido de magnésio (GUIMARÃES, 1997).

2.4 METACAULIM

O metacaulim é um tipo de pozolana de alta reatividade utilizada como adição mineral em argamassa. Os materiais pozolânicos são, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992, p. 2-3):

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem ser divididas em dois grupos de acordo com sua origem: em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são basicamente materiais de origem vulcânica tais como as cinzas e tufos vulcânicos. Já as pozolanas artificiais são materiais provenientes de

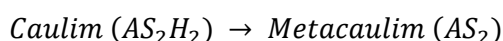
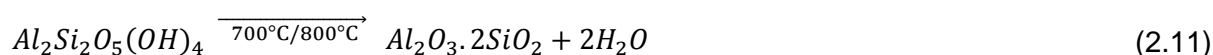
tratamento térmico, tais como as argilas calcinadas, ou resultantes de processos industriais com atividade pozolânica como, por exemplo, a sílica ativa e a cinza volante.

A norma NBR 12653 (ABNT, 1992) classifica os materiais pozolânicos em três classes, a saber, N, C e E. A classe N compreende as pozolanas naturais e artificiais tais como as argilas calcinadas, que incluem o metacaulim, e os materiais vulcânicos; já a classe C corresponde a cinza volante e aos materiais produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas; e a classe E englobam todas as pozolanas que não pertencem as demais classes.

2.4.1 Processo de obtenção do metacaulim

O metacaulim é obtido a partir do processo de calcinação da caulinita, que é o argilomineral predominante das argilas brasileiras utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos tais como tijolos de alvenaria e telha (SANTOS, 1992). É necessário, portanto, que a caulinita seja calcinada entre 500°C a 800°C, e, posteriormente, moída, a fim de reduzir sua granulometria, para que seja desenvolvida a atividade pozolânica (SOUZA; DAL MOLIN, 2002). Neste intervalo de temperatura forma-se a fase metacaulinita (SANTOS, 1992). A partir de 900°C são formados comumente duas novas fases cristalinas, a saber, espinélio e cristobalita, e acima de 1100°C é formado a mulita (TAYLOR, 1997). Esses novos compostos cristalinos são estáveis e de menor área específica, o que reduz consideravelmente a atividade pozolânica (SANTOS, 1992).

A reação de calcinação da caulinita, onde ocorre a desidroxilação da estrutura cristalina e obtém o metacaulim, é apresentada a seguir (NITA; JOHN, 2007). No processo de calcinação de um caulim puro ocorre uma perda de massa teórica de 13,76% em massa (SHVARZMAN *et al.*, 2003¹² *apud* NITA; JOHN, 2007).



A pozolonicidade do metacaulim é influenciada por vários fatores relacionados ao seu processo de produção, tais como a temperatura e o tempo de queima argila, além do tempo de moagem e do tipo de moinho. As dimensões das partículas da pozolana obtidas após o processo de moagem também influenciam na sua atividade pozolânica, sendo que em valores inferiores a 5 µm o metacaulim obtém excelência nesta atividade e passa a ser

¹²SHVARZMAN, *et al.* The effect of dehydroxylaton/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 405-416, 2003.

denominado, por alguns autores, de metacaulim de alta reatividade (SOUZA; DAL MOLIN, 2002).

2.4.2 Composição e características do metacaulim

A composição química do metacaulim é caracterizada por proporções próximas, quase idênticas, de SiO_2 e Al_2O_3 , em massa (MALHOTRA, MEHTA, 1996). Para um total de 92% de massa são aproximadamente 40% de alumina e 52% de sílica, o restante são impurezas tais como, “o quartzo, outros argilominerais, a mica, o feldspato, gipsita, componentes do ferro e materiais orgânicos” (NITA; JOHN, 2007, p. 4).

As exigências físicas e químicas do metacaulim estabelecidas pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010) estão apresentadas na Tabela 2. 7.

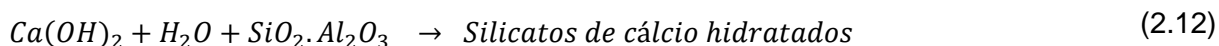
Tabela 2. 7 – Exigências físicas e químicas do metacaulim (adaptada da NBR 15894-1, ABNT, 2010).

Componente	Unidade	Limite
SiO_2	%	$\geq 44,0$ e $\leq 65,0$
Al_2O_3	%	$\geq 32,0$ e $\leq 46,0$
CaO + MgO	%	$\leq 1,5$
SO_3	%	$\leq 1,0$
Na_2O	%	$\leq 0,5$
Equivalente alcalino em Na_2O	%	$\leq 1,5$
Umidade	%	$\leq 2,0$
Perda ao fogo	%	$\leq 4,0$
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 μm	%	$\leq 10,0$
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105
Índice de atividade pozolânica Chapelle	$\text{mg Ca(OH)}_2/\text{g material}$	≥ 750
Área específica B.E.T.	$\text{m}^2.\text{g}^{-1}$	≥ 15

O metacaulim consiste numa fase não-cristalina (amorfa) de alumino silicato (Si-Al-O). A estrutura não-cristalina do metacaulim, assim como sua elevada área específica, são características que fazem deste um material altamente reativo (MALHOTRA; MEHTA, 1996). Esse material apresenta-se comumente em placas lamelares (ABNT, 2010).

2.4.3 Argamassas de cal aérea e metacaulim

De modo geral, o metacaulim reage na presença de água com o hidróxido de cálcio, obtido pela hidratação da cal aérea, formando compostos aglomerantes conforme exposto a seguir:



Silico – aluminatos de cálcio hidratados

Aluminatos de cálcio hidratados

Existem diversos tipos de silicatos, silico-aluminatos e aluminatos de cálcio hidratados obtidos a partir da reação de pozolanas com hidróxido de cálcio. Velosa (2006) compilou na literatura os produtos formados a partir dessa reação. Com base nos dados levantados pela autora referentes ao metacaulim, foi elaborada neste trabalho a Tabela 2. 8, onde estão apresentados os produtos da reação do metacaulim com a portlandita.

Tabela 2. 8– Silicatos, aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados formados a partir da reação do metacaulim com o hidróxido de cálcio (VELOSA, 2006, p. 37, 39, adaptada).

Produto	Produto formado
Silicatos	$C_3S_2H_n$
	C-S-H
Aluminatos	C_4AH_6
	C_4AH_{13}
	C_3AH_6
Silico-aluminatos	C_2ASH_8
	C_2ASH_n

Vários fatores influenciam na reação da pozolana com o hidróxido de cálcio. Na Tabela 2. 9 está apresentada, com base em dados da literatura levantados por Velosa (2006, p. 42-47), uma listagem desses fatores, além de um resumo sobre a relação desses fatores com reação pozolânica.

Tabela 2. 9 – Resumo dos fatores que influenciam na reação pozolânica.

Fatores	Tendência/ Influência
Tipo de pozolana (composição)	Para cada pozolana existe uma correlação direta entre a combinação de pozolana com cal e o endurecimento das argamassas, sendo esta relacionada à composição química do material.
Superfície específica	Quanto maior a superfície específica maior a reatividade do material.

Fatores	Tendência/ Influência
Temperatura de cozedura/formação	A temperatura, o tempo de cozedura/formação e resfriamento influenciam na reatividade do material. Sendo os parâmetros de temperatura variáveis para cada tipo pozolana.
Relação cal/pozolana	Variam de acordo com o tipo de pozolana (quantidade de sílica e alumina).
Quantidade de água	Quanto maior a quantidade de água maior é a velocidade da reação.
Condicionamento (temperatura/umidade)	Temperatura: Tendência é de aumentar a reação pozolânica em maiores temperaturas. Umidade: Resistência mecânica menor nas argamassas de cal e pozolana condicionadas ao ar livre.
Compactação	Uma boa compactação melhora a resistência do material.

Além dos fatores listados anteriormente, a presença de aditivos nas argamassas de cal e pozolana exercem influência sobre sua reação. A dissolução em meio aquoso da pozolana, por exemplo, é potencializada pelo aumento do pH da solução (VELOSA, 2006), essencialmente quando este é superior a 12,5 (NITA; JOHN, 2007).

Segundo Ashurst (2007), não é indicado acrescentar metacaulim na produção de argamassas de cal aérea em quantidades superiores a 10% da pasta de cal.

Neste trabalho foram compilados vários proporcionamentos de argamassas de cal aérea e metacaulim utilizados em pesquisas recentes, os quais estão apresentados na Tabela 2. 10. Alguns proporcionamentos levantados na bibliografia estão em volume, já outros em massa e porcentagem. No intuito de estabelecer uma relação entre eles, definiu-se que todos seriam apresentados em massa.¹³ Nessa tabela ainda foi apresentada a relação em massa de aglomerante e pozolana. As relações agregado/aglomerante oscilaram entre: 1:1,2 e 1:4, sendo que a maioria dos valores de agregados está entre 1:1,2 a 1:2. Na mesma tabela

¹³Para a transformação do proporcionamento em volume para massa utilizou-se a equação apresentada a seguir. Foram considerados para o cálculo o coeficiente de inchamento da areia de 1,43 e as seguintes massas unitárias de acordo com o material: a cal de 0,6 g/cm³; o metacaulim de 0,5 g/cm³ e a areia de 1,45 g/cm³.

$$1 : \frac{m \cdot \delta_m}{\delta_c} : \frac{a \cdot \delta_a}{\frac{vh}{vo} \cdot \delta_c}$$

Onde:

m = proporcionamento do metacaulim, em volume

a = proporcionamento do agregado, em volume

δ_c = massa unitária da cal, em g/cm³

δ_m = massa unitária do metacaulim, em g/cm³

δ_a = massa unitária da areia, em g/cm³

$\frac{vh}{vo}$ = coeficiente de inchamento da areia

também está apresentado o cálculo da porcentagem de metacaulim em relação aos materiais secos, sendo que a média obtida das pesquisas analisadas foi de 13%.

Tabela 2. 10 – Proporcionamentos de argamassas de cal aérea e metacaulim utilizados em pesquisas recentes.

Referência	Proporcionamento	Proporcionamento aproximado em massa	Relação aglomerante + pozolana: agregado em massa	Porcentagem de metacaulim/materiais secos
Coelho, Jalali e Torgal (2010)	5%:15%:74,4%+5,6%	1: 3: 14,88: 1,12 (cal: metacaulim: areia: areia)	1:4	15%
	5%:15%:74,4%+5,6%	1: 3: 14,88: 1,12 (cal: metacaulim: areia: areia)	1:4	15%
	10%:10%:74,4+5,6%	1: 1: 7,44: 0,56 (cal: metacaulim: areia: areia)	1:2	10%
Nóbrega <i>et al.</i> (2010)	1:1:4 – em massa	1:1:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2	17%
	1:1:4 – em massa	1:1:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2	17%
	1:0,5:4 – em massa	1:0,5:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2,7	9%
	1:0,5:4 – em massa	1:0,5:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2,7	9%
Sepulcre-Aguilar e Hernández-Olivares (2010)	1:1:3 – em massa	1:1:3 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	20%
	2:1:7 – em massa	2:1:7 (cal: metacaulim: areia)	1:2,3	10%
	1:1:3 – em massa	1:1:3 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	20%
	1:1:3 – em massa	1:1:3 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	20%
	1:1:3 – em massa	1:1:3 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	20%
Veiga, Velosa e Magalhães (2009)	1:0,5:2,5 – em volume - chapisco	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:2,5 – em volume – primeira camada	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:3 – em volume – segunda camada	1:0,4:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,4	12%
Velosa, Rocha e Veiga (2009)	1:0,5:2,5 – em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:2,5 – em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:2,5 – em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
Velosa, Veiga e Rocha (2009)	1:1:4 – em volume	1:0,8:2,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	18%
	1:1:4 – em volume	1:0,8:2,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	18%
	1:0,5:2,5 – em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
Magalhães e Veiga (2009)	1:3 – com 10% de metacaulim do peso da cal – em volume	1:0,1:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,9	3%

Referência	Proporcionamento	Proporcionamento aproximado em massa	Relação aglomerante + pozolana: agregado em massa	Porcentagem de metacaulim/ materiais secos
Valente (2008), Teixeira (2008)	1:0,5:2,5– em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:1,25:1,25– em volume	1:0,4:0,83:0,83 (cal: metacaulim: areia: areia)	1:1,2	13%
	1:0,5:2,5– em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
Velosa e Veiga (2007)	1:1:4 – em volume	1:0,8:2,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	18%
	1:1:4 – em volume	1:0,8:2,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,5	18%
	1:0,5:2,5 – em volume	1:0,4:1,67 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	13%
Veiga, Velosa e Magalhães (2007)	1:0,20:3 – em volume	1:0,2:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,7	6%
	1:0,20:3 – em volume	1:0,2:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,7	6%
Fortes-Revilla, Martínez-Ramírez e Blanco-Varela (2006)	1:1 e 1:2 – cal:metacaulim e cal+metacaulim:areia – não informam	1:1:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2	17%
	1:2 e 1:2 – cal:metacaulim e cal+metacaulim:areia – não informam	1:2:6 (cal: metacaulim: areia)	1:2	22%
	1:1 e 1:2 – cal:metacaulim e cal+metacaulim:areia – não informam	1:1:4 (cal: metacaulim: areia)	1:2	17%
	1:2 e 1:2 – cal:metacaulim e cal+metacaulim:areia – não informam	1:2:6 (cal: metacaulim: areia)	1:2	22%
Velosa (2006)	1:3 – com 10% de metacaulim sobre o peso da cal - em volume	1:0,1:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	3%
	1:3 – com 20% de metacaulim sobre o peso da cal - em volume	1:0,2:2,5 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	5%
	1:3 – com 10% de metacaulim sobre o peso da cal - em volume	1:0,1:2 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	3%
	1:3 – com 20% de metacaulim sobre o peso da cal - em volume	1:0,2:2,5 (cal: metacaulim: areia)	1:1,2	5%

2.5 ARGAMASSAS PARA REABILITAÇÃO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS

As argamassas utilizadas para a reabilitação de edificações históricas devem possuir, em geral, características similares às antigas. A partir do estudo dos materiais históricos, é possível estabelecer requisitos para o desenvolvimento de argamassas de reabilitação. A seguir, são abordados os requisitos gerais destas argamassas, tendo como foco principal a sua relação com o substrato. Em seguida, são apresentados os requisitos específicos das argamassas de reabilitação destinadas ao assentamento de azulejos históricos.

2.5.1 Requisitos gerais das argamassas de reabilitação

Veiga e Tavares (2002), com base em vários estudos, estabeleceram alguns requisitos gerais para as argamassas de reabilitação quando existe conhecimento do substrato, os quais estão apresentados a seguir:

- características mecânicas semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do substrato;
- resistência à tração inferior ao substrato: a ruptura não deve ser coesiva na base;
- força máxima desenvolvida por retração restringida inferior à resistência à tração do substrato;
- capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhantes às argamassas originais e superiores às do substrato;
- porosidade semelhante a das argamassas originais e com maior porcentagem de poros grandes que o substrato; e
- coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas originais e a do substrato.

Uma dificuldade no âmbito da reabilitação de edificações históricas é o não conhecimento completo das características das paredes antigas. Veiga (2005), por exemplo, mostra que em Portugal não existe um levantamento sobre as características de suas paredes antigas. Entretanto, a autora com base em estudos realizados sobre paredes irregulares portuguesas (VEIGA; CARVALHO, 2002¹⁴; VEIGA *et al.*, 2004¹⁵) elaborou uma compilação de limites

¹⁴VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. **Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos**. Requisitos e características a respeitar, Lisboa, LNEC, Outubro 2002. Cadernos de Edifícios, nº 2.

recomendados para as argamassas de reabilitação, os quais estão apresentados na Tabela 2. 11 e

Tabela 2. 12. Vale ressaltar, entretanto, que esses valores não são rígidos devendo ser adequados a cada caso específico.

Tabela 2. 11 – Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição – características mecânicas (VEIGA, 2005).

Uso	Características mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento a retração restringida			
	Rt	Rc	E		Fr máx (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000	0,1 a 0,3 ou ruptura coesiva pelo reboco	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000		< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3	3000 - 6000	0,1 a 0,5 ou ruptura coesiva pela junta	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7

Rt – Resistência à tração; Rc – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade; Fr máx – Força máxima induzida por retração restringida; G – Energia de ruptura à tração; CSAF – Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda; CREF – Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação.

Tabela 2. 12 – Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição – características não-mecânicas (VEIGA, 2005).

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento artificial acelerado	Comportamento aos sais
	Ensaio clássico		Ensaio com umidímetro				
	SD (m)	C ($\text{kg/m}^2\cdot\text{h}^{0,5}$) ($\text{kg/m}^2\cdot\text{min}^{0,5}$)	M (h)	S (h)	H (mv.h)		
Reboco exterior	< 0,08	< 12; > 8 (< 1,5; > 1,0)	> 0,1	< 120	< 16 000	Médio: degradação moderada nos ciclos água/gelo	Teores reduzidos de sais solúveis. Resistência aos sais existentes na parede (estudos em curso).
Reboco interior	< 0,10	---	---	< 120	---		
Juntas	< 0,10	< 12; > 8 (< 1,5; > 1,0)	> 0,1	< 120	< 16 000		

SD - espessura da camada de ar de difusão equivalente (valor relacionado com a permeância); C – coeficiente de capilaridade; M – atraso na molhagem; S – período de umedecimento; H – intensidade de molhagem.

Martínez e Carro (2007) mostram que, de modo geral, essas argamassas devem possuir: baixa resistência à compressão, baixo módulo de elasticidade, alta permeabilidade ao vapor

¹⁵VEIGA, M. R. *et al.* **Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos**. Lisboa, LNEC, Julho 2004. Coleção Edifícios, CED 9.

de água e ausência de sais solúveis. Alvarez, Sequeira e Costa (2005, p. 9) explicam que essas argamassas devem, por um lado, permitir a respiração da parede e, por outro lado, impedir a entrada de águas pluviais. Segundo os autores, para permitir a respiração da parede, ou seja, permitir a passagem do vapor de água, “é importante a utilização de ligantes com estruturas relativamente abertas e agregados com curvas granulométricas criteriosamente escolhidas”. É necessário impedir a entrada de águas, pois se essa água vier a circular no interior da parede e dissolver os sulfatos e o cálcio, geralmente presentes nos rebocos antigos, provavelmente arrastará esses produtos para a interface, cristalizando-se na superfície e contribuindo para o destacamento do reboco de reabilitação (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

A partir dessas averiguações, Alvarez, Sequeira e Costa (2005) sugerem que o do reboco de reabilitação seja aplicado por camadas distintas e sempre que possível sejam armadas com tela. Esse sistema de aplicação seria composto por três camadas, as quais são apresentadas a seguir:

- primeira camada de aderência, a aplicar de forma não contínua, como se tratasse de um chapisco;
- segunda camada constituída pelo reboco de reabilitação propriamente dito, cuja resistência deverá ser igual ou inferior à camada de aderência e;
- terceira camada de acabamento, com granulometria fina e características mecânicas semelhantes à anterior.

Após o entendimento dos requisitos das argamassas de reabilitação fica claro o porquê da incompatibilidade do uso da argamassa de cimento na restauração de edificações históricas. Alguns dos motivos, reconhecidos por vários autores, são a baixa porosidade e permeabilidade, podendo provocar maior retenção de umidade nas paredes. Outro motivo é sua resistência ser maior do que os materiais antigos, podendo causar danos aos sistemas construtivos seja em casos que tenha que ser retirada ou simplesmente pela sua permanência no local de aplicação (VEIGA, 2003; ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; KANAN, 2008; FERREIRA M., 2009). Os danos ocasionados pelas tensões geradas no sistema de revestimento estão descritas a seguir:

[...] o seu rápido endurecimento provoca a deterioração do suporte devido às tensões produzidas, e os elevados módulos de elasticidade, de resistência à tração e de aderência ao suporte geram tensões muito grandes na alvenaria que resultam frequentemente na fissuração, e logo, na entrada de água no suporte (FERREIRA M., 2009, p. 99).

O cimento mesmo em conjunto com a cal em argamassas mistas tem se mostrado inadequado para o uso em restauração, como apresenta a pesquisa de Martínez e Carro (2007). Nessa pesquisa, os autores avaliaram 8 tipos diferentes de argamassas de cimento e cal, com teores diferentes dos aglomerantes. Independentemente dos teores dos ligantes, tais argamassas não apresentaram, de modo geral, alta permeabilidade ao vapor de água, baixa resistência mecânica e a ausência de sais, que são, conforme comentado anteriormente, requisitos para as argamassas de reabilitação. No caso das concentrações de cimento superiores a 33%, as argamassas apresentaram altas resistências mecânicas. Mesmo as argamassas com concentrações de cimento inferiores a 33%, apesar de resultarem em baixas resistências, apresentaram, em contrapartida, considerável redução na permeabilidade ao vapor.

A Figura 2. 7 ilustra o uso inadequado de argamassa a base de cimento em fachada histórica de um edificação localizada na cidade de Ovar, em Portugal.



Figura 2. 7 – Uso inadequado de argamassa de cimento em fachada de azulejos em Ovar, Portugal (CARASEK; CASCUDO, 2010).

Diferentemente da argamassa à base do cimento Portland e da argamassa mista de cimento e cal, a argamassa à base de cal tem se mostrado compatível com os substratos antigos, uma vez que possuem predominância de volume de poros grandes, não retendo umidade e permitindo a parede respirar; resistência mecânica adequada e processo de cura mais lento adequando-se a vários tipos de alvenaria histórica (KANAN, 2008).

Vale ressaltar ainda que alguns produtos presentes em argamassas de uso corrente para a melhoria da sua aderência têm se mostrado prejudiciais aos rebocos antigos e, portanto, o

uso desses deve ser evitado em argamassas de reabilitação. Esses produtos são as resinas, que dificultam a permeabilidade ao vapor de água; e o metil celulose, que por ser um material orgânico pode transportar bactérias para o reboco antigo (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

2.5.2 Requisitos das argamassas de reabilitação de assentamento de azulejos

As principais funções da argamassa de assentamento de placas cerâmicas atuais são de aderir a placa cerâmica ao substrato e “absorver as deformações naturais a que o sistema de revestimento cerâmico estiver sujeito” (CARASEK, 2007, p. 9). Segundo a autora os principais requisitos e propriedades que deve possuir uma argamassa de revestimento cerâmico são: trabalhabilidade; aderência e capacidade de absorver deformações, ou seja, ser flexível, principalmente no caso de fachadas. Os mesmos requisitos e propriedades podem ser extrapolados para as argamassas de assentamento em revestimento de azulejo histórico.

Ferreira M. (2009) recomenda o uso de argamassa de assentamento de azulejos com proporção volumétrica de 1 de cal área hidratada em pó (ligante) para 3 de areia de rio com granulometria média (agregado).

Os procedimentos usualmente realizados para o assentamento de azulejos históricos e de suas reproduções é descrito por Ferreira M. (2009). Várias etapas e cuidados devem ser realizados durante o processo de execução do revestimento cerâmico. As condições climáticas ambientais, por exemplo, durante o processo devem ser favoráveis (temperatura e umidade amenas). A seguir estão dispostas resumidamente as etapas desse processo, de acordo com a autora:

- Preparo da argamassa: misturar bem previamente os materiais; acrescentar uma pequena quantidade de água e misturar a argamassa por um longo período até que esta se apresente de forma densa e homogênea¹⁶.
- Preparo do azulejo: devem-se organizar os azulejos pela ordem que serão aplicados na fachada de acordo com o indicado no levantamento fotográfico e gráfico, realizado no momento de remoção dos azulejos, onde os mesmos recebem

¹⁶ O teor de água presente na argamassa pode variar de acordo com as características da base da edificação e das condições climáticas presentes no momento da intervenção. Deve-se, entretanto, ter cautela, pois o excesso de água causa o acréscimo da porosidade e da retração do revestimento (FERREIRA M., 2009).

identificação. Caso sejam utilizados reproduções dos azulejos, estes devem ter seu ajuste dimensional (corte) realizado na obra;

- Preparo do suporte: deve ser limpo e ligeiramente umedecido no intuito de contribuir para a aderência¹⁷ (LUCAS, ABREU, 2005¹⁸ p.114, apud FERREIRA M., 2009). A base também deve ser uniformizada (eliminação das lacunas e vazios);
- Aplicação dos azulejos: uma espessura de argamassa em torno de 2 cm deve ser aplicada no tardo do azulejo, sendo que essa espessura varia de acordo com a planeza ou regularidade da superfície da base (LUCAS, ABREU, 2005¹⁹ p.114, apud FERREIRA M., 2009). Deve-se também pressionar levemente o azulejo, para que ocorra uma distribuição homogênea da argamassa de assentamento no tardo e a ligação entre ambos.
- Juntas: devem ser preenchidas com uma mistura de pó de pedra e cal.

Além do método de aplicação de azulejo mencionado por Ferreira M. (2009), podem ser citados outros como, por exemplo, o de aplicar a argamassa de assentamento tanto na base como no tardo do azulejo e, em seguida, de assentar o azulejo na base.

Após todo esse processo de assentamento dos azulejos, ainda devem-se eliminar os resquícios de cal na superfície dos azulejos. Caso seja necessário restaurar e conservar o azulejo *in loco*, isso deve ocorrer no final das etapas do processo. Deve-se também efetuar a proteção contra “choques mecânicos e de vibrações”, assim como também de variações higrótérmicas da fachada durante os primeiros meses que se seguem o assentamento dos azulejos (FERREIRA M., 2009, p. 103).

Como visto no item 2.3.2, o endurecimento da argamassa à base de cal aérea ocorre pela evaporação da água de amassamento e pelo processo de carbonatação da cal hidratada na presença do CO₂. Durbin (2005) mostra que a fixação da peça cerâmica na argamassa de assentamento dificulta a entrada de CO₂ no revestimento de argamassa desfavorecendo, assim, o processo de carbonatação deste. Nesse sentido, é interessante que as argamassas de assentamento de azulejos tenham características hidráulicas, tais como as constituídas por cal aérea e pozolana. A escolha da pozolana a ser utilizada na reabilitação

¹⁷ A aderência pode ser prejudicada caso seja utilizada água em excesso, pois esta impede que a água absorva a água da argamassa. Lucas e Abreu (2005) mostram que fatores como planeza e regularidade superficial da base influenciam na aderência. Ferreira M. (2009) explica que se por um lado a rugosidade intensifica a resistência à aderências da argamassa, por outro lado dependendo da planeza do suporte é preciso executar uma camada de regularização sobre este.

¹⁸ LUCAS, J. A. C.; ABREU, M. M. **Revestimentos cerâmicos colados**: descolamento. Série: Patologia e Reabilitação da Construção nº 4. Lisboa: LNEC, 2005. (124 p.) ISBN 972-49-2029-1

¹⁹ LUCAS, J. A. C.; ABREU, M. M. **Revestimentos cerâmicos colados**: descolamento. Série: Patologia e Reabilitação da Construção nº 4. Lisboa: LNEC, 2005. (124 p.) ISBN 972-49-2029-1

de edificações históricas vai depender principalmente da disponibilidade do material na região onde vai ser utilizada e da sua constituição química que deve ser similar a do original

Teixeira (2008), ao estudar argamassas de reabilitação para serem utilizadas em intervenções de conservação de fachadas azulejadas do século XIX em Ovar, Portugal, conclui que a adição de metacaulim em argamassas de cal pode ser uma boa solução para recolagem de azulejos ou colagem de cópias de azulejos antigos nessas fachadas, uma vez que tais argamassas possuíam compatibilidade química, assim como em relação ao tipo de ligante e ao comportamento mecânico, entre as argamassas antigas e as novas.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO REVESTIMENTO CERÂMICO HISTÓRICO DE FACHADA

O estudo científico dos materiais históricos é necessário para se propor soluções e ações de restauração que contemplem materiais atuais compatíveis com os primeiros.

Uma das propostas deste trabalho foi estudar a interface dos revestimentos cerâmicos históricos de fachadas de edificações do século XIX de Portugal. Tal revestimento é composto por azulejo aplicado sobre argamassas à base de cal. Para tanto, foram retiradas amostras de edificações escolhidas para serem avaliadas em laboratório. Além das análises relativas à interface, foi realizada uma caracterização dos seus materiais constituintes. O estudo dessas características e propriedades do azulejo e da argamassa histórica é importante para o entendimento do mecanismo de aderência entre esses materiais.

O detalhamento da amostragem e dos métodos de avaliação das amostras de revestimento cerâmico de fachada, bem como a apresentação e discussão dos resultados dessas análises, estão abordados a seguir.







3.1 AMOSTRAS

As amostras estudadas são revestimentos cerâmicos históricos de fachada do final do século XIX e início do século XX retiradas de edificações portuguesas, localizadas em Ovar, ao norte de Portugal. Essa cidade, considerada o Museu do Azulejo, se destaca pela grande quantidade de edificações revestidas de azulejos existentes, concentradas, principalmente, no seu centro histórico. Essas amostras foram disponibilizadas pelo Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo (ACRA) da Câmara Municipal de Ovar, no âmbito do projeto Azulejar, projeto este coordenado pela Universidade de Aveiro com várias parcerias, dentre elas a Universidade Federal de Goiás.

Esta pesquisa contempla o estudo de 3 casos denominados de Caso 1, Caso 2 e Caso 3, sendo que cada caso corresponde a uma edificação analisada. A nomenclatura das amostras, bem como a definição dos casos, foram estabelecidas pelos pesquisadores

portugueses. A nomenclatura é composta basicamente pelas iniciais do endereço do edifício de onde a amostra foi recolhida da fachada e pela numeração da amostra. Entretanto, quando a numeração era ausente, foi acrescentada a sigla SI (sem identificação). Foi ainda acrescentada nesta pesquisa, no início da nomenclatura, a abreviação do país de origem (PT). A Tabela 3. 1 apresenta alguns dados relativos aos casos estudados e o padrão de nomenclatura utilizado para as amostras.

Tabela 3. 1 – Identificação dos casos pelo endereço das edificações e padrão de nomenclatura utilizado.

Casos	Caso 1	Caso 2			Caso 3
Imagem da fachada da edificação	 (VELOSA, 2010)	 (VELOSA, 2010)			 (VELOSA, 2010)
Imagem do azulejo da fachada					
Endereço	Rua Visconde de Ovar	Rua Dr. Antônio Sobreira			Rua Sobral
Abreviação do endereço	VO	DAS ou AS			SO
Padrão de nomenclatura da amostra	PT-VO-AX	PT-DAS- Z2-AX	PT-AS- AX	PT-AS- SIX	PT-SO-AX

A Figura 3. 1 apresenta o número e tipos de amostras disponíveis para o estudo, sendo amostras de azulejos com argamassa (7 amostras) e de argamassa (4 amostras). Além das amostras de azulejo com argamassa e só de argamassa, foram analisadas nesta pesquisa também amostras só de azulejo. A Figura 3. 2 apresenta estas amostras estudadas por caso, sendo 8 azulejos do Caso 1, 9 azulejos do Caso 2 e 2 azulejos do Caso 3. No total foram 19 azulejos avaliados.

O uso de poucas amostras se mostra suficiente, pois se trata de um estudo exploratório. Outro fator que explica o número reduzido de amostras é a necessidade de se interferir o

mínimo possível nos revestimentos das edificações estudadas, uma vez que se tratam de edificações de valor histórico.

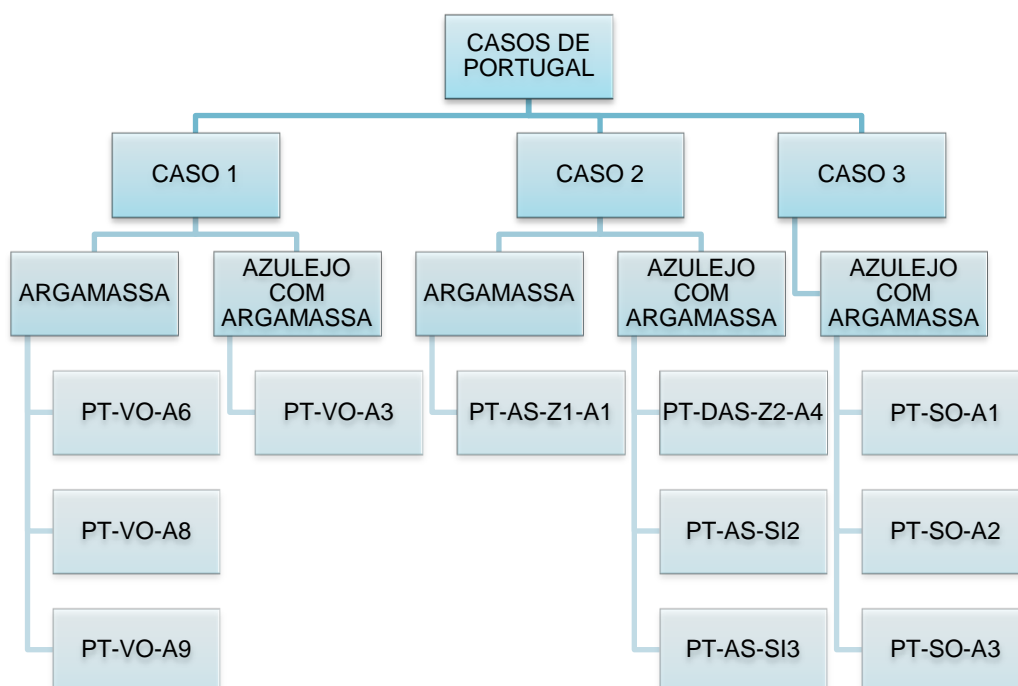


Figura 3. 1 – Organograma das amostras estudadas de azulejos com argamassa e de argamassa portuguesas.

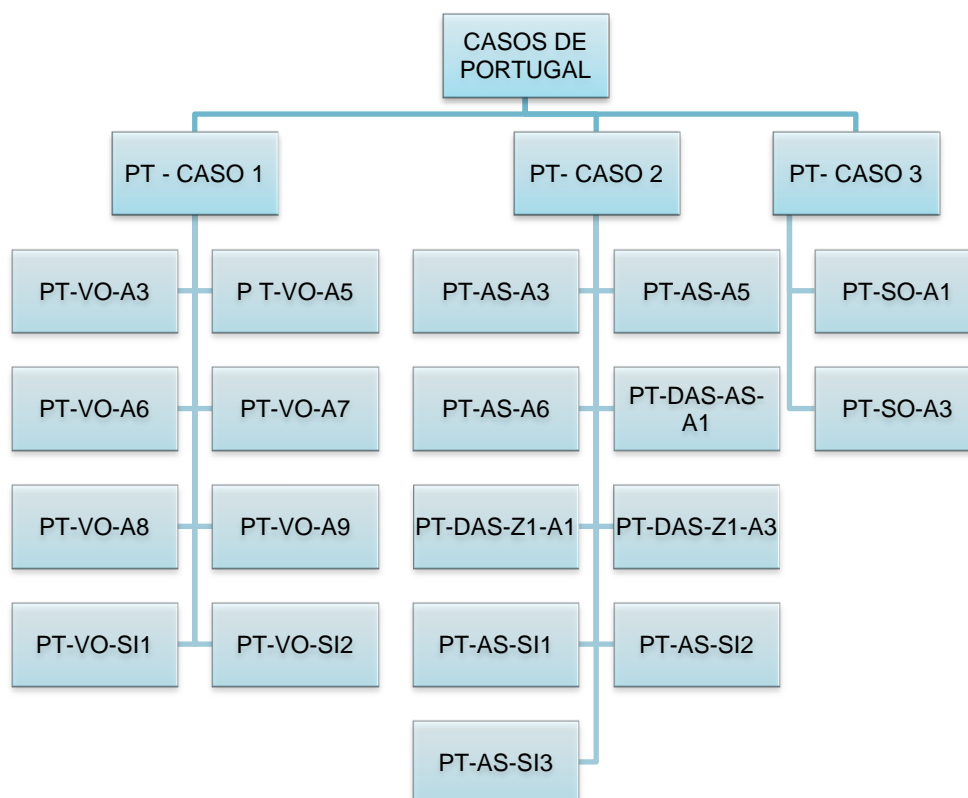


Figura 3. 2 – Organograma das amostras estudadas somente de azulejos históricos portugueses.

3.2 MÉTODOS

Foram realizados vários ensaios e avaliações nas amostras históricas, que estão apresentados na Figura 3. 3. Estes métodos foram organizados em 4 grupos principais: no primeiro está a caracterização visual das amostras, no segundo estão os ensaios de caracterização do azulejo antigo, no terceiro estão os ensaios de caracterização da argamassa histórica e no quarto estão os métodos para o estudo da interface, que foram realizados sobre o revestimento composto pelo azulejo e a argamassa de cal. Na seqüência são apresentados os ensaios e avaliações de cada um desses grupos.

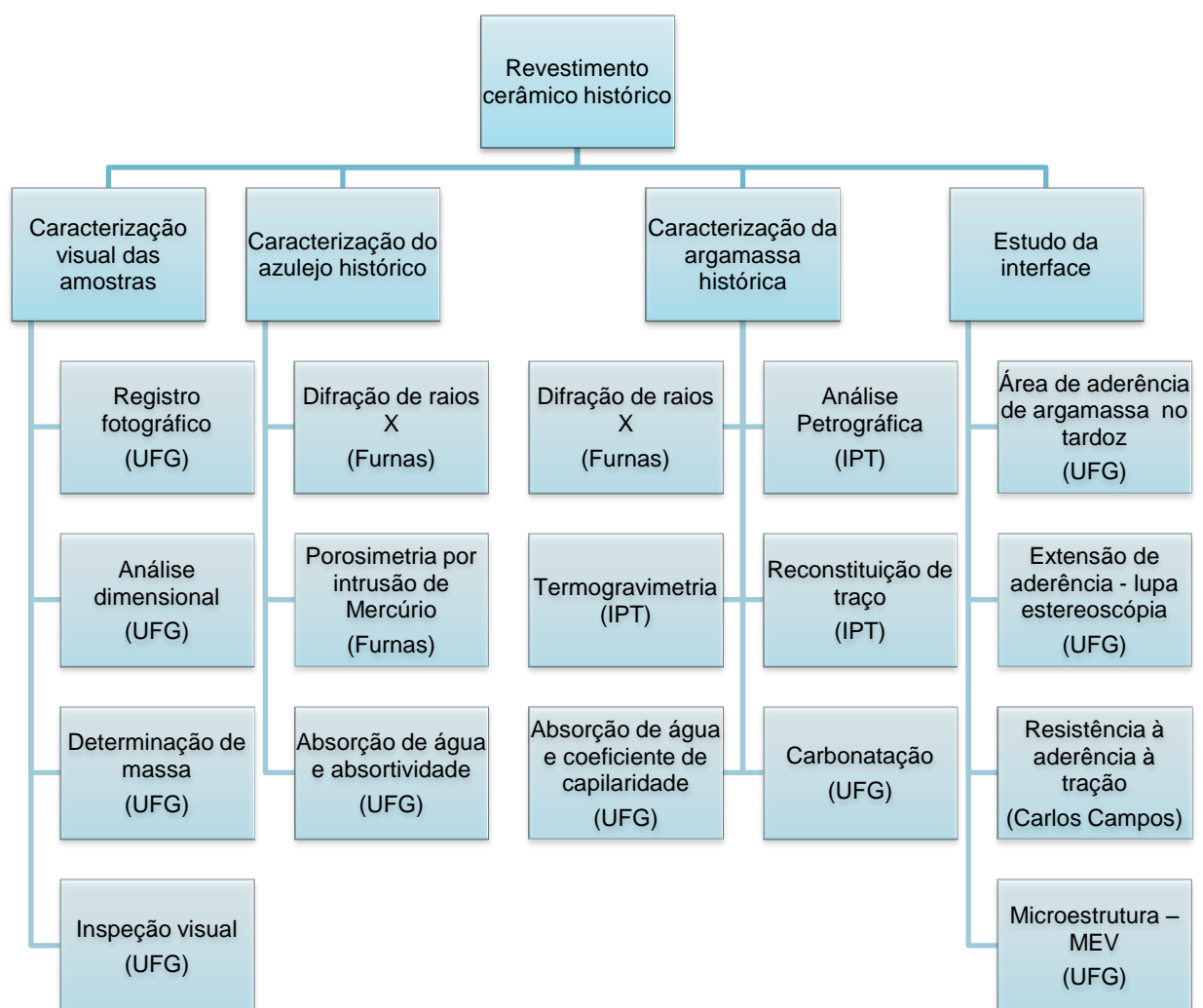


Figura 3. 3 – Organograma dos ensaios e análises para os revestimentos cerâmicos históricos, com identificação dos locais onde foram realizados.

Os ensaios foram realizados em diversos laboratórios, a saber: laboratório de ensaios especiais, laboratório de mecânica dos solos e laboratório Multiusuário de Microscopia de

Alta Resolução (LAMMAR) da Universidade Federal de Goiás (UFG); laboratório de Difração de Raios-X, laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia e laboratório de química de Furnas Centrais elétricas S.A.; laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo; e laboratório de materiais da empresa Carlos Campos– Consultoria e Construções Limitada; conforme indicado no organograma.

3.2.1 Caracterização visual das amostras

Para a caracterização visual das amostras históricas foram realizados: registro fotográfico; análise dimensional; determinação de massa e inspeção visual. Foram elaboradas fichas catalográficas tanto das amostras de azulejo com argamassa como das amostras de argamassa, as quais estão apresentadas no Apêndice A.A análise dimensional e de terminação de massa não foram realizadas para as amostras só de argamassa, uma vez que essas se apresentavam em vários fragmentos. Não foi contemplada também a caracterização visual das amostras só de azulejos, uma vez que essas não são o foco específico da pesquisa.

Para o registro fotográfico foi utilizado o mesmo procedimento de modo que todas as imagens possuíssem a mesma angulação, foco e distância da câmera. A Figura 3. 4 ilustra o método de execução do registro fotográfico. Vale ressaltar que a iluminação pode influenciar na coloração dos materiais nas fotos.



Figura 3. 4 – Método do registro fotográfico.

As dimensões determinadas em cada amostra foram: espessura, largura e comprimento, sendo realizadas com paquímetro da Digimess.

A determinação da massa das amostras foi efetuada em balança com precisão de 0,01g, modelo AS5500C da marca Marte.

A inspeção visual das amostras de argamassa abrangeu análise de desagregação de material, presença de torrões de argila, cal ou outro; fissuras, matéria orgânica e classificação da coloração. Essa última se deu por comparação entre a amostra e o catálogo de cores NCS²⁰. As fissuras e microfissuras foram observadas na lupa micrométrica da Proceq.

3.2.2 Caracterização dos azulejos históricos

Nesta pesquisa para a caracterização dos azulejos históricos foram empregados a difração de raios X (DRX), a porosimetria por intrusão de mercúrio, a absorção de água total por fervura e ao longo do tempo. Tais métodos são descritos a seguir.

Os azulejos históricos que foram ensaiados estão apresentados na Tabela 3. 2 de acordo com o tipo de ensaio.

Tabela 3. 2– Amostras de azulejos históricos ensaiados por tipo de ensaio.

Caso	Amostra	Ensaio		
		Difração de raios X	Porosimetria	Absorção de água
1	PT-VO-A5			
	PT-VO-A6			
	PT-VO-A7			
	PT-VO-A8			
	PT-VO-A9			
	PT-VO-SI1			
	PT-VO-SI2			
	PT-VO-A3-F1*			
	PT-VO-A3-F4*			

²⁰ **Catálogo de cores NCS.** Disponível em: <<http://tintasepintura.blogspot.com/2009/02/cores-ncs.html>>. Acesso em: 15 set 2010. Vale ressaltar que podem existir alguma diferenciação do catálogo digital utilizado da versão impressa.

Caso	Amostra	Ensaio		
		Difração de raios X	Porosimetria	Absorção de água
2	PT-AS-A3			
	PT-AS-A5			
	PT-AS-A6			
	PT-DAS-AS-A1			
	PT-DAS-Z1-A1			
	PT-DAS-Z1-A3			
	PT-AS-SI1			
	PT-AS-SI2-F1			
	PT-AS-SI3-F2			
3	PT-SO-A1			
	PT-SO-A3-F1			

* Amostras originadas de uma mesma placa (PT-VO-A3)

3.2.2.1 Difração de raios X

O uso da técnica de difração de raios X permite a caracterização mineralógica do material. A amostra deve estar pulverizada para que sejam incididos os raios X. A difração desses raios ocorre quando entram em contato com os cristais do material, gerando um difratograma.

Para a análise foi utilizado um difratômetro marca Siemens, modelo D5000. A fonte geradora dos raios-X foi um tubo de cobre (anodo), cujo comprimento de onda principal é $K\alpha$ 1,5418 Å. As amostras foram analisadas sob voltagem 40 kV e amperagem de 30 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,05°/s, em uma faixa de detecção de 3° a 70° em 2θ .

As amostras de azulejo (biscoito e esmalte) foram submetidas à moagem prévia em moinho orbital até a sua total moagem (100% passante na peneira 325 mesh – 0,043 mm) com o objetivo de obter material representativo de granulação bem fina. Concluída essa etapa, parte do material foi analisada no Difratômetro de Raios-X, pelo Método do Pó Não-Orientado (Análise Integral).

As interpretações foram realizadas em computador acoplado ao difratômetro, utilizando-se o Software EVA, versão 2009, com banco de dados de 2009 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

3.2.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio consiste na aplicação de uma força externa para que o mercúrio penetre nos capilares da substância porosa. É necessário que esta força seja superior a tensão superficial do mercúrio e supere o ângulo de contato entre o mercúrio e o material (GOUVEA, 2009). A Equação 3.1 mostra um cálculo básico de porosimetria.

$$D = \frac{-4\gamma\cos\theta}{P} \quad (3.1)$$

Onde:

D é o tamanho do poro;

γ é a tensão superficial;

θ é ângulo de contato; e

P é pressão externa.

A relação entre o tamanho dos poros e a pressão externa é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o tamanho dos poros maior a pressão necessário para permitir a intrusão do mercúrio nos poros.

Para a realização do ensaio utilizou-se o porosímetro modelo Pore Master da marca Quanta Chrome, o qual está ilustrado na Figura 3. 5. O programa utilizado para o processamento de dados foi o Quantachrome Poremaster para Windows® Data Report versão 5.10. O objetivo da realização do ensaio foi a determinação da distribuição dos tamanhos dos poros, do diâmetro médio dos poros e da porosidade total da amostra.

Foram utilizadas para a realização do ensaio 3 amostras de azulejos para o Caso 1 e uma amostra para o Caso 2 e outra para o Caso 3. Vale ressaltar que as amostras eram de fragmentos de azulejos constituídos por biscoito e esmalte

As amostras de azulejos foram cortadas a fim de ter suas dimensões reduzidas para aproximadamente 0,7 cm x 0,6 cm x 2,3 cm. A cortadeira de precisão utilizada foi amodelo Minitom da marca Struers. Durante o corte foi utilizada a água, visando reduzir o atrito. Após esta etapa, as amostras foram secas em estufa à 40°C até atingirem massa constante e, posteriormente, armazenadas em dessecador com sílica gel.

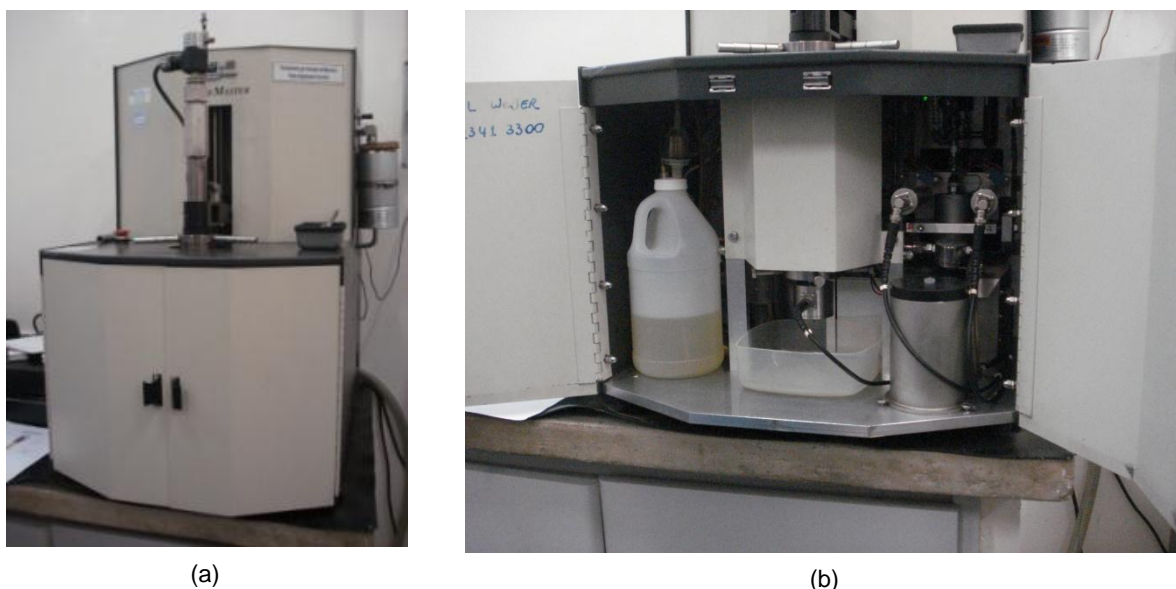


Figura 3. 5 – Porosímetro modelo Pore Master da marca Quanta Chrome utilizado no ensaio: (a) vista geral e (b) vista do seu interior.

Inicialmente foram realizadas várias medições de massa em balança de precisão de sensibilidade de 0,01g, modelo AS5500C da marca Marte. A primeira delas foi a medição de massa seca das amostras. Em seguida, foi realizada a medição do conjunto composto pelo penetrômetro e azulejo. Após esse procedimento, o penetrômetro com amostra de azulejo foi inserido no porosímetro, como ilustrado na Figura 3. 6, onde esse é submetido a vácuo e, em seguida, preenchido com mercúrio. Por fim, é realizada a medição de massa do conjunto formado pela amostra, penetrômetro e mercúrio.

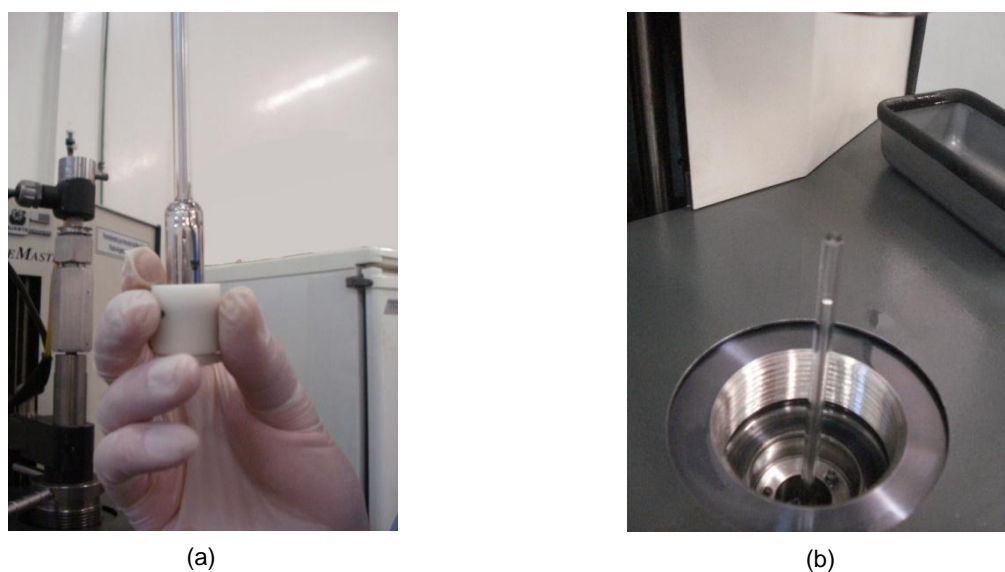


Figura 3. 6 – Penetrômetro com a amostra de azulejo: (a) vista antes e (b) vista depois de ser inserido no porosímetro.

O conjunto formado pelo penetrômetro, amostra e mercúrio é inserido novamente no porosímetro para continuidade do ensaio. É introduzido óleo pela haste do penetrômetro fazendo com que o mercúrio seja pressionado. A pressão é aumentada paulatinamente de modo a provocar a intrusão do mercúrio na amostra. A leitura da intrusão é realizada e, em seguida, é realizada a extrusão do mercúrio, ocasionada pela diminuição gradativa da pressão. Por fim, os dados são processados no programa do porosímetro.

3.2.2.3 Absorção de água total por fervura e absorção de água ao longo do tempo

O ensaio de absorção de água dos azulejos foi realizado de acordo com a NBR 13818 (ABNT, 1997b), entretanto, não foi seguida a quantidade de corpos-de-prova estabelecidos por essa, uma vez que o grupo de amostras históricas é reduzido.

Para manter os azulejos em posição vertical dos azulejos, conforme prescrito na norma, foram utilizadas ligas de borrachas presas num suporte metálico apoiado no fundo do recipiente. A Figura 3. 7 ilustra a o ensaio de absorção por fervura.

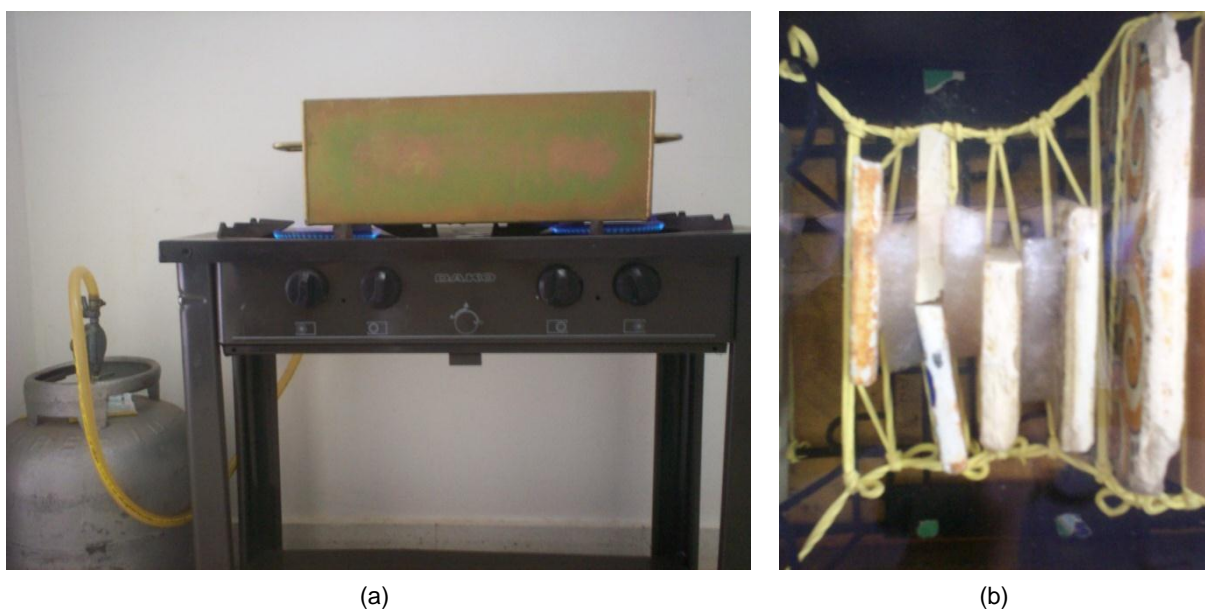


Figura 3. 7 – Ensaio de absorção de água por fervura dos azulejos: (a) realização do ensaio e (b) detalhe da estrutura criada para que os azulejos fossem mantidos na posição vertical dentro do recipiente.

Diferentemente do ensaio de absorção, o ensaio de absorção ao longo do tempo não é normalizado. Este ensaio consiste em monitorar ao decorrer do tempo o acréscimo de

massa da amostra à medida que esta absorve a água. O monitoramento deve ocorrer até a estabilização da massa da amostra.

Foram ensaiadas as 19 amostras de azulejo existentes, conforme indicado na Tabela 3.2.

Os azulejos foram secos em estufa a 110°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) até atingirem constância de massa. Posteriormente, esses foram armazenados em dessecador com sílica gel. Após o resfriamento das amostras deu-se início a realização do ensaio.

Inicialmente mediu-se a massa da amostra seca em balança de precisão. Em seguida as amostras foram colocadas no recipiente metálico, cujas dimensões são 18 cm x 20 cm x 50 cm, previamente preenchido com água destilada.

As medições de massa da amostra foram realizadas a cada um minuto durante os dez primeiros minutos. Posteriormente, foram realizadas medições ao completar 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos após a submersão do azulejo na água. Sempre antes de ser realizada a medição o azulejo passava-se levemente uma flanela, a fim de eliminar o excesso de água na sua superfície. A absorção obtida em cada um desses tempos foi calculada em porcentagem, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$Abs = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

Abs = absorção de água (%);

Mt = massa obtida em determinado tempo (g); e

mi = massa inicial (g).

3.2.3 Caracterização das argamassas históricas

Elsen (2006) fez uma revisão das técnicas existentes de caracterização de argamassas históricas. Segundo o autor, até 1970–1980 a caracterização de argamassas históricas baseou-se principalmente nas tradicionais análises químicas úmidas, mas a interpretação desses resultados se mostrava difícil, sendo necessário um bom conhecimento da natureza dos componentes da argamassa. Posteriormente foi proposta a utilização de técnicas de difração de raios X e microscopia óptica, para esta finalidade. Devido à complexidade de composição dos revestimentos de argamassas, atualmente várias técnicas e métodos de análise são utilizados em conjunto, uma vez que as informações obtidas por uma técnica complementam a outra e assim por diante.

Nesta pesquisa para a caracterização das argamassas históricas foi realizada a difração de raios X (DRX), a análise petrográfica, a análise termogravimétrica (TG) e a reconstituição de traço. Também foram realizadas avaliações da profundidade carbonatada e de absorção de água e coeficiente de capilaridade das amostras de argamassas. Os métodos desses ensaios são abordados a seguir.

Na Tabela 3. 3 estão apresentadas as amostras de argamassas históricas de acordo com o tipo de ensaio.

Tabela 3. 3 – Amostras de argamassas históricas ensaiadas por tipo de ensaio.

Caso	Amostra	Ensaio					
		DRX	Análise Petrográfica	TG	Reconstituição de traço	Absorção de água e coeficiente de capilaridade	Carbonatação
1	Várias						
	PT-VO-A6						
	PT-VO-A8						
	PT-VO-A9						
2	Várias						
	PT-AS-ZI-A1						
	PT-AS-SI2						
	PT-AS-SI3						
3	PT-SO-A2						
	PT-SO-A3						

3.2.3.1 Difração de raios X

A análise qualitativa por difração de raios x foi realizada tanto no laboratório de Furnas como no laboratório do IPT, portanto, a seguir são apresentadas as metodologias utilizadas em cada um dos locais.

a. Metodologia do ensaio realizado em Furnas

Além da metodologia já descrita no item 3.2.1.1, foram realizadas outras análises referentes à fração argilosa, as quais estão descritas a seguir.

Posteriormente a conclusão da Análise Integral, procedeu-se à separação por sedimentação em coluna da fração argila dessas amostras, seguida por montagem em vidro de três lâminas orientadas para cada registro, ou seja, apenas com deslizamento de uma lâmina

sobre à que contém a “lama” para orientação. Nessas lâminas, fez-se uma Análise Natural (apenas com secagem ao ar), uma após saturação com etileno-glicol em dessecador, colocado sobre chapa aquecida a 50°C, por 12 horas, para garantir a completa saturação da atmosfera interna e, assim, possibilitar a identificação dos argilominerais expansivos, caso existissem. Após a retirada das amostras do dessecador, elas foram levadas imediatamente ao difratômetro de raios-X para análise (Análise Glicolada). Outro tratamento dado às amostras foi a calcinação da “fração argila” a 550°C, por 3 horas (Análise Calcinada). Essa análise serve para indicar a presença de minerais que passam por retração de sua estrutura em tais condições (caulinita, gibbsita, goethita, entre outros).

b. Metodologia do ensaio realizado no IPT

A análise realizada no IPT seguiu o procedimento CT-OBRAS-LMCC-P-PE 008 "Análise mineralógica por difratometria de raios-X". Vale ressaltar que o ensaio foi realizado no material passante na ABNT N.º 100 (0,150 mm).

3.2.3.2 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi realizada no IPT seguindo as diretrizes gerais da ASTM E 794/01²¹. Para tanto, utilizou-se o equipamento TA *Instruments* SDT 2960, empregando-se cadinho de alumina (volume de 110 µ) sem tampa; com fluxo de gás de 60 mL/min de argônio e taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C.

O ensaio foi realizado no material passante na peneira ABNT N.º 200 (0,075mm), após fracionamento e separação majoritária da fração agregado.

3.2.3.3 Análise petrográfica

A análise petrográfica foi realizada no IPT, utilizando o procedimento CT-OBRAS-LMCC-P-PE-001 "Análise petrográfica"²². A seguir estão apresentadas algumas informações da metodologia do ensaio de acordo com dados cedidos pelo IPT.

²¹ASTM: American Society for Testing and Materials. **E794**. Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis. Philadelphia, 2001.

²²Procedimento elaborado com base em diretrizes gerais da norma ASTM C 856/95 e em Oliveira *et al.* (1999).

ASTM: American Society for Testing and Materials. **C856 - 11**. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. Philadelphia, 1995.

OLIVEIRA, M. C. B., NASCIMENTO, C. B., CINCOTTO, M. A. Microestrutura de argamassas endurecidas: uma contribuição da petrografia. Montevideo, Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. **Anais**. 1999, p.227-234.

Primeiramente foi extraído de cada amostra um bloquete de dimensões centimétricas, que foi impregnado, a vácuo, com resina epóxi e corante azul. Após a secagem em estufa (a 60°C, por 24 h), o corpo-de-prova foi lixado e colado em lâmina de vidro e após cortado novamente (espessura de ± 2 mm). Posteriormente o material foi desgastado e lixado até atingir a espessura de 30 μm , sendo então coberto com lamínula de vidro e reservado para o estudo.

As análises petrográficas foram executadas com o auxílio de uma lupa estereoscópica e de um microscópio petrográfico, marca Carl Zeiss, sob luz transmitida e ilustradas com fotomicrografias. A identificação dos minerais foi baseada nas suas características ópticas, conforme descritas por Kerr (1959)²³, e Winchell e Winchell (1951)²⁴.

3.2.3.4 Reconstituição de traço

A reconstituição de traço das argamassas históricas, realizada pelo IPT, se baseou nos resultados obtidos pela análise química. Algumas referências foram consideradas para essa análise, que estão apresentadas a seguir:

- Umidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel, anidrido silícico (SiO_2), óxidos de ferro e alumínio (R_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3): Procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-042 "Concreto e Argamassa - Reconstituição de traço"²⁵,
- Anidrido carbônico (CO_2): NBR-NM 20/09 "Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria" - Método de descarbonatação térmica (referência), item 6.2: CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-011.

A partir dos resultados de análise química das argamassas, foram calculados os constituintes percentuais, traços e relações aglomerante/agregado, em massa. Para o cálculo, foram considerados os materiais de referência indicados na Tabela 3. 4 e os seguintes parâmetros:

²³KERR, P. F. 1959. **Optical Mineralogy**. MacGraw-Hill. New York. 422 p.

²⁴WINCHELL, A. N.; WINCHELL, H. 1951. **Elements of Optical Mineralogy**- An Introduction to Microscopic Petrography, part II - description of minerals. John Wiley & Sons. New York. 4 ed. 511p.

²⁵Procedimento elaborado com base em diretrizes gerais do método de ensaio apresentado em:

QUARCIONI, V. A. **Reconstituição de traço de argamassas: atualização do Método IPT**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998, 188 p.; e

Método "Reconstituição do traço do concreto". Métodos de análises químicas adotados no IPT. Boletim... São Paulo: IPT, setembro 1940, n.º 25, p. 75-84.

- a. resíduo insolúvel em ácido clorídrico representa o teor de agregado (areia) e a fração solubilizada representa o(s) aglomerante(s) presente (s).
- b. no caso da "Argamassa PT – Caso 1":
- o teor de cal hidráulica calculado a partir do teor de anidrido silícico (SiO_2) da argamassa, expresso na base não volátil, adotando-se uma cal hidráulica como parâmetro de referência;
 - o teor de sulfato de cálcio (CaSO_4), proveniente do gesso de construção- $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ - calculado a partir do anidrido sulfúrico (SO_3) da argamassa, expresso na base não volátil, descontando-se o SO_3 proveniente da cal hidráulica e considerando-se desprezível o teor de SO_3 presente na cal hidratada. Essa premissa foi adotada uma vez que o teor de SO_3 presente nessa argamassa é superior ao esperado.
 - o teor de cal calculado a partir do teor de óxido de cálcio (CaO) da argamassa, expresso na base não volátil, adotando-se uma cal hidratada dolomítica como parâmetro de referência e descontando-se o teor de CaO proveniente da cal hidráulica e do gesso de construção;
- c. no caso da "Argamassa PT – Caso 2":
- o teor de cal hidráulica calculado a partir do teor de anidrido silícico (SiO_2) da argamassa, expresso na base não volátil, adotando-se uma cal hidráulica como parâmetro de referência;
 - o teor de cal calculado a partir do teor de óxido de cálcio (CaO) da argamassa, expresso na base não volátil, adotando-se uma cal hidratada dolomítica como parâmetro de referência e descontando-se o teor de CaO proveniente da cal hidráulica e do gesso de construção;
- d. no caso da "Argamassa PT – Caso 3" o teor de cal hidráulica calculado a partir do teor de anidrido silícico (SiO_2) da argamassa, expresso na base não volátil, adotando-se uma cal hidráulica como parâmetro de referência.

Tabela 3. 4 – Constituintes dos materiais de referência utilizados no cálculo.

Material	Base original (%)					Base não volátil (%)			
	PF	SiO_2	CaO	MgO	SO_3	SiO_2	CaO	MgO	SO_3
Cal hidráulica	17,4	13,9	59,2	1,47	1,35	16,8	71,7	1,78	1,63
Cal hidratada dolomítica	27,4	---	39,6	27,8	---	---	54,6	38,29	---

3.2.3.5 Absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e absorção total por imersão

Para a determinação da absorção de água e coeficiente de capilaridade foi utilizada a NBR 15259 (ABNT, 2005g) como referência, entretanto, algumas modificações foram realizadas, as quais são apresentadas na sequência.

As amostras analisadas foram a PT-VO-A8 e PT-VO-A9 do Caso 1. Os outros casos não possuíam amostras de argamassa para a realização deste ensaio.

As amostras de argamassa foram colocadas em estufa à temperatura média de 50°C durante tempo superior a 48 horas. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em dessecador com sílica gel.

A norma indica que os corpos de prova devem ficar suspensos por um anteparo de modo que a altura da lâmina de água seja constantemente de 5 mm (± 1) acima da face de contato. A norma não padroniza, entretanto, como seria esse anteparo. Devido à forma irregular das amostras de argamassas históricas, foram utilizadas fôrmas de isopor, as quais se adequassem ao formato específico de cada amostra. As fôrmas foram elaboradas de forma que o seu comprimento coincidissem com a largura do recipiente, de forma que, as primeiras ficassem suspensas, conforme apresentado na Figura 3. 8. Buscou-se posicionar as amostras de forma que seu contato fosse mínimo com o fundo do recipiente.



Figura 3. 8 – Adequação do anteparo de isopor para execução do ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) vista lateral e (b) vista superior do recipiente.

Antes de iniciar o ensaio, foi realizada a medição da massa seca das amostras. As amostras foram colocadas no recipiente e, só então, foi adicionada água destilada nesse até a altura

de 5 mm. Como indicado na norma, ao longo da execução buscou-se manter a coluna de água constante.

As medições da massa de absorção de água por capilaridade foram realizadas ao completar 1, 2, 3, 4, 5, 10, 30 e 90 minutos. A norma, entretanto, indica apenas duas determinações aos 10 e 90 minutos. A balança utilizada no ensaio é a modelo AS5500C da marca Marte, com capacidade de carga máxima 500 g e sensibilidade de 0,01 g.

Para o cálculo da absorção de água por capilaridade, além dos valores de massa inicial e massa do corpo-de-prova em determinado tempo, é necessário informar a área da superfície de contato. Pelo fato das argamassas serem amorfas, optou-se por fazer uma marcação com caneta no perímetro da região, onde correspondia ao contato da altura de 5 mm da lâmina de água. Após essa marcação, fez-se o registro fotográfico desse perímetro juntamente com uma régua. A imagem foi inserida no programa Autocad, colocada na escala e, após o contorno da linha do perímetro, foi possível, por fim, obter a área. Este valor, portanto, é aproximado. A Figura 3. 9 ilustra este processo de obtenção da área das amostras.

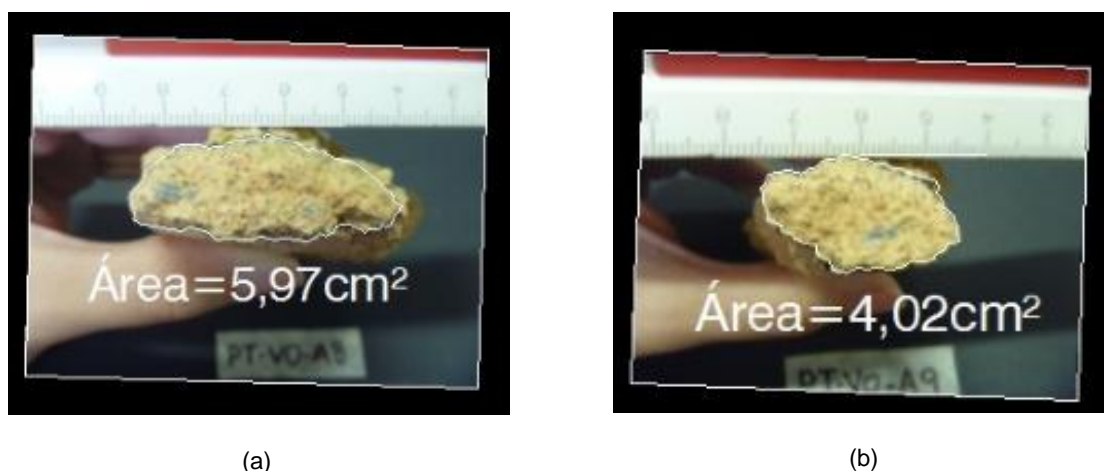


Figura 3. 9 – Forma utilizada para o cálculo da área da superfície de contato na altura referente a 5 mm da lâmina de água no programa Autocad: (a) amostra PT-VO-A8 e (b) amostra PT-VO-A9.

Tanto o cálculo da absorção de água como a forma de obtenção do coeficiente de capilaridade foi obtido de acordo com a norma.

Outra análise realizada foi o cálculo de absorção total. Para tanto, posteriormente a medição de massa das amostras aos 90 minutos, foi acrescentada mais água ao recipiente para que as amostras ficassem completamente submersas. Após 24 horas de submersão foi realizada a medição de massa. A Figura 3. 10 ilustra o ensaio de absorção total.



Figura 3. 10 – Ensaio de absorção total nas argamassas do Caso 1: (a) vista lateral e (b) vista superior do recipiente.

O cálculo da absorção total foi obtido a partir da fórmula apresentada a seguir.

$$A_T = \frac{m_0 - m_t}{m_t} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

A_T é a absorção total da argamassa em porcentagem;

m_0 é a massa inicial (g); e

m_t é a massa do corpo-de-prova em determinado tempo (g).

3.2.3.6 Carbonatação

Lawrence (2006) apresenta em sua tese uma série de métodos para avaliar a carbonatação em argamassas. O mais usual é o método de pulverizar com fenolftaleína uma superfície recentemente fraturada da argamassa. A fenolftaleína é um indicador que muda de incolor para rosa em PH entre 8,3 e 10. Portanto, caso a argamassa apresente mancha rosa, isso indica que aquela região não foi carbonatada, uma vez que a portlandita se caracteriza por ser alcalina. Segundo o autor, a implicação normalmente extraída dessa análise é que existe uma fronteira nítida entre o material carbonatado e o não-carbonatado. Da diferença entre essas regiões é possível medir a profundidade de carbonatação.

Nesta pesquisa, foi analisada a carbonatação pela aspensão de fenolftaleína sobre as superfícies recentemente fraturadas de apenas uma amostra de argamassa histórica do Caso 1, a PT-VO-A6. Se apresentassem regiões não carbonatadas seria medida a sua profundidade carbonatada.

3.2.4 Estudo da interface

A interface entre o azulejo e argamassa de cal histórica foi avaliada pela determinação da área de aderência de argamassa no tardo do azulejo, pelo ensaio de resistência de aderência à tração, pelo estudo da extensão de aderência e da microestrutura da argamassa. A descrição dessas análises está apresentada na sequência.

Na Tabela 3. 5 estão dispostas as amostras de azulejo com argamassa históricas analisadas de acordo com o tipo de ensaio.

Tabela 3. 5– Amostras de azulejo com argamassa históricas ensaiadas por tipo de ensaio.

Caso	Amostra	Ensaio			
		Área de aderência de argamassa no tardo	Extensão de aderência - lupa estereoscópica	Resistência à aderência à tração	Microestrutura – MEV
1	PT-VO-A3				
2	PT-DAS-Z2-A4				
	PT-AS-SI2				
	PT-AS-SI3				
3	PT-SO-A1				
	PT-SO-A2				
	PT-SO-A3				

3.2.4.1 Determinação da área de aderência de argamassa no tardo do azulejo

Para a determinação da área de aderência de argamassa no tardo do azulejo, fez-se primeiramente uso dos registros fotográficos do tardo do azulejo. Inserindo essas imagens no programa Autocad, contornou-se as regiões analisadas e o perímetro do azulejo, como pode ser observado na Figura 3. 11 (a), então, obteve-se suas áreas.

Além da determinação da área de aderência, foram determinadas as regiões do tardo que possuíam argamassa aderida. Nesse sentido, foram definidos nove quadrantes, a partir do perímetro dos azulejos, para identificação das zonas com argamassa aderida.

Na Figura 3. 11 (b) pode-se observar essas divisões, cujas denominações são: Lateral esquerda superior (LES); Lateral esquerda central (LEC); Lateral esquerda inferior (LEI); Central superior (CS); Central (C); Central inferior (CI); Lateral direita superior (LDS); Lateral direita central (LDC) e Lateral direita inferior (LDI).

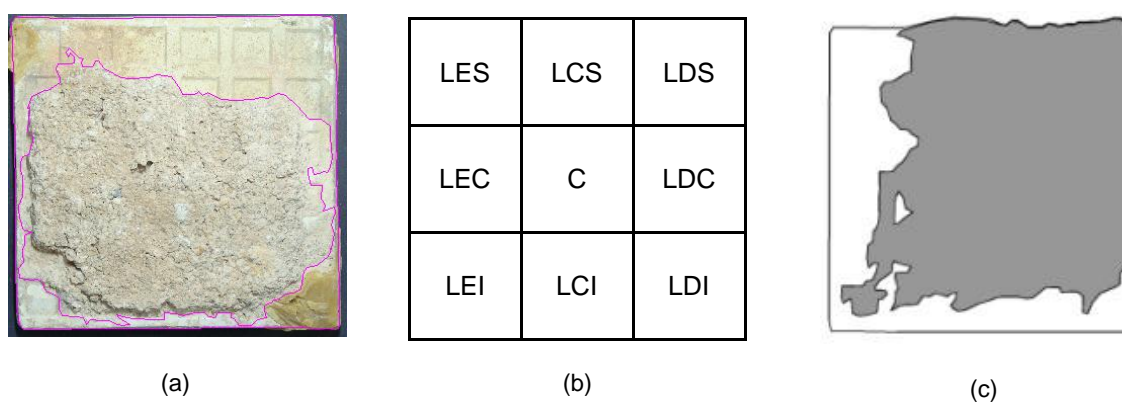


Figura 3. 11 – (a) Delimitação da área de argamassa aderida e (b) divisão das nove zonas de aderência e (c) posicionamento da amostra para análise das zonas de argamassa aderida.

Antes de fazer a quantificação de azulejos que possuíam argamassa aderida em determinada zona, foi padronizado que a amostra seria posicionada de modo que sua maior concentração de argamassa estivesse localizada na região superior direita, conforme ilustrado na Figura 3. 11 (c). Foi necessário estabelecer essa referência, pois a mudança de posição da amostra influencia diretamente na quantificação de argamassa por quadrante. Desta forma, foi possível tanto quantificar com maior constância a argamassa no tardo, quanto visualizar a existência de um padrão no desenho desta, sem, no entanto, isto representar a situação real como as placas estavam aplicadas na fachada uma vez que a posição exata das placas nas paredes não é conhecida.

3.2.4.2 Avaliação da extensão de aderência na lupa estereoscópica

A avaliação da extensão de aderência consiste na observação da interface das amostras coletadas na lupa estereoscópica da Leica modelo MZ12.5, a qual possui: capacidade máxima de magnificação de 640x, escala micrométrica e câmera digital colorida Leica EC3.

A Figura 3. 12 mostra a forma como as amostras de revestimento cerâmico histórico foram analisadas na lupa.

A partir das 6 amostras de azulejos com argamassa analisadas foram geradas 21 amostras menores de secções planas de azulejos com argamassa, sendo que cada amostra possuía duas faces possíveis de serem analisadas.

Para a análise de extensão de aderência foram escolhidas 12 amostras de azulejo com argamassa, sendo consideradas 6 faces por caso, o que gerou no total 18 faces analisadas. Durante a seleção das amostras buscou-se escolher aquelas cujas secções transversais apresentassem tanto a irregularidade do desenho da muratura do tardo como a argamassa ao longo da secção.

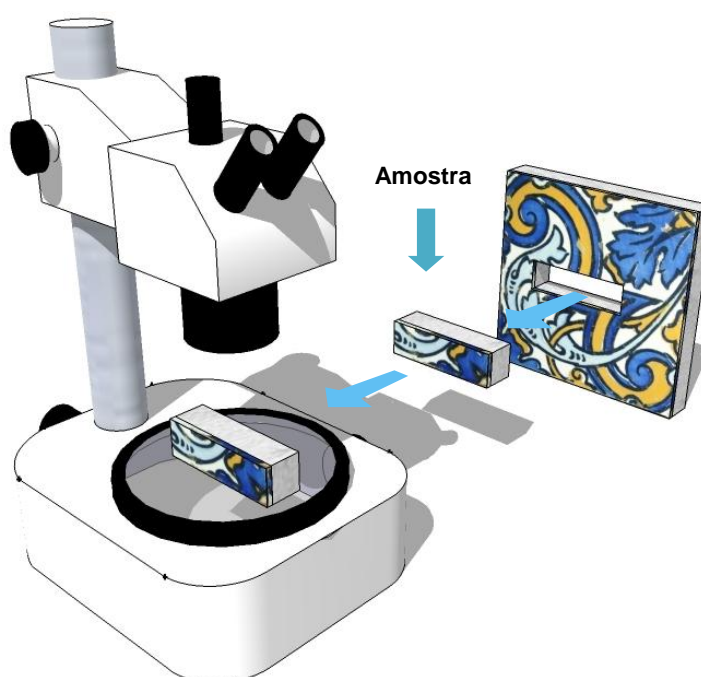


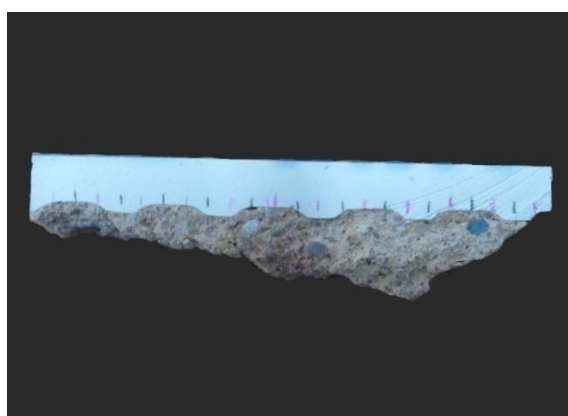
Figura 3. 12 – Forma de análise das amostras na lupa estereoscópica.

As amostras de azulejo com argamassa foram seccionadas na cortadeira de precisão modelo Minitom da marca Struers, ilustrada na Figura 3. 13, utilizando terebentina ou solução de cal e água (10% de cal), de modo a obter secções transversais planas e lisas com cerca de 7,5 cm de comprimento e 1,5 cm de largura. Dentre os casos analisados, apenas no Caso 2 algumas amostras de azulejos com argamassa apresentaram dificuldades para serem cortadas, tais como, a perda de aderência da argamassa ao tardo do azulejo.



Figura 3. 13 – Cortadeira de precisão modelo Minitom da marca Struers.

Posteriormente a redução dimensional das amostras, foram marcados riscos, de cores alternadas e com espaçamento de 3 mm entre eles, no biscoito do azulejo próximo da região de interface, com o objetivo de facilitar e evitar equívocos no levantamento dimensional para a análise de extensão de aderência, conforme ilustrado na Figura 3. 14. Após esses procedimentos as amostras foram encaminhadas à lupa estereoscópica.



(a)



(b)

Figura 3. 14 – Secção plana transversal da amostra com riscos alternados (a) amostra PT-VO-A3-F2-1 do Caso 1 e (b) amostra PT-SO-A2-F3-3 do Caso 3.

Foi realizado o registro fotográfico a cada extensão de 3 mm ao longo da interface azulejo/argamassa de todas as amostras na lupa estereoscópica. As imagens obtidas foram

processadas no programa Leica *Application Suite*, LAS-EZ, versão 1.8. Neste programa, primeiramente, foram realizadas as medidas de toda extensão do tardo possível de ser aderida pela argamassa e depois as medidas das áreas que não possuíam argamassa aderida. Os valores obtidos em cada imagem de determinada amostra foram somados no final.

O cálculo da extensão de aderência, a partir dos dados coletados, foi obtido utilizando a metodologia proposta por Carasek (1996) através da razão entre a extensão de fato aderida e a extensão da superfície possível de ser aderida da amostra.

$$A = \frac{Lt - Lv}{Lt} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

A é a porcentagem de argamassa aderida ao tardo;

Lt é o comprimento total da amostra; e

Lv é o comprimento dos locais sem aderência.

3.2.4.3 Determinação da resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração nos revestimentos cerâmicos históricos teve como parâmetro a NBR 14084 (ABNT, 2005e), a qual trata desse ensaio referente à argamassa colante para assentamento de placas cerâmicas. Algumas adaptações foram realizadas, tais como, número de corpos-de-prova, idade do ensaio, dimensões da amostra, entre outros, que não se enquadravam dentro do contexto das amostras ensaiadas. O dinamômetro de tração utilizado é o modelo 3102 da marca Alfa Instrumentos.

Para o ensaio de resistência de aderência à tração foram utilizadas 17 amostras cortadas para a análise na lupa, as quais possuíam aproximadamente 7,5 cm de comprimento por 1,5 cm de largura. Essas amostras precisaram ter sua maior dimensão reduzida a 5 cm para ser utilizada no ensaio de resistência de aderência. Para tanto, foi utilizado um disco de corte diamantado (makita).

Inicialmente foi realizado a limpeza do substrato padrão, da superfície esmaltado do azulejo e das pastilhas metálicas quadradas de 5 cm de lado, a fim de remoção de partículas soltas.

Após esse procedimento, as amostras de azulejo com argamassa foram coladas no substrato-padrão. Após o período de secagem da cola, foi aplicada a cola na superfície da pastilha a qual, posteriormente, foi pressionada sobre a superfície esmaltada do azulejo.

Procurou-se posicionar a pastilha de forma centralizada em relação à amostra. A Figura 3. 15 (a) mostra a configuração do corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.

Após a secagem da cola, o equipamento foi montado e seu eixo regulado de forma totalmente ortogonal ao plano do revestimento. Para tanto, foi utilizado um nível de bolha para verificar se a base do equipamento estava na mesma inclinação da superfície do corpo-de-prova. Caso não estivesse, era colocado um calço abaixo da base do equipamento para que fosse mantida a mesma inclinação, conforme ilustrado na Figura 3. 15 (b).

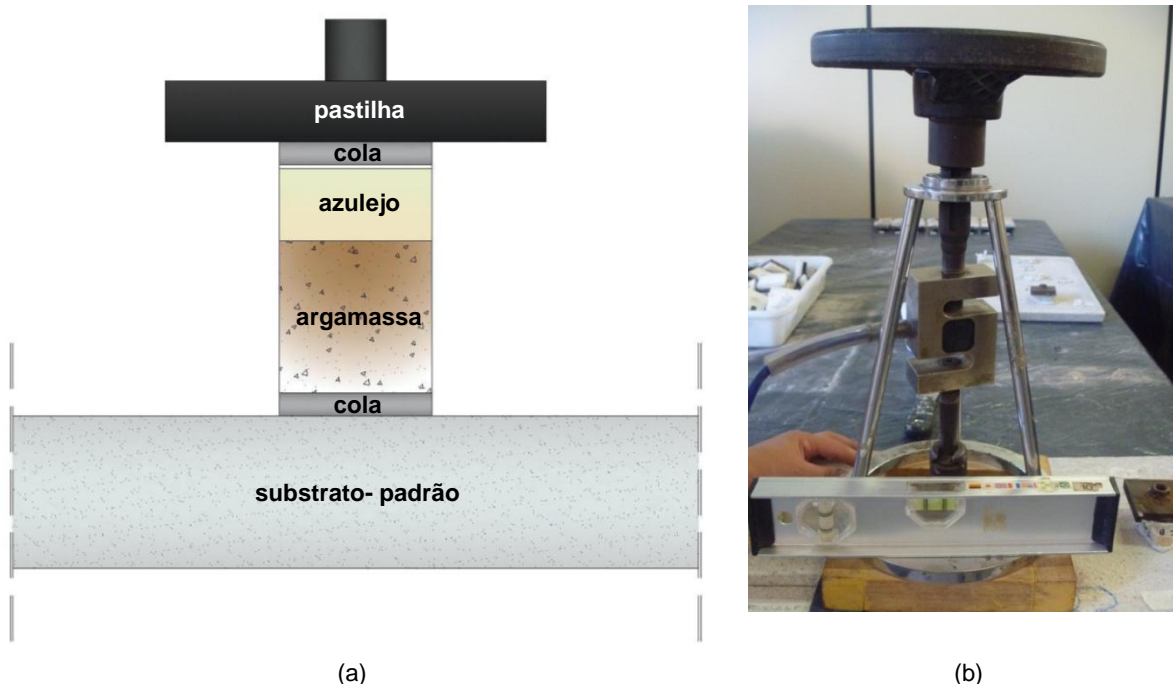


Figura 3. 15 – (a) Configuração do corpo-de-prova de aderência de revestimento cerâmico histórico pronto para ser ensaiado e (b) nivelamento do equipamento de modo que o eixo do equipamento ficasse ortogonal em relação superfície do corpo-de-prova.

Antes da aplicação da carga, verificava-se se não havia flutuação do dispositivo de leitura. Após esse procedimento o esforço de tração foi aplicado até a ruptura do corpo-de-prova. Em seguida, as cargas e a porcentagem de ruptura foram anotadas. A tensão de resistência à aderência foi obtida através da seguinte fórmula:

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Onde:

T é a tensão (MPa);

F é a força de ruptura (N); e

A é a área da seção de aplicação da força (m²).

Quando a porcentagem de ruptura era diferente de 100% (um único tipo), a obtenção da porcentagem de argamassa aderida no tardo do azulejo foi realizada no programa Autocad. Para tanto, primeiramente foi realizado o registro fotográfico da superfície do tardo após a ruptura. Em seguida, as imagens foram inseridas no programa, contornadas as regiões com argamassa e, posteriormente, foram obtidas suas áreas.

Conforme proposto por Carasek (1996), na análise de resultados do ensaio de resistência de aderência à tração foram considerados os valores de resistência potencial, que são os maiores valores obtidos. Nesta pesquisa foram considerados os 3 maiores valores de cada argamassa para a análise de dados.

O uso da resistência potencial é justificado pela premissa de que não há no procedimento de execução do ensaio nenhuma ação que vá aumentar os valores de resistência e, ao contrário, o que comumente ocorre são falhas nesse procedimento que reduzem esses valores. A fragilidade da argamassa e as inadequações realizadas durante a execução do ensaio ocasionam uma alta variabilidade dos resultados (CARASEK, 1996).

3.2.4.4 Avaliação da microestrutura no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A avaliação da microestrutura da argamassa constituiu na observação de amostras no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O objetivo desta análise é identificar e observar a morfologia dos produtos existentes na argamassa.

Para a análise das amostras no MEV foi utilizado o equipamento Jeol JSM-6610, ilustrado na Figura 3. 16, o qual possui capacidade máxima de magnificação de 300.000x.

As imagens utilizadas para avaliação da morfologia do material foram obtidas através de sinais de elétrons retroespalhados (BSE) e elétrons secundários (SE). Essas imagens foram processadas no programa Jeol *Scanning Electron Microscope*, versão 2.2.4. Além da obtenção de imagens de microestrutura da argamassa, foram realizadas microanálises químicas, com a adoção ao microscópico do detector de Raios X por espectrômetro de

dispersão de energia (EDS). Para esta finalidade, utilizou-se o programa Nss 2.3 da *Thermo Scientific*.

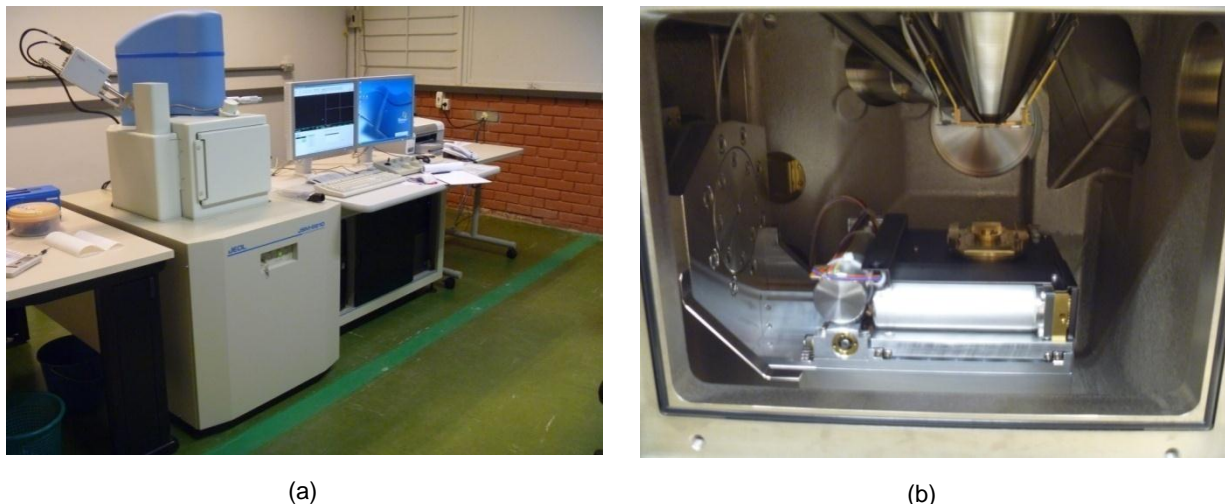


Figura 3. 16 – Microscópio eletrônico de Varredura Jeol JSM-6610 do LAMMAR: (a) imagem geral e (b) imagem do seu interior.

Foram analisadas apenas uma amostra de argamassa histórica por caso, que são: PT-VO-A3 do Caso 1, PT-AS-SI2 do Caso 2 e PT-SO-A2 do Caso 3.

Para a análise do MEV foram utilizados pedaços fraturados de azulejo com argamassa ou apenas de argamassa de dimensões de aproximadamente 2 cm X 2 cm X 1 cm.

Após a adequação do dimensionamento das amostras, essas foram colocadas na estufa, onde permaneceram por tempo superior a 48 horas a uma temperatura de $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Depois do período de secagem, as amostras foram armazenadas no dessecador com sílica gel e cal sodada, as quais absorvem umidade presente no recipiente.

Antes da amostra ser colada ao porta-amostra (“*stub*”), este passa por várias etapas de limpeza. Inicialmente, a limpeza foi realizada utilizando bucha, água e detergente. Em seguida este foi seco com papel toalha e, na sequência, toda a superfície do porta-amostra foi limpa com acetona e, posteriormente, isopropanol. Depois desse procedimento, a amostra foi colada no porta-amostra com dupla-face.

Visando intensificar a condutividade termo-elétrica, aplicou-se com pincel uma tinta prata sobre e entre a base do porta-amostra e o topo da amostra, de modo a estabelecer o contato elétrico entre eles. Após a secagem da tinta, o porta-amostra foi inserido no

equipamento *Sputtering*, modelo *Desk V*, da *Danton Vacuum*, para a etapa de metalização conforme ilustrado na Figura 3. 37. É necessário revestir as amostras com uma fina película de material condutivo, pois os materiais analisados possuem baixa condutividade térmica e elétrica. O processo de metalização visa impedir a formação de cargas eletrostáticas prejudiciais à qualidade das imagens e favorecer a dissipação de calor formado pelo bombeamento eletrônico. No caso específico foi depositada uma fina película de ouro sobre a amostra. O processo de metalização só inicia após o estabelecimento de vácuo no equipamento. O ouro sólido é transformado em plasma, através de uma tela com diferença de potencial localizado entre o ouro e o porta-amostra. Depois desta transformação o material é finalmente aplicado sobre a superfície da amostra.

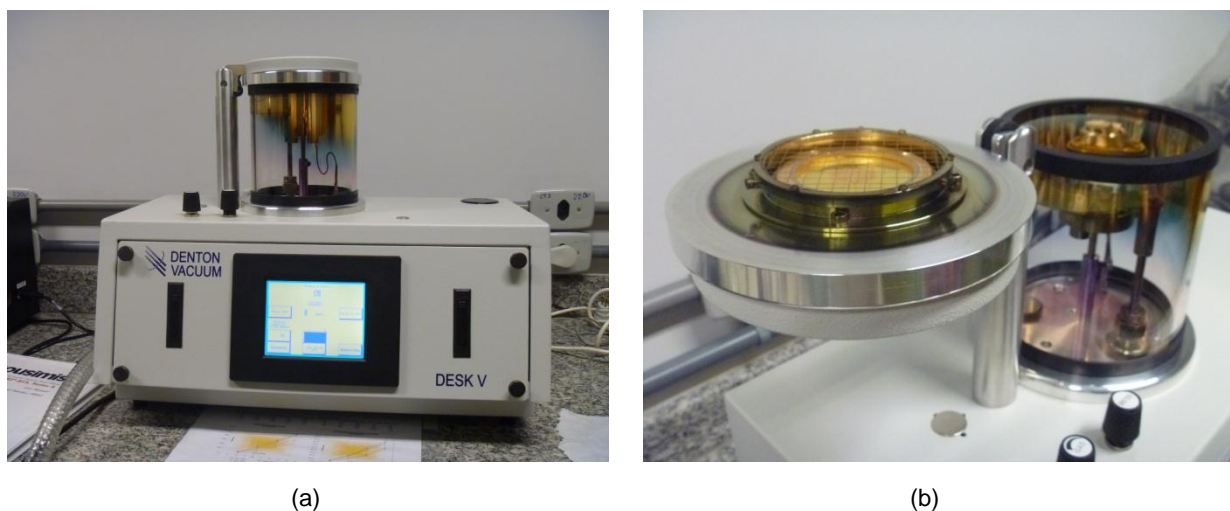


Figura 3. 17– Equipamento *Sputtering*, modelo *Desk V*, da *Danton Vacuum* utilizado para a metalização das amostras: (a) imagem geral e (b) detalhe da tela de diferença de potencial.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das amostras históricas obtidos pela caracterização tanto da argamassa quanto do azulejo e pelo estudo da interface do conjunto azulejo/argamassa.

3.3.1 Caracterização visual das amostras

Todas as amostras de argamassa, inclusive as aderidas ao azulejo, apresentaram pulverulência e fissuras. A presença de torrões de cal, também foi identificada em todos os casos, como ilustrado na Figura 3. 18 (a). Em nenhuma amostra foi identificada a presença de matéria-orgânica. As amostras de argamassas em geral apresentaram colorações

diversas. Essas diferenças de cor foram identificadas em amostras de um mesmo caso (Casos 1 e 2) e até mesmo na própria amostra (PT-AS-SI3, PT- DAS-Z2-A4), como pode ser visto na Figura 3. 18 (b).



Figura 3. 18 – (a) Torrões esbranquiçados, provavelmente de cal nas argamassas, na amostra PT-VO-A6 do Caso 1 e (b) diferenças de colorações da argamassa na própria amostra PT-AS-SI3 do Caso 2.

Além das características visuais relativas às argamassas, observou-se que existem basicamente dois tipos de tardo dos azulejos analisados: o listrado, referente ao Caso 1, e o quadriculado, referente aos Casos 2 e 3, como ilustrado na Figura 3. 19. Vale ressaltar que, os azulejos dos Casos 2 e 3 são da mesma fábrica, Cerâmica da Devesas, da cidade de Porto, já os dos Caso 1 não foi possível identificar a origem de sua fabricação.

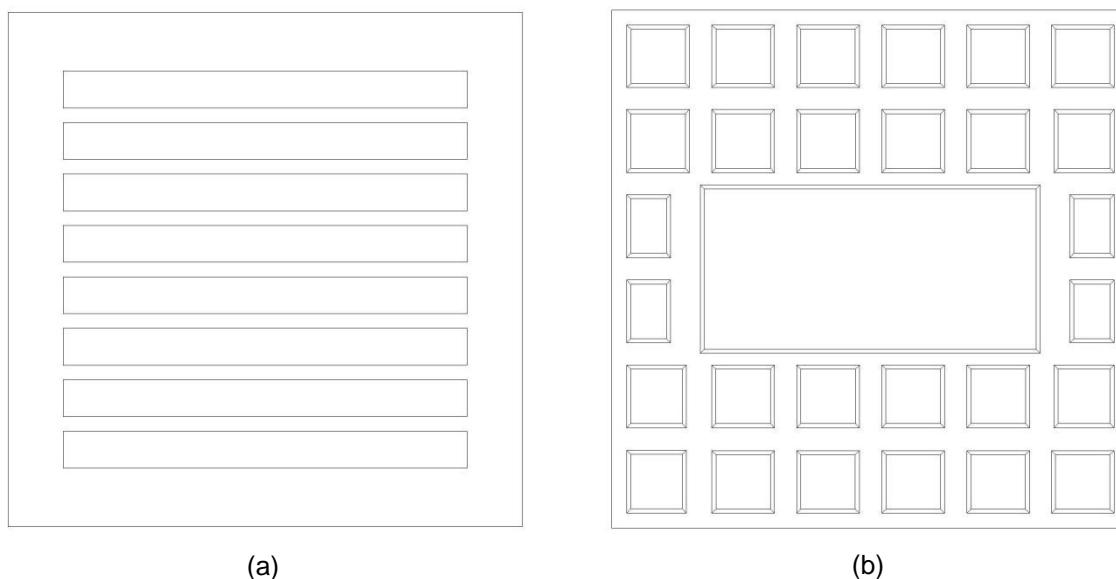


Figura 3. 19 – Tardoz dos azulejos (a) do Caso 1 e (b) dos Casos 2 e 3.

3.3.2 Caracterização dos azulejos históricos

Na sequência são realizadas tanto a apresentação dos resultados médio obtidos na caracterização dos azulejos históricos quanto a discussão desses. No Apêndice C e Anexo B são apresentados esses resultados em pormenor.

3.3.2.1 Difração de raios X

A Tabela 3. 6 apresenta a constituição mineralógica dos azulejos históricos portugueses identificados na análise por difração de raios X. Os difratogramas obtidos a partir desta análise estão disponíveis no Anexo B.

Tabela 3. 6 – Identificação mineralógica dos azulejos históricos portugueses de acordo com sua predominância.

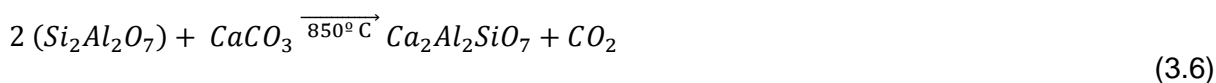
Identificação mineralógica	Composição química	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Quartzo	SiO ₂	p	p	p
Gehlenita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	p	p	p
Diopsídio	CaMg(SiO ₂) ₂	s	p	p
Plagioclásio (anortita e albita)	[(NaSi), (CaAl)] AlSi ₂ O ₂	s	s	s
Calcita	CaCO ₃	s	s	s
Espinélio	MgAl ₂ Cr ₂ O ₄	---	---	s
Wolastonita	CaSiO ₃	t	---	---
Grossular	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	---	t	---
Mullita	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	---	---	t
Eitelita	Na ₂ Mg(CO ₃) ₂	---	---	t

Legenda: ■ Principal (p) ■ Subordinado (s) ■ Traço (t) ---Sem presença

Os azulejos históricos portugueses são constituídos predominantemente por quartzo e gehlenita, sendo que nos Casos 2 e 3 ainda há predominância também do diopsídio. Todos apresentam em menor quantidade o plagioclásio e a calcita. Além desses, no Caso 1 foi identificado diopsídio e no Caso 3 foi encontrado o espinélio. Foram ainda identificados resquícios de wollastonita no Caso 1, de grossular no Caso 2 e mullita e eitelita no Caso 3. Pode-se observar que a composição dos azulejos do Caso 2 e do Caso 3 é muito semelhante, como esperado, por serem do mesmo fabricante.

A gehlenita, wolastonita, diopsídio e plagioclásio (anortita e albita) são compostos obtidos a partir da reação de material carbonático com o material silicoso e/ou aluminoso, como pode

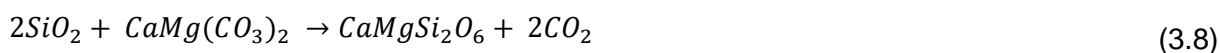
ser observado nas reações 3.6 (ANDO *et al.*, 2003²⁶ *apud* FERREIRA L., 2009), 3.7 (KLEIN; HURBUT, 1998²⁷ *apud* FERREIRA L., 2009), 3.8 e 3.9 (KIRSCH, 1972²⁸ *apud* FERREIRA L., 2009) apresentadas a seguir. Esses compostos foram obtidos, provavelmente, após a desestruturação das matérias-primas (possivelmente, o quartzo, a calcita e algum argilomineral) durante o processo de queima na produção dos azulejos estudados. Outros autores também identificaram esses compostos em azulejos históricos (SANJAD, 2002; SANJAD *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2006; FERREIRA L., 2009).



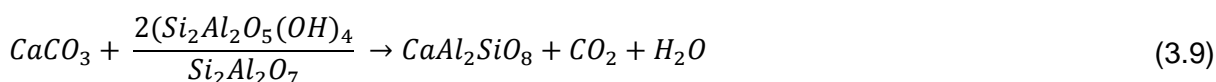
Metacaulinita + Calcita → **Gehlenita** + *Dióxido de carbono*



Quartzo (fase vítrea) + Calcita → **Wolastonita** + *Dióxido de carbono*



Sílica + Dolomita → **Diopsídio** + *Dióxido de carbono*



Calcita + $\frac{\text{Caulinita}}{\text{Metacaulinita}}$ → **Anortita** + *Dióxido de carbono* + *Água*

A presença de mulita e espinélio nos azulejos do Caso 3 indicam o uso de caulinita como matéria-prima na sua fabricação. Isso pode ser constatado nas reações apresentadas a seguir, que mostram a evolução da caulinita em mulita e cristobalita.

²⁶ ANDO, T. *et al.* Synthesis of zeolite from paper sludge (PS) ash, part 2: the influence of the excess amount of Ca and the ideal mineral composition range of PS ash for the zeolite synthesis. **Nendo Kagaku**, v. 43, n. 4, 2003.

²⁷ KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. JR. **Manual de Mineralogía**. Barcelona: Editorial Reverté, 1998.

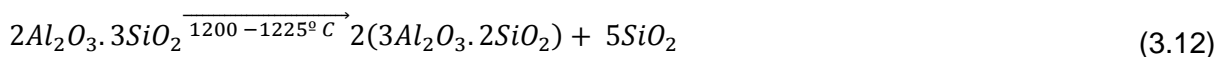
²⁸ KIRSCH, H. **Mineralogia aplicada**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1972.



Caulinita → *Metacaulinita* + *Água*



Metacaulinita → *Espinélio* + *Sílica amorfa*



Espinélio → *Mulita* + *Cristobalita*

Ressalta-se que a presença apenas de mulita, sem cristobalita, nas amostras do Caso 3, pode indicar temperaturas de queima inferiores às indicadas na reação (3.12), de 1200°C a 1250°C. Diferentemente da cristobalita, que geralmente precisa de temperaturas elevadas para ser formada, a mulita em certos casos pode ser formada a partir de 900°C. Segundo Singer e Singer (1971²⁹ *apud* FERREIRA L., 2009), a obtenção da mulita, a partir da caulinita, pode ocorrer aos 1000°C e, de acordo com Ferreira L. (2009), na presença de feldspatos, a mulita ainda pode ser obtida a partir dos 900°C. No caso analisado, é provável que a queima dos azulejos tenha ocorrido por volta de 1000°C.

A calcita, identificada na análise como composto subordinado em todos os casos, pode estar relacionada com a penetração da argamassa constituídas à base de cal no tardo do azulejo. É improvável que a calcita identificada seja originada da composição dos azulejos, uma vez que o processo de produção desses foi realizado a altas temperaturas, o que implicaria na transformação da calcita em óxido de cálcio.

3.3.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosidade total de um material representa a quantidade poros abertos ou interconectados que foram preenchidos pelo mercúrio. As amostras de azulejos analisadas não apresentaram diferenças significativas entre os resultados de porosidade total, tendo em média 46%, como pode ser observado na Tabela 3. 7.

²⁹ SINGER, F.; SINGER, S. **Cerâmica Industrial**. Bilbao: Ediciones Urmo, 1971.

Tabela 3. 7 – Porosidade total dos azulejos históricos.

Casos	Porosidade total (%)	Porosidade total média (%)
PT - Caso 1	48	46
PT - Caso 2	46	
PT - Caso 3	43	

Os resultados obtidos de distribuição do tamanho dos poros pelo volume de mercúrio intrudido nas amostras de azulejos estudadas estão agrupados na Tabela 3. 8 e ilustrados na Figura 3. 20.

Tabela 3. 8 – Distribuição dos poros pelo volume de mercúrio intrudido dos azulejos históricos.

Diâmetro dos poros (μm)	Volume de Hg intrudido (%)			
	PT - Caso 1	PT - Caso 2	PT - Caso 3	Média
5 - 10	0,00	0,00	0,00	0,00
1 - 5	2,88	0,03	3,68	2,20
0,1 - 1	36,28	37,05	36,85	36,73
0,05 - 0,1	9,17	10,89	9,34	9,80
0,01 - 0,05	42,76	42,57	40,73	42,02
<0,01	8,90	9,43	9,40	9,24
Diâmetro médio dos poros (μm)	0,95	0,46	0,97	0,79

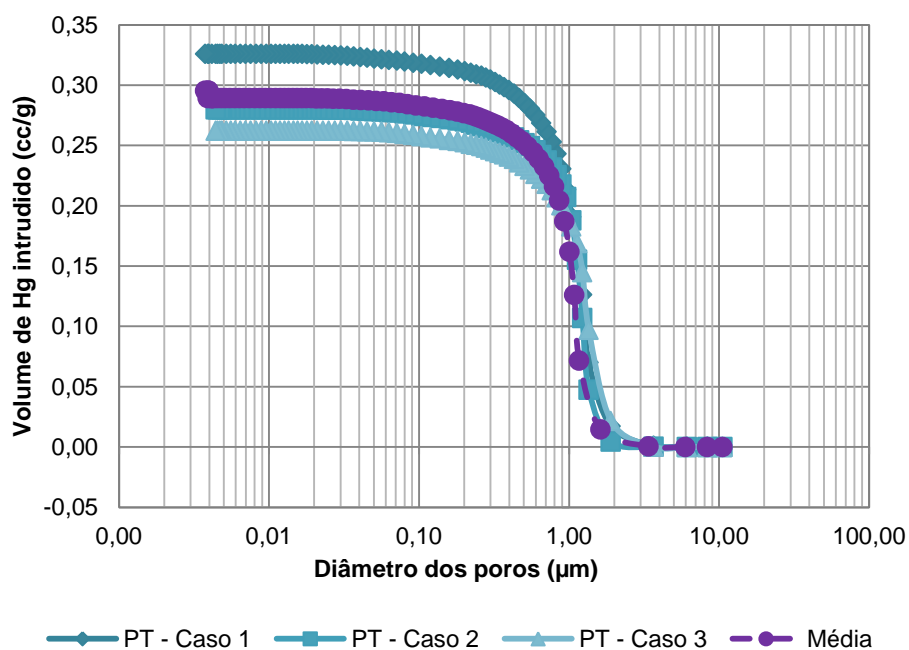


Figura 3. 20 – Distribuição do tamanho dos poros dos azulejos históricos.

Os casos apresentam uma distribuição de tamanho de poros semelhantes, tendo uma percentagem de volume de mercúrio intrudido maior nos seguintes intervalos de diâmetros de poros: entre 0,1 μm a 1 μm e entre 0,01 μm a 0,05 μm . Embora os casos tenham uma configuração de tamanho de poros similares, as diferenças entre os valores de volume total de mercúrio intrudido devem-se a uma quantidade de poros interconectados, os quais possibilitam a passagem desse material nos poros dos azulejos.

O Caso 2 possui um diâmetro médio dos poros de 0,46 μm que é bem inferior aos demais casos de 0,95 μm e 0,97 μm .

3.3.2.3 Absorção de água total por fervura e absorção de água ao longo do tempo

Os resultados médios de absorção total por fervura dos azulejos históricos estão apresentados na Tabela 3. 9, já os de absorção ao longo do tempo estão reunidos na Tabela 3. 10 e ilustrados graficamente na Figura 3. 21.

Tabela 3. 9 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por fervura dos azulejos históricos.

Caso	Absorção média por caso (%)	Absorção média dos azulejos históricos (%)
1	26,5	23,9
2	21,4	
3	23,7	

Tabela 3. 10 – Resultados médios de absorção ao longo do tempo dos azulejos históricos.

Tempo (minutos)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	45	60	90	120	
Média por caso (%)	1	0	19	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23	
	2	0	12	15	16	17	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19	20
	3	0	14	17	28	29	20	20	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22
Absorção média dos azulejos históricos (%)	0	15	18	19	19	20	20	20	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	

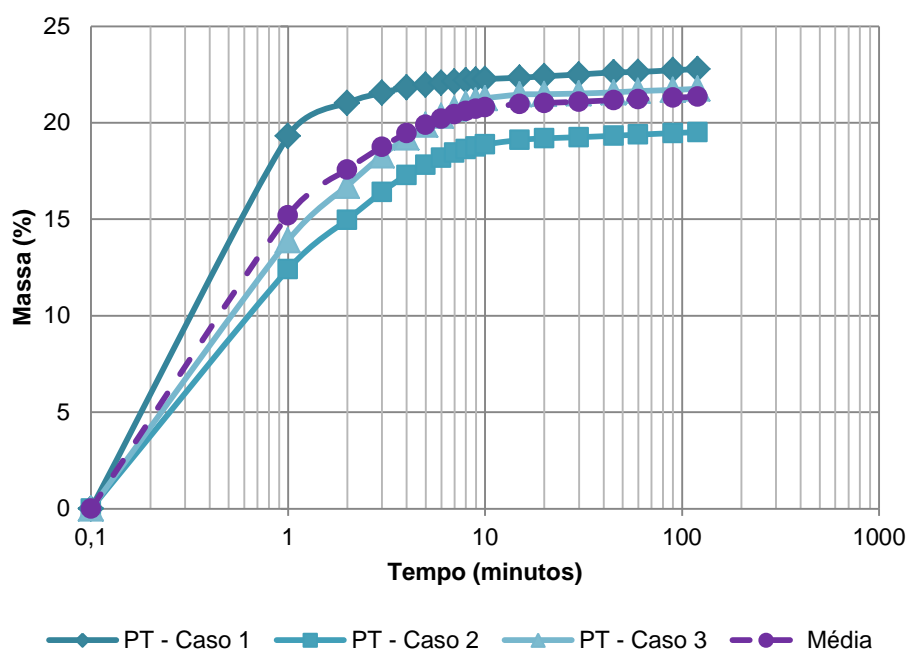


Figura 3. 21– Curvas de absorção de água ao longo do tempo dos azulejos históricos.

Nota-se uma proximidade dos valores de absorção total por fervura entre os casos, em média de 23,9%, que está relacionada diretamente com a similaridade da configuração dos poros dos azulejos analisados.

A absorção de água ao longo do tempo das amostras entre os casos analisados é muito semelhante, caracterizando-se por uma absorção intensa nos primeiros 5 minutos, especialmente no primeiro minuto, e pela estabilização da absorção a partir dos 10 minutos. Observa-se que, as amostras do Caso 1 possuem uma absorção mais alta no primeiro minuto, bem como uma estabilização precoce desta em relação aos demais casos, que são justificadas pela quantidade maior de poros abertos dos azulejos desse caso.

3.3.3 Caracterização das argamassas históricas

Na sequência são apresentados e analisados os resultados obtidos da caracterização das argamassas históricas. No Apêndice D e no Anexo C estão reunidos os resultados parciais dessas análises de caracterização.

3.3.3.1 Difração de raios X

Na Tabela 3. 11 estão reunidos os resultados obtidos por DRX das argamassas obtido em Furnas e no IPT. Os compostos mineralógicos identificados estão apresentados de acordo com sua predominância nas argamassas.

Tabela 3. 11 – Identificação mineralógica das argamassas históricas portuguesas.

Identificação mineralógica	PT - Caso 1	PT - Caso 2	PT- Caso 3
Quartzo	p	p	p
Calcita	s	s	s
Mica (moscovita)	t	t	t
Lawsonita	t	t	t
Montmorilonita	t	t	t
Vaterita	t	t	t
Portlandita (hidróxido de cálcio)	---	t	t
Caulinita	---	t	t
Feldspatos (microclínio)	t	t	---
Gipsita	t	---	---
Magnesita	t	---	---
Franzinita	t	---	---
Feldspatos (albita)	t	---	---
Gibbsita (hidróxido de alumínio)	---	---	t
Lazurita	---	---	t

Legenda: Principal (p) Subordinado (s) Traço (t) ---Sem presença

Pelos minerais identificados na análise de DRX pode-se concluir que as argamassas históricas são à base de cal, indicadas pela presença de calcita e vaterita, com predominância de agregados silicosos (quartzo), além de resquícios de argilominerais montmorilonita e moscovita. Pode-se observar também que as amostras de argamassa dos Casos 2 e 3 têm com composições mais parecidas.

A presença de traços de portlandita nas amostras dos Casos 2 e 3 mostram que essas não foram completamente carbonatadas, o que é compreensível, já que, no sistema de revestimento cerâmico, os azulejos funcionam como uma barreira ao acesso do CO₂ à argamassa de assentamento. Diferentemente desses casos, as amostras do Caso 1 não apresentaram na sua constituição o hidróxido de cálcio, indicando uma carbonatação mais intensa nas amostras desse caso, que pode estar relacionada a maior porosidade do azulejo ou a possíveis lacunas entre as placas cerâmicas. Isto também pode estar relacionado com uma maior exposição da amostra após a retirada da parede (espessura menor da camada

de argamassa), ou, então, a uma espessura do rejuntamento ou maior porosidade da argamassa de rejunte que permitiu a penetração de CO_2 .

Nas amostras do Caso1 foram identificados traços da gipsita, que indica o uso de gesso de construção na constituição das argamassas desse caso.

3.3.3.2 Análise termogravimétrica

Nas Figura 3. 22 a Figura 3.24 são apresentadas as curvas de TG, em verde, e as de DTG, em azul, das amostras de argamassas históricas.

Nas curvas termogravimétricas foram indicadas perdas de massa em determinados intervalos de temperatura, cujos resultados são apresentados na Tabela 3. 13. De forma resumida, os eventos térmicos são: entre 23°C e 200°C verifica-se a desadsorção de água, essencialmente de metalosilicatos; entre 200°C e 550°C ocorre a desidroxilação de diferentes tipos de minerais, tais como silicatos, aluminatos e silicoaluminatos de cálcio, e entre 550°C e 1000°C contata-se a descarbonatação dos carbonatos.

Nas curvas termodiferenciais foi possível identificar picos de ocorrência de fenômenos relativos a eventos térmicos. Alguns picos foram identificados por letras, cujos eventos térmicos correlatos estão apresentados na Tabela 3. 12.

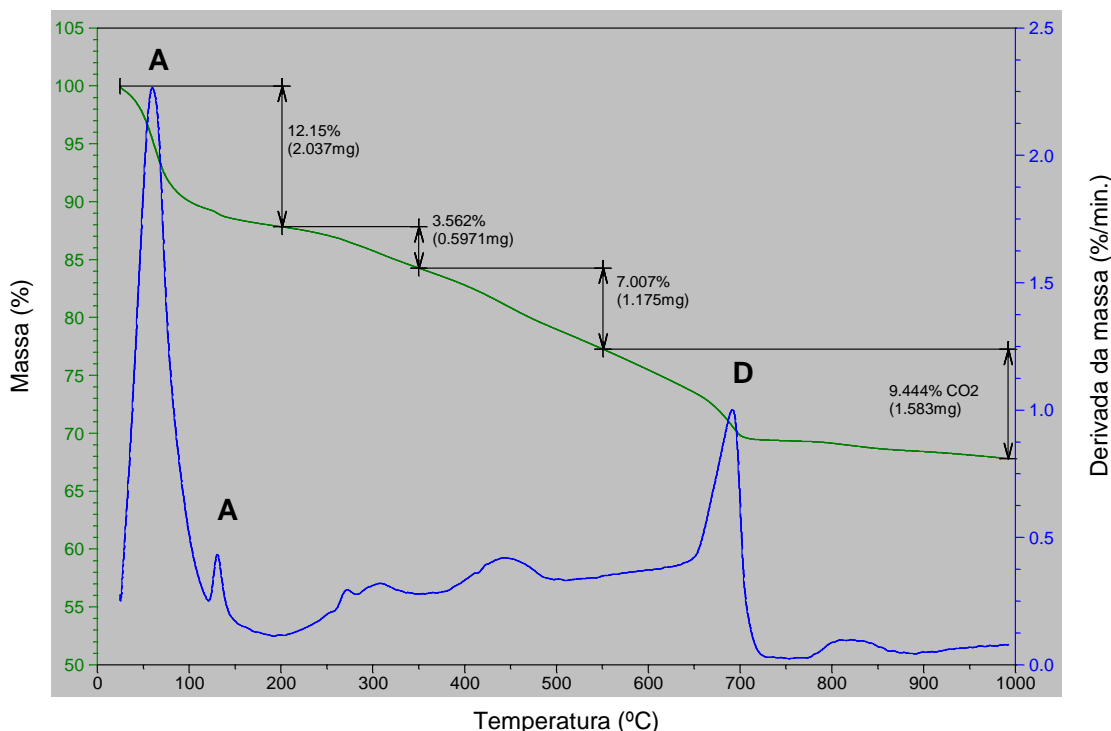


Figura 3. 22 – Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 1.

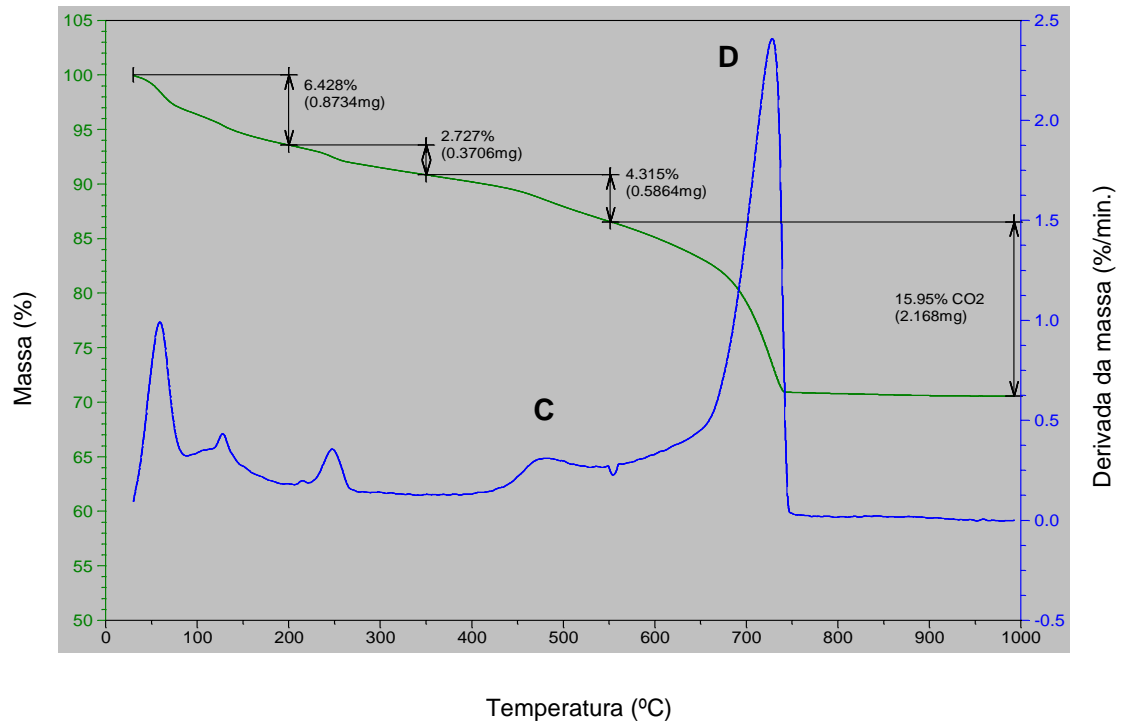


Figura 3. 23 – Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 2.

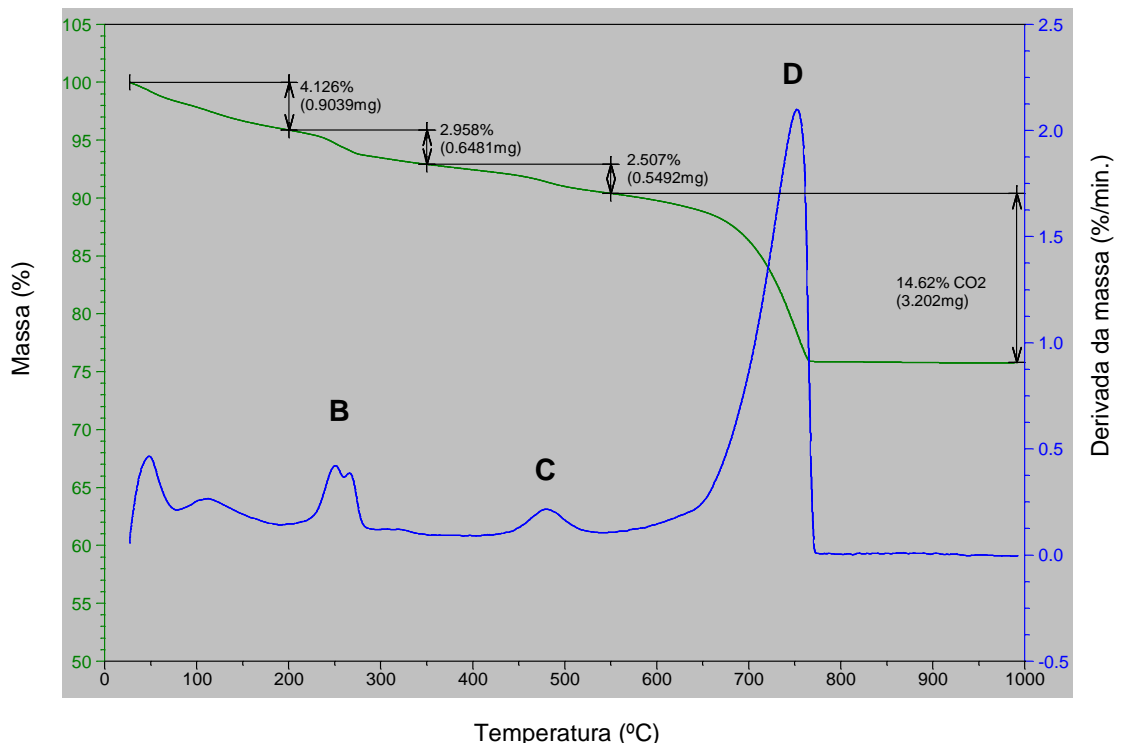


Figura 3. 24 – Curvas TG/DTG da amostra PT – Caso 3.

Tabela 3. 12 – Fenômenos envolvidos nos eventos térmicos, respectivas temperaturas das curvas de TG/DTG.

Letra	Evento térmico	Faixa de temperatura (°C)
A	Desidratação da gipsita	0-170
B	Desidratação da gibbsita	150-390
C	Desidroxilação da caulinita	430-550
D	Decomposição de carbonato de cálcio (CaCO ₃)	680-1000

Tabela 3. 13 – Perdas de massas envolvidas no processo de decomposição térmica.

Amostra	Temperatura / Perdas de massa (%)				CaCO ₃ (%)
	23°C a 200°C (desadsorção de água - metalossilicatos)	200°C a 350°C (dexidroxilação - minerais)	350°C a 550°C (dexidroxilação - minerais)	550°C a 1000°C (descarbonatação)	
PT – Caso 1	12,15	3,56	7,00	9,44	21,65
PT – Caso 2	6,43	2,73	4,31	15,95	36,27
PT – Caso 3	4,13	2,96	2,51	14,62	33,25

A partir dos dados levantados, pode-se concluir que as amostras analisadas são típicas argamassas à base de cal, uma vez que possuem perdas acentuadas de massa entre 550°C a 1000°C, intervalo onde ocorre a descarbonatação da calcita.

Observa-se também que as argamassas do Caso 2 e Caso 3 apresentam curvas semelhantes, enquanto a argamassa do Caso 1 se diferencia das demais, confirmando o que foi observado na difração de raios X. Enquanto as primeiras apresentam o pico D, referente à descarbonatação do carbonato de cálcio, muito elevado, a última apresenta o pico A, referente à desidratação da gipsita, em destaque. Isso mostra que argamassa do Caso 1, além de possuir cal na sua constituição, também possui uma quantidade considerável de gesso de construção. Os picos B e/ou C, que indicam a presença, respectivamente, da gibbsita e da caulinita, foram identificados nos Casos 2 e 3.

3.3.3.3 Análise petrográfica

A partir da análise petrográfica foi possível levantar características da pasta, dos agregados e dos vazios das argamassas históricas, as quais estão apresentadas nas Tabela 3. 14 a Tabela 3. 16.

Tabela 3. 14 – Características da pasta das argamassas históricas.

Análise	PT- Caso 1	PT- Caso 2	PT- Caso 3
Pasta/argamassa (%)	20 a 25	20	15
Coloração	Marrom	Cinza	Cinza
Carbonatação	Intensa e pervasiva	Intensa e pervasiva	Intensa e pervasiva
Presença de grãos de silicato ou silico-aluminato de cálcio hidratado	Concentrados em uma determinada região da argamassa	---	Concentrados em uma determinada região da argamassa
Presença de restos rocha carbonática mal calcinada	Raros	Sim	Raros
Presença de portlandita	Pouco	Raras plaquetas submilimétricas dispersas	Rara

Tabela 3. 15 – Características dos agregados das argamassas históricas.

Análise	PT- Caso 1	PT- Caso 2	PT- Caso 3
Agregado/argamassa (%)	65 a 70	60 a 65	70 a 75
Granulometria	0,03 mm a 2,5 mm	0,2 mm a 5,5 mm	0,2 mm a 2,0 mm
Granulometria predominante	0,9 mm a 1,2 mm	0,8 mm a 1,2 mm	0,4 mm a 0,6 mm
Tipos de grãos	Arredondados a subarredondados	Subangulosos a arredondados	Subangulosos a subarredondados
Esfericidade dos grãos	Moderada a alta	Baixa a moderada	Moderada a alta.
Composição granulométrica (%)	Quartzo mono e policristalino– 85%	Quartzo mono e policristalino– 90%	Quartzo mono e policristalino– 85%
	Fragmento de solo ou cerâmico -10%	---	Fragmentos de solo – 10%
	Outros: mica, feldspato, fragmento de rocha (siltito) – 5%	Outros: mica, feldspato, torrão de argila, estauroлита– 10%	Outros: feldspato estauroлита, fragmentos de rocha, turmalina, muscovita - <5%

Nota: Nos Casos 1 e 2 ainda foi identificada a presença de sílica amorfa e no Caso 3 foram identificados muitos grãos do agregado com borda de reação (material argiloso + hidróxidos de ferro)

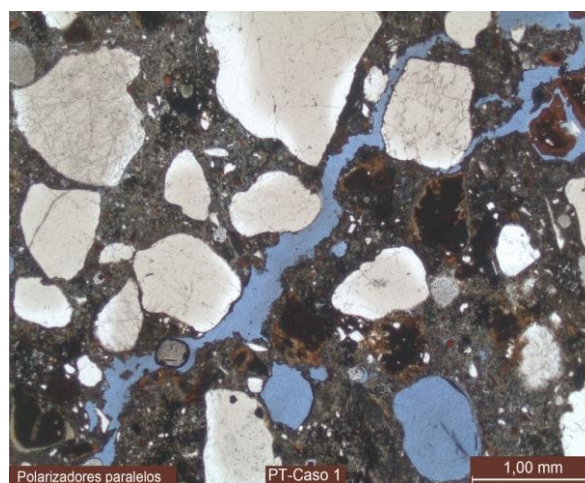
Tabela 3. 16 – Características dos vazios das argamassas históricas.

Análise	PT- Caso 1	PT- Caso 2	PT- Caso 3
Vazios/argamassa (%)	10	15-20	10-15
Bolhas de ar aprisionado	0,2 mm a 1,0 mm de diâmetro - comuns.	Vazios irregulares e/ou coalescência de bolhas de ar aprisionado - 0,4 mm a 2,5 mm de tamanho	Possíveis bolhas de ar aprisionado de 0,2 mm a 0,5 mm de diâmetro - raras
Vazios alongados	0,7 mm a 1,2 mm de comprimento – comuns.	3,5 mm de comprimento – comuns	5 mm de comprimento – comuns
Vazios de interface pasta-agregado	---	---	<0,01 mm de espessura – raros
Microfissuras na pasta	0,1 mm a 0,3 mm de espessura – raros	<0,01 mm de espessura – comuns	<0,1 mm de espessura – comuns.
Microporosidade na pasta	---	<0,01 mm – comuns	<0,01 mm – comuns
Grãos arrancados	Possíveis grãos arrancados de 0,5 mm a 1,0 mm – raros.	---	1,2 mm a 1,6 mm – comuns

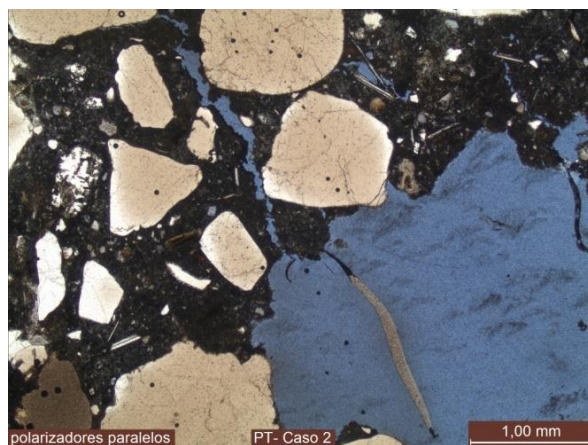
As argamassas históricas apresentam pasta intensamente carbonatada, com resquícios de rocha carbonática mal calcinada e de portlandita, sendo que em alguns pontos das amostras dos Casos 1 e 3 foi identificada a presença grãos de silicato ou silico-aluminato de cálcio hidratado, que pode ser explicada pela utilização da cal hidráulica ou de fragmentos cerâmicos utilizados com cal aérea – reação pozolânica (GUIMARÃES, 1997).

Os agregados das argamassas são constituídos predominantemente de quartzo (cerca de 85% a 90%), sendo ainda presentes fragmentos/ torrões de solo ou cerâmicos em todas as amostras. Nos Casos 2 e 3 existe a presença de agregado constituído de sílica amorfa, que pode ter sido adicionada a argamassa provavelmente por seu caráter reativo. De modo geral, os agregados dos Casos 1 e 3 apresentam características próximas entre si, enquanto os do Caso 2 se diferenciam dos demais casos. O menor grão identificado é o do Caso 1 de 0,03 mm, já o maior é o do Caso 2 de 5,5 mm, que é um valor alto se comparado aos valores máximos encontrados nos outros casos entre 2,0 mm a 2,5 mm. O Caso 3 é o que apresenta a predominância de grãos de dimensões menores no intervalo entre 0,4 mm a 0,6 mm, já os demais casos apresentam predominância de grãos de dimensões maiores de aproximadamente entre 0,8 mm a 1,2 mm. Os grãos de agregado do Caso 2 apresentam esfericidade baixa a moderada, enquanto nos outros casos esta se caracteriza por ser moderada a alta.

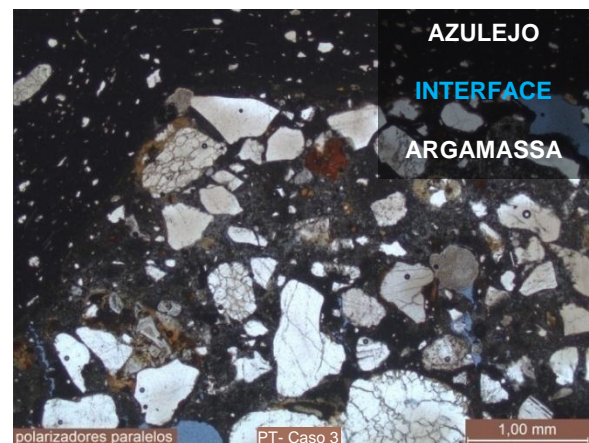
Argamassas apresentam elevada porosidade, sendo que o Caso 2 apresenta o maior índice de vazios entre 15% a 20% e o Caso 1 o menor índice de 10%. Todos os casos apresentam bolhas de ar aprisionado, sendo mais comuns no Caso 1. Observou-se também a presença comum de vazios alongados nas amostras analisadas. Foram identificados a presença tanto de microfissuras como de microporos nas pastas das argamassas dos Casos 2 e 3, sendo que no Caso 1 raramente foram encontradas microfissuras. Apenas no Caso 3 foram identificados raros vazios na interface pasta/agregado. Na Figura 3. 25 podem ser observados os vazios e as microfissuras presentes na pasta das argamassas estudadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 25 – Aspecto geral das argamassas (a) do Caso 1, (b) do Caso 2 e (c) do Caso 3; sendo indicado em azul as microfissuras e vazios na pasta.

3.3.3.4 Reconstituição de traço

Na Tabela 3. 17 estão apresentados os resultados de reconstituição de traço das argamassas históricas estudadas. Vale ressaltar que, pela análise química não foi possível discriminar claramente se a hidráulidade existente nas argamassas deve-se à utilização de cal hidráulica ou da mistura de cal aérea e solo ou fragmento cerâmico, de natureza pozolânica, uma vez que esses últimos foram identificados tanto na análise petrográfica, quanto na análise química (Anexo C). Esses materiais podem ser responsáveis pela hidráulidade da fração aglomerante das argamassas. Dessa forma, o termo cal hidráulica, indicado na Tabela 3. 17, pode se referir a essas duas situações distintas. No entanto, é importante destacar que não era comum o uso de cal hidráulica em argamassas entre o final do século XIX e início do século XX, em Portugal, o que torna a hipótese do uso de cal área juntamente com adição mineral argilosa mais provável do que o uso de cal hidráulica nas amostras de argamassas históricas analisadas.

Tabela 3. 17 – Resultados de reconstituição do traço das argamassas históricas.

Identificação das argamassas	Parâmetros calculados	Cal hidráulica	Gesso de construção	Agregado silicoso	Relação Aglomerante/agregado
PT – Caso 1	Constituintes (%)	26,6	4,7	68,7	1 : 2,2
	Proporcionamento, em massa	1	0,2	2,6	
PT – Caso 2	Constituintes (%)	31,7	---	68,3	1 : 2,1
	Proporcionamento, em massa	1	---	2,15	
PT – Caso 3	Constituintes (%)	20,4	---	79,6	1 : 3,9
	Proporcionamento, em massa	1	---	3,9	

As argamassas apresentam na sua constituição a cal hidráulica (ou cal aérea e adição mineral argilosa) e agregado silicoso, sendo que no Caso 1 ainda possui o gesso de construção. Apesar de não ser usual o uso de gesso em argamassas de assentamento deste período, este foi identificado em uma quantidade considerável em relação aos demais constituintes da argamassa na reconstituição de traço. Além disso, sua presença foi confirmada em outras análises, como foi o caso da análise petrográfica.

A relação aglomerante/agregado das argamassas do Caso 1 e 2 são muito próximas, respectivamente, 1:2,2 e 1:2,1, já o Caso 3 possui relação de 1:3,9, logo, este caso possui uma proporção maior de agregado silicoso que os outros casos.

3.3.3.5 Absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e absorção total por imersão

Na Tabela 3. 18 estão reunidos os valores de absorção de água por capilaridade das argamassas do Caso 1 ao longo do tempo e na Figura 3. 26 esses são expressos em forma de gráfico.

Tabela 3. 18 – Resultados médios de absorção de água por capilaridade do PT – Caso 1

Tempo (minutos)		0	1	2	3	4	5	10	30	90
Absorção (g/cm ²)	PT-VO-A8	0,00	0,23	0,37	0,47	0,57	0,64	0,79	1,08	1,57
	PT-VO-A9	0,00	0,19	0,27	0,33	0,38	0,43	0,56	0,87	1,47
	Média	0,00	0,21	0,32	0,40	0,48	0,54	0,68	0,98	1,52

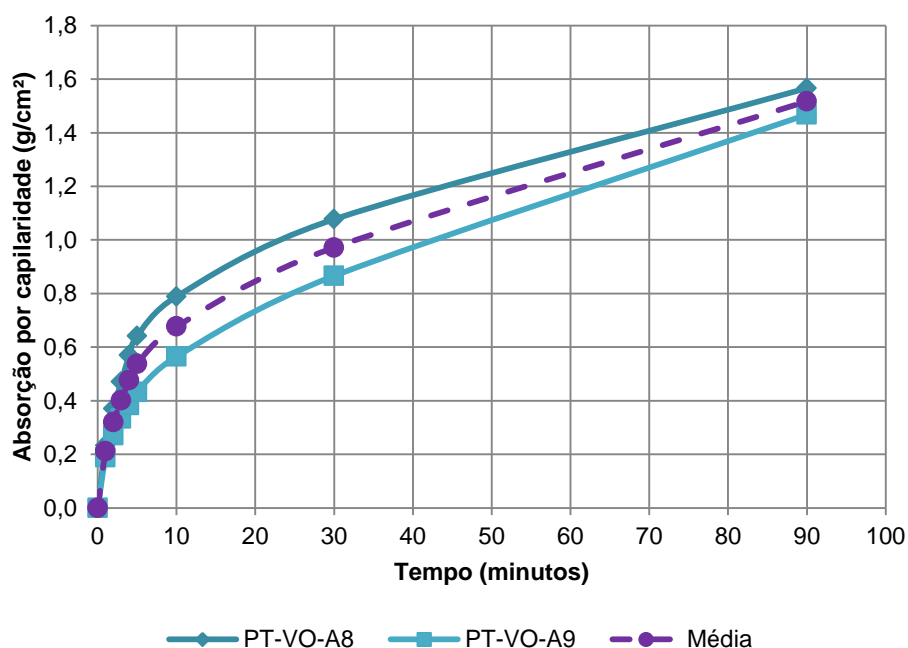


Figura 3. 26 – Absorção por capilaridade das argamassas do PT – Caso 1.

As curvas apresentadas mostram um comportamento de absorção de água por capilaridade das argamassas mais intensa nos primeiros minutos do que nos posteriores.

As amostras de argamassa do Caso 1 apresentaram coeficiente de capilaridade médio de $4,1 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ (ou $10,3 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ³⁰) e absorção de água por imersão após 24 horas de 12,6%.

3.3.3.6 Profundidade carbonatada

A argamassa histórica do Caso 1, após fratura e aspersão de fenolftaleína, não apresentou regiões com a coloração vermelho carmim, como pode ser visto na Figura 3. 27. Isso indica que a argamassa estava completamente carbonatada, o que confirma o resultado anterior apresentado na análise petrográfica.



Figura 3. 27 – Argamassa histórica do Caso 1 após fratura e a aspersão de fenolftaleína.

3.3.4 Estudo da interface

Os principais dados obtidos nas análises da interface azulejo/argamassa, bem como sua discussão, são abordados na sequência. No Apêndice I estão reunidos os resultados individuais das análises.

3.3.4.1 Área de aderência de argamassa no tardo do azulejo

As amostras de azulejo com argamassa apresentaram em média 63% a 99% de argamassa aderida no tardo do azulejo quando da análise a olho nu, como pode observado na Tabela 3.19.

³⁰ Valor obtido a partir da equação apresentada na EN 1015-18 (Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened rendering mortar, 1999).

Tabela 3. 19 – Resultados médios da área de argamassa aderida no tardo do azulejo.

Caso	Média da área de argamassa aderida no tardo (%)
1	63
2	68
3	99

As amostras de azulejo com argamassa do Caso 3 possuem o tardo praticamente todo recoberto por argamassa, já os outros casos possuem em média pelo menos um terço da superfície do tardo sem argamassa aderida. As amostras de azulejo com argamassa com menor e com maior percentual de aderência de argamassa no tardo estão ilustradas na Figura 3. 28.



Figura 3. 28 – (a) Amostra PT-VO-A3 do Caso 1 e (b) amostra PT-SO-A3 do Caso 3 com, respectivamente, a menor e a maior percentual de área de argamassa aderida no tardo do azulejo.

Na Figura 3. 29 são apresentadas a quantificação de azulejos pela presença de argamassa aderida em determinada zona e a configuração da argamassa no tardo das amostras analisadas.

A zona do tardo que apresentou maior número de amostras com aderência de argamassa foi a zona Central (C) e duas laterais adjacentes, já a região de menor valor corresponde justamente as bordas das outras duas laterais restantes do azulejo. Essa configuração da argamassa no tardo pode estar relacionada com o assentamento empregando a “técnica do bolão”, que consiste na aplicação de uma porção de argamassa no tardo da placa e posterior aperto dessa placa sobre a parede.

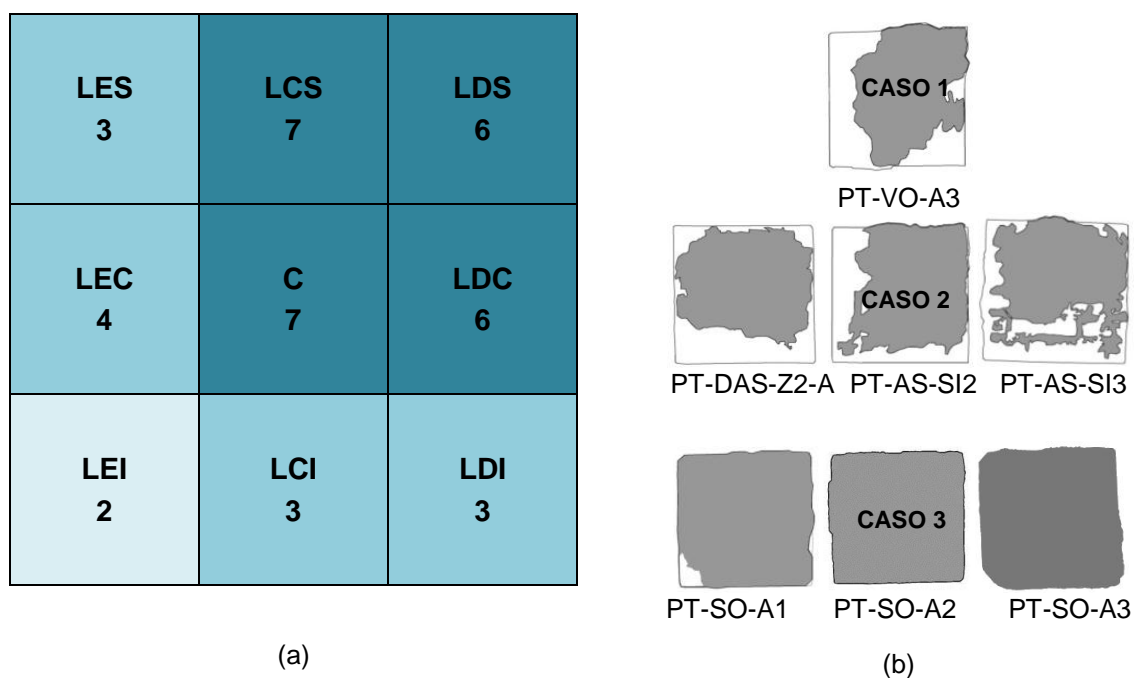


Figura 3. 29 – Resultados da quantificação de azulejos com aderência de argamassa em determinada zona e(b) configuração da argamassa no tarso das amostras analisadas por caso.

3.3.4.2 Extensão de aderência

A partir das imagens obtidas na lupa estereoscópica, foi possível tanto quantificar a porcentagem de extensão de aderência quanto analisar alguns aspectos da interface azulejo/argamassa das amostras históricas.

Os valores médios obtidos de extensão de aderência das amostras de revestimento cerâmico históricas estão apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3. 20 – Resultados médios de extensão de aderência das amostras de revestimentos cerâmicos históricas.

Caso	Média da extensão de aderência (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
1	82	10	12
2	64	16	26
3	83	4	5

Os Casos 1 e 3 não apresentam diferença significativa entre seus valores de extensão de aderência, já o Caso 2 apresentou valores inferiores aos outros casos, o qual está diretamente relacionado com um número maior de falhas de aderência na interface azulejo/argamassa. Nas Figura 3. 30 a Figura 3. 32 são ilustrados tanto regiões com falhas de aderência como regiões com boa extensão de aderência identificadas na interface do azulejo/argamassa das amostras de azulejo com argamassa estudadas.

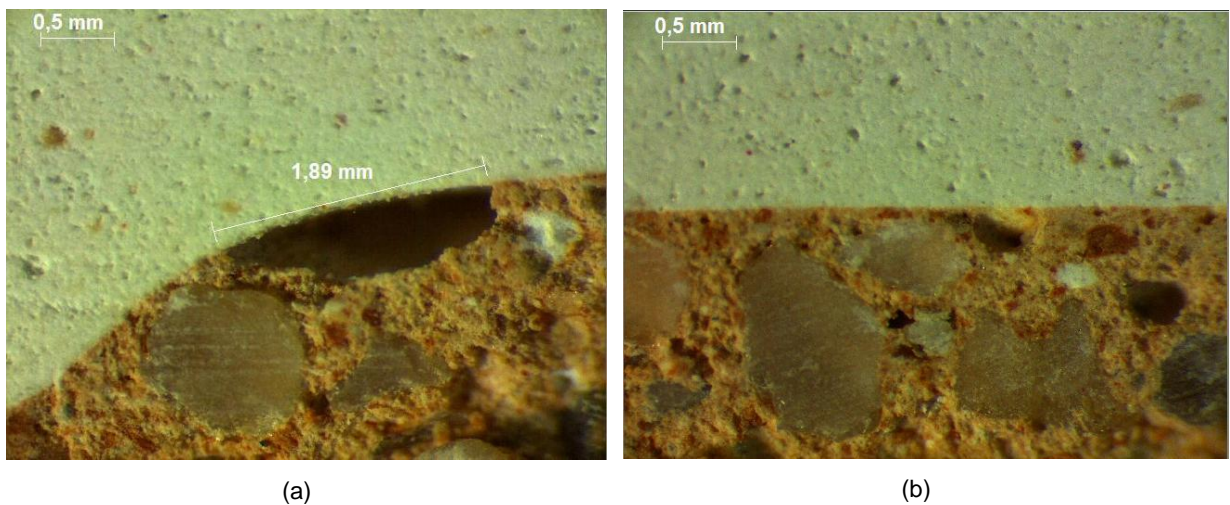


Figura 3. 30 – Interface entre azulejo e argamassa do Caso 1: (a) presença de falhas de aderência na região de relevo e (b) ausência dessas na região plana da muratura do tardo do azulejo.

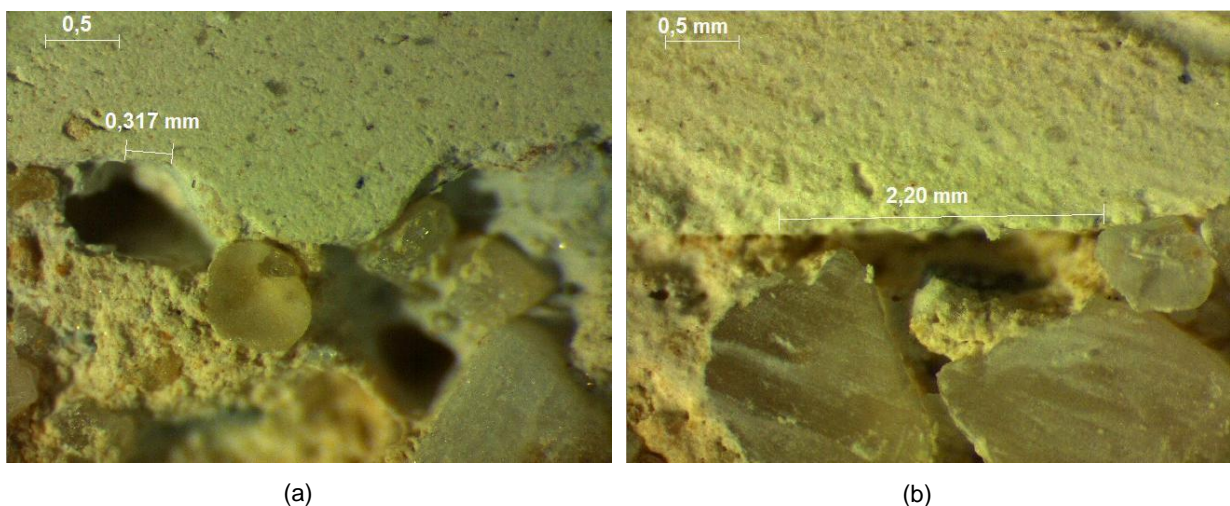


Figura 3. 31 – Falhas de aderência entre azulejo e argamassa do Caso 2: (a) na região de relevo e (b) na região plana da muratura do tardo do azulejo.

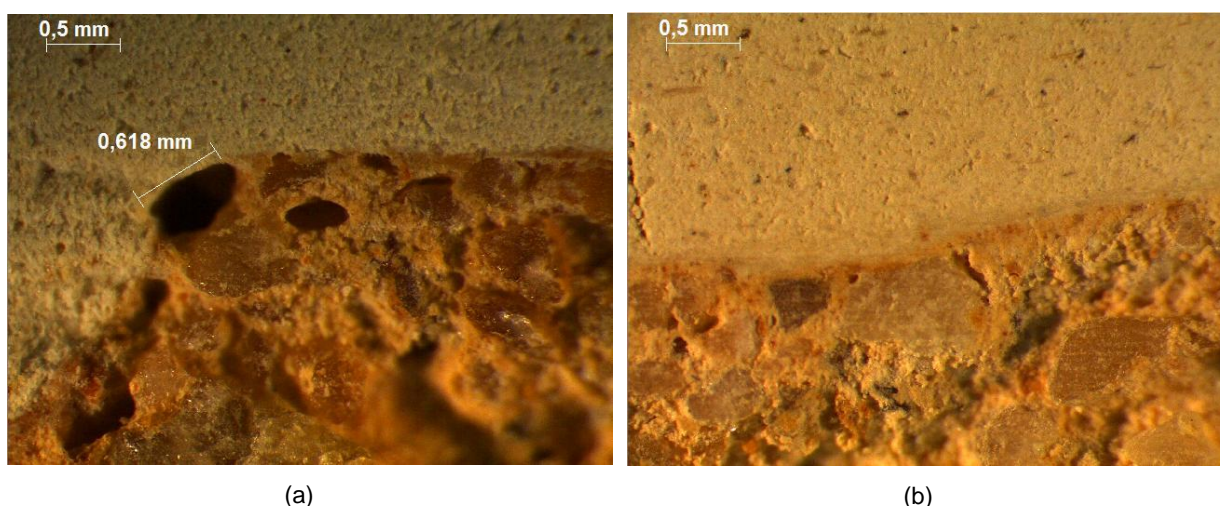


Figura 3. 32 – Interface entre azulejo e argamassa do Caso 3: (a) presença de falhas de aderência na região de relevo e (b) ausência dessas na região plana da muratura do tardo do azulejo.

Vários são os fatores que podem exercer influência na extensão de aderência entre o azulejo e a argamassa. Com base nos dados levantados das amostras históricas, buscou-se estabelecer algumas relações entre as características dos materiais constituintes do revestimento cerâmico analisadas e sua respectiva extensão de aderência, as quais estão apresentadas a seguir.

A relação aglomerante/agregado das argamassas de assentamento não exerceu influência na porcentagem de extensão de aderência, uma vez que as argamassas dos Casos 1 e 3 possuem relação aglomerante/agregado distintas e, no entanto, apresentaram extensão de aderência semelhantes, já o contrário ocorre entre as argamassas dos Casos 1 e 2 que apresentam relação aglomerante/agregado similares, porém porcentagens de extensão de aderência diferentes.

A existência de relevos no tardo dos azulejos visa aumentar a área de contato entre a argamassa e a superfície posterior da placa cerâmica e, assim, favorecer a aderência. Entretanto observou-se que as regiões de baixo relevo no tardo dos azulejos apresentaram mais falhas de aderência do que as regiões planas, o que mostra a dificuldade da argamassa, durante o processo de assentamento dos azulejos de se acomodarem nessas regiões de reentrâncias. Provavelmente as dimensões e o formato da muratura do tardo dos azulejos analisados, associados com a trabalhabilidade das argamassas empregadas, não favorecem a aderência da argamassa, uma vez que esses vazios foram identificados mesmo nos casos de alta extensão de aderência.

Além do formato da muratura do tardo do azulejo, constatou-se a influência do tamanho dos grãos do agregado nos valores de extensão de aderência. As amostras de argamassas do Caso 2 possuem grãos de agregados de dimensões maiores (grãos entre 0,2 mm a 5,5 mm) do que os demais casos (grãos entre 0,03 mm a 2,5 mm), como observado na análise petrográfica, os quais contribuíram para o aumento tanto da quantidade quanto da dimensão das falhas de aderência, como observado na Figura 3. 31. Quando esses grãos maiores se localizam próximo da superfície do tardo do azulejo, eles tendem a impedir o contato da pasta com o tardo, o qual é necessário para que haja o travamento mecânico entre o azulejo e a argamassa. Outras características dos agregados como a esfericidade dos grãos também podem exercer influência na extensão de aderência. Os Casos 1 e 3 possuem grãos de esfericidade moderada a alta, enquanto o Caso 2 possui grãos de esfericidade baixa a moderada. Assim, quanto maior a esfericidade dos grãos, maior a trabalhabilidade das argamassas e provavelmente maior é a extensão de aderência entre a argamassa e o tardo do azulejo. Os grãos mais arredondados permitem que a pasta se aproxime mais da superfície do tardo do azulejo do que os grãos menos esféricos.

3.3.4.3 Resistência de aderência à tração

Na Tabela 3. 21 estão agrupados os valores potenciais médios de resistência de aderência das amostras de azulejo com argamassa dos Casos 2 e 3. Apesar de ter sido contemplado no ensaio, os valores obtidos do Caso 1 não foram analisados devido ao seu pequeno número de amostras ensaiadas, o que pode não ser representativo para a discussão dos dados, entretanto, esses são apresentados no Apêndice I.

Tabela 3. 21 – Resultados potenciais médios de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos históricos portugueses do Caso 2 e do Caso 3.

Caso	Resistência à aderência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação	Forma de ruptura (%)	
				Argamassa	Interface argamassa/tardo
2	0,13	0,06	47	65	35
3	0,34	0,16	46	100	0

As amostras de azulejo com argamassa do Caso 3 obtiveram uma resistência de aderência média de 0,34 MPa, que é um valor bem superior ao obtido pelas amostras do Caso 2 de 0,13 MPa, em média. Cabe ressaltar que, esses valores podem ter sido reduzidos pela manipulação e corte das amostras realizadas antes do ensaio.

As amostras do Caso 3 apresentaram ruptura apenas na argamassa de assentamento, enquanto as do Caso 2 romperam 35% na interface argamassa/tardo e 65% na argamassa. A porcentagem de ruptura na interface identificada nas amostras do Caso 2 é um indicativo de sua baixa aderência entre a argamassa e o azulejo o que foi observado também na lupa, com a menor extensão de aderência.

Para entendimento da aderência entre o azulejo e argamassa de assentamento é necessário compreender a influência desses dois materiais na aderência.

A configuração dos poros dos azulejos provavelmente não exerceu influência no travamento mecânico entre os materiais, uma vez que os azulejos apresentaram valores de porosidade total e absorção muito semelhantes.

Nas argamassas a fração aglomerante é geralmente responsável pela conferência de resistência mecânica do revestimento. Não foi identificada essa relação de acréscimo da resistência de aderência com o aumento da porcentagem de aglomerante, pois a argamassa do Caso 3 possui uma taxa inferior de aglomerante em relação à argamassa do Caso 2 e, no entanto, apresenta uma resistência de aderência superior ao Caso 2. Provavelmente os valores de resistências não estão associados aos teores de aglomerante e agregado das argamassas, mas as características macro da argamassa, como observados na análise de extensão de aderência.

A resistência de aderência baixa das amostras do Caso 2 em relação ao Caso 3 pode ser justificada pelo tipo e tamanho de grãos dos agregados constituintes da sua argamassa. Os agregados maiores e pouco esféricos prejudicam o contato da pasta com a superfície do tardo, criando regiões de vazios, onde não há penetração da pasta nos poros da placa cerâmica, o que é desfavorável as resistência de aderência, uma vez que é essa pasta penetrada após seu endurecimento nos poros do azulejo que provoca o travamento mecânico entre o azulejo e argamassa.

3.3.4.4 Microestrutura das argamassas históricas

A avaliação das argamassas históricas no microscópio eletrônico de varredura está mostrada a seguir.

a. PT – Caso 1

A Figura 3. 33, referente à argamassa do Caso 1, mostra uma região com predominância de compostos constituídos por alto teor de cálcio, por quantidades menores de silício e

alumínio, e ainda por resquícios de sódio, magnésio e ferro, como pode ser constatado no espectro de EDS apresentados na Figura 3. 34 e na Figura 3. 35. Os cristais presentes na região analisada são provavelmente de carbonatos identificados na análise por DRX, a saber, calcita, vaterita e magnesita (provenientes da pasta da argamassa); as presenças de silício, alumínio e ferro são explicadas pelos agregados que estão abaixo dessa pasta.

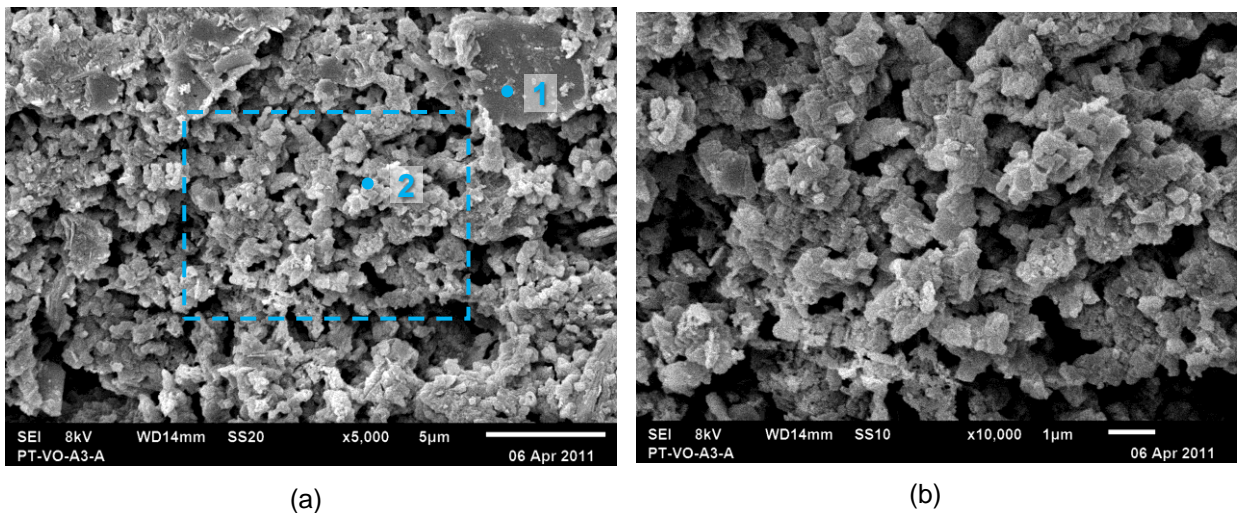


Figura 3. 33 – Micrografias de uma região da argamassa histórica do Caso 1 com predominância de cristais de carbonatos.

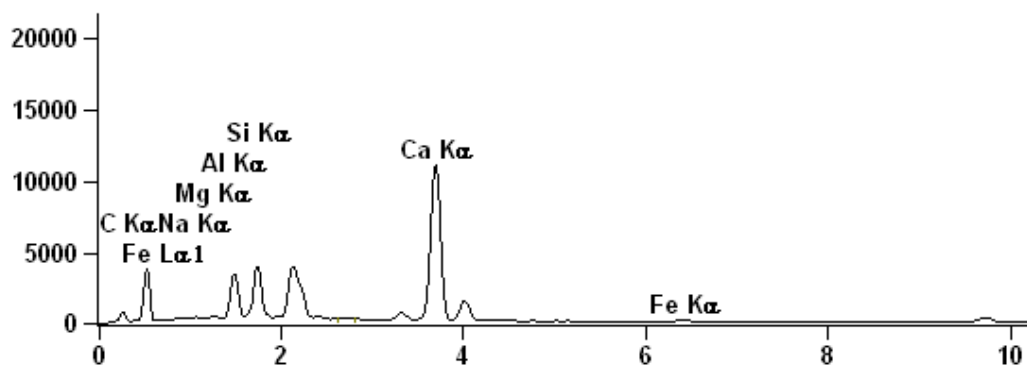


Figura 3. 34 – Espectro EDS no ponto 1 da argamassa histórica do Caso 1.

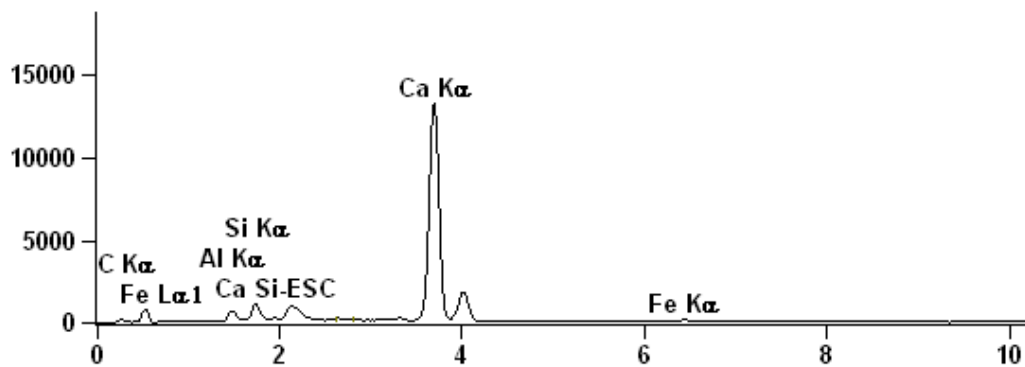


Figura 3. 35 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa histórica do Caso 1

Além da presença de carbonatos, nas amostras de argamassa do Caso 1 foi identificado por DRX a presença de gipsita, que é um indicativo do uso de gesso de construção na sua composição. Pela análise química foi possível detectar um teor de 4,7% de gesso de construção presente na constituição dessa argamassa. Buscou-se na literatura micrografias que mostrassem a morfologia deste constituinte. Silva (2010) estudou tanto a morfologia do gesso (sulfato de cálcio hemi-hidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) como da gipsita (sulfato de cálcio dihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cujas micrografias estão apresentadas na Figura 3. 36. Observa-se a morfologia de cristais prismáticos semelhante entre os dois compostos.

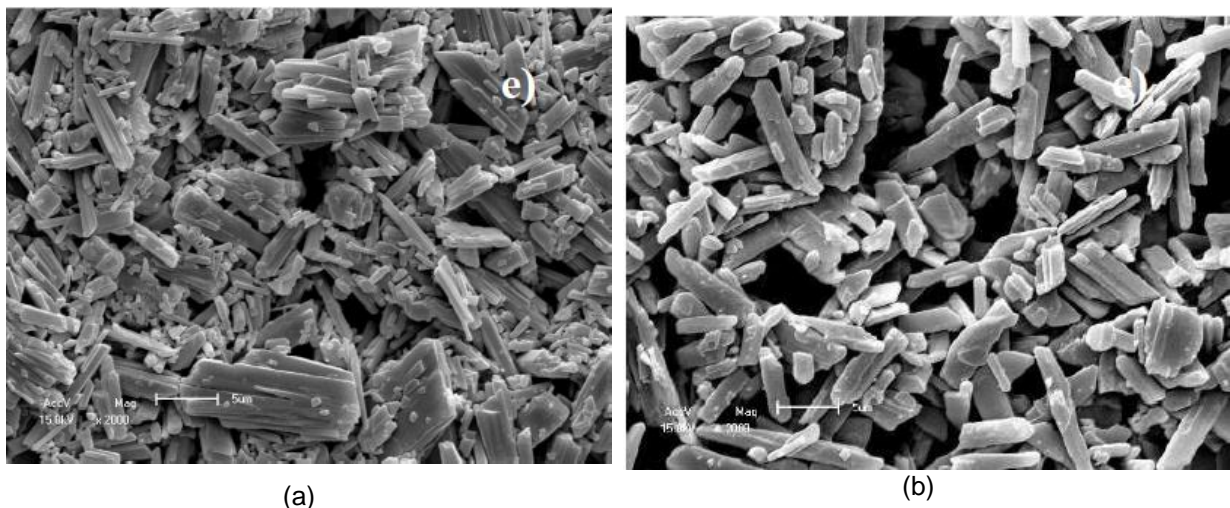


Figura 3. 36 – Aspectos morfológicos do pó (a) de gesso comercial e (b) da gipsita (SILVA, 2010).

Na Figura 3. 37 está ilustrada, em várias ampliações, um região com predominância de sulfato e cálcio, conforme espectro de EDS apresentado na Figura 3. 38. Observa-se a sobreposição de cristais lamelares apresentada em várias direções.

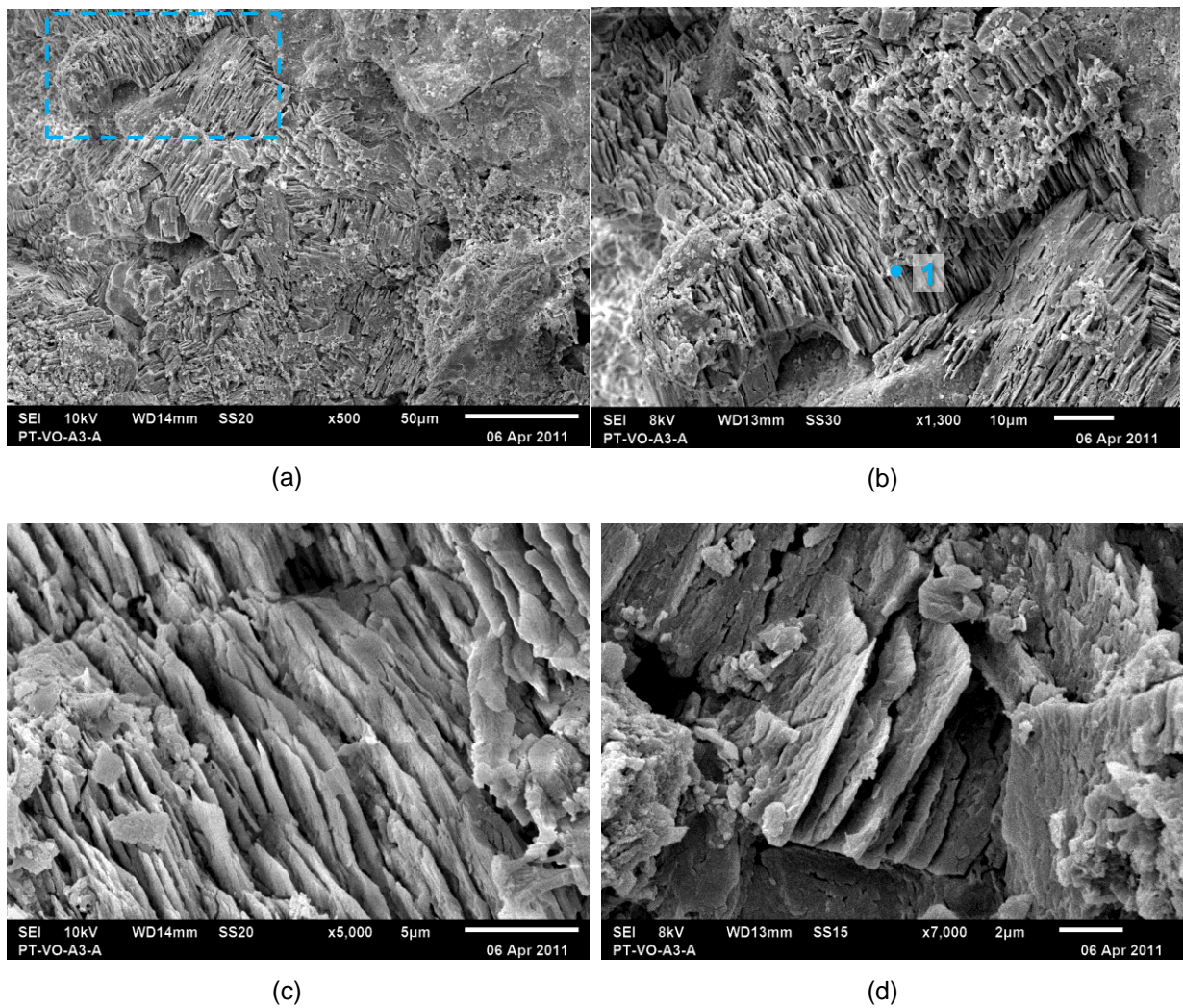


Figura 3. 37 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 1 com predominância de sulfato e cálcio.

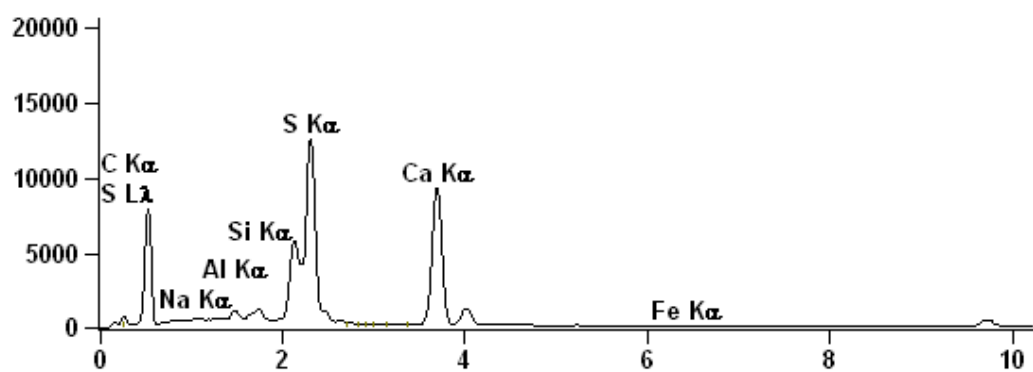


Figura 3. 38 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa histórica do Caso 1.

b. PT - Caso 2

Na argamassa do Caso 2 foi identificada uma região caracterizada pela presença de cristais de morfologia distinta, conforme ilustrado na Figura 3. 39. Foram realizadas microanálises qualitativas dos pontos indicados na Figura 3. 39 (a), cujos resultados estão apresentados na Figura 3. 40 e Figura 3. 41.

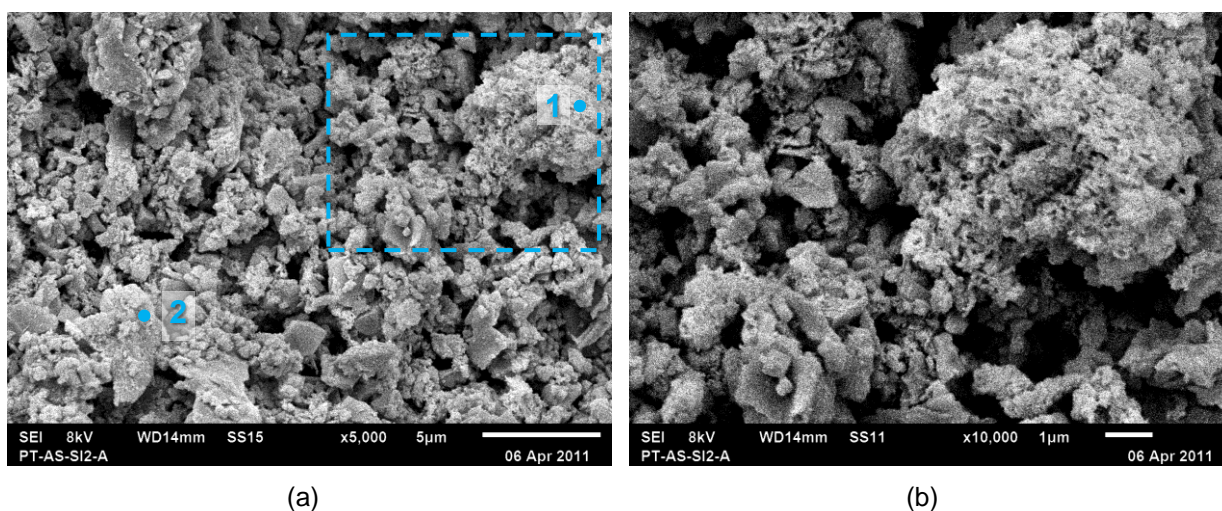


Figura 3. 39 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 2 com predominância de cristais com morfologia distinta.

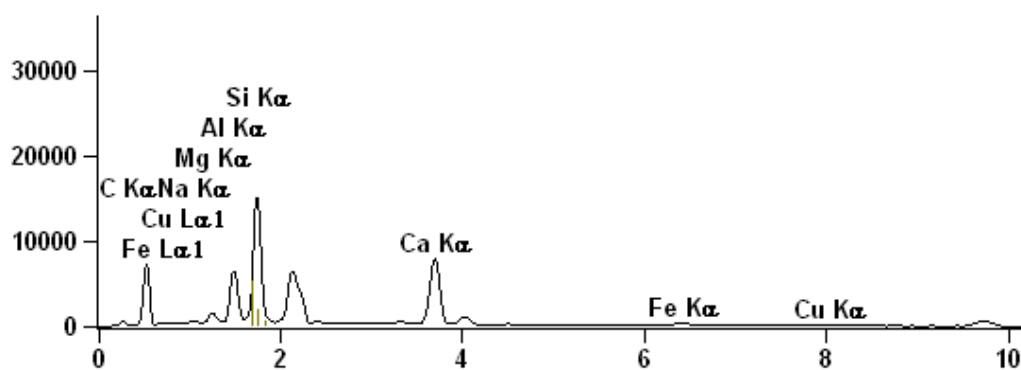


Figura 3. 40 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa do Caso 2.

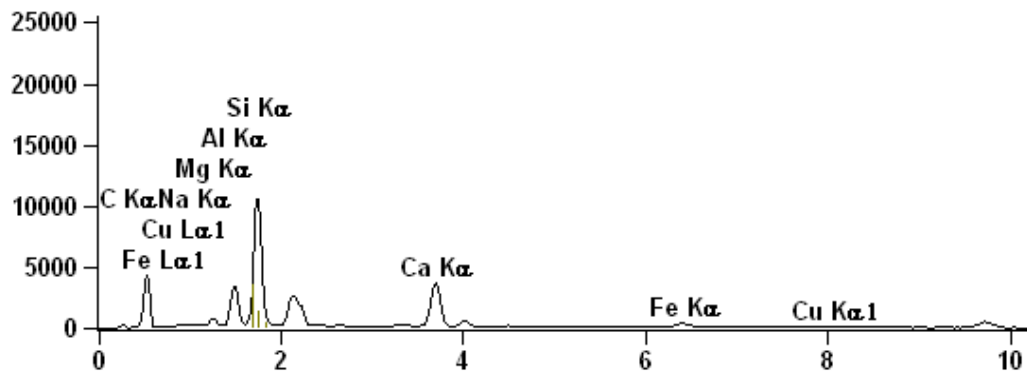


Figura 3. 41 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 2.

A análise de EDS nos pontos 1 e 2 mostram a preponderância de silício e, em menores proporções a presença de cálcio, alumínio e ferro, o que sugere que os compostos analisados sejam silicoaluminatos de cálcio hidratados, possivelmente provenientes de reações pozolânicas.

Em outra região, apresentada na Figura 3. 42, também foi identificada a presença de compostos com constituintes semelhantes a da região anterior como pode ser confirmado nos espectros EDS na Figura 3. 43 e na Figura 3. 44. Observa-se na região, além da morfologia de cristais de morfologia distinta, a presença de compostos em formatos de grãos.

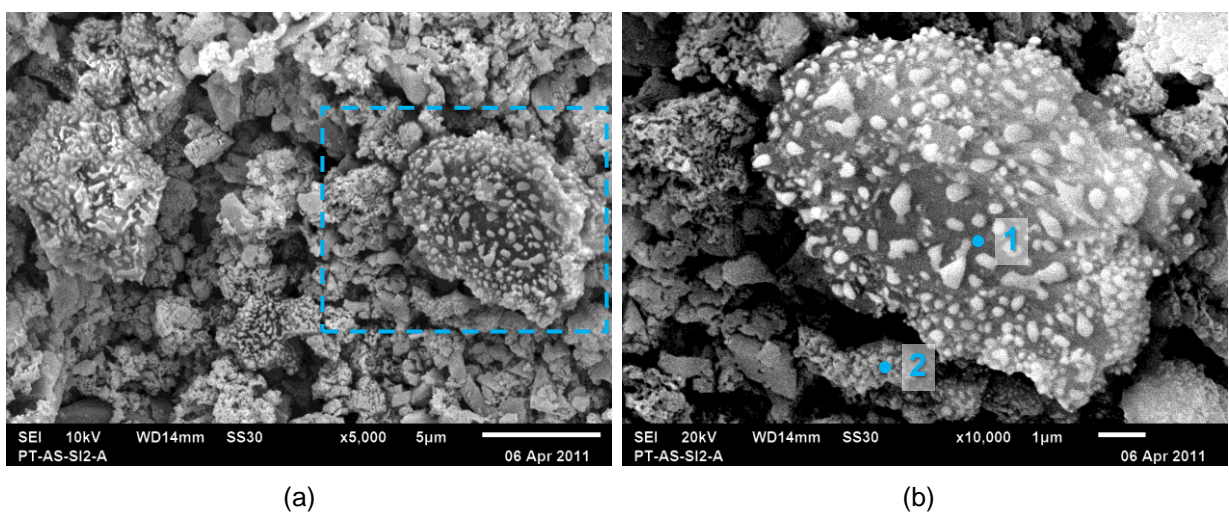


Figura 3. 42 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 2 com predominância de cristais de morfologia distinta.

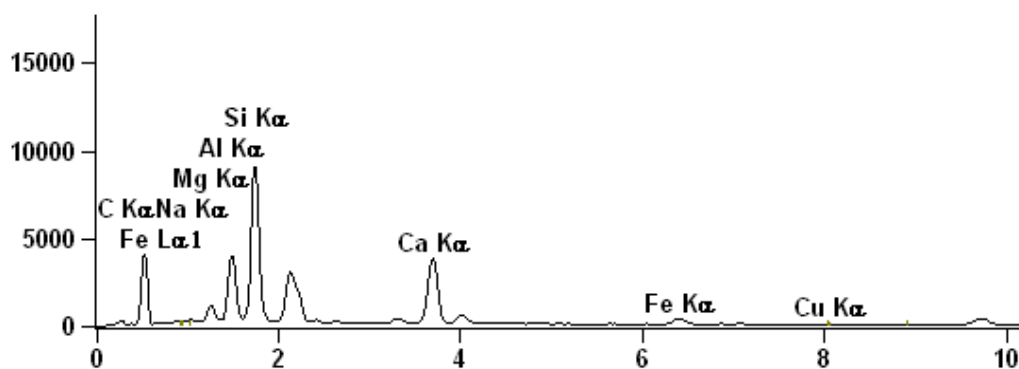


Figura 3. 43 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa do Caso 2.

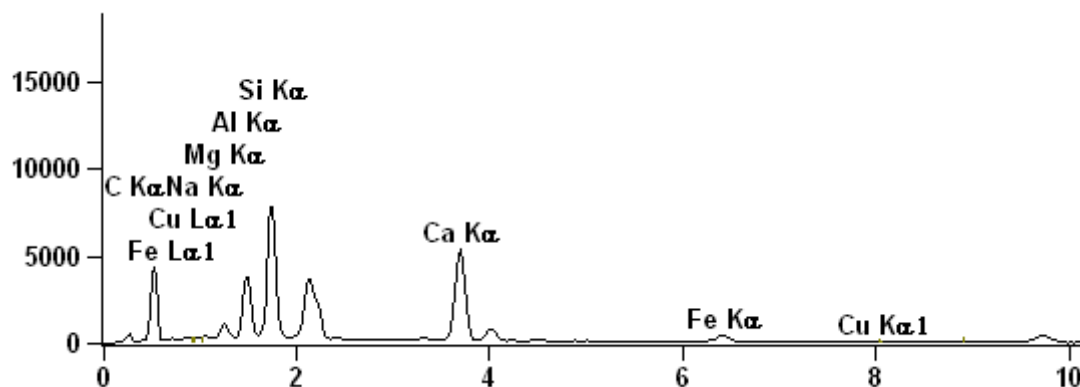


Figura 3. 44 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 2.

c. PT – Caso 3

O aspecto geral de uma região da argamassa do Caso 3 está ilustrado na Figura 3. 45. Nessa região foram realizadas microanálises qualitativas de determinados pontos, indicados na Figura 3. 45 (a), que estão apresentadas na Figura 3. 46 e Figura 3. 47.

O composto analisado no ponto 1 é constituído principalmente por cálcio e o ferro, tendo ainda teores menores de silício e alumínio; já o composto relativo ao ponto 2 é constituído fundamentalmente por ferro e alumínio, e, em quantidades menores, de silício e cálcio. A presença de altos teores de ferro confirma a observação na análise petrográfica de muitos grãos de agregados com borda de reação entre material argiloso e hidróxido de ferro na argamassa do Caso 3.

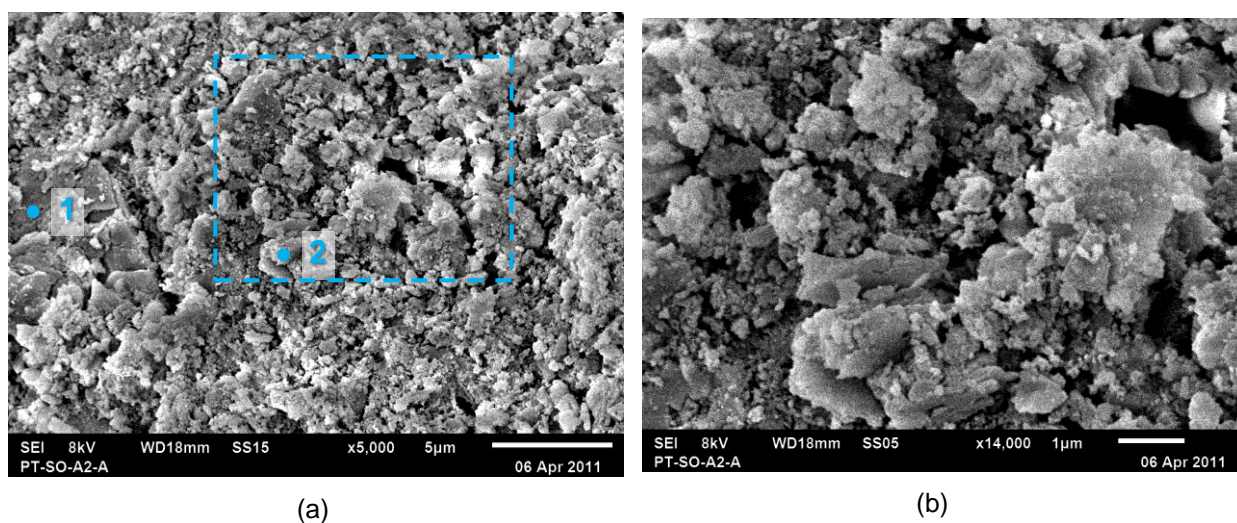


Figura 3. 45 – Micrografias de uma região da argamassa do Caso 3.

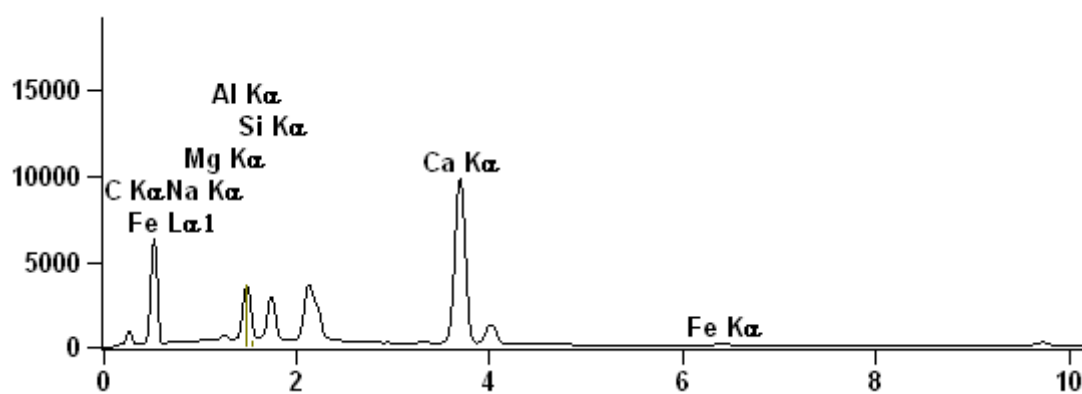


Figura 3. 46 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa histórica do Caso 3.

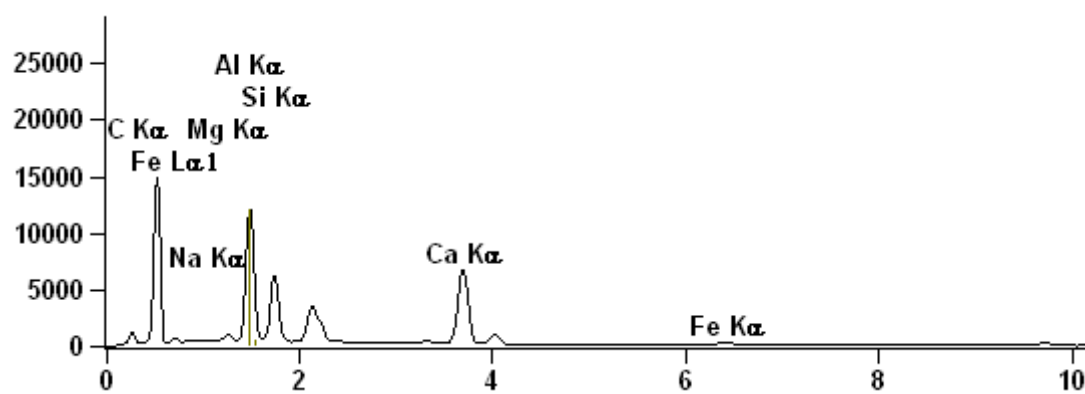


Figura 3. 47 – Espectro EDS do ponto 2 da argamassa do Caso 3.