



CATÓLICA
ESCOLA DAS ARTES

PORTO

ESTUDO DE INCOMPATIBILIDADE ENTRE
REBOCOS CIMENTÍCIOS E PAREDES DE ADOBE.
A CASA GANDARESA COMO CASO DE ESTUDO.

Dissertação apresentada à Universidade Católica Portuguesa
para obtenção do grau de Mestre em Conservação e Restauro de Bens Culturais

Beatriz Durão Soares Lemos

Porto, setembro 2025



CATÓLICA
ESCOLA DAS ARTES

PORTO

ESTUDO DE INCOMPATIBILIDADE ENTRE
REBOCOS CIMENTÍCIOS E PAREDES DE ADOBE.
A CASA GANDARESA COMO CASO DE ESTUDO.

Dissertação apresentada à Universidade Católica Portuguesa
para obtenção do grau de Mestre em Conservação e Restauro de Bens Culturais

- Especialização em -
Património Edificado

Beatriz Durão Soares Lemos

Trabalho efetuado sob a orientação e Coorientação de

Prof^ª Doutora Eduarda Vieira

Prof^ª Doutora Arquiteta Alice Tavares

Porto, setembro 2025

Agradecimentos

A realização desta dissertação contou com o contributo e apoio de várias pessoas e instituições, às quais desejo expressar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, manifesto o meu sincero agradecimento à Professora Doutora Eduarda Vieira, minha orientadora, pela orientação científica, pela disponibilidade constante e pelo rigor crítico com que acompanhou todas as fases deste trabalho. A sua dedicação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento desta investigação.

À Professora Doutora Arquiteta Alice Tavares, minha coorientadora na Universidade de Aveiro, agradeço profundamente o acompanhamento próximo, a partilha de conhecimento e toda a orientação prática nos ensaios laboratoriais, que foram determinantes para a concretização desta tese.

Dirijo também um agradecimento especial ao Pedro Santos, aluno da Licenciatura em Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro, pelo apoio imprescindível na execução dos ensaios laboratoriais. Sem a sua ajuda e empenho não teria sido possível levar a cabo grande parte deste trabalho experimental. Agradeço igualmente à Matilde Oliveira, aluna de doutoramento em Ciências e Engenharia de Materiais, pelo auxílio prestado na fase inicial da preparação dos testes de laboratório.

Ao Município de Vagos, e em particular ao Eng. Hugo Silva, deixo o meu reconhecimento pela colaboração prestada, assim como à empresa P3R, Lda., pela cedência das plantas da Casa-Museu de Santo António, fundamentais para o desenvolvimento deste estudo de caso.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia de Materiais e ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela disponibilização dos espaços e recursos necessários à realização dos ensaios laboratoriais.

Não poderia deixar de reconhecer a Universidade Católica Portuguesa, instituição onde tenho vindo a estudar há já cinco anos, e onde cresci não apenas em conhecimento, mas também em maturidade académica e pessoal.

À minha família, em especial aos meus pais e às minhas irmãs, agradeço todo o esforço, apoio e incentivo incondicional ao longo deste percurso. Este trabalho é também fruto do sacrifício e dedicação que sempre demonstraram para que eu pudesse prosseguir os meus estudos.

Aos meus amigos, agradeço a presença e o apoio constantes. Por fim, expresso a minha gratidão a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, estiveram presentes neste caminho. Em particular, agradeço ao Mohamed, pelo companheirismo, paciência e incentivo constante.

A todos, o meu mais sincero obrigada.

Resumo

A arquitetura em adobe, amplamente difundida em Portugal até meados do século XX, constitui um património de elevado valor cultural, mas apresenta vulnerabilidades significativas quando sujeita a intervenções com materiais industrializados. Entre estes, os rebocos cimentícios destacam-se pela sua recorrente aplicação em processos de reabilitação, apesar da incompatibilidade físico-química e higrotérmica com suportes de adobe.

A presente dissertação teve como objetivo analisar a compatibilidade dos rebocos cimentícios aplicados em alvenarias de adobe, através do estudo de caso da Casa Gandaresa de Santo António de Vagos e da realização de ensaios laboratoriais complementares. Foram realizadas análises mineralógicas e químicas por difração de raios X (DRX) e ensaio de dissolução em ácido, ensaios físicos de densidade aparente (método de Arquimedes), absorção por capilaridade e análise colorimétrica, de forma a caracterizar a interface entre os revestimentos cimentícios e o suporte em adobe, com especial atenção aos fenómenos de transporte e cristalização de sais solúveis.

Os resultados obtidos evidenciaram a presença de fases típicas da hidratação do cimento (portlandite e hidrotalcite), bem como de sais solúveis como gypsum, thenardite e butlerite, associados a processos ativos de degradação. Os ensaios físicos evidenciaram que a cristalização de sais e a formação de produtos de hidratação do cimento levaram ao bloqueio parcial da rede porosa. Esta obstrução reduziu a permeabilidade ao vapor de água, favorecendo a retenção de humidade no interior das paredes e criando condições propícias à acumulação de sais e à degradação progressiva do adobe. Em síntese, conclui-se que a utilização de rebocos cimentícios em alvenarias de adobe potencia a deterioração acelerada do sistema construtivo, reforçando a necessidade de recorrer a materiais de substituição compatíveis, como argamassas à base de cal e adições naturais, de forma a assegurar a conservação e a sustentabilidade deste património.

Palavras-Chave: Casa Gandaresa, Adobe, Cimento, Compatibilidade, Conservação

Abstract

Adobe architecture, widely used in Portugal until the mid-20th century, represents a heritage of high cultural value but shows significant vulnerabilities when subjected to interventions with industrial materials. Among these, cement renders stand out due to their recurrent application in rehabilitation processes, despite their physico-chemical and hygrothermal incompatibility with adobe substrates.

This dissertation aimed to analyze the compatibility of cement renders applied to adobe masonry through the case study of the Casa Gandaresa de Santo António in Vagos and complementary laboratory tests. Mineralogical and chemical analyses were carried out using X-ray diffraction (XRD) and acid dissolution tests, along with physical tests of apparent density (Archimedes method), capillary absorption, and colorimetric analysis, in order to characterize the interaction between cement-based coatings and the adobe substrate, with particular attention to the phenomena of transport and crystallization of soluble salts.

The results revealed the presence of phases typical of cement hydration (portlandite and hydrotalcite), as well as soluble salts such as gypsum, thenardite, and butlerite, associated with active degradation processes. Physical tests showed that salt crystallization and the formation of cement hydration products led to partial blockage of the pore network. This obstruction reduced water vapor permeability, promoted moisture retention inside the walls, and created favorable conditions for salt accumulation and progressive degradation of the adobe.

In summary, it is concluded that the use of cement renders in adobe masonry accelerates the deterioration of the building system, reinforcing the need to employ compatible replacement materials, such as lime-based mortars with natural additives, in order to ensure the conservation and sustainability of this heritage.

Keywords: Casa Gandaresa, Adobe, Cement, Compatibility, Conservation

| | |
|---|-----------|
| Índice | |
| Lista de Abreviaturas | 8 |
| 1. Introdução | 9 |
| 1.1. Definição do objeto de investigação e problemática..... | 9 |
| 1.2. Metodologia e estrutura da dissertação | 11 |
| 2. Estado da Arte..... | 14 |
| 2.1 O adobe: características físicas, composição e comportamento | 14 |
| 2.2 O cimento: propriedades e incompatibilidades..... | 17 |
| 2.3. Patologias associadas à aplicação de rebocos de cimento em alvenarias de adobe ... | 21 |
| 3. Caracterização do Caso de Estudo | 25 |
| 3.1 Apresentação, enquadramento histórico e estado de conservação do edifício | 25 |
| 3.2 Objetivos das análises laboratoriais | 29 |
| 4. Trabalho Experimental..... | 32 |
| 4.1. Análises Laboratoriais a Amostras do Caso de Estudo..... | 32 |
| 4.1.1. Análise Lupa Eletrónica | 32 |
| 4.1.2. Análise por Difração de Raios X (DRX)..... | 33 |
| 4.1.3. Ensaio de Arquimedes..... | 37 |
| 4.1.4. Ensaio de Dissolução em Ácido | 40 |
| 4.1.5 Análise Colorimétrica..... | 43 |
| 4.1.6. Ensaio de Absorção por Capilaridade | 45 |
| 5. Conclusões | 49 |
| 5.1. Recomendações Futuras | 50 |
| Bibliografia..... | 52 |
| Apêndice A - Registo Fotográfico da Casa-Museu de Santo António de Vagos | 57 |
| Apêndice B - Registo das amostras..... | 65 |
| B.1. Tabelas | 66 |
| B.2. Imagens Amostras | 69 |
| Apêndice C - Ensaios Laboratoriais..... | 74 |
| C.1. Imagens Lupa Eletrónica | 75 |
| C.2. Procedimento dos Ensaios | 80 |

Lista de Abreviaturas

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

SEM-EDS – Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy
(Microscopia Eletrónica de Varrimento com EDS)

EN – Normas Europeias

ISO – International Organization for Standardization (ex.: ISO 14688-2:2017)

CIELAB – Sistema de medição colorimétrica (L^* , a^* , b^*)

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites

GCI – Getty Conservation Institute

ICCROM – International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural
Property

CRATerre – Centre International de la Construction en Terre

CEM – Classificação de cimentos segundo EN 197-1

1. Introdução

1.1. Definição do objeto de investigação e problemática

O adobe, enquanto técnica de construção de terra, representa um dos sistemas construtivos mais antigos da humanidade. Utilizado em diferentes geografias e contextos culturais, este material destaca-se pela sua simplicidade compositiva, adequação climática e sustentabilidade ambiental. Em Portugal, a sua aplicação foi particularmente significativa nas regiões centro e litoral do país, onde se consolidou como uma solução construtiva dominante até meados do século XX (Tavares et al., 2018a). As paredes de adobe, compostas por blocos moldados de terra com ou sem estabilizantes naturais, beneficiam da massa térmica, atenuando oscilações diurnas e contribuindo para a regulação passiva da temperatura interior (Austin, 1984).

A continuidade desta prática ao longo do tempo, mesmo após o regresso de emigrantes economicamente favorecidos do Brasil, revela a forte persistência cultural e funcional do adobe. Apesar de algumas atualizações na linguagem arquitetónica e nas exigências de salubridade, a alvenaria de terra manteve-se como solução estrutural em muitas construções da região de Aveiro, nomeadamente nas chamadas "casas de brasileiro"¹, nas quais se observam preocupações com o conforto e a durabilidade, mas sem substituição radical dos sistemas tradicionais (Tavares et al., 2018b).

Contudo, a partir da década de 1940, o avanço da industrialização e a disseminação de novos materiais construtivos como o cimento e o betão armado marcaram uma viragem nos paradigmas da construção. A incorporação de rebocos cimentícios sobre paredes de adobe foi frequentemente justificada por razões de durabilidade, economia ou modernização estética, sem que fosse ponderada a compatibilidade entre os materiais aplicados e o substrato original (Tavares et al., 2021). Este tipo de intervenção, em muitos casos realizado sem qualquer avaliação prévia de compatibilidade, veio a revelar-se um dos principais fatores de degradação das construções em adobe.

A principal problemática reside na incompatibilidade higroscópica e mecânica entre materiais modernos e materiais porosos tradicionais. O cimento, devido à sua elevada densidade e reduzida permeabilidade ao vapor de água, impede a respiração natural das paredes, provocando acumulação de humidade, condensações e tensões internas que favorecem fissuração, delaminação e perda de coesão do adobe (Torraca, 2005). Estes processos são agravados pela

¹ Designam habitações construídas ou adaptadas por emigrantes regressados do Brasil, entre finais do século XIX e início do século XX, caracterizadas pela introdução de elementos decorativos e soluções arquitetónicas mais elaboradas sobre as tipologias tradicionais de adobe (Tavares, Costa & Varum, 2018b).

presença de sais solúveis, que por sua vez migram através da parede e se acumulam nas interfaces entre suporte e reboco, originando cristalizações cíclicas que aceleram a degradação. A investigação de Silveira et al. (2007) demonstra que as alterações provocadas por rebocos de cimento em alvenarias de terra não se limitam a aspetos estruturais, mas incluem também impactos visuais e físicos associados à coloração superficial, à retração diferencial e à perda da textura original. Os autores sublinham a importância de se utilizarem argamassas compatíveis, com comportamento semelhante ao do suporte, como forma de garantir a durabilidade e a legibilidade histórica da construção.

Estudos laboratoriais realizados por Martins e Varum (2006) sobre adobes do distrito de Aveiro comprovam a elevada porosidade e heterogeneidade dos materiais usados, o que os torna particularmente sensíveis à presença de elementos externos agressivos. A variabilidade dimensional dos blocos, o tipo de solo utilizado e a presença de agregados orgânicos condicionam diretamente o desempenho físico-mecânico das alvenarias, exigindo especial cautela na escolha de materiais de reparação e acabamento.

Neste contexto, a presente investigação propõe-se estudar a incompatibilidade entre rebocos de cimento e paredes de adobe, a partir do caso de estudo da Casa-Museu de Santo António de Vagos, uma construção representativa da arquitetura tradicional da região gandraesa². A escolha deste edifício prende-se não só com o seu valor histórico e simbólico, mas também com a sua representatividade em termos de sistemas construtivos e patologias associadas a intervenções com materiais modernos. O estudo pretende avaliar, com base em ensaios laboratoriais e observação *in situ*, os efeitos da presença de rebocos cimentícios sobre a durabilidade, o comportamento higroscópico e o aspeto visual das alvenarias de adobe.

Ao escolher este tema, importa ainda destacar a motivação pessoal e profissional que lhe está subjacente. Enquanto conservador-restaurador, não é comum desenvolver uma dissertação exclusivamente centrada em investigação laboratorial. Contudo, o interesse pela arquitetura vernácula, em particular pelas construções de terra de zonas de planície e a convicção de que o adobe não representa apenas um legado do passado, mas também um material com potencial para a arquitetura sustentável do futuro, justificam esta opção. A abordagem laboratorial foi eleita precisamente por permitir uma análise objetiva, comparativa e mensurável das patologias e das compatibilidades materiais, oferecendo um contributo científico sólido que pode apoiar

² A região gandraesa corresponde à faixa arenosa do noroeste da Beira Litoral, entre Aveiro e Figueira da Foz, onde o adobe foi amplamente utilizado como sistema construtivo até meados do século XX (Dias, Oliveira & Galhano, 1959).

futuras decisões de conservação, sem recorrer diretamente à intervenção em património edificado.

1.2. Metodologia e estrutura da dissertação

A presente investigação conjuga a análise de materiais recolhidos num edifício em adobe com uma componente experimental realizada nos laboratórios do departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade de Aveiro, visando compreender os efeitos da aplicação de argamassas cimentícias sobre suportes em adobe. A metodologia adotada parte de uma abordagem comparativa entre o comportamento físico e químico de amostras reais, recolhidas na Casa-Museu de Santo António de Vagos, e provetes moldados com diferentes composições, permitindo estudar a compatibilidade entre os materiais e os mecanismos que podem potenciar a degradação do suporte.

As amostras recolhidas no edifício foram submetidas a um conjunto de ensaios laboratoriais que permitiram caracterizar a sua composição mineralógica, comportamento hídrico e degradação superficial. Recorreu-se à difração de raios X (DRX) para identificar as fases cristalinas presentes nos materiais, particularmente relevantes para a interpretação de reações de carbonatação ou de formação de sais secundários em ambientes húmidos (Pauletto et al., 2020). Paralelamente, realizaram-se testes de colorimetria com o objetivo de detetar alterações cromáticas superficiais resultantes de processos de degradação ou contaminação salina. Adicionalmente, realizaram-se testes de solubilidade de sais, com o intuito de identificar a presença de cloretos, sulfatos e nitratos. Espinosa et al. (2008) demonstraram, através da análise termodinâmica e cinética de sais em materiais porosos, que as variações de humidade relativa crítica afetam diretamente a taxa de cristalização e a reincorporação de água nos sais, agravando a deterioração em sistemas com elevada porosidade e retenção de humidade. A estes ensaios junta-se ainda a aplicação do método de Arquimedes, utilizado para determinar a porosidade aberta e a absorção de água das amostras, indicadores essenciais na leitura do seu comportamento capilar e da vulnerabilidade à ascensão de humidade (Torraca, 2005).

Em simultâneo, foram produzidos provetes laboratoriais com o objetivo de testar o comportamento físico de diferentes composições de argamassas cimentícias. A produção destes provetes seguiu a norma EN 1015-11³. Cada provete tem dimensões de 4×4×16 cm e foram

³ A norma EN 1015-11 define os procedimentos de preparação, cura e ensaio de provetes prismáticos de argamassas (40 × 40 × 160 mm), permitindo determinar a resistência à flexão e à compressão de argamassas endurecidas (CEN, 2019).

moldadas três unidades por tipo de cimento utilizado. Os cimentos selecionados representam diferentes tipologias correntes: Cimentos Lemona (CEM I 52.5R), um cimento Portland puro com $\geq 95\%$ de clínquer e até 5% de componentes adicionais; Morteros Tudela Veguín (CEM II/B-V 32.5R), com 32% de cinza volante, 0,02% de cloretos e 2,9% de trióxido de enxofre (SO_3); e Cimpor (CEM II/B-L 32.5N), com um teor de clínquer entre 65% e 79%, entre 21% e 35% de calcário e até 5% de constituintes adicionais minoritários, além da presença de sulfato de cálcio como regulador de presa.

As misturas foram preparadas com uma parte de cimento, uma parte de areia fina, uma parte de areia semi-fina, ambas de pedreira da zona de Guimarães e três partes de uma areia com o código SWL⁴. Esta composição foi escolhida de modo a garantir uma proporção representativa de argamassas utilizadas em intervenções contemporâneas, mas suficientemente contrastante para evidenciar os efeitos de cada ligante. Os provetes foram sujeitos exclusivamente ao ensaio de capilaridade, com o intuito de perceber a taxa de absorção de água por ascensão capilar, um dos fatores mais críticos na avaliação da compatibilidade entre revestimentos e suportes porosos. Como referido por Silveira et al. (2007), a aplicação de argamassas de elevada densidade sobre materiais de terra tende a bloquear os mecanismos naturais de evaporação, intensificando a acumulação de humidade e contribuindo para o aparecimento de patologias.

Com esta metodologia, procura-se analisar de forma sistemática os mecanismos de degradação observados em contextos reais, relacionando-os com os comportamentos identificados em laboratório. O confronto entre as propriedades dos materiais cimentícios e as exigências do adobe, enquanto sistema construtivo poroso, permitirá fundamentar propostas de intervenção mais adequadas e coerentes com os princípios da conservação preventiva.

Embora a literatura e documentos de referência apontem de forma consistente para a incompatibilidade entre rebocos cimentícios e alvenarias de adobe, esta dissertação não se centra em “provar” esse princípio, mas em torná-lo diagnosticável e fundamentável num caso real. Assim, o foco do trabalho é compreender como essa incompatibilidade se materializa no edifício selecionado, em particular através da relação entre comportamento hídrico, acumulação de humidade, presença de sais e alterações micro/mineralógicas, e de que modo diferentes técnicas de caracterização, quando analisadas em conjunto, permitem estabelecer correlações robustas entre causas e manifestações patológicas. Deste modo, o contributo da investigação reside na integração de um conjunto de metodologias laboratoriais e observação in situ (DRX, parâmetros físicos por método de Arquimedes, dissolução em ácido, colorimetria e

⁴ Designação do lote de areia utilizada para padronizar a mistura dos provetes.

capilaridade) como protocolo articulado de leitura, capaz de transformar uma evidência geral já conhecida num diagnóstico material aplicado, útil para sustentar recomendações de conservação e reabilitação compatíveis com suportes em terra crua.

Importa referir que não foi possível complementar a análise mineralógica por DRX com microscopia eletrónica de varrimento (SEM/EDS).

Apesar do SEM ser uma técnica pertinente para a observação microestrutural, caracterização morfológica de produtos de reação e identificação localizada de elementos (incluindo em interfaces reboco–suporte), a sua utilização ficou condicionada por limitações de recursos financeiros e pela indisponibilidade/condicionamento de acesso ao equipamento no período de realização do trabalho. Deste modo, privilegiaram-se metodologias viáveis e reproduzíveis no contexto do projeto, assegurando ainda assim uma caracterização robusta através do conjunto de técnicas aplicadas (DRX e ensaios físico-químicos complementares).

A dissertação organiza-se em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema, os objetivos da investigação e a metodologia adotada. No segundo capítulo desenvolve-se o estado da arte, abordando criticamente a construção em adobe, as patologias associadas aos rebocos de cimento e os princípios de compatibilidade de materiais. O terceiro capítulo incide sobre o caso de estudo, com a descrição histórica da casa em questão e os objetivos da análise laboratorial. No quarto capítulo apresenta-se a descrição e os resultados dos ensaios realizados. Finalmente, no quinto capítulo sintetiza-se as principais conclusões e propõem-se recomendações para a intervenção em edifícios de adobe.

2. Estado da Arte

2.1 O adobe: características físicas, composição e comportamento

A construção em terra representa uma das formas mais antigas e disseminadas de edificação, com manifestações técnicas e culturais adaptadas às condições locais. Entre as técnicas construtivas baseadas em terra, o adobe destaca-se pela simplicidade do processo e pela acessibilidade dos materiais, sendo produzido por moldagem manual de uma mistura de terra, água e, frequentemente, cal aérea ou aditivos fibrosos como a palha, seguida de secagem ao sol. Embora à primeira vista simples, esta técnica incorpora um saber empírico acumulado ao longo de séculos, com soluções adaptadas a contextos climáticos diversos e uma racionalidade construtiva centrada na sustentabilidade, na eficiência térmica e na proximidade dos recursos (Cranstone, 1991).

Em Portugal, a utilização do adobe encontra expressão significativa nas regiões Centro e Sul, De Ovar a Leiria como elemento construtivo principal de alvenarias exteriores e Alentejo para paredes interiores. Estas regiões revelam uma adaptação eficaz aos materiais locais e uma continuidade de saberes construtivos tradicionais. Barreira (2022), ao estudar as casas gandaresas, destaca a dimensão cultural do adobe como expressão de identidade local, enfatizando a relação entre o espaço construído, o modo de vida agrícola e a autossuficiência material.

A composição do adobe é determinada pela proporção de argila, silte e areia, sendo recomendada uma percentagem de argila entre 15% e 30%, associada a um teor adequado de areia que garanta resistência à compressão e reduza a retração. A composição do adobe na região de Aveiro/Gândara assenta em terras arenosas, sendo frequente a inclusão de cal para melhorar o desempenho e a durabilidade (nomeadamente em zonas húmidas, como poços) (Varum et al., 2005). A norma ISO 14688-2:2017, ainda que não específica para a construção em terra, dá critérios para a classificação de solos com base em propriedades granulométricas, plásticas e composição mineral, servindo como referência técnica nos processos de caracterização do solo destinado à produção de adobes.

A composição do adobe varia substancialmente consoante a geografia, refletindo a disponibilidade dos solos locais e o saber empírico das comunidades construtoras. Em Portugal, os adobes da região Centro revelam uma predominância de silte e argila, com menor proporção

de areia, o que favorece a plasticidade da mistura, mas compromete a resistência mecânica se não for estabilizada com fibras ou cal (Tavares et al., 2018a). Em contrapartida, na região do Alentejo, encontram-se adobes mais arenosos, frequentemente com adição de palha para controlar a retração.

A composição e as propriedades físicas do adobe refletem-se na sua densidade seca aparente, que, em Portugal, apresenta valores médios bastante consistentes. Ensaio em blocos recolhidos na região de Aveiro revelaram pesos volúmicos médios de 14,77 kN/m³ e 17,09 kN/m³, consoante o edifício analisado (Carvalho, 2011). Em Sarrico (2014), os blocos de adobe ensaiados apresentam peso volúmico médio de 18,128 kN/m³, com variação entre ~16,07 e 20,10 kN/m³ (\approx 1645–2049 kg/m³). Estes valores situam-se claramente abaixo dos materiais industrializados, como o betão, o que contribui para a leveza estrutural e a eficiência térmica das alvenarias em adobe. A elevada porosidade total, frequentemente superior a 40%, confere ao adobe uma notável capacidade de absorção e libertação de humidade, funcionando como um regulador higroscópico natural. Esta característica, ainda que benéfica para o conforto ambiental, torna o material particularmente vulnerável à ação da água e à presença de sais solúveis, fatores que aceleram os processos de degradação, sobretudo na ausência de proteção superficial adequada (Santiago, 2007).

A resistência à compressão dos blocos de adobe é geralmente baixa, mas suficiente para estruturas de um ou dois pisos. Ensaio experimentais realizados por Al-Ajmi et al. (2016) mostraram que blocos de adobe preparados com uma proporção ótima areia/argila de 0,15 atingiram resistência média de aproximadamente 1,52 MPa. Estes autores verificaram ainda que a incorporação de fibras vegetais em pequena percentagem melhora o desempenho mecânico, enquanto teores excessivos reduzem a resistência.

A seguir, apresenta-se um paralelo com materiais semelhantes, mas distintos dos adobes: em blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento, Ahmed et al. (2024) observaram que a resistência à compressão aumenta até um teor ótimo de humidade de moldagem e depois decresce, enquanto a absorção de água cresce com frações de argila mais elevadas e com mais água de moldagem. (Ahmed et al., 2024).

Estes resultados não são diretamente extrapoláveis aos adobes não estabilizados, dado que os BTC cimentícios apresentam maior densidade, compactidade e distribuição de poros diferente, condicionando a sorptividade e a secagem de modo diverso. (Ahmed et al., 2024).

Do ponto de vista térmico, o adobe possui elevada inércia térmica, ou seja, capacidade de armazenar calor e libertá-lo lentamente, amortecendo as oscilações térmicas diárias. Mileto et

al. (2012) referem que, em climas secos e com grande amplitude térmica, esta propriedade contribui para o conforto interior sem recurso a meios mecânicos.

Bui et al. (2009) confirmam que a resposta do adobe à humidade depende da qualidade do solo utilizado, da presença de estabilizantes naturais e da existência de elementos de proteção arquitetónica, como beirados ou rodapés. A vulnerabilidade do adobe à ação da água justifica a adoção de rebocos compatíveis, nomeadamente de terra estabilizada com cal aérea, capazes de proteger a superfície sem impedir a evaporação.

A literatura especializada tem vindo a reforçar a importância de uma caracterização rigorosa dos adobes existentes antes de qualquer intervenção. Turanli e Saritas (2011), em ensaios de paredes de adobe sujeitas a cargas laterais, demonstraram a influência da composição e do reforço na capacidade estrutural e na deformabilidade, confirmando a necessidade de adaptações específicas consoante a técnica construtiva.

A compatibilidade dos materiais de intervenção com o adobe tem sido destacada por organismos internacionais. O Project Terra (2000) chama a atenção para os riscos associados à utilização de materiais modernos sem estudo de compatibilidade, defendendo abordagens que respeitem os princípios de reversibilidade, durabilidade e afinidade material. A sua revisão da literatura identifica vários casos de falhas em reabilitações de edifícios em terra devido ao uso de ligantes inadequados, nomeadamente cimentos Portland, cuja rigidez e impermeabilidade ao vapor são incompatíveis com a natureza porosa do adobe.

A Carta do Património Vernáculo Construído (ICOMOS, 1999) reforça esta posição, ao afirmar que a conservação de estruturas vernaculares deve basear-se no uso de materiais compatíveis e técnicas tradicionais, reconhecendo a sua vulnerabilidade à introdução de materiais modernos não testados. A integração destas diretrizes normativas na prática da conservação é essencial para garantir a eficiência e sustentabilidade das intervenções em património construído em terra crua.

Desta forma, o conhecimento aprofundado das características do adobe é condição essencial para qualquer proposta de conservação ou reabilitação, não apenas pela especificidade do material, mas também pela relação entre o sistema construtivo, o clima local e as técnicas de manutenção tradicionais. É neste enquadramento que se compreende a necessidade de compatibilizar os materiais aplicados em intervenção com os suportes originais, conforme será aprofundado nas secções seguintes.

2.2 O cimento: propriedades e incompatibilidades

O cimento Portland, resultado da industrialização da construção e da busca por soluções normatizadas e duráveis, é hoje um dos materiais mais utilizados a nível global. As suas propriedades físico-químicas, nomeadamente a elevada resistência à compressão, durabilidade, aderência e tempo de presa controlável, justificam amplamente a sua aplicação em contextos estruturais modernos (Taylor, 1997). No entanto, estas mesmas características tornam-no frequentemente inadequado quando aplicado em sistemas construtivos vernáculos, como o adobe, cuja elevada porosidade, permeabilidade e sensibilidade higroscópica exigem materiais compatíveis e tecnicamente adaptados (Torraca, 2005). A literatura recente tem reforçado que a rigidez, a impermeabilidade e a alcalinidade do cimento podem induzir patologias severas nos suportes de terra crua, comprometendo a durabilidade e autenticidade dos edifícios (Silveira et al., 2007).

De acordo com a norma europeia EN 197-1, o cimento é definido como um aglomerante hidráulico composto maioritariamente por clínquer, ao qual podem ser adicionados calcário, pozolanas, cinzas volantes, escórias ou sílica de fumo, entre outros constituintes minoritários. A hidratação do clínquer, sobretudo dos silicatos tricálcico (C_3S) e dicálcico (C_2S), conduz à formação de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e portlandite ($Ca(OH)_2$), responsáveis pela resistência mecânica da pasta endurecida (Taylor, 1997). Este processo de hidratação ocorre em diferentes fases, incluindo uma fase inicial rápida, responsável pela libertação de calor e pela formação imediata de compostos hidratados, uma fase de dormência que permite a trabalhabilidade da mistura, e uma fase de aceleração, durante a qual a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de portlandite ($Ca(OH)_2$) contribui decisivamente para o ganho de resistência mecânica (Taylor, 1997).

O pH da solução intersticial da pasta de cimento ultrapassa frequentemente valores de 12 nas primeiras horas após a hidratação, consequência da dissolução de hidróxidos alcalinos e da formação de portlandite, criando um ambiente fortemente alcalino pouco compatível com suportes porosos como o adobe (Taylor, 1997). Essa alcalinidade favorece reações deletérias na interface reboco-substrato, potenciando a acumulação e cristalização de sais solúveis, conduzindo à degradação progressiva da parede (Espinosa et al., 2008). Nos cimentos com elevado teor de clínquer, como os CEM I, a abundância de portlandite aumenta a suscetibilidade a fenómenos de carbonatação em ambientes húmidos, conduzindo a variações volumétricas e fissuração (Taylor, 1997). Já os cimentos compostos (CEM II), como o CEM II/B-V da Morteros Tudela Veguín, incorporam adições de cinzas volantes que reagem com a portlandite,

reduzindo a alcalinidade da matriz e melhorando a estabilidade volumétrica (Pauletto et al., 2020). O CEM II/B-L, com adição de calcário, apresenta um comportamento intermédio, mantendo uma matriz relativamente compacta e impermeável (Cimpor, ficha técnica).

A reação de hidratação do cimento gera uma estrutura densamente empacotada, com baixa porosidade capilar e elevada rigidez, características adequadas à construção moderna, mas profundamente incompatíveis com os sistemas construtivos em terra crua. O adobe, por seu lado, é um material naturalmente poroso, higroscópico e permeável ao vapor de água, cujas propriedades contribuem para a regulação térmica e hídrica do edifício (Silveira et al., 2007). Esta incompatibilidade torna-se particularmente crítica no que respeita à humidade: enquanto o adobe permite a ascensão e evaporação da água por capilaridade, o cimento forma um revestimento praticamente estanque, que bloqueia os fluxos naturais de evaporação, retendo a humidade na base das paredes e criando condições propícias à degradação interna, nomeadamente pela recristalização de sais solúveis (Espinosa et al., 2008).

Ensaio laboratoriais conduzidos por Silveira et al. (2007) em provetes de adobe revestidos com diferentes tipos de argamassa demonstraram que as de cimento apresentam menor permeabilidade ao vapor, retração acentuada e destacamentos precoces, em contraste com as argamassas de cal, que mantiveram maior compatibilidade. Resultados semelhantes foram descritos por Corradi et al. (2018), que observaram que os rebocos finos de cimento aplicados em paredes históricas apresentavam rigidez excessiva, menor aderência à interface e fissuração precoce, comprometendo a estabilidade e a durabilidade do conjunto. Do ponto de vista térmico, o cimento possui elevada condutividade térmica e baixa capacidade de armazenamento de calor, contrastando com a elevada inércia térmica do adobe, que contribui para a estabilidade das condições interiores em climas com grandes amplitudes térmicas diárias (Santiago, 2007). A aplicação de cimento rompe esse equilíbrio, originando pontes térmicas e zonas de condensação intersticial, como evidenciado por Corradi et al. (2018), que registaram o aparecimento de fissuração e destacamentos em rebocos cimentícios aplicados em paredes históricas, associados a diferenças de comportamento higratérmico entre o reboco e o suporte.

Mecanicamente, o cimento apresenta um módulo de elasticidade significativamente superior ao do adobe, o que implica que, sob ações térmicas ou sísmicas, o reboco tende a conservar a sua forma enquanto o suporte deforma, provocando fissuração, destacamentos e perda de aderência (Tavares et al., 2021). A rigidez excessiva e a retração durante a cura favorecem a formação de microfissuras, que se tornam pontos de entrada de água e de agentes agressivos. Ensaio em painéis históricos mostram que rebocos delgados à base de cimento aumentam a rigidez e a capacidade ao corte, mas o comportamento passa a ser governado pela ligação na interface;

quando ocorrem fissuração e descolagem, o benefício estrutural torna-se negligenciável (Corradi, Sisti & Borri, 2018). Além disso, a resistência de interface é sensível à humidade: em tripleteo tijolo–argamassa de cal, as amostras saturadas apresentaram $\approx 20\%$ menos resistência ao corte do que em condições secas, o que potencia a abertura de fendas e a perda de aderência (Bompa & Elghazouli, 2020).

Diversas investigações laboratoriais têm procurado demonstrar, quantitativamente, os efeitos nefastos da utilização deste material sobre suportes de adobe. Silveira et al. (2007), por exemplo, realizaram ensaios de absorção de água e retração em provetes de adobe com diferentes tipos de revestimento, concluindo que as argamassas de cimento reduzem a evaporação em cerca de 70%, agravando os processos de degradação interna. Os provetes revestidos com cimento apresentaram ainda destacamentos precoces e fissuração longitudinal, fenómenos inexistentes nos revestidos com cal.

Estudos conduzidos por Tavares et al. (2018d) confirmaram que, em amostras de adobe da região centro de Portugal, a aplicação de rebocos cimentícios conduz à cristalização de sais junto à interface entre o reboco e o suporte, provocando desagregação progressiva da superfície e perda de espessura útil. As análises por DRX e SEM-EDS realizadas nestes estudos identificaram a presença de etringite, gipsita e calcita secundária nos pontos de contacto entre os materiais, revelando reações químicas entre os produtos de hidratação do cimento e os sais transportados por capilaridade.

A norma EN 197-1 (Cement – Composition, specifications and conformity criteria for common cements) estabelece os limites de composição dos diferentes tipos de cimento, regulando, por exemplo, que o CEM I deve conter entre 95% e 100% de clínquer, enquanto os cimentos CEM II incorporam entre 6% e 35% de componentes adicionais, como calcário (CEM II/B-L) ou cinzas volantes (CEM II/B-V). Estas variações de composição influenciam diretamente o comportamento das argamassas, nomeadamente a taxa de hidratação, a formação de portlandite e a suscetibilidade à carbonatação, como amplamente discutido na literatura especializada.

Por outro lado, a norma EN 1015-11 regula os métodos de ensaio de resistência e absorção de argamassas endurecidas, sendo frequentemente utilizada em contextos de caracterização de materiais aplicados sobre suportes históricos. Esta norma foi, aliás, a base metodológica para os provetes moldados na presente investigação, que seguem as dimensões padronizadas de $4 \times 4 \times 16$ cm e estão sujeitos a condições de cura controlada, com o objetivo de simular o desempenho real de revestimentos cimentícios em alvenarias de adobe.

Do ponto de vista das recomendações patrimoniais, na Carta do Património Vernáculo Construído, ratificada pelo ICOMOS em 1999, afirma-se que: “O uso de novos materiais só

deverá ser permitido quando forem julgados compatíveis com os materiais originais.” Esta disposição, ainda que genérica, exclui implicitamente o uso de cimento Portland em edifícios de adobe, dada a comprovada incompatibilidade entre ambos, como demonstrado em inúmeras investigações.

Mais explícita é a recomendação do National Park Service dos Estados Unidos, no seu manual técnico Conservação de Edifícios Históricos em Adobe, onde se lê: “Nunca se deve substituir uma argamassa adobe por uma argamassa de cal ou de cimento Portland.”, “As argamassas compostas com cimento Portland [...] vão provocar a fratura dos tijolos – o material mais fraco – a sua desagregação e eventual desintegração.”

Estas orientações são reforçadas pelo relatório técnico do Project Terra (2000), desenvolvido por CRATerre, ICOMOS, GCI e ICCROM, que denuncia o uso generalizado de consolidantes e revestimentos inapropriados em construções de terra, destacando os efeitos destrutivos da impermeabilização e da rigidez excessiva. Este relatório, de carácter internacional, recomenda expressamente que as intervenções respeitem os princípios da compatibilidade física, química e mecânica entre materiais.

A análise das propriedades físico-químicas do cimento, associada aos estudos experimentais e às normas técnicas e patrimoniais, confirma de forma inequívoca que o cimento Portland, mesmo em formulações compostas, é incompatível com alvenarias de adobe. Esta incompatibilidade manifesta-se em múltiplos níveis: bloqueio da evaporação, geração de tensões internas, retração, fissuração, migração e cristalização de sais, perda de aderência e, conseqüentemente, degradação acelerada do suporte. A sua aplicação, ainda frequente em obras de reabilitação, revela a persistência de um desalinhamento entre a prática e o conhecimento técnico consolidado. Esta dissertação propõe-se, entre outros objetivos, a contribuir para esse alinhamento, reforçando a necessidade de opções compatíveis, informadas e cientificamente sustentadas.

2.3. Patologias associadas à aplicação de rebocos de cimento em alvenarias de adobe

A aplicação de rebocos cimentícios sobre alvenarias de adobe tem sido amplamente apontada como uma das principais causas de patologias no tipo de alvenarias em estudo. A origem destes fenómenos está profundamente relacionada com a incompatibilidade física, química e mecânica entre os dois materiais. O cimento, ao contrário da terra, apresenta rigidez elevada, baixa permeabilidade ao vapor de água e forte retração durante a cura, criando condições desfavoráveis para o bom desempenho do adobe subjacente (Silveira et al., 2007). Esta dissonância comportamental entre o reboco e o substrato desencadeia um conjunto de patologias recorrentes, que comprometem a integridade do sistema construtivo e aceleram a degradação do edificado.

Entre os fenómenos mais comuns observam-se fissuração, destacamento dos revestimentos, erosão superficial, pulverulência, perda de coesão do adobe e desagregação de camadas. A fissuração ocorre devido às tensões induzidas pelas diferenças de módulo de elasticidade e pela retração diferenciada dos materiais. O destacamento dos rebocos é frequentemente causado pela fraca adesão da - base porosa e deformável do adobe, agravada pela rigidez excessiva do cimento (Torraca, 2005). Estas fissuras, ao permitirem a entrada de água, potenciam ainda mais o ciclo de degradação, especialmente em regiões expostas a variações térmicas ou precipitação frequente.

No contexto português, estudos de campo realizados na região de Aveiro revelam uma prevalência significativa de patologias em construções de adobe com camadas de reboco cimentício. A investigação conduzida por Tavares et al. (2018) documenta casos em que a substituição de argamassas tradicionais por cimento resultou em degradação acelerada da base mural, com evidência de humidade ascensional bloqueada, destacamento extensivo e colapso de elementos construtivos. A análise estratigráfica demonstrou que os rebocos de cimento, ao impedirem a evaporação natural da água, promoveram a saturação das paredes, criando um ambiente propício à migração de sais e à perda estrutural do suporte.

Outros estudos, como os de Barreira (2022), reportam edifícios na zona das Gândaras onde rebocos de cimento causaram desagregação progressiva das primeiras fiadas de adobe, associada à retenção sucessiva de humidade. As manifestações incluem colapsos parciais, descamação superficial e perda de espessura útil. Trabalhos do LNEC em construções de adobe no Ribatejo apontam ainda a presença de microrganismos, como fungos e algas, colonizando superfícies constantemente húmidas devido à impermeabilidade do reboco, o que agrava a degradação da terra crua por ação biológica.

A presença de sais solúveis representa uma das patologias mais severas e complexas associadas à aplicação de rebocos de cimento sobre suportes em terra crua. Estes sais podem ter origem nos próprios materiais de construção, no solo ou em fontes externas. A sua migração por capilaridade e posterior cristalização em zonas superficiais ou nas interfaces entre o reboco e o suporte é fortemente condicionada pela temperatura, pela humidade relativa e pela disponibilidade de água líquida (Espinosa et al. 2008).

O ciclo de dissolução e recristalização destes sais, especialmente sulfatos, nitratos e cloretos, provoca aumentos de volume e tensões internas nos poros, com formação de fases como gipsita, halite, etringite e calcita secundária (Steiger, 2005). Este processo, conhecido como pressão de cristalização⁵, contribui para a microfissuração e esfoliação progressiva, e é amplamente potenciado quando os revestimentos dificultam a evaporação da humidade acumulada no interior da parede (Elert et al., 2002).

Apesar do cimento não ser totalmente impermeável, a sua microestrutura densa reduz substancialmente a taxa de evaporação, favorecendo a retenção de água e criando um ambiente saturado que propicia a cristalização de sais logo abaixo da superfície (Lubelli, 2006). Nestes contextos, a humidade não consegue ser expulsa, o que resulta numa concentração de sais, amplificando os danos a cada ciclo higrotérmico. Este comportamento foi claramente demonstrado em ensaios de envelhecimento acelerado realizados por Steiger (2005), em que se verificou que a ausência de porosidade adequada nos rebocos resultava em intensas pressões cristalinas junto ao substrato.

A análise química de amostras recolhidas em edifícios de adobe da região centro tem revelado elevadas concentrações de sulfatos e nitratos nas zonas de contacto entre o reboco cimentício e o substrato. Tais resultados foram obtidos através de ensaios laboratoriais com difração de raios X (DRX), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e testes de solubilização, permitindo identificar os sais presentes e a sua distribuição espacial (Silveira et al., 2007). Estes dados mostram uma correlação direta entre a aplicação de cimento e o agravamento dos processos de salinização interna e superficial.

Esta problemática tem sido alvo de diversos ensaios experimentais, realizados tanto em laboratório como em contexto real. Faria et al. (2008) demonstraram que argamassas cimentícias aplicadas sobre suportes porosos apresentam boa aderência inicial, mas revelam perda acelerada de coesão após ciclos húmido-secos, originando fissuração e destacamento. De forma complementar, Espinosa et al. (2008) evidenciaram que a reduzida permeabilidade ao

⁵ Fenómeno físico-químico em que sais cristalizados em espaços confinados exercem forças expansivas capazes de superar 20 MPa (Steiger, 2005).

vapor de água destes revestimentos favorece a acumulação de humidade na interface, potenciando processos de degradação localizada e acelerada do suporte.

Moropoulou et al. (2000) realizaram uma investigação sistemática sobre a compatibilidade de argamassas com suportes porosos históricos, incluindo alvenarias de terra. Recorreu-se, para tal, a porosimetria por intrusão de mercúrio, ensaios de permeabilidade ao vapor de água e testes de resistência à tração por aderência, que permitiram identificar diferenças significativas entre os materiais. As argamassas de cimento apresentaram porosidade inferior a 15% e uma quase total impermeabilidade ao vapor, contrastando com suportes de adobe com mais de 40% de porosidade. Esta discrepância higroscópica resultou na acumulação de humidade nas interfaces e em tensões capilares que favoreceram a delaminação do revestimento e a perda de coesão superficial.

Elert et al. (2002), através de ensaios acelerados de cristalização salina, expuseram rebocos cimentícios e de cal aérea a ciclos controlados de humedecimento e secagem em presença de sais solúveis. Os resultados revelaram que os rebocos de cimento promoveram a concentração de sais nas zonas de interface, desencadeando fenómenos de microfissuração intensa e perda de aderência. Em contraste, os rebocos de cal permitiram uma distribuição mais difusa dos sais, com menor incidência de danos estruturais, evidenciando a sua maior compatibilidade físico-química com suportes em terra. Silveira et al. (2007), em ensaios com provetes de adobe, confirmaram que as argamassas de cimento apresentavam retração acentuada e destacamentos precoces, enquanto as de cal se mantinham mais estáveis. Resultados semelhantes foram registados por Corradi et al. (2018), que observaram rigidez excessiva, baixa aderência e fissuração precoce em rebocos cimentícios aplicados em paredes históricas, com o comportamento governado pela interface reboco–suporte (Corradi, 2018). Em materiais de terra estabilizados com ligante, Ávila et al. (2022) mostraram que a resistência à compressão e a rigidez aumentam com o acréscimo do teor de cal até cerca de 12%, evidenciando o endurecimento do compósito com maior teor de ligante (Ávila, Puertas & Gallego, 2022). Faria, Henriques e Rato (2008) compararam argamassas de cal (pasta de longa extinção vs. cal hidratada), avaliando capilaridade, resistência a cloretos e sulfatos, porosimetria a mercúrio e resistências mecânicas (EN 1015-11). Verificaram que as argamassas com pasta de cal de longa extinção apresentam melhor desempenho face a sais e uma rede porosa mais adequada à gestão da humidade; embora se observem perdas de massa de 40–50% em ensaios de sulfatos em idades jovens, segue-se uma fase estacionária, contribuindo para maior durabilidade em contexto patrimonial (Faria et al., 2008).

Em painéis históricos, Corradi, Sisti e Borri (2018) mostraram que rebocos cimentícios delgados podem aumentar a rigidez e a capacidade ao corte, mas quando ocorrem fissuração e descolagem na interface, o ganho torna-se negligenciável; por isso, o módulo de corte do reboco não deve divergir substancialmente do da alvenaria (Corradi et al., 2018).

Quanto ao efeito de humidade/ciclos húmido-seco na perda de desempenho por interface, Bompa e Elghazouli (2020) testaram tripletos tijolo–argamassa de cal e observaram que a condição húmida (48 h de submersão) reduz a resistência ao corte ~20% em média face à condição seca, evidenciando a sensibilidade da interface (Bompa & Elghazouli, 2020).

Neste sentido, a compreensão dos mecanismos de degradação, tanto físicos como químicos e biológicos, associados à aplicação de rebocos de cimento em paredes de adobe é indispensável para a definição de estratégias de conservação sustentáveis. O reconhecimento da influência dos sais solúveis enquanto agentes ativos de deterioração, aliado à deteção de microrganismos em ambientes saturados de humidade, reforça a necessidade de uma abordagem interdisciplinar no diagnóstico e na escolha de soluções compatíveis.

Apesar da bibliografia existente sobre a incompatibilidade entre rebocos cimentícios e suportes de adobe, observa-se uma carência de estudos que articulem, de forma integrada, a caracterização de edifícios históricos com ensaios laboratoriais realizados em condições controladas. A maioria dos trabalhos foca-se em análises isoladas, ora centradas na materialidade dos rebocos, ora na descrição das patologias observadas em campo, sem estabelecer uma correlação entre causa e efeito. Neste sentido, a presente dissertação propõe-se preencher esta lacuna, conjugando a análise de amostras reais, com a experimentação laboratorial de provetes preparados com diferentes cimentos modernos. Esta abordagem permite não apenas aprofundar o entendimento dos mecanismos de degradação observados, como também fundamentar critérios técnicos de compatibilidade material e sustentabilidade aplicáveis à conservação da arquitetura vernacular em terra.

3. Caracterização do Caso de Estudo

3.1 Apresentação, enquadramento histórico e estado de conservação do edifício

A Casa-Museu de Santo António de Vagos, construída em 1937 por Claudino Domingues dos Santos, representa um exemplo da arquitetura vernácula da região da Gândara, localizada na faixa costeira centro-norte de Portugal.

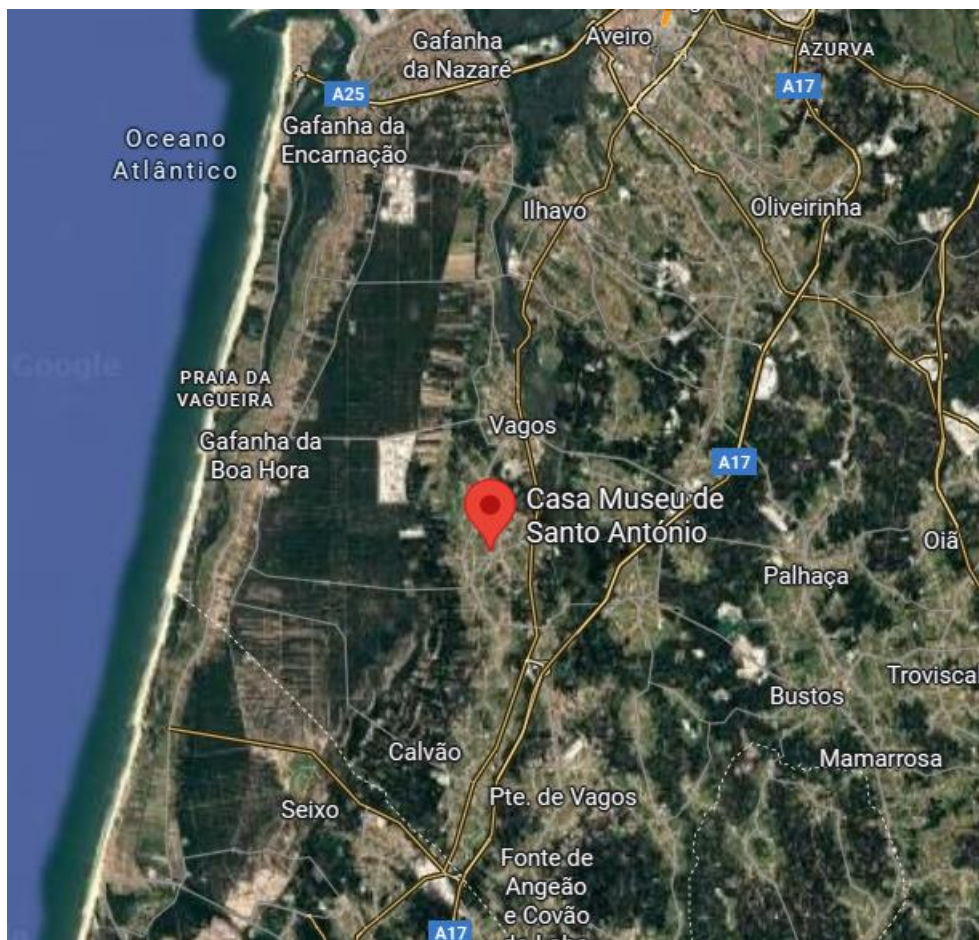


Fig. 3.1 – Imagem satélite da localização da Casa-Museu de Santo António de Vagos. **Fonte** – Google Maps

A sua edificação insere-se num contexto de transformação socioeconómica resultante dos fluxos migratórios para os Estados Unidos da América, fenómeno que marcou profundamente a evolução das tipologias habitacionais locais. Claudino Domingues dos Santos, após um período de emigração, regressou com recursos que permitiram, portanto, a construção de uma casa que, embora modesta face às "casas de brasileiro" mais exuberantes, apresentava já elementos de maior conforto e distinção social (Município de Vagos, s.d.).

A organização da casa em torno de um pátio central, denominado de estrumeira, reflete a adaptação pragmática às exigências da vida agrícola, privilegiando a funcionalidade e a proteção da intimidade familiar. Este espaço central, frequentemente coberto por uma latada ou parreiral, articulava a casa de habitação com as dependências agrícolas, nomeadamente currais, celeiros, telheiros e galinheiros. Esta disposição evidencia a continuidade de práticas construtivas ancestrais, moldadas pela necessidade de aproveitamento racional dos recursos disponíveis e pela forte interligação entre a habitação e a atividade agrícola (Tavares et al., 2021).

As Gândaras, de morfologia plana e solos arenosos, apresentam uma paisagem marcada pela Ria de Aveiro e pelos seus canais/esteiros. A arquitetura gandaresa responde a este contexto com técnicas vernaculares em terra (adobe) e revestimentos/pinturas de cal, privilegiando soluções simples e de baixo custo (Barreira, 2022).

O telhado de duas ou quatro águas, frequentemente coberto com telha de Marselha⁶, é documentado em várias casas gandaresas como sinal de uma transição para soluções mais duráveis e eficazes. De acordo com Barreira (2022), a arquitetura local revela uma articulação entre técnicas tradicionais e materiais industrializados, refletindo um processo evolutivo da edificação. A organização da fachada, frequentemente do tipo janela-porta-janela-portão-janela, preserva elementos formais característicos das construções vernáculas da região.

A compartimentação interna das casas-pátio da região centro revela a hierarquia funcional e simbólica atribuída aos diferentes espaços. A chamada “Sala do Senhor” era reservada a ocasiões especiais, como a receção do Senhor na Páscoa, o acolhimento de visitas importantes ou o velório de familiares, refletindo a centralidade da religiosidade popular na organização doméstica. A “meia-sala”, ou quarto da frente, era geralmente o espaço mais valorizado da casa, reservado a hóspedes ou a situações cerimoniais, distinguindo-se pelo maior cuidado decorativo e pela sua localização nobre na fachada. Esta disposição espacial, descrita por Santiago (2007), ilustra a articulação entre usos quotidianos e rituais, e a forma como a arquitetura doméstica materializava os valores sociais e religiosos das famílias rurais da Beira Litoral.

O pátio e as estruturas anexas, celeiros, adegas, currais e a casa da eira, compunham um sistema integrado que assegurava a autossuficiência alimentar e a gestão racional dos recursos. A existência de espaços dedicados à armazenagem de batatas, cereais e produtos hortícolas sublinha a importância da autossustentabilidade nas economias rurais da Gândara, onde a

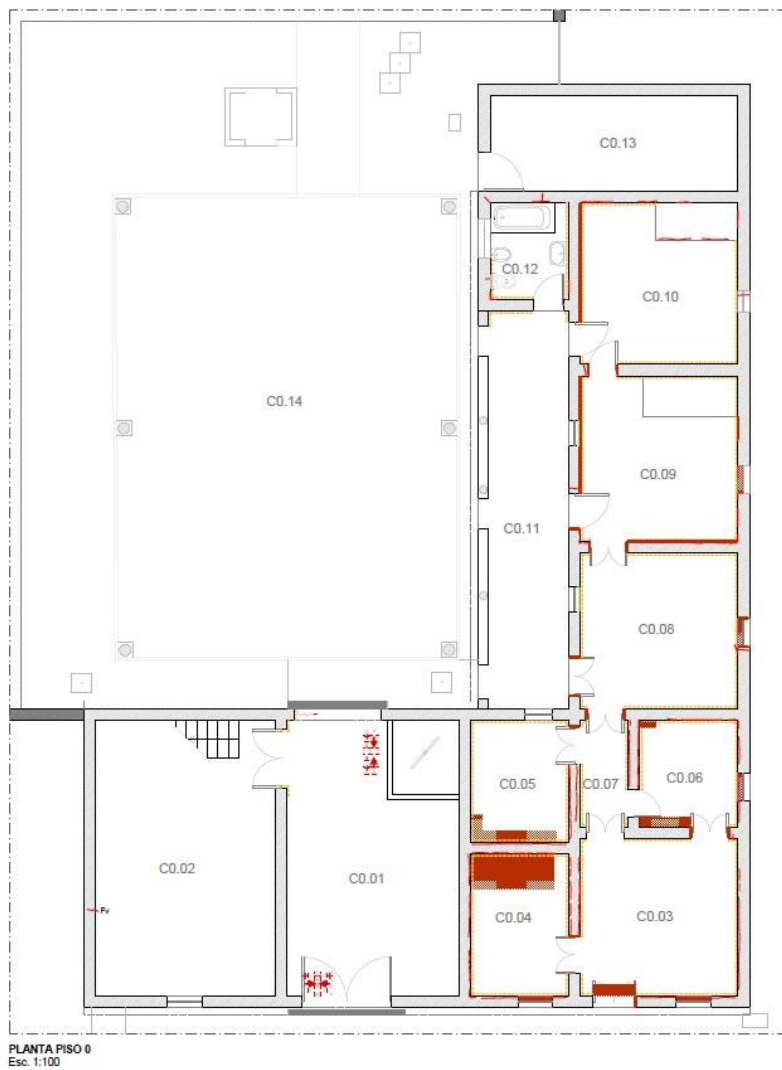
⁶ Segundo Carvalho (2011), em várias construções de adobe do distrito de Aveiro verificou-se a substituição das coberturas originais por telha de Marselha, sinalizando a adoção de materiais industrializados e de soluções mais duráveis.

distância aos mercados urbanos impunha uma lógica de produção para consumo próprio (Barreira, 2022).

A preservação da Casa Gandaresa de Santo António adquire, neste contexto, um valor patrimonial de primeira ordem. Mais do que um simples vestígio arquitetónico, a casa constitui um repositório vivo das práticas sociais, económicas e culturais que moldaram a identidade das Gândaras. A conservação deste tipo de património exige não apenas a proteção física dos edifícios, mas também a valorização do seu enquadramento histórico, cultural e paisagístico, assegurando a transmissão dos saberes e modos de vida que lhe deram origem (Tavares et al. 2021).

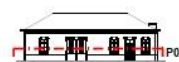


Fig. 3.2 - Fachada da Casa-Museu de Santo António de Vagos. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Legenda de Anomalias:

- Fissuração/ Fendilhação
 - Fh - Horizontal
 - Fd - Diagonal
 - Fv - Vertical
- Fissuração mapeada
- Deformação/ Inclinção
- Degradação da madeira
- Destacamento de reboco
- Destacamento de tinta/ eflorescências
- Elemento partido



| | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|---------|
| OBJ: Casa-Museu de Santo António | | P3R | |
| REQUERENTE: Câmara Municipal de Vagos | | LOCAL: Rua de Santo António, nº 40, Vagos | |
| PROJ. Nº: --- | APRESENTADOR: --- | FASE: INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO | |
| TECNICO: Alice Tavares, Arq. | GENÉRICO: MAPA DE ANOMALIAS | ESCALA: 1:100 1:500 | 04/2020 |

Fig. 3.3 – Mapa de patologias Casa-Museu de Santo António de Vagos. **Fonte** – P3R LDA©

3.2 Objetivos das análises laboratoriais

As análises laboratoriais realizadas no âmbito da presente dissertação têm como finalidade aprofundar o conhecimento sobre a degradação de alvenarias em adobe sujeitas à aplicação de rebocos cimentícios, procurando compreender tanto os processos físico-químicos envolvidos, como a influência dos materiais modernos sobre suportes tradicionais. O estudo parte de um caso concreto onde se observam múltiplas patologias associadas à utilização de argamassas de cimento em paredes originalmente construídas em terra crua. Neste contexto, os ensaios laboratoriais são organizados em duas frentes complementares: a primeira com amostras reais recolhidas no edifício em estudo; a segunda, centrada em provetes moldados com diferentes tipos de cimento.

Na primeira vertente, serão realizados ensaios aplicados a amostras retiradas da Casa Gandaresa, nomeadamente 1Ab, 2Am, 2Bm, 2Cb, 2Da, 3Am, 3Bm, 4Ams, 4Bmp, 5Am, 5Bm, 6Am, 7Ab e FAm⁷, com o objetivo de caracterizar o estado de degradação do adobe original e identificar os principais agentes responsáveis pela sua deterioração. A análise por difração de raios X (DRX) permitirá identificar a presença de fases salinas cristalinas, como sulfatos (gipsita, etringite), nitratos ou cloretos, frequentemente associados a processos de migração e cristalização forçada por rebocos impermeáveis. O ensaio de dissolução em ácido clorídrico teve como objetivo estimar a proporção de ligante presente nos provetes cimentícios, separando-o dos agregados insolúveis por via gravimétrica após introdução controlada de ácido, enquanto a análise colorimétrica documentará alterações cromáticas na superfície das amostras, frequentemente associadas à salinização ou à degradação superficial por humidade. Por fim, o ensaio de Arquimedes vai-nos dar a noção daquilo que será a densidade aparente e da porosidade total das amostras recolhidas.

Complementarmente, pretende-se avaliar o comportamento hídrico de três tipos distintos de cimento, CEM I 52.5R, CEM II/B-V 32.5R e CEM II/B-L 32.5N, aplicados em provetes padronizados com mistura de areias de diferentes granulometrias. Os ensaios de capilaridade, realizados segundo a norma EN 15801, visam medir a absorção de água ao longo do tempo, bem como a taxa de secagem dos provetes após saturação parcial. Estes dados permitirão comparar a permeabilidade, a retenção de humidade e o grau de bloqueio dos fluxos capilares em função da composição do cimento. A escolha desta abordagem baseia-se na constatação, documentada na bibliografia técnica, de que rebocos cimentícios frequentemente impedem a evaporação natural da humidade no interior das paredes de adobe, criando condições para a

⁷ Consultar Fig.3.4 e Apêndice B.1 Fig. B.1.1

acumulação de água, cristalização de sais e desagregação do suporte (Silveira et al., 2007). O objetivo é, assim, validar de forma empírica os mecanismos de incompatibilidade entre cimentos industriais e suportes terrosos, num ambiente de ensaio controlado.

O cruzamento dos resultados obtidos nestas duas frentes, provetes laboratoriais e amostras reais, permitirá identificar paralelismos entre as propriedades dos materiais testados e os danos observados no edifício, criando uma base de interpretação científica para a origem e progressão das patologias verificadas. Pretende-se, com isso, validar a hipótese de que a degradação observada resulta diretamente da incompatibilidade química entre os materiais tradicionais e os produtos industriais aplicados em intervenções recentes. Mais do que uma análise descritiva, esta abordagem busca fundamentar tecnicamente as diretrizes de compatibilidade material, sustentabilidade e conservação preventiva, aplicáveis a intervenções futuras em edifícios de terra crua.

Em suma, os objetivos dos ensaios laboratoriais realizados no âmbito deste trabalho são: (i) compreender os mecanismos de absorção e retenção de água em diferentes argamassas cimentícias, (ii) caracterizar as alterações físico-químicas entre o adobe e o reboco em questão no caso de estudo, em função das intervenções sofridas, (iii) estabelecer relações de causa-efeito entre os materiais aplicados e as patologias diagnosticadas, e (iv) reforçar, com base empírica, a necessidade de adotar critérios de compatibilidade na conservação de arquitetura vernácula em terra.

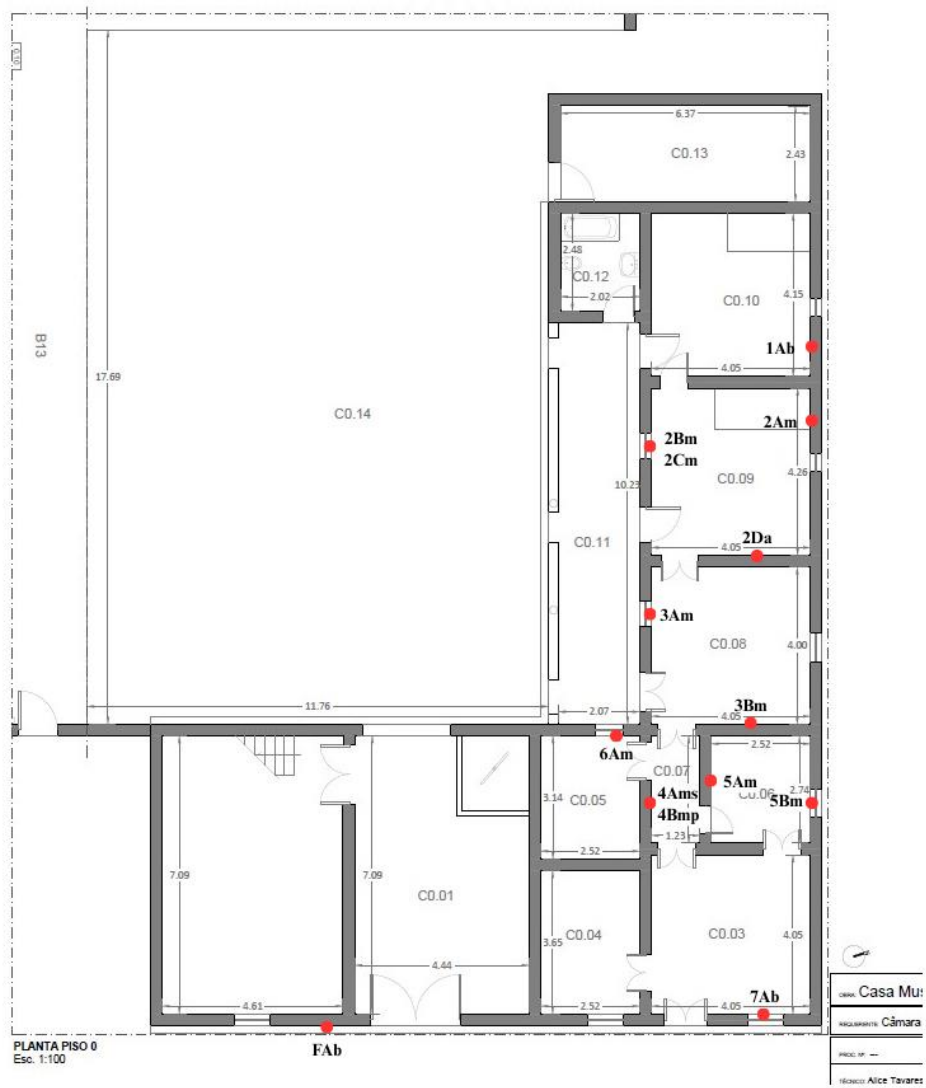


Fig. 3.4 – Mapa levantamento de amostras Casa-Museu de Santo António de Vagos. **Fonte** – P3R LDA©

4. Trabalho Experimental

4.1. Análises Laboratoriais a Amostras do Caso de Estudo

4.1.1. Análise Lupa Eletrónica

A primeira etapa do trabalho experimental consistiu na observação das amostras recolhidas com recurso a uma lupa eletrónica (estereomicroscópio Leica EZ4 HD). Este equipamento combina ampliação ótica de baixa e média resolução, iluminação LED e sistema de registo digital, permitindo uma análise não destrutiva da superfície e a obtenção de imagens de alta-definição. O fabricante destaca precisamente a sua adequação para contextos de ensino e investigação, onde se pretende aliar simplicidade de utilização a capacidade de documentação precisa (Leica Microsystems, 2014).

No âmbito desta dissertação, a análise ao estereomicroscópio permitiu identificar fenómenos relevantes como fissuras superficiais, zonas de pulverulência, variações cromáticas associadas a processos de salinização e indícios de cristalização de sais. Foram também observadas diferenças na granulometria dos agregados e na compactação do adobe, aspetos que revelam a heterogeneidade dos materiais e fornecem pistas sobre o seu comportamento mecânico e hídrico.

As imagens obtidas encontram-se reunidas no Apêndice C, funcionando como registo sistemático do estado das amostras antes da realização de ensaios mais avançados. Para além da sua função documental, esta etapa assumiu particular relevância metodológica, ao servir como triagem para a seleção das amostras mais representativas a submeter à difração de raios X (DRX). Esta abordagem segue a lógica recomendada em estudos de conservação, onde a observação preliminar de carácter não destrutivo constitui a base para a definição de estratégias de análise mais específicas (Torraca, 2005).

Em síntese, a lupa eletrónica desempenhou um papel duplo nesta investigação: por um lado, permitiu documentar de forma detalhada a superfície das amostras; por outro, orientou a definição da estratégia experimental, garantindo que os ensaios subsequentes incidissem sobre materiais criteriosamente selecionados e representativos.

4.1.2. Análise por Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) constitui uma ferramenta essencial para a identificação das fases cristalinas em materiais de construção, sendo amplamente utilizada no diagnóstico de patologias em edifícios históricos. Conforme explicado por Holder e Schaak (2019), a técnica baseia-se na interação entre um feixe monocromático de raios X e os planos atômicos das estruturas cristalinas, originando padrões de difração característicos de cada composto. Essa especificidade permite a detecção precisa de sais solúveis, produtos de hidratação de ligantes e outros contaminantes, desempenhando um papel crucial na caracterização de argamassas e camadas superficiais alteradas (Espinosa 2008).

A caracterização mineralógica das amostras recolhidas na Casa-Museu foi realizada através de difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes nos rebocos, e assim compreender os processos de degradação associados à sua composição. Para tal, foi utilizado um difratômetro Philips Panalytical X'Pert-Pro MPD (Malvern, UK), com radiação Cu K α ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$)⁸, operando a 50 kV e 30 mA. As medições foram realizadas no intervalo de 4° a 65° (2 θ), com velocidade do goniómetro de 0,02° 2 θ e tempo de aquisição de 1 segundo por passo. As análises foram feitas em amostras em pó, com aproximadamente 0,500 g.

Foram analisadas seis amostras recolhidas das superfícies das paredes interiores e exteriores: 2DA, 3AM, 3BM, 5BM, FAB e 7AB⁹. A seleção considerou zonas com manifestações visíveis de degradação, como eflorescências, pulverulência e descoloração, e visou recolher material representativo de zonas propensas à acumulação de sais ou à ação da humidade. O foco na camada superficial teve como objetivo maximizar a identificação de compostos resultantes de interações recentes com materiais contemporâneos, como rebocos cimentícios ou pinturas industriais.

⁸ A radiação de cobre (Cu K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) é a mais utilizada em análises de difração de raios X, pela sua elevada intensidade e capacidade de gerar difratogramas de boa definição em materiais cristalinos (Gobbo, 2009).

⁹ Apêndice B.1., Fig. B.2.

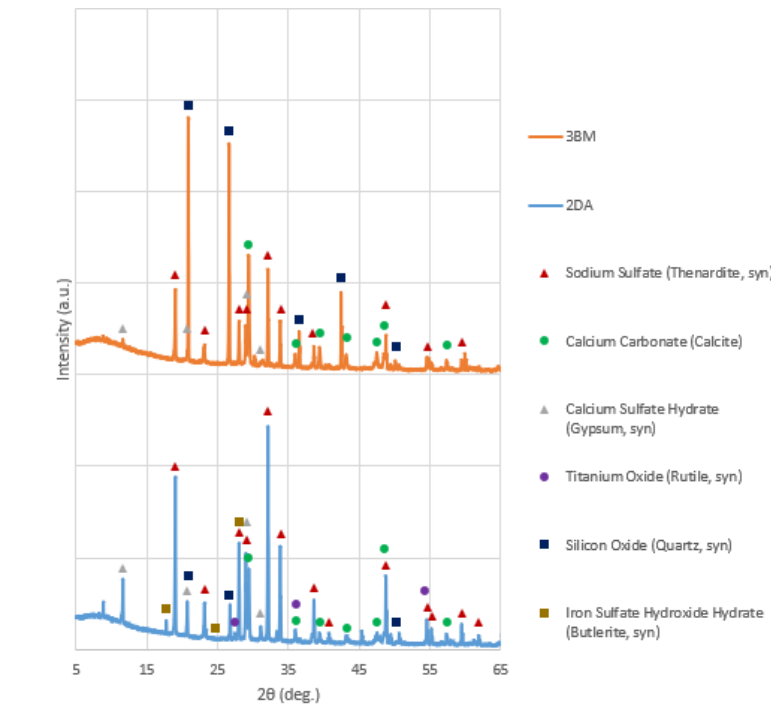


Fig. 4.1 - Gráfico DRX 3BM; 2DA. **Fonte** - Beatriz Lemos©2025

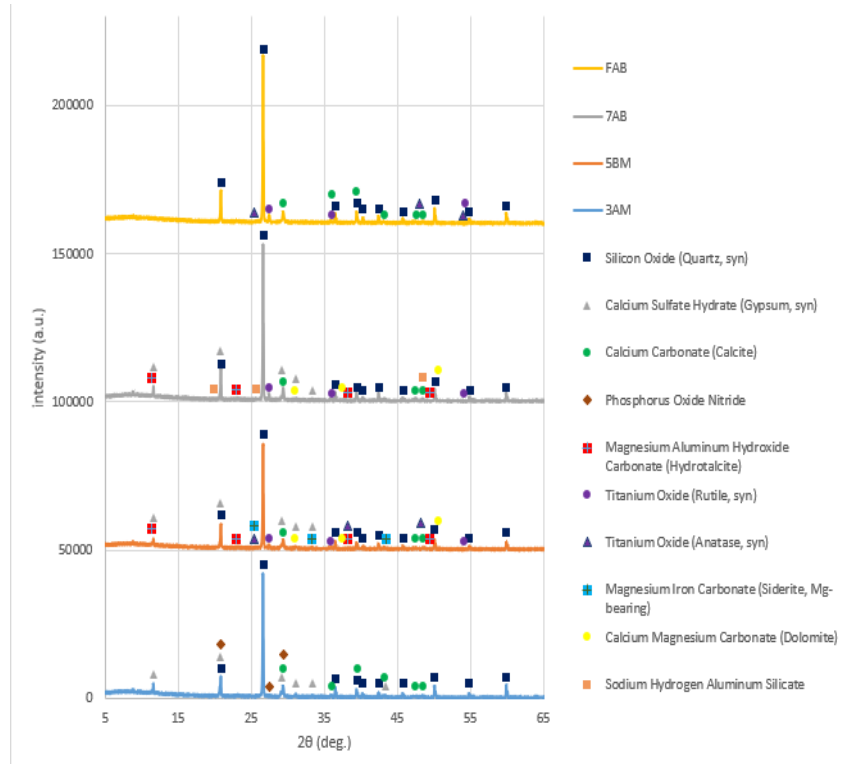


Fig. 4.2 - Gráfico DRX FAB; 7AB; 5BM; 3AM. **Fonte** - Beatriz Lemos©2025

A análise revelou que todas as amostras apresentavam calcite (CaCO_3) e quartzo (SiO_2), minerais geralmente associados ao uso de areias siliciosas e à carbonatação de ligantes calcários ou cimentícios. A presença de quartzo é esperada nas argamassas devido ao agregado arenoso ($\text{SiO}_2 \sim 96\%$ na areia por ser essencialmente quartzo), enquanto a calcite decorre da cal/portlandite e da sua carbonatação, tal como evidenciado por DRX em argamassas de cal. (Elert et al., 2002) Remeto para o Apêndice B.2. onde se encontra a imagem de todas as amostras retiradas da Casa-Museu.

Amostras como 3BM evidenciaram também uma concentração significativa de sais sulfáticos, nomeadamente gypsum (gesso) ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e thenardite (Na_2SO_4), sais associados a fenómenos de cristalização induzidos pela capilaridade e presença de revestimentos de baixa permeabilidade. Conforme demonstrado por Espinosa et al. (2008), estes sais promovem pressões internas significativas durante os ciclos de hidratação e desidratação, podendo levar à desagregação superficial de argamassas e suportes.

A amostra 5BM, recolhida na base de uma janela, revelou ainda dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), siderite (FeCO_3) e hidrotalcite, esta última indicadora da hidratação de cimentos com adições minerais como cinzas volantes ou escórias. De acordo com Pauletto et al. (2020), a hidrotalcite constitui um produto secundário típico da hidratação de ligantes industriais, sendo frequentemente identificada em contextos de utilização de cimentos do tipo CEM II e CEM III. A diversidade mineralógica da amostra 7AB aponta para uma elevada mobilização salina, associada a condições de humidade e alcalinidade intensificadas por materiais contemporâneos. As amostras 5BM e 7AB também revelaram hidrotalcite, bem como vestígios de gypsum (gesso) e a presença sistemática de rutilo (TiO_2), sugerindo a aplicação de acabamentos industriais pigmentados. O dióxido de titânio, particularmente na forma de rutilo, é amplamente utilizado em tintas modernas como pigmento branco opaco e a sua presença, especialmente nas amostras interiores, aponta para intervenções recentes com materiais potencialmente selantes e pouco compatíveis com a respiração dos suportes (Tavares, Costa & Varum, 2018d).

A amostra 2DA revelou, além de calcite e quartz, uma forte presença de butlerite ($\text{FeSO}_4\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)¹⁰, um sulfato de ferro associado a ambientes muito húmidos.

Em contraponto, a amostra FAB, proveniente da face exterior do edifício, apresentou um padrão DRX mais simples, com picos menos intensos e ausência de fases salinas agressivas, o que

¹⁰ A butlerite ($\text{FeSO}_4\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um sulfato de ferro hidratado, relativamente raro, formado em ambientes muito húmidos ou de oxidação de compostos ferrosos, sendo descrita como mineral monoclinico de ocorrência supergénica (Čejka et al., 2011)

poderá estar relacionado com menor grau de humidade capilar, maior ventilação natural e possível lavagem superficial pelas chuvas.

De forma geral, os resultados do DRX evidenciam uma forte correlação entre a presença de sais e a utilização de revestimentos de baixa permeabilidade. Os sais identificados (gypsum, thenardite, butlerite) são reconhecidos pela sua capacidade de expandir em ambientes húmidos, provocando pressões internas nas paredes de adobe, cuja elevada porosidade e fragilidade tornam-nas especialmente suscetíveis à degradação. A literatura aponta estes sais como fatores críticos na destabilização de sistemas construtivos tradicionais (Espinosa et al., 2008).

A identificação de hidrotalcite em três das seis amostras reforça a hipótese de aplicação de cimentos com adições minerais, incompatíveis com o comportamento higroscópico do adobe. Estes cimentos, apesar de tecnologicamente mais avançados, produzem fases que colmatam os poros e reduzem a permeabilidade das paredes, promovendo acumulação de humidade e formação de sais. A rutura na continuidade higrotérmica entre revestimento e suporte acelera a deterioração, como evidenciado pelas zonas de contacto observadas nas amostras mais degradadas.

A presença de TiO_2 (rutilo) em quatro amostras é indicativa de intervenções recentes com tintas industriais, dado o uso corrente deste pigmento em revestimentos modernos. Camadas superficiais de baixa porosidade tendem a dificultar a “respiração” higrotérmica e a favorecer acumulação/cristalização de sais em alvenarias sujeitas a humidade ascensional, fenómeno observado quando se introduzem revestimentos cimentícios na base das paredes. (Tavares et al., 2018).

Deste modo, a análise por DRX permite identificar e caracterizar as fases cristalinas presentes nas argamassas e nas amostras recolhidas, incluindo produtos associados a ligantes cimentícios e sais solúveis potencialmente relevantes para a degradação. Estes resultados sugerem a ocorrência de condições favoráveis a fenómenos como cristalização salina e alteração do regime de humidade nas paredes, sobretudo quando associados a revestimentos de menor permeabilidade ao vapor.

A avaliação da compatibilidade entre as argamassas aplicadas e os suportes de adobe não decorre do DRX de forma isolada, mas sim da correlação entre a evidência mineralógica e os ensaios físicos e químicos (capilaridade, densidade/porosidade e dissolução em ácido), bem como da leitura das patologias observadas in situ. Esta abordagem integrada permite quantificar o impacto das transformações identificadas e sustentar decisões futuras de conservação com base em critérios de compatibilidade e reversibilidade, conforme preconizado por orientações internacionais de conservação.

4.1.3. Ensaio de Arquimedes

Com o objetivo de caracterizar fisicamente as camadas superficiais das paredes interiores, foi realizado o ensaio de Arquimedes. Este método, descrito na norma EN 1936:2006¹¹, permite determinar a densidade aparente de materiais sólidos irregulares através da pesagem da amostra em três estados: seca, saturada e imersa em água

O procedimento consistiu na pesagem das amostras no estado seco após estarem na estufa a 70°C, tendo de seguida as amostras sido totalmente imersas em água destilada, sendo registada a massa aparente imersa. Após saturação completa, foi medida também a massa húmida. O volume foi obtido a partir da diferença entre a massa seca e a massa imersa, considerando a densidade da água como 1 g/cm³.

A densidade aparente foi então determinada pela razão entre a massa seca da amostra e o volume deslocado, de acordo com as seguintes expressões:

$$\text{Volume (cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa seca (g)} - \text{massa imersa (g)}}{1}$$
$$\text{Densidade (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa seca (g)}}{\text{volume (cm}^3\text{)}}$$

Foram analisadas quatro amostras, designadas A1 a A4, recolhidas em zonas interiores onde se observa a presença de rebocos cimentícios, ou onde se supõe existir uma transição entre revestimento e suporte. A pesagem foi realizada com balança analítica de precisão, garantindo reprodutibilidade.

¹¹ EN 1936:2006 – *Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.*

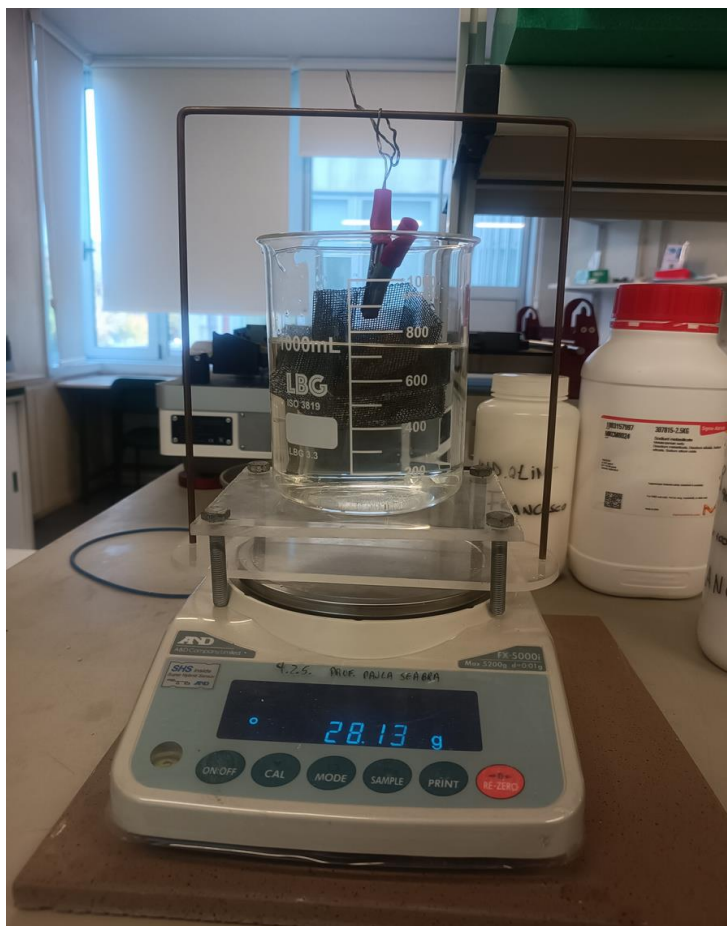


Fig. 4.4 - Procedimento do Ensaio de Arquimedes. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

O volume foi determinado com base na diferença entre a massa da amostra seca e a sua massa aparente submersa em água.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados na tabela seguinte:

| <i>Amostra</i> | <i>Massa seca (g)</i> | <i>Massa imersa (g)</i> | <i>Massa húmida (g)</i> | <i>Volume deslocado (cm³)</i> | <i>Densidade aparente (g/cm³)</i> |
|----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|
| A1 | 48,18 | 28,24 | 55,70 | 19,94 | 2,42 |
| A2 | 55,15 | 30,99 | 62,90 | 24,16 | 2,28 |
| A3 | 57,13 | 34,60 | 65,55 | 22,53 | 2,54 |
| A4 | 23,90 | 14,04 | 27,98 | 9,86 | 2,42 |

Fig. 4.5 - Quadro Resultados Ensaio de Arquimedes. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

Os valores de densidade aparente determinados para as amostras situam-se entre 2,28 g/cm³ e 2,54 g/cm³, significativamente superiores aos registados em adobes históricos portugueses, que apresentam valores entre 1,67 g/cm³ e 1,86 g/cm³ (Sarrico, 2015). Esta diferença poderá ser atribuída a múltiplos fatores: a presença de ligantes cimentícios modernos, a cristalização de sais solúveis nos poros e a progressiva densificação superficial das camadas alteradas. Tais fatores aumentam a massa sem afetar proporcionalmente o volume, conduzindo a uma elevação artificial da densidade.

A leitura crítica destes dados exige articulação com os resultados obtidos por difração de raios X. Nas amostras retiradas em geral detetada a presença de calcite (CaCO₃), gypsum (CaSO₄·2H₂O) e thenardite (Na₂SO₄), compostos cuja formação está associada à hidratação de ligantes hidráulicos e à recristalização de sais transportados por capilaridade. Estas fases, ao preencherem os poros, reduzem a permeabilidade e alteram a capacidade higroscópica do sistema, sendo apontadas como indicadoras de degradação ativa.

A presença de fases derivadas da hidratação do cimento, como a portlandite, e de sais como gypsum (sulfato de cálcio hidratado) e thenardite (sulfato de sódio anidro), confirmam que as paredes se encontram sujeitas a processos ativos de degradação por humidade e salinidade. Como já descrito por Tavares et al. (2018d), densidades elevadas e baixa permeabilidade estão diretamente associadas a zonas intervencionadas com cimento, onde o bloqueio da evaporação favorece o transporte ascendente e a cristalização de sais.

Estes resultados são também coerentes com as observações de Moropoulou et al. (2000) que demonstraram que rebocos cimentícios aplicados sobre suportes porosos tendem a apresentar porosidade inferior a 15%, contrastando com a porosidade superior a 40% dos materiais em terra. Esta discrepância de comportamento promove tensões internas, sobretudo quando a humidade capilar, impedida de evaporar, se acumula e transporta sais dissolvidos que se cristalizam nas interfaces.

A comparação entre amostras permite ainda inferir variações locais na intensidade da alteração: a amostra A3 apresenta a maior densidade (2,54 g/cm³), sugerindo possível maior espessura de reboco cimentício ou maior concentração de sais incrustados. Já a amostra A2, com densidade ligeiramente inferior (2,28 g/cm³), poderá corresponder a uma zona de transição entre argamassa e adobe ou a um estágio de alteração menos avançado.

Em síntese, os resultados do ensaio de Arquimedes validam, por via física, os indícios químicos e mineralógicos obtidos por DRX. A estrutura do caso de estudo mostra-se alterada na sua estrutura higroscópica e porosa, refletindo a aplicação de soluções construtivas incompatíveis com os princípios da arquitetura em terra crua. A elevada densidade, associada à baixa

permeabilidade, compromete a função respirável do sistema construtivo, acentuando as patologias de origem salina.

A adoção de materiais cimentícios em contextos vernaculares deve, assim, ser cuidadosamente ponderada, tendo em conta não apenas critérios estruturais, mas também a compatibilidade higrotérmica e a sustentabilidade a longo prazo da intervenção de conservação.

4.1.4. Ensaio de Dissolução em Ácido

A análise da composição das argamassas aplicadas nas paredes intervencionadas foi aprofundada através de um ensaio químico de dissolução seletiva em ácido clorídrico (HCl), técnica frequentemente utilizada para estimar a proporção relativa entre agregados e ligantes. Este método é particularmente útil na caracterização de argamassas antigas, permitindo avaliar a quantidade de componentes solúveis em meio ácido, geralmente associados ao ligante (como cal ou cimento), e componentes insolúveis, atribuíveis aos agregados minerais (Moropoulou et al., 2000).

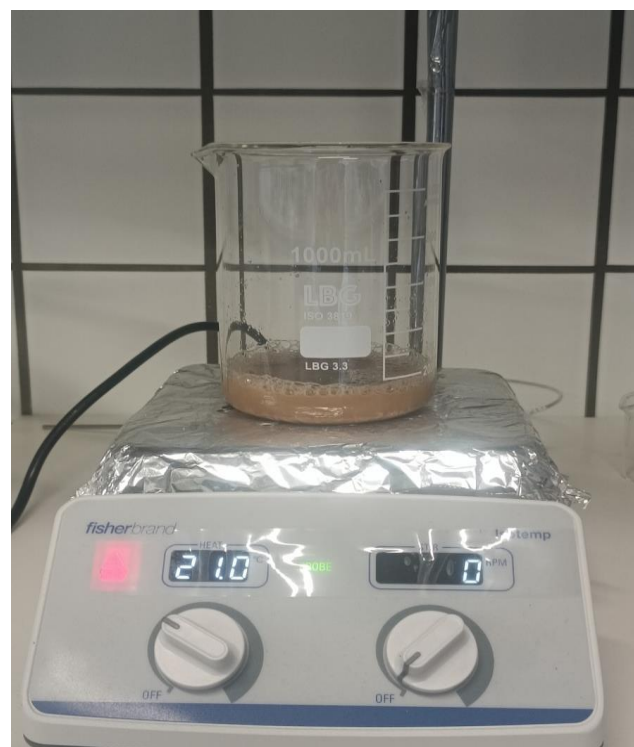


Fig. 4.6- Procedimento do Ensaio Dissolução. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

A metodologia aplicada baseou-se na desagregação de três amostras representativas de argamassas, AD1, AD2 e AD3, recolhidas em pontos distintos das superfícies rebocadas. As amostras foram desagregadas e submetidas a tratamento com uma solução de ácido clorídrico diluído (100 ml de HCl concentrado para 500 ml de água destilada), numa proporção experimentalmente eficaz para dissolver as fases solúveis. Cada amostra foi preparada com 50 g de material seco, ao qual se adicionaram 100 ml desta solução e, 10 gotas água (H₂O). A mistura foi aquecida durante cerca de dois minutos até à fervura e, posteriormente, filtrada.

O material insolúvel foi seco em estufa e pesado para determinação do resíduo final. A massa do papel de filtro foi previamente conhecida e subtraída da massa final.

A percentagem de resíduo insolúvel foi calculada de acordo com a expressão:

$$\% \text{ Resíduo} = \left(\frac{\text{massa seca após dissolução} - \text{massa do filtro}}{\text{massa inicial}} \right) \times 100$$

A tabela seguinte sintetiza os resultados obtidos:

| Amostra | Massa Inicial (g) | Massa Filtro (g) | Massa Seca Pós- Dissolução (g) | % Resíduo Insolúvel |
|----------------|------------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|
| AD1 | 50.11 | 1.04 | 50.12 | 97.94 |
| AD2 | 50.17 | 1.26 | 50.40 | 97.94 |
| AD3 | 50.05 | 1.14 | 49.71 | 97.04 |

Fig. 4.7 - Quadro Resultados Ensaio de Dissolução em Ácido. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

Os resultados demonstram que todas as amostras apresentaram teores de resíduo insolúvel superiores a 97%, sugerindo uma formulação marcadamente pobre em ligante. Este comportamento é compatível com argamassas produzidas com elevado teor de agregados e

reduzido teor de cimento, prática comum em intervenções contemporâneas de baixo custo. Como referem Tavares, Costa e Varum (2018d), estas práticas resultam, muitas vezes, no agravamento da degradação dos paramentos, por não respeitarem as características físico-químicas dos suportes em terra crua.

Argamassas com reduzido teor de ligante tendem a apresentar fraca coesão interna e maior suscetibilidade à fragmentação e perda de aderência. Estudos de Faria et al. (2008) demonstram que a baixa proporção de ligante em argamassas contemporâneas favorece a fissuração superficial e o destacamento precoce, especialmente após ciclos húmidos-secos.

Adicionalmente, camadas superficiais rígidas e pouco porosas dificultam a evaporação da humidade ascensional, favorecendo a acumulação de sais dissolvidos junto à interface. (Torraca 2005) Na presença desses sais, a cristalização no interior dos poros pode desenvolver pressões capazes de induzir microfissuração e perda de material. (Espinosa et al., 2008). Neste caso, os dados obtidos neste ensaio confirmam a existência de uma argamassa formulada de forma desadequada às exigências dos suportes em adobe. A quantidade residual de ligante observada nas amostras analisadas corrobora os resultados da difração de raios X (ver subcapítulo 4.1.2), onde se identificaram produtos secundários de hidratação como portlandite, gypsum e thenardite. A compatibilização entre estas diferentes leituras analíticas aponta para a utilização de cimentos diluídos, com reduzido teor de clínquer e elevada proporção de inertes.



Fig. 4.8 – Resíduo Insolúvel. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

Este conjunto de dados sustenta a conclusão de que as argamassas aplicadas resultam de práticas de reabilitação inadequadas, que negligenciam a compatibilidade físico-química entre materiais. O ensaio de dissolução, aliado às análises mineralógicas e físicas anteriormente descritas, evidencia a urgência de se formular soluções de substituição baseadas em ligantes

calcários compatíveis, respeitando a porosidade, higroscopicidade e comportamento mecânico dos sistemas construtivos tradicionais em terra.

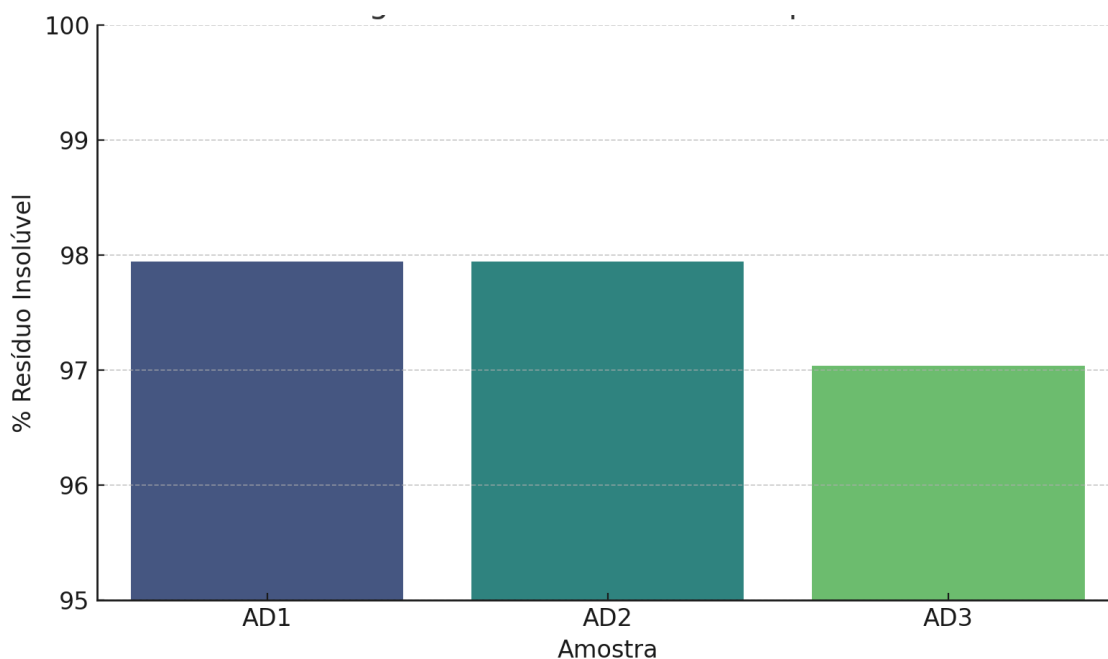


Fig. 4.9 – Percentagem do Resíduo Insolúvel por Amostra. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

4.1.5 Análise Colorimétrica

A análise colorimétrica constituiu uma etapa relevante na avaliação das alterações superficiais das argamassas e camadas de tinta, tendo como objetivo identificar variações cromáticas associadas à presença de sais solúveis, envelhecimento diferencial e sobreposição de materiais. O ensaio foi realizado com recurso a um colorímetro Minolta CR-400 (Konica Minolta), utilizando o sistema CIELAB, que expressa a cor em três parâmetros: L* (luminosidade, variando entre 0 – preto – e 100 – branco), a* (eixo verde-vermelho) e b* (eixo azul-amarelo). As medições foram efetuadas em dois lados distintos de cada amostra, lado reboco e lado tinta, e os resultados foram cruzados com a localização física de recolha, conforme registado no levantamento *in situ*.

As amostras submetidas a este ensaio foram selecionadas essencialmente pela sua boa preservação física e pela presença simultânea de reboco e camada de acabamento (tinta), condição indispensável para a análise comparativa dos dois lados. Paralelamente, optou-se por incluir algumas amostras que também foram analisadas por difração de raios X, como a 3AM, 5BM e FAB, permitindo uma correlação mais sólida entre a coloração superficial e a presença de sais identificados por via mineralógica.

As amostras 5AM, 5BM e 6AM, recolhidas no Quarto Lateral Direito e Esquerdo, a uma altura entre 50–120 cm, evidenciam uma clara diferença entre os dois lados analisados. Os rebocos apresentam valores de luminosidade L^* entre 60 e 72 e b^* superiores a 10, traduzindo-se em tonalidades ligeiramente amareladas e com menor claridade, compatíveis com a presença de sais como gypsum e thenardite, identificados nas análises de difração de raios X. As camadas de tinta, por sua vez, apresentam valores de L^* superiores a 90 e a^* fortemente negativos, revelando tonalidades azuladas ou esbranquiçadas. Estes resultados são coerentes com estudos que mostram que a colorimetria CIELAB permite identificar e quantificar a presença de eflorescências em materiais de construção. (Parisotto et al., 2021).

A amostra 3AM, proveniente da Sala de Estar, também entre os 50 e 120 cm de altura, segue a mesma tendência: um reboco com valor de L^* de 59.43, indicando escurecimento, e uma tinta com L^* de 90, a^* de -5.81 e b^* de 8.82, demonstrando uma aparência clara, fria e desaturada. A discrepância entre os dois lados sugere a atuação de mecanismos distintos de alteração nas camadas externas e internas.

No caso da amostra 2BM, recolhida na Sala de Jantar, na mesma faixa de altura (50–120 cm), observa-se um comportamento semelhante. O reboco apresenta L^* de 63.89 e b^* de 11.9, enquanto a tinta apresenta um L^* de 90.93 e um a^* ainda mais negativo (-5.62), reforçando a prevalência de tonalidades azuladas.

A amostra FAB, recolhida da fachada principal exterior entre 50–120 cm, exhibe valores de L^* elevados (75.8), a^* de -4.55 e b^* de 10.52, sugerindo uma tonalidade clara, com tendência amarelada e esbranquiçada. Esta condição é coerente com o desgaste superficial provocado pela exposição solar e pela lavagem natural das superfícies devido à chuva.

A interpretação integrada dos dados colorimétricos, da mineralogia salina por DRX e da localização das amostras traça um perfil coerente da degradação cromática, compatível com a ação da humidade ascensional e da deposição/cristalização de sais. Os processos de fase dos sais em poros (cristalização, hidratação, deliquescência) são reconhecidos como motores de dano físico e alterações de aspeto em materiais porosos, condicionados pela porosidade e pela humidade relativa ambiente (Espinosa et al., 2008). Variações locais de teor e tipo de sais podem refletir-se em diferenças mensuráveis nos parâmetros L^* , a^* e b^* nas zonas afetadas. Conclui-se que a análise colorimétrica, articulada com os resultados de DRX e a observação direta, constitui uma ferramenta de diagnóstico eficaz para a identificação de zonas de degradação associadas à presença de sais solúveis e à incompatibilidade dos materiais de revestimento. Esta abordagem contribui para o delineamento de critérios técnicos mais

rigorosos na seleção de materiais de substituição, tendo em conta não apenas o desempenho físico-químico, mas também a integração visual e cromática com o substrato histórico.

| Amostra | Lado | L* | a* | b* |
|----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 2BM | Reboco | 63.89 | -2.68 | 11.9 |
| 2BM | Tinta | 90.93 | -5.62 | 9.96 |
| 3AM | Reboco | 59.43 | -2.2 | 11.19 |
| 3AM | Tinta | 90.0 | -5.81 | 8.82 |
| 5AM | Reboco | 63.99 | -2.66 | 11.93 |
| 5AM | Tinta | 93.47 | -5.82 | 8.5 |
| 5BM | Reboco | 60.39 | -2.55 | 10.76 |
| 5BM | Tinta | 93.26 | -5.5 | 9.14 |
| 6AM | Reboco | 71.67 | -3.39 | 12.42 |
| 6AM | Tinta | 92.61 | -5.44 | 6.81 |
| FAB | Reboco | 75.8 | -4.55 | 10.52 |

Fig. 4.10– Tabela de Resultados Colorimetria **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

4.1.6. Ensaio de Absorção por Capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi conduzido com o objetivo de avaliar a interação entre diferentes formulações de cimento e a água ascendente, processo que constitui um dos principais mecanismos de degradação em alvenarias de adobe. A migração de água por porosidade fina, acompanhada do transporte e cristalização de sais, favorece a desagregação do suporte e o destacamento de revestimentos incompatíveis.

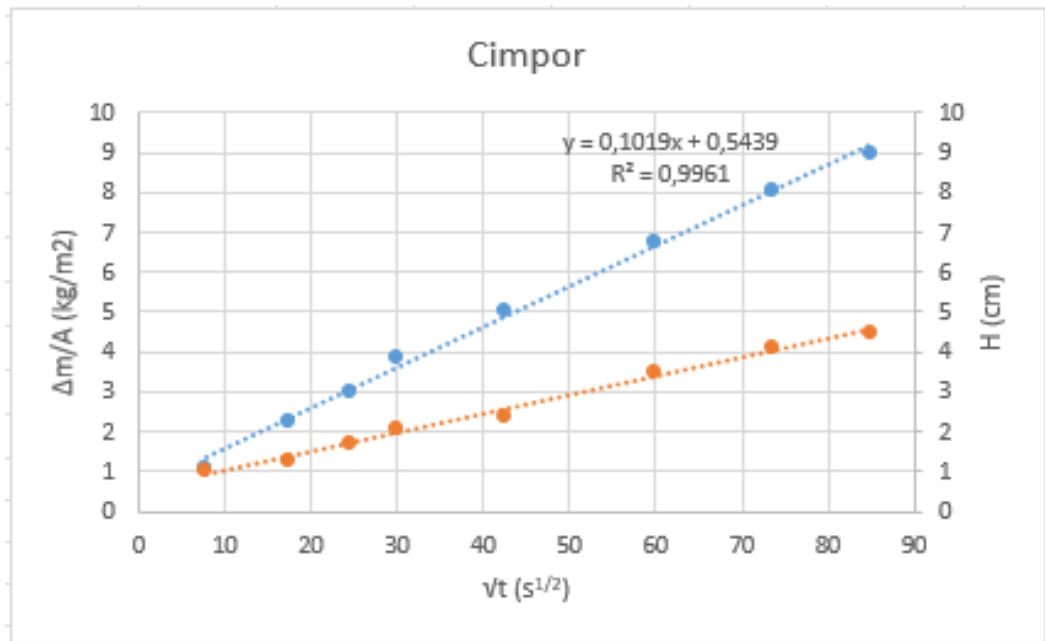
Os provetes foram preparados segundo a norma EN 1015-11, com dimensões de 4×4×16 cm, utilizando três tipos distintos de cimento: Cimpor (CEM II/B-L 32.5N), composto por clínquer (65–79%) e calcário (21–35%); Cimentos Lemona (CEM I 52.5R), com ≥95% de clínquer; e Morteros Tudela Veguín (CEM II/B-V 32.5R), contendo 32% de cinza volante e 2,9% de SO₃. As argamassas foram formuladas com uma proporção de 1:5 (cimento:areia), utilizando mistura de areias de granulometria variada, refletindo práticas correntes em reabilitações não especializadas. O ensaio seguiu a norma EN 15801, com registos de absorção até 120 minutos. Os resultados confirmam diferenças significativas no comportamento capilar entre os provetes. As curvas $\Delta m/A$ vs. \sqrt{t} apresentaram comportamento linear para os três ligantes, confirmando o regime capilar de absorção inicial. No CEM I 52.5R (Lemona) obteve-se sorptividade de 0,0611 kg·m⁻²·s^{-1/2} com R² = 0,9927 (Fig. 4.10b). No CEM II/B-V (Morteros Tudela Veguín)

a sorptividade foi $0,0886 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ com $R^2 = 0,9926$ (Fig. 4.10c). O CEM II/B-L (Cimpor) registou a sorptividade mais elevada, $0,1019 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$, com $R^2 = 0,9961$ (Fig. 4.10a).

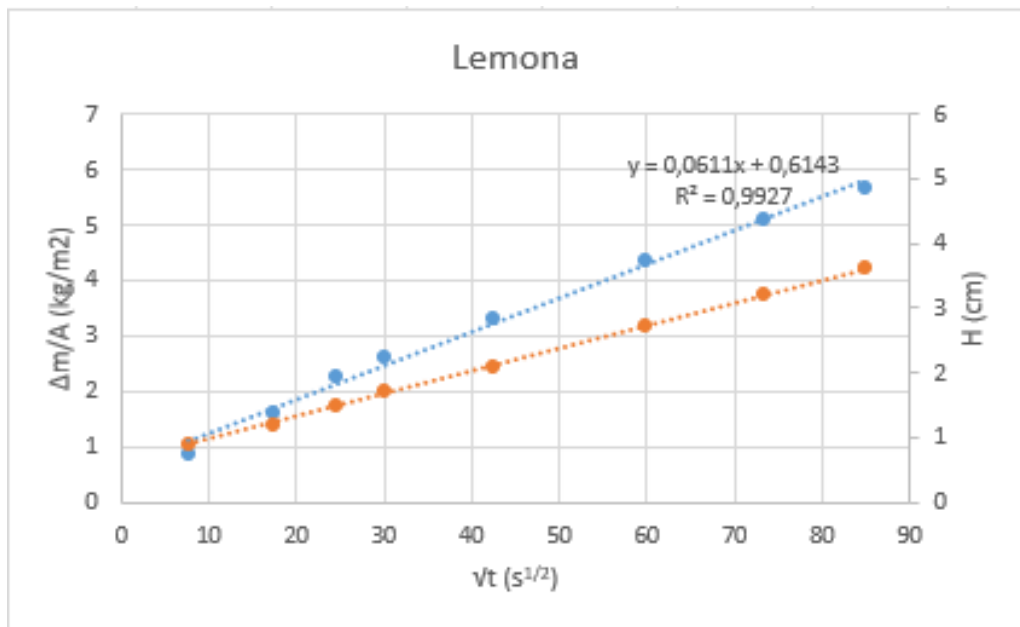
A comparação direta evidencia o seguinte ordenamento de entrada capilar de água: CEM II/B-L > CEM II/B-V > CEM I. Assim, o CEM II/B-L revela a maior propensão ao transporte capilar de soluções, o que aumenta a probabilidade de carreamento de sais dissolvidos para o interior do revestimento e para a interface com o adobe. O CEM II/B-V apresenta um comportamento intermédio, compatível com uma matriz refinada por adições, conduzindo a absorção moderada. Já o CEM I, com sorptividade mais baixa, exhibe entrada inicial de água mais lenta. Estes resultados ajudam a explicar diferenças no risco de mobilização e deposição de sais sob condições de humidade ascensional: maior sorptividade tende a favorecer a ingressão e o transporte em fase líquida; menor sorptividade tende a limitar a ingestão inicial.

A leitura comparativa dos resultados demonstra que a escolha do ligante influencia diretamente o balanço hídrico da parede. Enquanto os cimentos com adições (como o CEM II/B-V) revelam maior capacidade de regulação, os cimentos Portland puros ou de matriz muito densa agravam os desequilíbrios higroscópicos, sobretudo em contacto com suportes porosos como o adobe. Estes dados convergem com observações feitas em estudos anteriores, que associam a cristalização de sais como gypsum e thenardite a zonas de maior mobilidade capilar e bloqueio superficial.

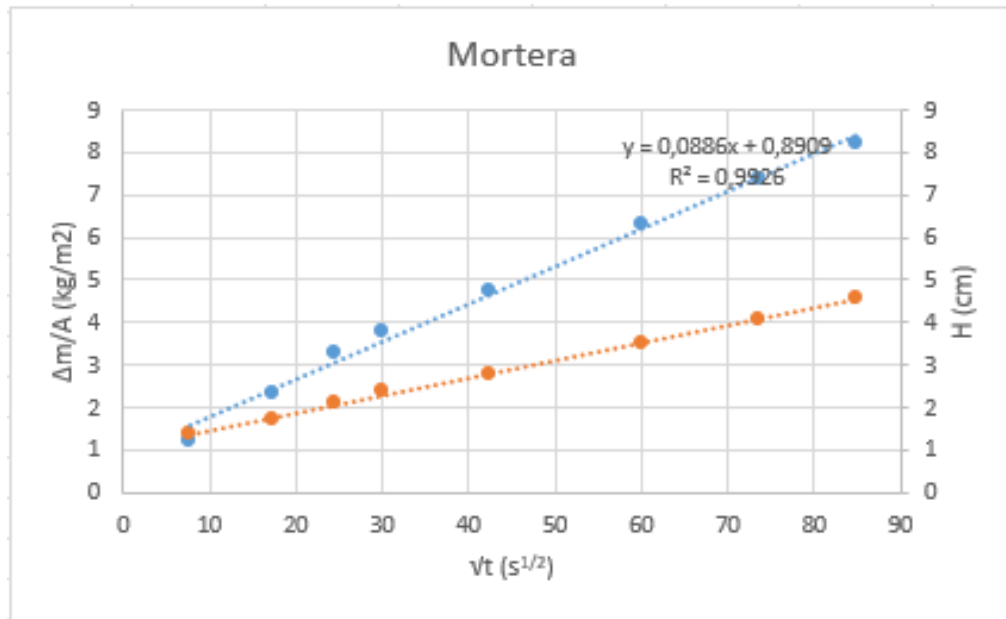
Conclui-se que nenhuma das formulações testadas é plenamente compatível com a alvenaria em terra, mas a utilização de cimentos com adições pozolânicas apresenta menor risco comparativo. A formulação de rebocos destinados à conservação deve, por isso, privilegiar critérios de equilíbrio higrotérmico e compatibilidade físico-química, apoiando-se em ensaios laboratoriais sistemáticos para fundamentar intervenções futuras.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.11– Resultados do ensaio de absorção por capilaridade nos provetes de argamassa cimentícia: (a) Cimpor (CEM II/B-L 32.5N), (b) Lemona (CEM I 52.5R) e (c) Morteros Tudela Veguín (CEM II/B-V 32.5R).

Fonte –Beatriz Lemos©2025

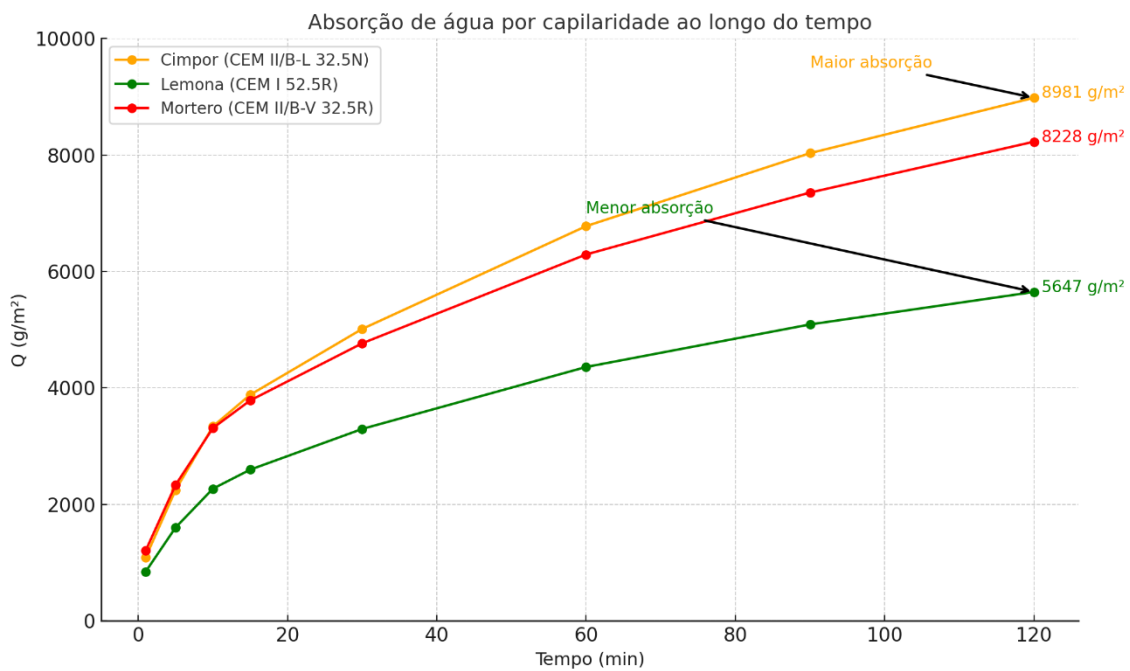


Fig. 4.12 – Comparação dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade entre os três tipos de cimento utilizados: Cimpor (CEM II/B-L 32.5N), Lemona (CEM I 52.5R) e Morteros Tudela Veguín (CEM II/B-V 32.5R).

Fonte – Beatriz Lemos©2025

5. Conclusões

O estudo desenvolvido ao longo desta dissertação permitiu confirmar a incompatibilidade entre os rebocos cimentícios e as alvenarias de adobe, evidenciada tanto pelos ensaios laboratoriais como pela análise das amostras recolhidas *in situ*. As diferentes metodologias aplicadas – difração de raios X, ensaio de Arquimedes, dissolução em ácido, colorimetria e absorção por capilaridade – revelaram de forma consistente que a introdução de ligantes industriais altera profundamente o equilíbrio higrotérmico e estrutural dos suportes em terra crua.

A análise mineralógica demonstrou a presença recorrente de sais solúveis como gesso, thenardite e butlerite, bem como fases derivadas da hidratação de cimentos modernos, como a portlandite e a hidrotalcite. Estas fases cristalinas, aliadas à baixa permeabilidade dos rebocos cimentícios, potenciam fenómenos de cristalização salina e bloqueio da difusão de vapor, conduzindo à acumulação de humidade e à degradação progressiva do adobe.

Os ensaios físicos corroboraram esta leitura. A densidade aparente elevada das amostras, obtida pelo método de Arquimedes, indicou processos de colmatação dos poros e perda da capacidade respirável do suporte. O ensaio de dissolução em ácido evidenciou formulações pobres em ligante, prática comum em intervenções contemporâneas de baixo custo, que fragiliza a coesão das argamassas e acelera o destacamento superficial. A análise colorimétrica confirmou as alterações cromáticas associadas à presença de sais e ao envelhecimento diferencial dos materiais, enquanto o ensaio de capilaridade revelou diferenças significativas entre os tipos de cimento testados, apontando para uma relação direta entre porosidade, absorção de água e risco de degradação.

Em síntese, os resultados obtidos comprovam que a utilização de rebocos cimentícios em paredes de adobe não apenas compromete a durabilidade do sistema construtivo, como também desencadeia um processo ativo de deterioração, onde os sais solúveis desempenham um papel central. Este quadro confirma os alertas já veiculados por organismos internacionais, como a Carta do Património Vernáculo Construído (ICOMOS, 1999), que sublinham a necessidade de compatibilidade material e respeito pelas técnicas tradicionais na conservação da arquitetura em terra.

5.1. Recomendações Futuras

Atendendo à incompatibilidade confirmada entre rebocos cimentícios e alvenarias de adobe, recomenda-se como medida prioritária a remoção faseada dos rebocos à base de cimento atualmente aplicados na Casa-Museu. A sua baixa permeabilidade ao vapor e a presença de fases associadas à hidratação do cimento, em conjunto com sais solúveis identificados, favorecem o bloqueio higroscópico, a acumulação de humidade e a cristalização salina, acelerando a degradação do suporte em terra crua.

A remoção deve ser controlada e progressiva, com recurso a meios manuais e a áreas teste, evitando danos mecânicos no adobe e permitindo avaliar a extensão de contaminação por sais. Após a remoção, recomenda-se um período de secagem e monitorização higrométrica, bem como a eventual aplicação de medidas complementares de mitigação de sais (quando justificadas pelo diagnóstico), antes da execução de rebocos compatíveis e permeáveis, de modo a restabelecer a capacidade “respirável” do paramento e a durabilidade do sistema.

A conservação de edifícios em adobe deve privilegiar soluções de reabilitação que respeitem a natureza higroscópica e porosa destes suportes. Futuras intervenções devem, assim, assentar em critérios de compatibilidade físico-química e higrotérmica, garantindo que os novos materiais não comprometam o equilíbrio construtivo.

Uma primeira via a aprofundar é o recurso a argamassas à base de cal aérea ou cal hidráulica natural, cuja permeabilidade ao vapor de água permite a manutenção da função respirável das paredes. Estudos demonstraram que as argamassas de cal oferecem maior compatibilidade com suportes de terra, ao contrário dos ligantes industriais que tendem a bloquear a difusão da humidade (Faria, 2008).

Outra alternativa de elevado potencial é a incorporação de adições pozolânicas de origem natural, como cinzas vulcânicas ou metacaulino. Estas adições reagem com a cal, formando compostos mais duráveis, e que simultaneamente, preservam a porosidade e a capacidade de troca higroscópica do material (Mileto et al., 2012).

O desenvolvimento de argamassas híbridas, incluindo terra estabilizada com pequenas proporções de cal e reforçadas com fibras vegetais, surge também como um caminho promissor. Ensaio experimentais demonstraram que a incorporação de fibras melhora a resistência mecânica e o controlo da retração, sem comprometer a compatibilidade com o adobe (Correia et. al, 2014).

Do ponto de vista metodológico, recomenda-se a realização de ensaios de longa duração, tanto em ambiente controlado como *in situ*, que permitam compreender a evolução das interações entre rebocos e suportes em condições reais de exposição. Paralelamente, técnicas de

diagnóstico não destrutivo, como termografia e espectroscopia portátil, devem ser integradas para alargar a capacidade de avaliação prévia e reduzir a intervenção invasiva.

Por fim, estas recomendações exigem também uma componente social e cultural: é fundamental investir na formação de mão de obra especializada em técnicas tradicionais de construção em terra, e promover a sensibilização das comunidades locais para os riscos do uso do cimento e para as vantagens de soluções compatíveis. Tal abordagem garante não apenas a preservação material dos edifícios, mas também a continuidade dos saberes e práticas que lhes dão identidade cultural.

Bibliografia

- Ahmed, M. I., Renukadevi, M. V., Natraj, K., Madhavi, K., Basutkar, S. M., Amalkar, M. S., & Joshi, A. M. (2024). *Influence of clay and moisture content on characteristics of stabilized mud blocks made with sandy soil*. In 2024 8th International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSITSS64042.2024.10816765>
- Al-Ajmi, F., Abdalla, H., Abdelghaffar, M., & Almatawah, J. (2016). *Strength behavior of mud brick in building construction*. **Open Journal of Civil Engineering**, *6*, 482–494. <https://doi.org/10.4236/ojce.2016.63041>
- Anjos, M. A. S., Camões, A., Jesus, C., & Duarte, F. (2012). Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. *Engenharia Civil, Universidade do Minho*, *44*, 41–58.
- Arizzi, A., Viles, H., & Cultrone, G. (2012). Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 807–818.
- Austin, G. S. (1984). Adobe as a building material. *New Mexico Geology*, *6*(4), 69–71. <https://doi.org/10.58799/NMG-v6n4.69>
- Ávila, F., Puertas, E., & Gallego, R. (2022). Mechanical characterization of lime-stabilized rammed earth: Lime content and strength development. *Construction and Building Materials*, *350*, 128871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128871>
- Barreira, I. D. (2022). *Conservação das casas gandaresas: Inventariação da cor das fachadas e metodologia de levantamento cromático* (Dissertação de Mestrado, Universidade Católica Portuguesa). Universidade Católica Portuguesa.
- Bompa, D. V., & Elghazouli, A. Y. (2020). Experimental and numerical assessment of the shear behaviour of lime mortar clay brick masonry triplets. *Construction and Building Materials*, *262*, 120571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120571>
- Bui, Q. B., Morel, J.-C., Hans, S., & Meunier, N. (2009). Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: The case of rammed earth. *Materials and Structures*, *42*(8), 1101–1116.
- Câmara Municipal de Vagos. (s.d.). *Casa-Museu de Santo António de Vagos*. Câmara Municipal de Vagos. <https://www.cm-vagos.pt/viver/cultura/museus-culturais/poi/casa-museu-de-santo-antonio-de-vagos> (Acedido em 7 Maio 2025)
- Carvalho, J. P. M. R. de. (2011). *Caracterização material e construtiva de edifícios de adobe em Aveiro* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro).
- Čejka, J., Sejkora, J., Plášil, J., Bahfenne, S., Palmer, S. J., & Frost, R. L. (2011). A vibrational spectroscopic study of hydrated Fe³⁺ hydroxyl-sulfates: Polymorphic minerals butlerite and parabutlerite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *79*(5), 1356–1363. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.04.069>

- Cementos Leмона. (2020, May). *CEM I 52,5 R — Technical data sheet*. Cementos Leмона.
- CEN – European Committee for Standardization. (2000). EN 197-1: Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: CEN.
- CEN – European Committee for Standardization. (2006). EN 1936: Natural stone test methods — Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels: CEN.
- CEN – European Committee for Standardization. (2020). EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry — Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: CEN.
- Cimpor. (2022). *Cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N — Ficha técnica*. Cimpor.
- Corradi, M., Sisti, R., & Borri, A. (2018). Effect of thin cement-based renders on the structural response of masonry wall panels. *Applied Sciences*, 8(1), 98
- Correia, M., Carlos, G., & Rocha, S. (Eds.). (2014). *Vernacular heritage and earthen architecture: Contributions for sustainable development*. CRC Press/Balkema.
<https://doi.org/10.1201/b17392>
- Cranstone, B. A. L. (1991). Earth as a building material. *Journal of Museum Ethnography*, 2, 3–14. Museum Ethnographers Group. <https://www.jstor.org/stable/40795032>
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). The Mineralogical Society. ISBN 9780903056335
- Dias, J., Galhano, F., & Oliveira, E. V. (1961). A região e a casa gandaresa. *Anuário do Centro de Estudos de Etnologia Peninsular*, 3, 417–442. Coimbra: Centro de Estudos de Etnologia Peninsular.
- Elert, K., Rodríguez-Navarro, C., Pardo, E. S., Hansen, E., & Cazalla, O. (2002). Lime mortars for the conservation of historic buildings. *Studies in Conservation*, 47(1), 62–75.
<https://doi.org/10.1179/sic.2002.47.1.62>
- Espinosa, R. M., Franke, L., & Deckelmann, G. (2008). Phase changes of salts in porous materials: Crystallization, hydration and deliquescence. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1758–1773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.015>
- Faria, P., Henriques, F., & Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 338–346.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.03.003>
- Gobbo, L. de A. (2009). *Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland* [Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências]. São Paulo, Brasil.
- Gomes, M. I., Santos, T., Pereira, C., & Faria, P. (2019). Construção com base em terra: Contributo para a ecoeficiência na construção. *Sustainable Gaia – Ciências e Tecnologias da Sustentabilidade*, 19, 25–35. Instituto Superior Técnico.

Holder, C. F., & Schaak, R. E. (2019). Tutorial on powder X-ray diffraction for characterizing nanoscale materials. *ACS Nano*, 13(7), 7359–7365. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b03913>

Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications.

ICCROM, CRATerre, ICOMOS, & Getty Conservation Institute. (2000). *Project Terra: Guidelines for the conservation of earthen architecture*. Getty Conservation Institute. https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terrguidelines.pdf

ICOMOS. (1999). *Carta sobre o Património Construído Vernáculo*. In F. Lopes & M. B. Correia (Eds.), *Património cultural: Critérios e normas internacionais de proteção* (pp. 341–344). Caleidoscópio.

ISO. (2017). ISO 14688-2:2017 — Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 2: Principles for a classification. Geneva: ISO.

Leica Microsystems (Schweiz) AG. (2014). *Leica E Series manual: Leica ES2, Leica EZ4 & Leica EZ4 HD* (Ref. 13IDE10060EN_1). Leica Microsystems (Schweiz) AG.

Martins, T., & Varum, H. (2006). Experimental characterization of the mechanical behaviour of adobe bricks of existing constructions in Aveiro district. In *Proceedings of the 5th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions* (pp. 749–755).

Lubelli, B., van Hees, R. P. J., & Huinink, H. P. (2006). Effect of NaCl on the hydric and hygric dilation behaviour of lime–cement mortar. *Heron*, 51(1), 33–48.

Mileto, C., Vegas, F., & Cristini, V. (Eds.). (2012). *Rammed earth conservation: Proceedings of the first international conference on rammed earth conservation, RESTAPIA 2012, Valencia, Spain, 21–23 June 2012*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17392>

Mileto, C., Vegas, F., García, L., & Cristini, V. (Eds.). (2015). *Earthen architecture: Past, present and future: Proceedings of the International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture, Valencia, Spain, 11–13 September 2014*. CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/b17392>

Morteros Tudela Veguín. (n.d.). *CEM II/B-V 32,5 R — Ficha técnica*. Morteros Tudela Veguín.

Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. (2000). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 205–213. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00002-3)

National Park Service. (2004). *Conservação de edifícios históricos em adobe* (A. de B. Araújo, Trad.). Technical Preservation Services, U.S. Department of the Interior. (Obra original publicada em 1978).

Parisotto, A., Lampert, V., Scharnberg, A. R. de A., & Alves, A. K. (2021). Colorimetric evaluation of the presence of efflorescence in red clay ceramics with calcium and sulfate ions. *Ceramics International*, 47(11), 16186–16191. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.196>

- Pauletto, M. M., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2020). Composição mineralógica e influência do processo de hidratação em cimentos Portland com adições minerais. *Cerâmica*, 66(380), 501–511. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802902>
- Santiago, L. F. F. B. (2007). *A casa gandraesa do distrito de Aveiro: Contributo para a sua reabilitação como património cultural* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora). Universidade de Évora.
- Sarrico, P. G. de A. (2014). *Caracterização mecânica de paredes e construções de alvenaria de adobe* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro).
- Silveira, D., Varum, H., & Costa, A. (2007). Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: The traditional adobe constructions in Aveiro district. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 102, 705–714. <https://doi.org/10.2495/SDP070682>
- Steiger, M. (2005). Crystal growth in porous materials—I: The crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth*, 282(3–4), 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysro.2005.05.007>
- Tavares, A., Costa, A., Varum, H., & Ramos, L. F. (2016). Absorbent materials in waterproofing barriers: Analysis of the role of diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, 112, 883–890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.117>
- Tavares, A., Varum, H., & Costa, A. (2018a). A evolução das alvenarias da região centro de Portugal e o comportamento higrotérmico. In *Atas do Congresso Construção 2018*. Universidade de Coimbra.
- Tavares, A., Varum, H., & Costa, A. (2018b). A construção dos que regressam do Brasil no século XIX (para o Centro e Norte de Portugal). In *Atas do Congresso Construção 2018*. Universidade de Coimbra.
- Tavares, A., & Costa, A. (2018c). A construção luso-brasileira em período de transição da indústria. In *Atas do Congresso Construção 2018*. Universidade de Coimbra.
- Tavares, A., Costa, A., & Varum, H. (2018d). Reabilitação de alvenarias de terra antigas: Diagnóstico e estratégias de intervenção. In *Atas do Congresso Construção 2018*. Universidade de Coimbra.
- Tavares, A., Costa, A., & Varum, H. (2021). O desafio da preservação de valores culturais da arquitetura vernácula das Casas Gandraesas. *P&C – Revista de Património Cultural*, 70, 45–60.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford.
- Torraca, G. (2005). *Porous building materials: Materials science for architectural conservation* (Rev. ed., originally published 1981). ICCROM.
- Turanli, L., & Saritas, A. (2011). Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh. *Construction and Building Materials*, 25, 1747–1752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.030>

Turner, L. (2015). Bricks, blocks and panels: What's in a wall? *ReNew: Technology for a Sustainable Future*, (132), 42–52. Alternative Technology Association.

Apêndice A - Registo Fotográfico da Casa-Museu de
Santo António de Vagos

.

Apêndice A - Registo Fotográfico da Casa-Museu de Santo António de Vagos



Fig. A.1. – Cozinha de Serviço. Fonte – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.2. – Sala de Jantar. Fonte – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.3. – Sala do Senhor **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.4. – Quarto Lado Esquerdo. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.5. – Pátio. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.6. – Destacamento Sala de Jantar. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.7. – Destacamento de Reboco Corredor. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.8. – Destacamento Sala de Estar. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.9. – Destacamento Cozinha. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.10. – Destacamento Sala de Jantar. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.11. – Destacamento Madeira Corredor. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.12. – Destacamento Fachada. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. A.13. – Destacamento Quarto Lateral Esquerdo. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

Apêndice B - Registo de Amostras

Apêndice B - Registo das Amostras
B.1. Tabelas

| | Localização | Altura | Profundidade (Aprox.) | Registo <i>In Situ</i> | Registo Amostra |
|-------------|--------------------|---------------|-----------------------|---|---|
| 1Ab | Cozinha de Serviço | 0.0 - 0.50 cm | 1 mm |  |  |
| 2Am | Sala de Jantar | 0.50- 120 cm | 2 -3 mm |  |  |
| 2Bm | Sala de Jantar | 0.50- 120 cm | 2 - 3 mm |  |  |
| 2Cb | Sala de Jantar | 0.0 - 0.50 cm | 2 - 3 mm |  |  |
| 2Da | Sala de Jantar | 120 cm ou + | Superficial |  |  |
| 3Am | Sala de Estar | 0.50- 120 cm | 3 mm |  |  |
| 3Bm | Sala de Estar | 0.50- 120 cm | Superficial |  |  |
| 4Ams | Corredor | 0.50- 120 cm | 1mm |  |  |
| 4Bmp | Corredor | 0.50- 120 cm | 2 -3 mm |  |  |

| | | | | | |
|------------|-------------------------|---------------|------|---|---|
| 5Am | Quarto Lateral Direito | 0.50- 120 cm | 2 mm |  |  |
| 5Bm | Quarto Lateral Direito | 0.50- 120 cm | 1 mm |  |  |
| 6Am | Quarto Lateral Esquerdo | 0.50- 120 cm | 5 mm |  |  |
| 7Ab | Sala | 0.0 – 0.50 cm | 1 mm |  |  |
| FAm | Fachada Principal | 0.50- 120 cm | 2 mm |  |  |

Fig. B.1. – Tabela do Total das Amostras. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

| | Localização | Altura | Profundidade (Aprox.) | Registo <i>In Situ</i> |
|------------|------------------------|---------------|-----------------------|---|
| 2Da | Sala de Jantar | 120 cm ou + | Superficial |  |
| 3Am | Sala de Estar | 0.50- 120 cm | 3 mm |  |
| 3Bm | Sala de Estar | 0.50- 120 cm | Superficial |  |
| 5Bm | Quarto Lateral Direito | 0.50- 120 cm | 1 mm |  |
| 7Ab | Sala | 0.0 – 0.50 cm | 1 mm |  |
| FAb | Fachada Principal | 0.50- 120 cm | 2 mm |  |

Fig. B.2. – Tabela Amostras DRX. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

B.2. Imagens Amostras



Fig. B.2.1. – Amostra 1Ab (Aprox. 4,5 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.2. – Amostra 2Am (Aprox. 3,5 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.3. – Amostra 2Bm (Aprox. 3,2 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.4. – Amostra 2Cb (Aprox. 6 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.5. – Amostra 2Da (Aprox. 3,8 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.6. – Amostra 3Am (Aprox. 4 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.7. – Amostra 3Bm (Aprox. 3,8 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

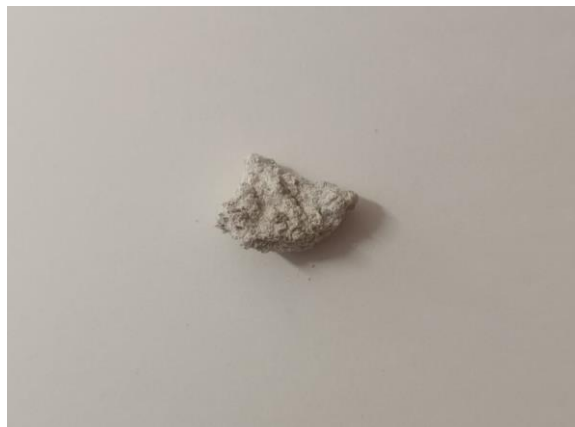


Fig. B.2.8. – 4Ams (Aprox. 3 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.9. – Amostra 4Bmp (Aprox. 3 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.10. – Amostra 5Am (Aprox. 3 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.11. – Amostra 5Bm (Aprox. 4,6 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.12. – Amostra 6Am (Aprox. 4,8 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.13. – Amostra 7Ab (Aprox. 5,7 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. B.2.14. – Amostra FAb (Aprox. 2,5 cm). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

Apêndice C – Ensaios Laboratoriais

Apêndice C - Ensaios Laboratoriais
C.1. Imagens Lupa Eletrônica



Fig. C.1.1 – Amostra 1Ab (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

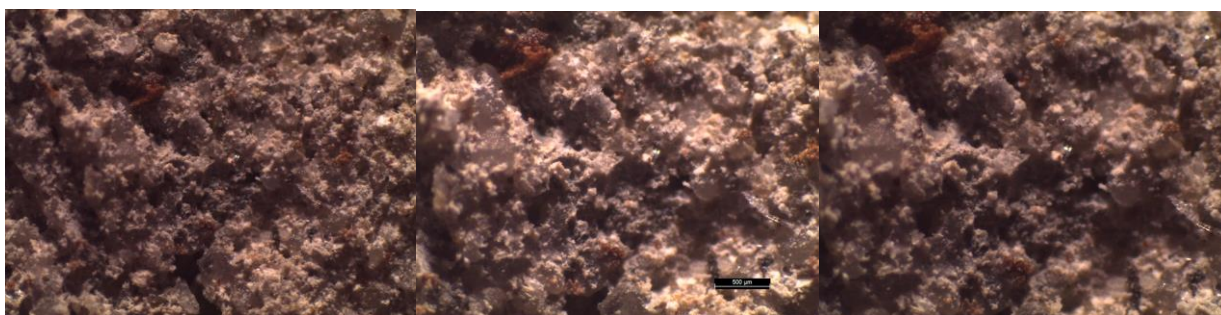


Fig. C.1.2 – Amostra 2Am (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

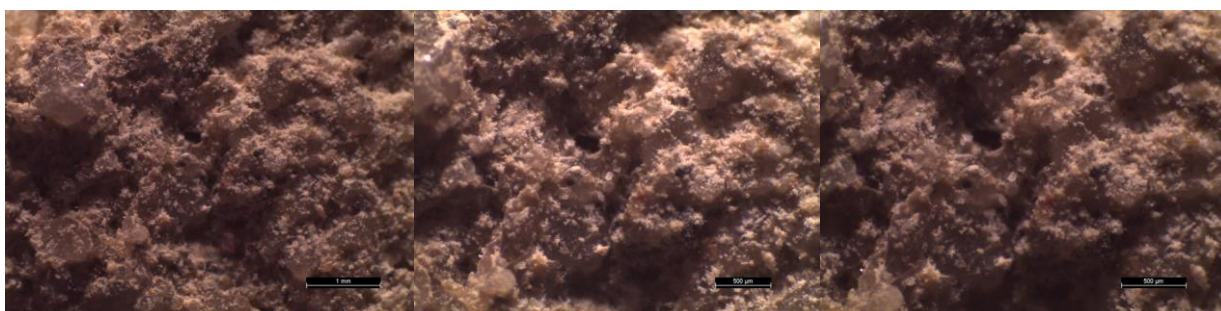


Fig. C.1.3 – Amostra 2Bm (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

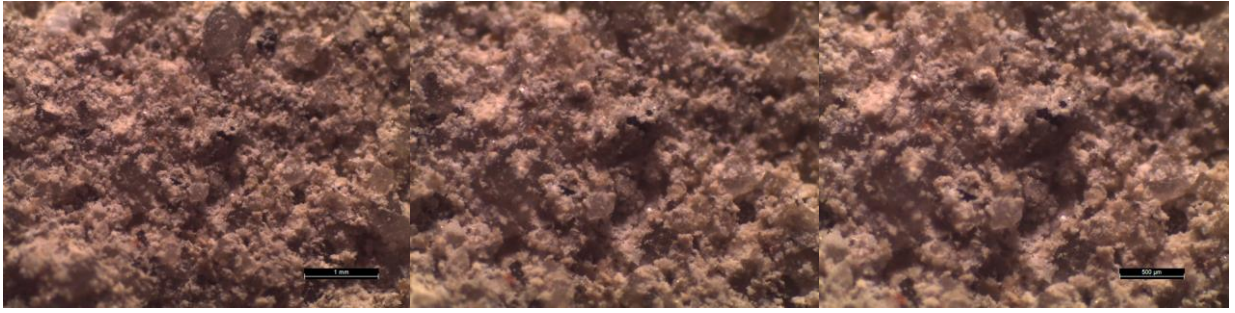


Fig. C.1.4 – Amostra 2Cb (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

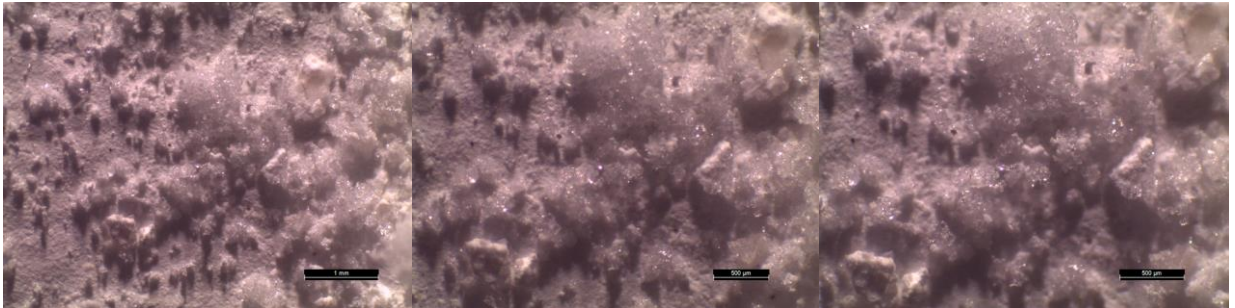


Fig. C.1.5 – Amostra 2Da (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

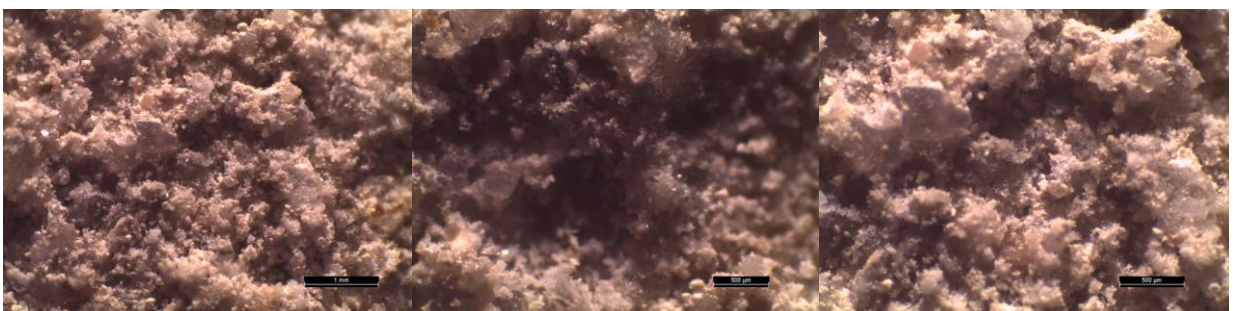


Fig. C.1.6 – Amostra 3Am (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

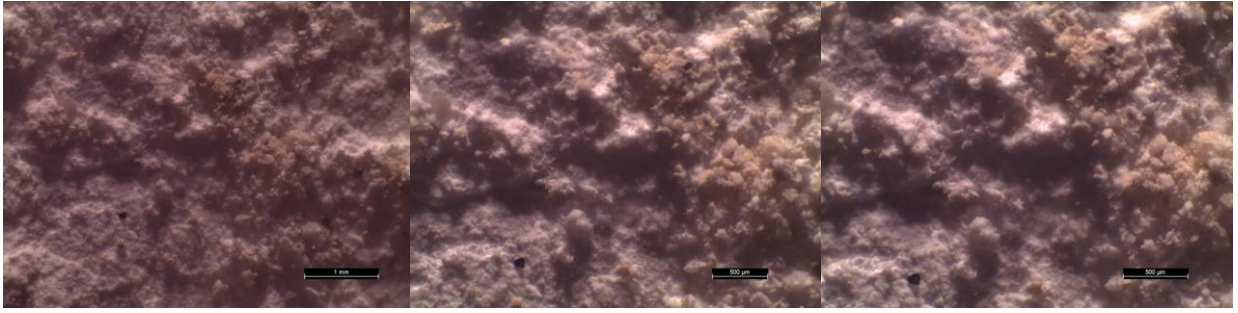


Fig. C.1.7 – Amostra 3Bm (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

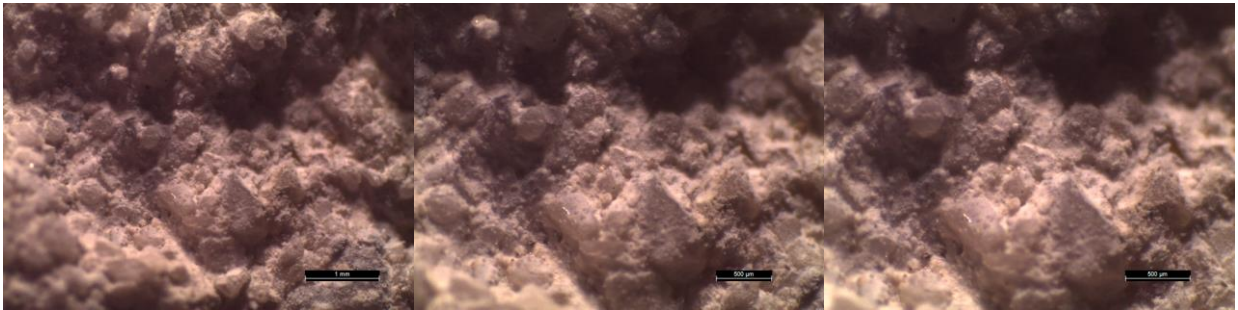


Fig. C.1.8 – Amostra 4Ams (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

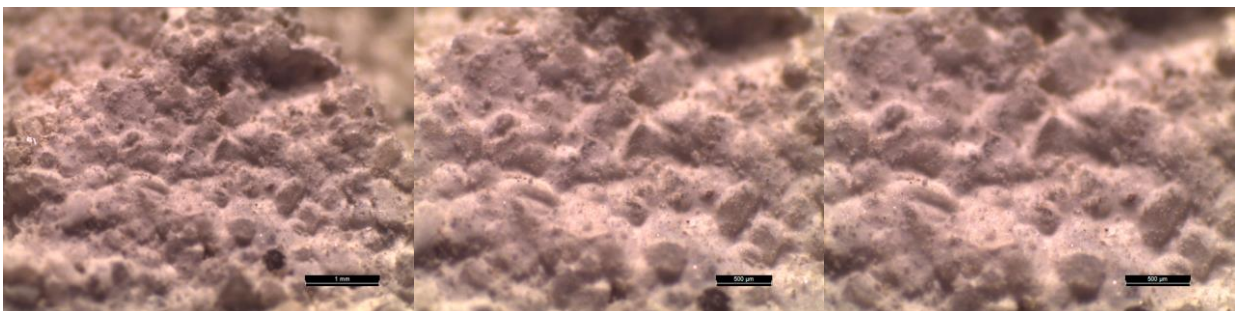


Fig. C.1.9 – Amostra 4Bmp (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

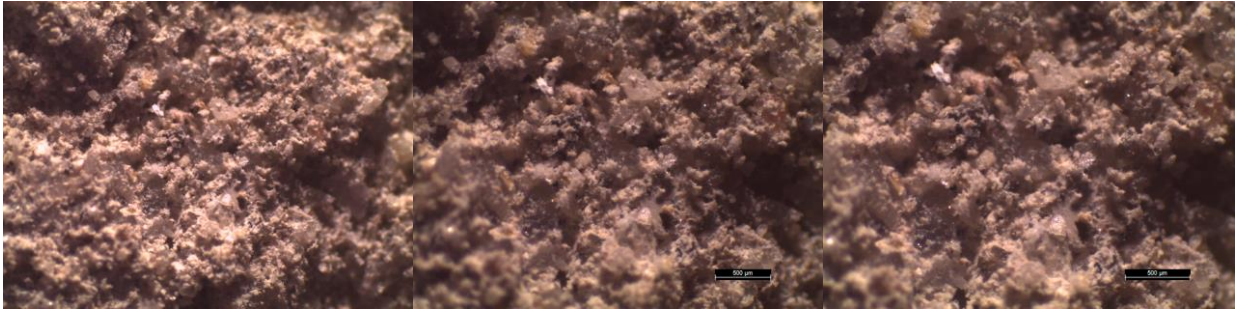


Fig. C.1.10 – Amostra 5Am (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

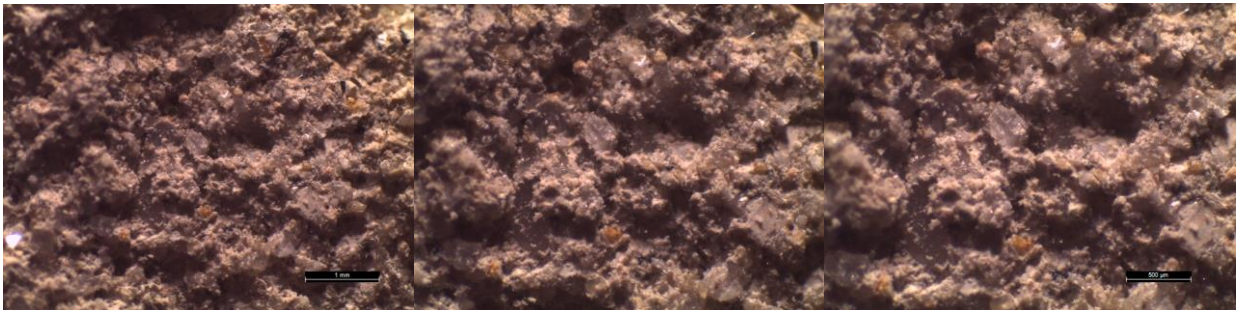


Fig. C.1.11 – Amostra 5Bm (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

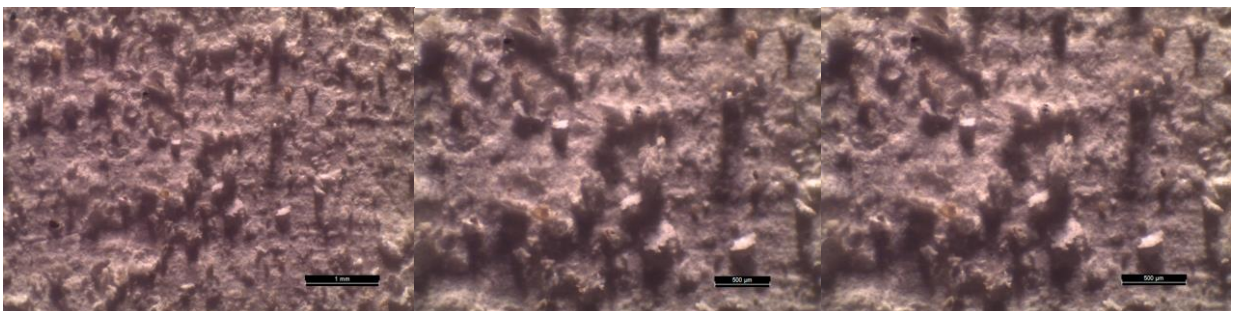


Fig. C.1.12 – Amostra 5Bm Sais (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

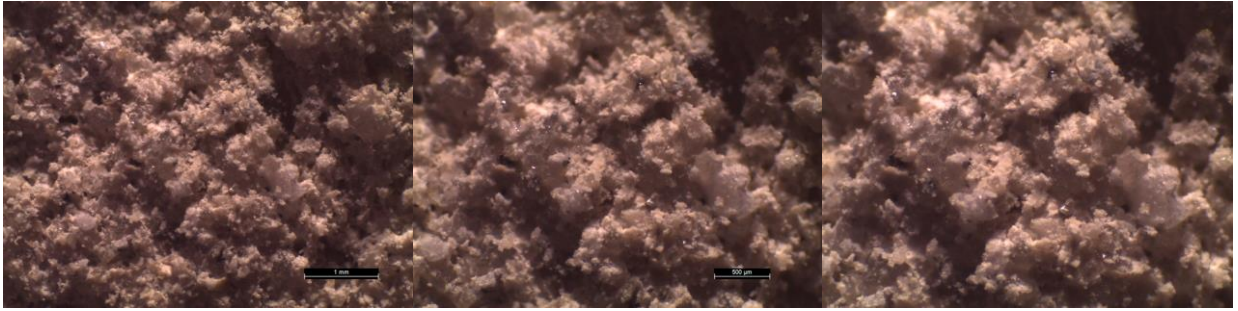


Fig. C.1.13 – Amostra 6Am (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

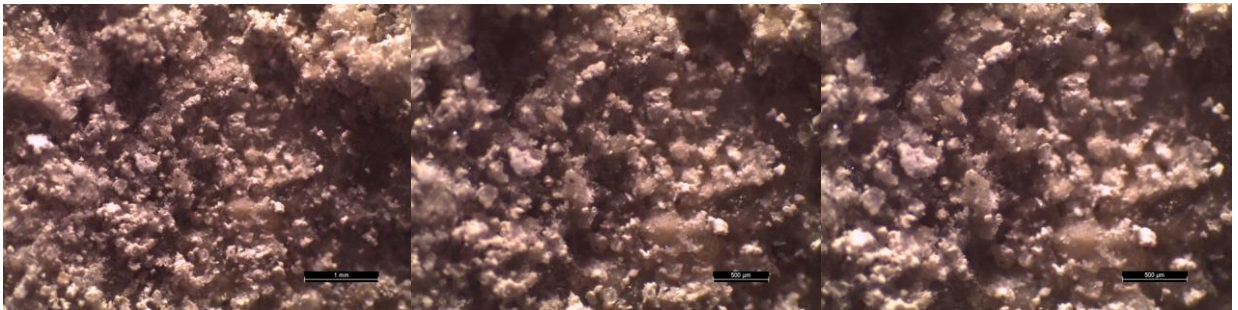


Fig. C.1.14 – Amostra 7Bm (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

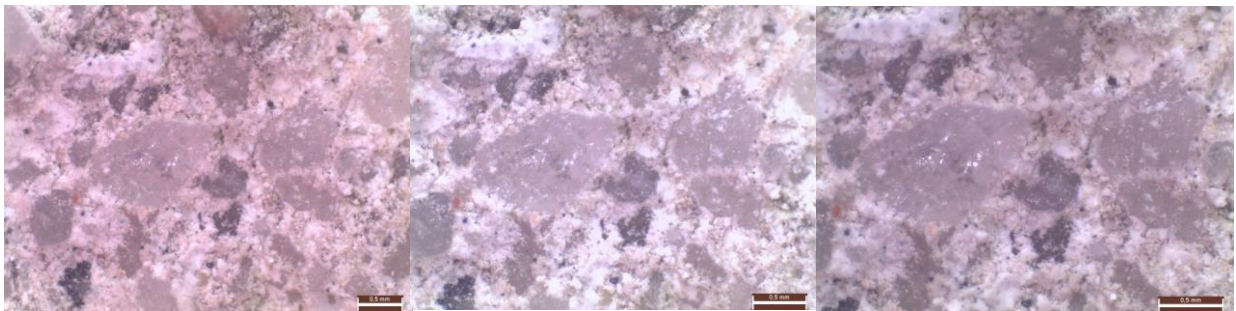


Fig. C.1.15 – Amostra FAb (20x, 30x, 35x). **Fonte** – Beatriz Lemos©2025

C.2. Procedimento dos Ensaio

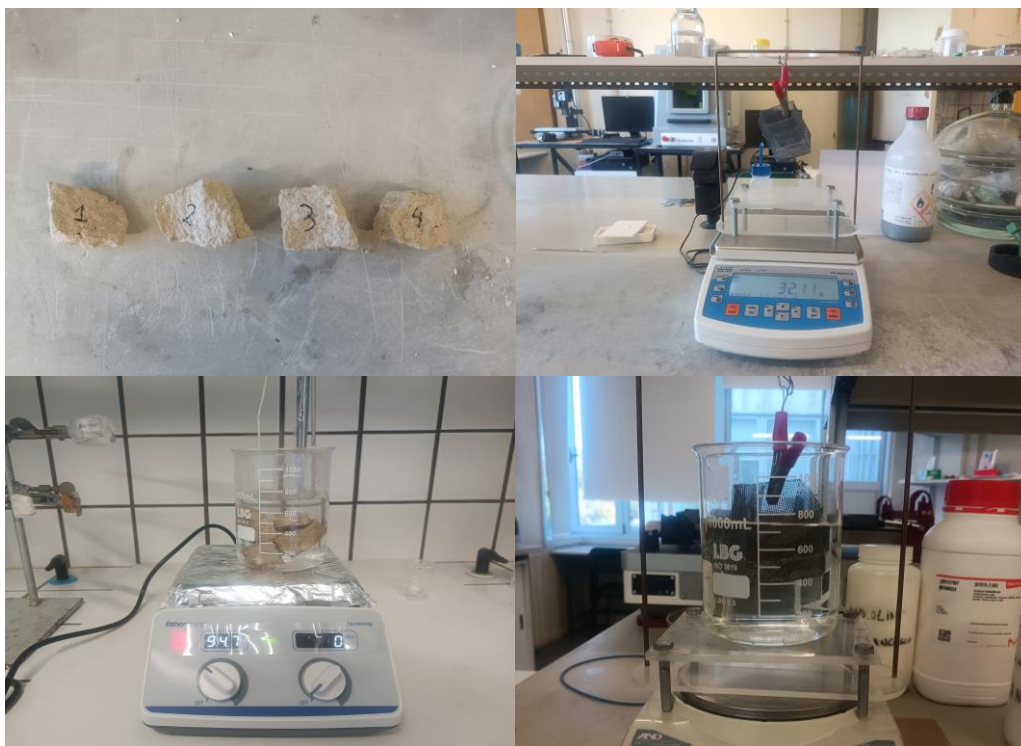


Fig. C.2.1 – Ensaio de Arquimedes. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. C.2.2 – Ensaio de Dissolução. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. C.2.3 – Ensaio de Colorimetria. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. C.2.4 – Preparação de Provetes. **Fonte** – Beatriz Lemos©2025



Fig. C.2.5 – Ensaio de Capilaridade. Fonte – Beatriz Lemos©2025