



EDUARDO  
MIGUEL  
FONTINHA  
EUGÉNIO

**CARACTERIZAÇÃO E  
DESENVOLVIMENTO DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO  
PARA FORTALEZAS EM TAIPA  
MILITAR NO ALENTEJO**

Relatório de Dissertação  
Mestrado em Conservação e Reabilitação do  
Edificado

**ORIENTADOR**

Professor Doutor António Pedro Carones Duarte  
Doutora Bruna Amarílis da Palma e Silva

Dezembro 2022



EDUARDO  
MIGUEL  
FONTINHA  
EUGÉNIO

**CARACTERIZAÇÃO E  
DESENVOLVIMENTO DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO  
PARA FORTALEZAS EM TAIPA  
MILITAR NO ALENTEJO**

**JÚRI**

*Presidente: Doutora Maria Eugénia de Jesus Santos, Professora Adjunta, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro/IPS*

*Orientador: Doutor António Pedro Carones Duarte, Professor Adjunto Convidado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro/IPS*

*Vogal: Doutora, Ana Rita Lopes dos Santos, Investigadora LNEC (Arguente)*

Dezembro 2022



## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores, Professor António Pedro Carones Duarte e Doutora Bruna Amarílis da Palma e Silva, pela infinita disponibilidade, pelas críticas construtivas, pelo constante incentivo, por toda a atenção demonstrada, apoio e amizade.

Aos meus três filhos, Simão, Eduardo e Manuel, agradeço a compreensão, imensa paciência, privando-os da minha companhia e do meu apoio enquanto pai, durante todos os momentos dedicados a este mestrado.

À minha esposa, Maria Eugénio, pela infinita paciência, incentivo e apoio incondicional no mestrado e ao longo da vida.

À minha mãe e aos meus sogros, pela disponibilidade, e apoio prestado aos netos, permitindo maior dedicação ao longo do mestrado.

À Catarina Almeida, colega de mestrado, pelo espírito de entreajuda, capacidade de trabalho em equipa, ao longo de todo o mestrado e pela sua amizade.

À Professora Raquel Duarte, por todo o apoio prestado, aquando da realização do ensaio de dissolução ácida, no laboratório de Engenharia Química do IPS.

À Professora Ana Paula Ferreira Pinto, do Instituto Superior Técnico, por ter disponibilizado o acesso ao equipamento que permitiu realizar a caracterização colorimétrica das amostras.

Ao Sr. Alexandre Gamito, técnico do laboratório de Engenharia Civil da ESTBarreiro-IPS, por todo o apoio na realização dos ensaios no laboratório de construção e reabilitação do IPS.

Ao professor José Aguiar e ao professor Pedro Pacheco, por concederem o acesso ao “Projeto de consolidação e restauro dos paramentos do perímetro abaluartado exterior e cerca islâmica e medieval interior”.

Ao Senhor José Pacheco da Câmara Municipal do Alandroal, por permitir o acesso à fortaleza de Juromenha, para recolha de amostras no decorrer da obra.

À Dra. Joana São José da empresa ERA Arqueologia, conservação e gestão do património, pelo apoio na recolha das amostras de argamassas de revestimento da fortaleza de Juromenha, necessárias ao estudo.

Ao Arquiteto Miguel Rocha, pelo seu apoio e disponibilidade que contribuíram para a realização desta dissertação.

À Direção Regional de Cultura do Alentejo, por disponibilizar acesso aos arquivos, relacionados, com o tema em estudo

## Resumo

O trabalho realizado teve como objetivo a caracterização de amostras de argamassa de revestimento pertencentes à fortaleza de Juromenha, importante estrutura em taipa militar do Alentejo (Portugal), e a proposta e estudo de potenciais argamassas de substituição.

Para tal, foi desenvolvido um amplo programa experimental, que começou com a recolha das amostras de argamassa de vários locais da fortaleza, as quais foram depois limpas e devidamente catalogadas. Posteriormente, procedeu-se à sua caracterização através da realização de ensaios colorimétricos e físicos (absorção de água por capilaridade, porosidade aberta, massas volúmicas real e aparente, absorção de água às 48 horas) e foi também avaliada a sua composição através dos ensaios de dissolução ácida para obtenção do traço aproximado e peneiração do resíduo insolúvel. Com base nos resultados anteriores, foram definidas e estudadas argamassas de substituição, sujeitas também elas aos mesmos ensaios colorimétricos e físicos, bem como a ensaios de caracterização mecânica (resistência à tração por flexão e resistência à compressão).

A caracterização efetuada às amostras de argamassa antiga permitiu verificar que estas eram constituídas por cal aérea e areia siliciosa, com traços aproximados em massa que variavam entre 1:2 e 1:4 (cal:agregado), sendo os traços mais ricos em agregado correspondentes às argamassas mais antigas. Foram então definidas e estudadas duas argamassas de substituição, produzidas com materiais semelhantes aos originais e com traços iguais aos extremos do intervalo de traços obtido anteriormente (1:2 e 1:4). Os resultados da sua caracterização mostraram que estas apresentavam características físicas, em geral, dentro da gama de valores da apresentada pelas amostras antigas. Contudo, no que diz respeito à resistência mecânica, as argamassas de substituição poderão ser demasiado resistentes, especialmente a argamassa 1:2. Também a cor das argamassas de substituição revelou ser mais clara e menos amarelada do que a das argamassas antigas.

**Palavras-chave:** argamassas de cal aérea; conservação do património; fortalezas em taipa militar; caracterização física; caracterização mecânica



## **Abstract**

The aim of the work carried out was the characterization of samples of rendering mortars belonging to the fortress of Juromenha, an important structure in military rammed-earth in Alentejo (Portugal), and the proposal and study of potential replacement mortars.

To this end, a broad experimental program was developed, which began with the collection of mortar samples from various locations in the fortress, which were then cleaned and catalogued. Subsequently, their characterization was made by carrying out colorimetric and physical tests (water absorption by capillarity, open porosity, real and bulk densities, water absorption at 48 hours), and their composition was evaluated through acid dissolution tests and the sieving of the insoluble residue. Based on these results, replacement mortars were defined and studied, and subjected to the same colorimetric and physical tests, as well as to mechanical tests (flexural tensile strength and compressive strength).

The characterization of the old mortar samples from the fortress allowed verifying that they were composed of aerial lime and siliceous sand, with approximate lime:aggregate ratios (by mass) that varied between 1:2 and 1:4. The richest ratios in aggregate were found to correspond to the older mortars. Two replacement mortars, produced with similar materials and with lime:aggregate ratios equal to the extremes of the range obtained (1:2 and 1:4) were then studied. The results of their characterization showed that these presented physical characteristics, in general, within the range of values presented by the old samples. However, with regard to mechanical strength, replacement mortars may be too resistant, especially the 1:2 mortar. The color of the replacement mortars also turned out to be lighter and less yellowish than that of the old mortars.

**Key-words:** aerial lime mortars; conservation of the built heritage; military rammed-earth fortresses; physical characterization; mechanical characterization



# Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e motivação .....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	1
1.3. Estrutura do documento.....	2
<b>2. Fortaleza de Juromenha .....</b>	<b>5</b>
2.1. Considerações iniciais .....	5
2.2. Localização geográfica .....	5
2.3. Enquadramento histórico .....	6
2.4. Intervenções.....	9
2.5. Anomalias/ Degradação das argamassas.....	10
<b>3. Argamassas .....</b>	<b>13</b>
3.1. Considerações gerais.....	13
3.2. Enquadramento histórico .....	13
3.3. Argamassas de cal .....	15
3.3.1. Materiais constituintes.....	15
3.3.2. Características físicas.....	17
3.3.3. Características mecânicas .....	19
3.4. Argamassas antigas .....	21
3.4.1. Composição das argamassas antigas .....	21
3.4.2. Características das argamassas antigas.....	23
3.4.3. Principais anomalias e mecanismos de degradação de argamassas.....	25
3.5. Argamassas de substituição .....	26
3.5.1. Princípios de intervenção .....	26
3.5.2. Requisitos para a formulação de argamassas de substituição.....	27
<b>4. Programa experimental .....</b>	<b>29</b>
4.1. Considerações gerais.....	29
4.2. Metodologia experimental .....	29
4.3. Recolha e amostragem das argamassas antigas.....	31
4.4. Produção das argamassas de substituição.....	36

4.4.1. Materiais utilizados .....	36
4.4.2. Produção de argamassa .....	37
4.4.3. Consistência por espalhamento .....	38
4.4.4. Moldagem dos provetes.....	39
4.4.5. Condições de cura e identificação dos provetes .....	40
4.5. Caracterização colorimétrica .....	40
4.6. Caracterização física.....	42
4.6.1. Absorção de água por capilaridade.....	42
4.6.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente .....	46
4.6.3. Absorção de água por imersão (após 48 horas).....	48
4.7. Resíduo insolúvel por dissolução ácida.....	50
4.8. Caracterização mecânica.....	54
4.8.1. Resistência à tração por flexão .....	54
4.8.2. Resistência à compressão.....	55
<b>5. Resultados e discussão .....</b>	<b>57</b>
5.1. Considerações gerais/introdução .....	57
5.2. Argamassas antigas .....	57
5.2.1. Caracterização colorimétrica.....	57
5.2.2. Caracterização física .....	59
5.2.2.1. Absorção de água por capilaridade .....	59
5.2.2.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente .....	60
5.2.2.3. Absorção de água por imersão (após 48horas) .....	63
5.2.3. Determinação da composição .....	64
5.2.3.1. Resíduo insolúvel por dissolução ácida .....	64
5.2.3.2. Análise granulométrica do resíduo insolúvel .....	65
5.3. Argamassas de substituição .....	66
5.3.1. Formulações estudadas.....	66
5.3.2. Caracterização colorimétrica.....	67
5.3.3. Caracterização física .....	68
5.3.3.1. Absorção de água por capilaridade .....	68
5.3.3.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente .....	69
5.3.3.3. Absorção de água por imersão (após 48horas) .....	71

5.3.4. Caracterização mecânica.....	71
5.3.4.1. Resistência à tração por flexão.....	71
5.3.4.2. Resistência à compressão.....	72
<b>6. Conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>75</b>
6.1. Conclusões .....	75
6.2. Propostas de desenvolvimentos futuros .....	77
<b>Referências .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>85</b>
Anexo I - Fichas de caracterização das amostras das fortalezas de Alcácer do Sal e Juromenha .....	87
Anexo II - Ficha técnica da cal .....	97
Anexo III - Ficha técnica da areia.....	101



## Índice de figuras

Figura 2.1 – Fortaleza de Juromenha, 2022 .....	5
Figura 2.2 – Imagem aérea Fortaleza de Juromenha .....	6
Figura 2.3 - Planta da Fortificação por Duarte de Armas - Fortaleza de Juromenha 1509, .....	7
Figura 2.4 - Plano de Juromenha e de sua cidade e novas fortificações nos anos de 1644 e 1657, por Nicolau de Langres.....	8
Figura 2.5 - Fortaleza atual Séc. XXI .....	9
Figura 2.6 – Fases construtivas da fortaleza .....	9
Figura 2.7 – Zonas de Intervenção pela DGEM da fortaleza de Juromenha .....	10
Figura 2.8 – (a) Destacamento de argamassas e perda de secção do suporte e (b) avançado estado de degradação do suporte e das argamassas de revestimento.....	11
Figura 2.9 – Derrocadas parciais por falta de coesão das argamassas de junta e insuficiente drenagem de águas pluviais (a) de parte da muralha e (b) de um torreão .....	11
Figura 2.10 – (a) Destacamento das argamassas de revestimento (fase construtiva da zona inferior) e fissuração das argamassas (fase construtiva da zona superior) e (b) perda de argamassa de revestimento e de junta.....	11
Figura 3.1 — Variação da porosidade aberta com o teor máximo de absorção de água .....	18
Figura 3.2 —Variação da resistência à compressão com a relação água/ligante de argamassas de cal estudadas por Algarvio (2010).....	19
Figura 3.3 – Comparação da resistência à compressão de argamassas antigas com a de produzidas em laboratório com um só tipo de agregado.....	24
Figura 4.1 – Metodologia experimental seguida para as amostras de argamassa antiga .....	30
Figura 4.2 – Metodologia experimental seguida para as argamassas de substituição.....	31
Figura 4.3 – Planta da fortaleza de Juromenha, com identificação dos locais de onde foram retiradas as amostras .....	32
Figura 4.4 – Amostra J/C/1 (a) Localização; (b) Amostra .....	33
Figura 4.5 – Amostra J/I/1 (a) Localização; (b) Amostra .....	33
Figura 4.6 – Amostra J/I/2 (a) Localização; (b) Amostra .....	34
Figura 4.7 – Amostra J/I/3 (a) Localização; (b) Amostra .....	34
Figura 4.8 – Amostra ARAB (a) Localização; (b) Amostra.....	34
Figura 4.9 – Amostra ARP (a) Localização; (b) Amostra .....	35

Figura 4.10 – Amostra EJMS (a) Localização; (b) Amostra .....	35
Figura 4.11 – Amostra RTS (a) Localização; (b) Amostra.....	35
Figura 4.12 – Cal hidratada utilizada .....	36
Figura 4.13 – Curva granulométrica da areia utilizada na produção das argamassas de substituição .....	36
Figura 4.14 – Produção de argamassas: (a) misturadora utilizada; (b) adição da água; (c) adição do ligante; (d) adição da areia.....	37
Figura 4.15 – Avaliação da consistência por espalhamento: (a) argamassa após retirada do molde troncocónico; (b) medição do espalhamento .....	38
Figura 4.16 – Processo de moldagem dos provetes: (a) compactação da argamassa no molde; (b) alisamento da superfície de argamassa .....	39
Figura 4.17 – Determinação da cor: (a) espaço de cor CIELAB; (b) colorímetro utilizado .....	41
Figura 4.18 – Determinação da absorção de água por capilaridade das amostras de argamassa antiga: (a) determinação da área em contacto com água recorrendo a papel milimétrico (b) secagem em estufa; (c) arrefecimento em exsiccador .....	43
Figura 4.19 – Determinação da absorção de água por capilaridade das amostras de argamassa antiga: (a) aspeto das amostras no início do ensaio; (b) aspeto das amostras no final do ensaio; (c) caixas onde se encontravam os tabuleiros foram mantidas fechadas ao longo do ensaio ...	43
Figura 4.20 – Exemplo de curva de absorção capilar .....	45
Figura 4.21 – Determinação da absorção de água por capilaridade em provetes de argamassa de substituição: (a) ensaio a decorrer; (b) imagem térmica dos provetes, sendo notório o nível de ascensão capilar .....	46
Figura 4.22 – Determinação da porosidade aberta e massa volúmica: (a) provetes no exsiccador sob vácuo; (b) pesagem hidrostática dos provetes; (c) pesagem no estado saturado.....	47
Figura 4.23 – Determinação do teor em água às 48 horas das amostras de argamassa antiga: (a) amostras imersas, durante o ensaio; (b) pesagem da amostra no estado saturado com superfície seca.....	49
Figura 4.24 – Determinação do teor em água às 48 horas em provetes de argamassa de substituição: (a) provetes imersos, durante o ensaio; (b) pesagem de provete no estado saturado com superfície seca .....	50
Figura 4.25 – Argamassas desagregadas para determinação do resíduo insolúvel.....	51
Figura 4.26 – Determinação do resíduo insolúvel: soluções ácidas com o material após repouso (1 - RTS 1.2; 2 - J/C/1.1; 3 - J/I/3.2; 4 - EJMS/1.1) .....	51

Figura 4.27 – Determinação do resíduo insolúvel: (a) processo de filtragem; (b) resíduo insolúvel após secagem em estufa; (c) pesagem da massa seca .....	52
Figura 4.28 – Agitador com bateria de peneiros.....	53
Figura 4.29 – Resíduo insolúvel das amostras para determinação da granulometria: (a) RTS 1.2; (b) J/C/1.1; (c) J/I/3.2; (d) EJMS 1.1.....	53
Figura 4.30 – Determinação da tensão de flexão: (a) máquina de ensaio de à tração por flexão; (b) rotura do provete à tração por flexão .....	55
Figura 4.31 – Determinação da tensão de compressão: (a) rotura do provete à compressão; (b) provete após ensaio.....	55
Figura 5.1 – Coordenadas $a^*$ e $b^*$ obtidas para as amostras de argamassa antiga.....	58
Figura 5.2 – Coordenadas $C^*$ e $L^*$ obtidas para as amostras de argamassa antiga.....	58
Figura 5.3 – Aspeto da amostra ARAB.....	58
Figura 5.4 – Curvas de absorção capilar das argamassas antigas .....	59
Figura 5.5 – Aspeto da face exterior das amostras de argamassa antiga: (a) RTS/1.2, (b) ARP.....	60
Figura 5.6 – Correlação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade .....	62
Figura 5.7 – Correlação entre a porosidade aberta e o teor em água às 48 h.....	63
Figura 5.8 – Curvas granulométricas dos resíduos insolúveis das amostras de argamassa antiga .....	65
Figura 5.9 – Aspeto dos resíduos insolúveis das amostras (a) J/C/1.1; (b) J/I/3.2; (c) EJMS/1.1; (d) RTS/1.2 .....	65
Figura 5.10 – Comparação entre as curvas granulométricas da areia utilizada nas argamassas de substituição (areia 0/4) e dos resíduos insolúveis das amostras de argamassa antiga .....	66
Figura 5.11 – Coordenadas $a^*$ e $b^*$ obtidas para as argamassas de substituição e comparação com as obtidas para as amostras de argamassa antiga.....	67
Figura 5.12 – Coordenadas $C^*$ e $L^*$ obtidas para as argamassas de substituição e comparação com as obtidas para as amostras de argamassa antiga .....	67
Figura 5.13 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de substituição .....	68
Figura 5.14 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as argamassas de substituição.....	69
Figura 5.15 – Valores assintóticos obtidos para as argamassas de substituição .....	69
Figura 5.16 – Porosidade aberta obtida para as argamassas de substituição .....	70
Figura 5.17 – Correlação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade e entre a porosidade aberta e o valor assintótico.....	70



## Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Resumo histórico da utilização das argamassas de cal .....	14
Tabela 3.2 – Classificação das argamassas medievais segundo Voillet-Le-Duc .....	14
Tabela 3.3 — Argamassas de cal produzidas com diferentes relações água/ligante e correspondente porosidade aberta, determinada por .....	18
Tabela 3.4 - Resistência à compressão de acordo com as idades das argamassas.....	20
Tabela 3.5 - Resistência à compressão de acordo com as idades das argamassas.....	21
Tabela 3.6 - Influência do traço nas principais propriedades de argamassas de cal aérea aos 90 dias de idade .....	21
Tabela 3.7 – Composição de diferentes argamassas antigas.....	22
Tabela 3.8 – Resistência à compressão de argamassas antigas.....	24
Tabela 3.9 – Anomalias predominantes em rebocos antigos .....	25
Tabela 4.1 – Nomenclatura das amostras antigas de argamassa .....	31
Tabela 4.2 – Amostras de argamassas antigas utilizadas na determinação da resistência à compressão .....	41
Tabela 4.3 – Provetes de argamassas de substituição utilizadas na determinação da resistência à compressão .....	41
Tabela 4.4 – Amostras de argamassas antigas utilizadas na determinação da absorção de água por capilaridade .....	42
Tabela 4.5 - Provetes de argamassas de substituição utilizadas na determinação da absorção de água por capilaridade.....	42
Tabela 4.6 – Intervalos de tempo entre pesagem das amostras antigas.....	44
Tabela 4.7 – Intervalos de tempo entre pesagem dos provetes de argamassa de substituição .....	46
Tabela 4.8 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação da porosidade aberta e massa volúmica real e aparente .....	47
Tabela 4.9 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da porosidade aberta e massa volúmica real e aparente .....	47
Tabela 4.10 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação do teor de água (após 48 h) .....	49
Tabela 4.11 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação do teor de água (após 48h).....	49

Tabela 4.12 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação do resíduo insolúvel por dissolução ácida .....	50
Tabela 4.13 – Amostras utilizadas na peneiração do resíduo insolúvel .....	52
Tabela 4.14 – Relação, Peneiros/ Malhas (mm).....	53
Tabela 4.15 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da resistência à flexão .....	54
Tabela 4.16 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da resistência à compressão .....	55
Tabela 5.1 – Caracterização colorimétrica das amostras de argamassa antiga.....	57
Tabela 5.2 – Coeficiente de capilaridade das amostras de argamassa antiga .....	60
Tabela 5.3 – Porosidade aberta das amostras de argamassa antiga .....	61
Tabela 5.4 – Valores médios de porosidade aberta obtidos para argamassas antigas .....	61
Tabela 5.5 – Massa volúmica real e aparente das amostras de argamassa antiga .....	62
Tabela 5.6 – Absorção de água por imersão (após 48h) das amostras de argamassa antiga.....	63
Tabela 5.7 – Resultado do resíduo insolúvel das amostras de argamassa antiga e traço estimado .....	64
Tabela 5.8 – Traço estimado de argamassas de revestimento de edifícios militares e religiosos, determinados por diversos autores .....	64
Tabela 5.9 – Caracterização colorimétrica das amostras de argamassas de substituição.....	67
Tabela 5.10 – Massas volúmicas real e aparente obtidas para as argamassas de substituição .....	70
Tabela 5.11 – Absorção de água por imersão (após 48h) obtida para as argamassas de substituição .....	71
Tabela 5.12 – Resistência à tração por flexão obtida para as argamassas de substituição.....	72
Tabela 5.13 – Resistência à compressão obtida para as argamassas de substituição.....	73

# **1. Introdução**

## **1.1. Contexto e motivação**

A presente dissertação enquadra-se no âmbito do mestrado em Conservação e Reabilitação do Edificado, na Escola Superior de Tecnologia, do Instituto Politécnico de Setúbal. Em particular, pretendeu-se caracterizar as argamassas utilizadas na fortaleza de Juromenha (Alentejo Portugal), construída maioritariamente em taipa militar (técnica construtiva/material frequentemente utilizado nesta região) e também em alvenaria de pedra. Previamente à realização deste trabalho, esta fortaleza apresentava sinais evidentes de degradação nos revestimentos, sendo necessária a sua reabilitação a curto prazo. Neste contexto, torna-se da maior relevância estudar detalhadamente a composição e propriedades das argamassas existentes na referida fortaleza, sendo este um dos objetivos principais desta dissertação. Outro dos objetivos é o de contribuir para futuras intervenções de conservação ou reabilitação, através do estudo de potenciais soluções de argamassa de substituição.

A escolha da fortificação em causa deveu-se: (i) à variedade de suportes existentes no edificado, pedra e taipa, sistemas construtivos tradicionais da região, (ii) à reduzida informação disponível sobre as argamassas de revestimento de estruturas em taipa militar, (iii) ao interesse profissional do candidato sobre este tipo de estruturas e (iv) à possibilidade de acesso à fortaleza para recolha de material, devido à empreitada de conservação que se encontrava a começar no decorrer deste trabalho.

## **1.2. Objetivos e metodologia**

O principal objetivo desta dissertação, apoiada numa extensa campanha experimental, é a caracterização de amostras de argamassa de revestimento pertencentes à fortaleza de Juromenha, importante estrutura em taipa militar do Alentejo (Portugal), e a proposta e estudo de potenciais argamassas de substituição. Pretende-se assim contribuir para o aumento do conhecimento no domínio dos materiais presentes nesta estrutura militar e contribuir para futuras intervenções de conservação ou reabilitação.

Deste modo, foram recolhidas amostras de argamassa de revestimento da fortaleza, de oito locais diferentes da fortificação, e sujeitas a caracterização, para sustentar os princípios

subjacentes à produção em laboratório das argamassas de substituição, por forma a possibilitar a comparação das suas propriedades.

Em relação à metodologia experimental realizada para a referida caracterização, após recolha, procedeu-se à limpeza e catalogação das amostras já em laboratório. Posteriormente, as amostras foram sujeitas a caracterização colorimétrica e física, que incluiu ensaios com vista à determinação da sua composição. Com base nestes resultados foram definidas as formulações de argamassa de substituição (neste caso, duas), e sujeitas a uma caracterização física e colorimétrica, mas também a uma caracterização mecânica. Pretendia-se, deste modo, que os ensaios de caracterização a ambos os tipos de argamassa fossem, no geral, os mesmos.

Numa fase posterior à realização da campanha experimental, e com base nos resultados obtidos, foi realizada a discussão dos resultados obtidos com a caracterização das amostras antigas e das argamassas de substituição. Procedeu-se depois à análise comparativa das argamassas antigas com as de substituição com vista à avaliação da sua adequabilidade e potencial compatibilidade.

### **1.3. Estrutura do documento**

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, em conformidade com os conteúdos infra expostos.

O primeiro capítulo, aqui apresentado, corresponde aos textos introdutórios do trabalho, com o contexto e motivação, objetivos e metodologia propostos e estrutura do documento final.

O segundo capítulo diz respeito à fortaleza de Juromenha, fazendo uma introdução relativamente à sua localização geográfica e enquadramento histórico. Apresentam-se também as intervenções a que foi sujeita ao longo do tempo, o estado atual de conservação e as anomalias mais frequentemente verificadas nos revestimentos.

O terceiro capítulo faz um apanhado do estado atual do conhecimento no que diz respeito às argamassas, antigas e de substituição, começando com um breve enquadramento histórico das argamassas à base de cal. Relativamente às argamassas antigas, abordam-se as suas características, composição e principais mecanismos de degradação. Quanto às argamassas de substituição, abordam-se os princípios de intervenção em estruturas antigas, os requisitos a que estas argamassas devem obedecer, bem como algumas regras para a sua correta formulação e seleção.

O quarto capítulo corresponde à apresentação do plano de trabalhos, descrevendo as amostras de argamassa antiga que foram recolhidas, a produção de argamassas novas e as metodologias seguidas nos ensaios de caracterização de ambas. Para cada ensaio, apresenta-se o material e equipamento utilizado, assim como os cálculos que lhes são específicos, além do enquadramento normativo de cada ensaio realizado.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados no cumprimento da campanha experimental. Procede-se também à discussão e análise comparativa dos resultados obtidos para as argamassas antigas e para as de substituição, assim como com outros estudos no mesmo âmbito.

No sexto, e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do estudo e propõem-se alguns desenvolvimentos futuros.



## 2. Fortaleza de Juromenha

### 2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo é feita a caracterização da fortaleza em estudo (Figura 2.1) ao nível da sua localização, história e geografia e são descritas as intervenções realizadas ao longo dos tempos. É também retratado o estado de conservação atual da fortaleza, e quais anomalias que apresenta.

A Fortaleza de Juromenha é classificada como IIP - Imóvel de Interesse Público, pelo Decreto n.º 41 191, DG, I Série, n.º 162, de 18-07-1957. A designação de "Fortaleza de Juromenha" inclui a fortificação moderna seiscentista, a Fortaleza Principal medieval, o Hornaveque de São Lázaro e o Hornaveque de Stº António.



Figura 2.1 – Fortaleza de Juromenha, 2022, [Fonte - Autor]

### 2.2. Localização

A Fortaleza de Juromenha, confinante ao rio Guadiana, encontra-se localizada na zona raiana do Alentejo central (Coordenadas GPS: N 38 44.285' W 007 14.368'), União de Freguesias de Alandroal, São Brás dos Matos e Juromenha, Município de Alandroal, distrito de Évora, NUT III Alentejo Central (Figura 2.2). Dista em linha reta, cerca de 13,4 km de Olivença, 17,2 km de Elvas, 28 km de Badajoz, e 14,7 km da sede de concelho, a Vila do Alandroal.

Erigida num planalto a cerca de 200m de altitude, envolvida a sul pelo Guadiana e defendida a nascente/norte pela ribeira de Mures, esta fortificação, ponto geoestratégico militar, tira partido da sua localização, com grande amplitude visual sobre o Guadiana e de onde é possível avistar outras praças, como Olivença, a partir das zonas baixas do Arroyo de la Charca ou Regato de Vila Real.



Figura 2.2 – Imagem aérea Fortaleza de Juromenha [Fonte – Google Earth, 2022]

### 2.3. Enquadramento histórico

A ocupação deste território é contínua desde a pré-história, constatando-se, na sua envolvente, a existência da Estação Paleolítica do Monte Branco, assim como diversas estruturas ligadas ao megalitismo alentejano, com provável origem no período paleolítico/neolítico. Sobre a formação de Juromenha, pouco se sabe, sendo geralmente reconhecido, que a sua origem, remonta aos Romanos (século I a.C.), tendo sido fundada por Júlio César, que de imediato a fortificou, erigindo uma muralha, que em harmonia com alguns autores, terá sido apelidada de *Julli Moenia*, ou Muralhas de Júlio.

De acordo com Brilhante (2005), não existe certeza quanto ao seu fundador e ao seu primeiro nome; há quem refira que foram os “gallos-celtas”, em 390 ou 400 anos a.C., ou Júlio Cesar que cercou o local de fortes muralhas, pelos anos 44 a.C., dando-lhe o nome de “*Julli Moenia*” ou “*Juris Moenia*”. Esta ideia acaba corroborada pela descoberta de inúmeros vestígios Romanos, entre eles uma *Ara Votiva*, em cantaria, no interior da fortificação, com apontamentos em latim dedicados a Endovélico, e outras lápides funerárias com inscrições em latim, verificando-se também, a reutilização de silharia de origem Romana.

Todavia, a muralha medieval, também ela expõe registos que apontam para a existências de elementos construtivos reutilizados da época visigótica, revelado pela introdução de peças de cantaria nos paramentos da fortificação, em particular nas suas torres. No entanto, as primeiras

menções à fortaleza medieval são escritas em árabe e datam da segunda metade do século IX, em que Makhûl ibn Umar, é senhor muladi de Juromenha. Mais tarde, em 930 d.C., o lugar fica submetido à influência do Califado de Córdoba, e posteriormente dos Califados Almorávida e Almóada, até à conquista definitiva pelo Reino de Portugal, em 1242. Mais tarde, em 1509, Duarte de Armas, incumbido pelo Rei D. Manuel I, realiza o primeiro levantamento do estado de conservação de todas as fortificações raianas, chegando assim, até aos nossos dias, as primeiras ilustrações da fortaleza (Figura 2.3).

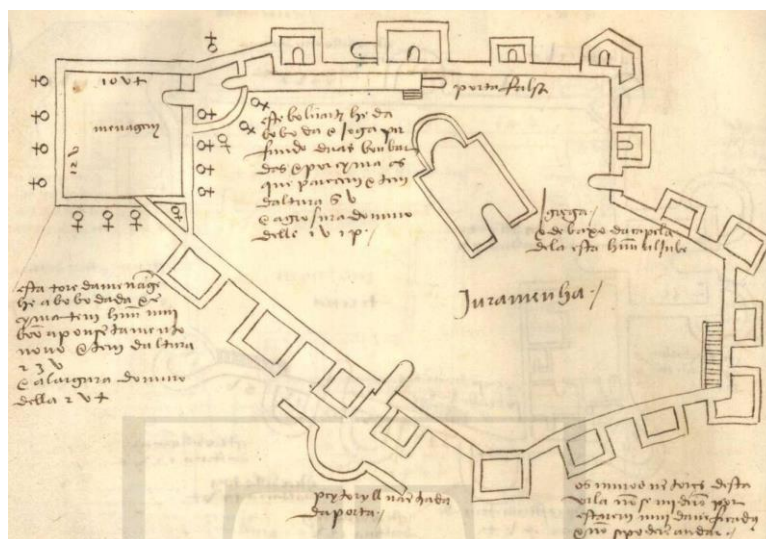


Figura 2.3 - Planta da Fortificação por Duarte de Armas - Fortaleza de Juromenha 1509 [Fonte – Arquivo Nacional – Torre do Tombo, 2022]

Nos desenhos de Duarte de Armas, foram registadas partes em ruína da vila e do Castel; note-se que até ao século XVII, a fortaleza de Juromenha aparenta ter sofrido poucas alterações, tendo sido objeto de adaptações aquando das guerras da restauração. Nos registos de 1509/1510, Duarte de Armas refere que partes da fortificação islâmica apresentam elevado estado de conservação, muito possivelmente por terem sido construídas com taipa militar e estruturas mistas, percebendo-se quais os elementos acrescentados pela reconquista cristã (Aguiar e Pacheco, 2019).

Relativamente às fortificações seiscentistas, em 1644 a 1658, procedeu-se a significativas obras de adaptação do antigo castelo medieval, a fortaleza abaluartada, aquando das guerras da restauração (SIPA, 2022). O projeto de alteração da fortaleza teve o objetivo de adaptar a mesma à nova realidade bélica, e ao contexto das guerras da restauração (1640-1668). Neste enquadramento, é desenvolvido o projeto da fortaleza moderna. A sua autoria ainda hoje é motivo de incertezas, sendo, contudo, atribuída ao flamengo Cosmader. De qualquer das

maneiras, o primeiro desenho conhecido da fortaleza moderna, evidente na Figura 2.4 é da autoria do francês Nicolau de Langres.



Figura 2.4 - Plano de Juromenha e de sua cidade e novas fortificações nos anos de 1644 e 1657, por Nicolau de Langres (2022)

Após a explosão do seu paiol (Torre de Menagem) em 1659, a fortificação voltou a ser fortemente abalada pelo terramoto de 1755, em especial a parte seiscentista da fortaleza, o que levou a uma campanha de melhoramentos no decorrer do século XVIII, nos quais se incluem a edificação do fortim do porto das barcas e de contraguardas. Também de acordo com Brilhante (2015), baseado em Espanca (1978) a praça foi objeto de grandes beneficiações, assim como as estacarias, contraguardas e obras mortas, tendo sido também erigido o fortim do porto das barcas, ainda hoje em ruínas.

Em 1920, a fortaleza foi definitivamente vetada ao abandono e à ruína, até meados do século XX (1950), altura em que a DGEMN (Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais) dá início a uma campanha de obras de reforço, conservação e restauro, que se prolongou praticamente até finais do século XX (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Fortaleza atualmente (séc. XXI) [Fonte – adaptado de Aguiar e Pacheco, 2019]

## 2.4. Intervenções

Para o conhecimento efetivo das intervenções realizadas é necessário conhecer as diversas fases construtivas da fortaleza, a sua transformação ao longo dos diversos períodos de ocupação, bem como a sua necessidade de adaptação às diversas realidades bélicas. Na Figura 2.6 apresenta-se um esquema das fases construtivas da Fortaleza de Juromenha.



Figura 2.6 - Fases Construtivas da Fortaleza de Juromenha [Fonte – adaptado de Bruno, 2006]

De acordo com Bruno (2006) foram realizadas diversas intervenções de conservação, em vários locais da fortaleza, na segunda metade do século XX, executadas pela DGEMN (Figura 2.7) sem as quais, seria impossível que o imóvel chegasse à actualidade nas actuais condições, tendo em consideração o seu avançado estado de degradação. Assim, apresenta-se de forma desenhada e resumida, uma planta da fortaleza (Figura 2.7) que congrega as diversas intervenções, à data, levadas a cabo pela referida Direcção Geral.

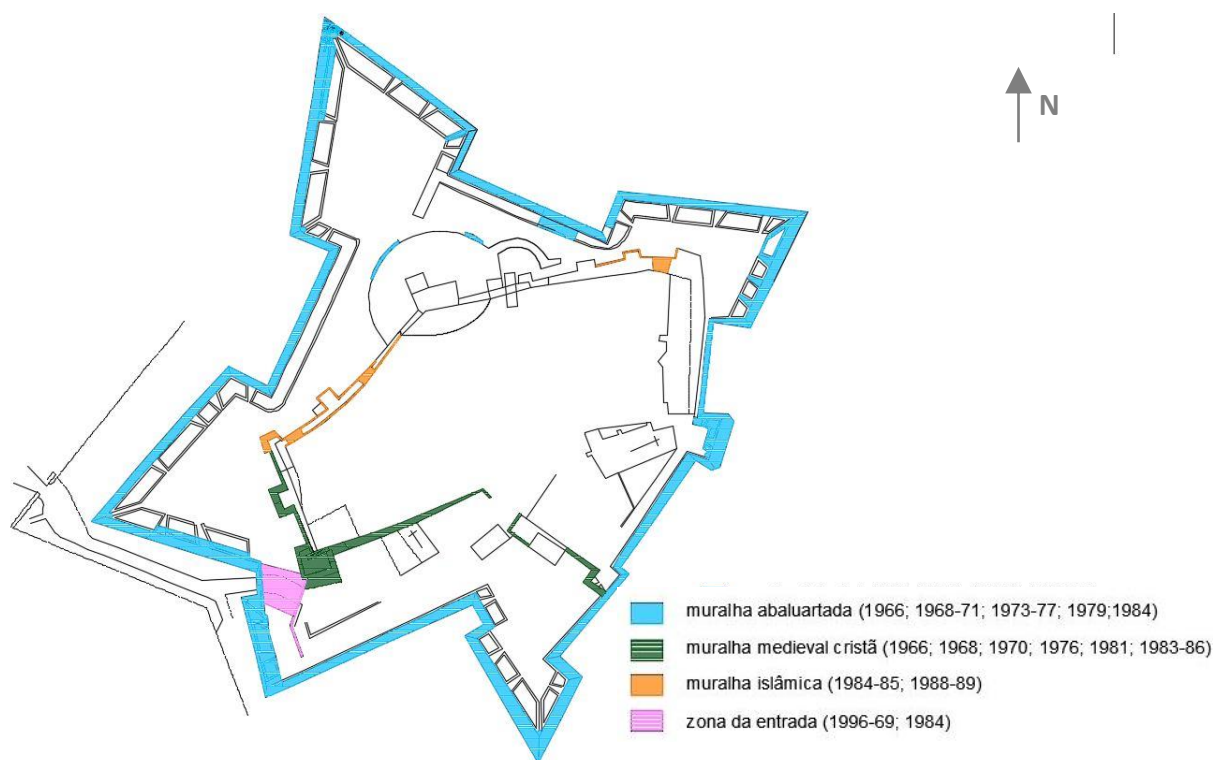


Figura 2.7 - Zonas de Intervenção DGEM [Fonte – adaptado de Bruno, 2006]

## 2.5. Anomalias/ Degradação das Argamassas

O destacamento do revestimento de argamassas é uma das principais anomalias verificadas, sendo a sua principal causa a penetração de água na interface entre o reboco e o suporte. Estes destacamentos são mais frequentes nas paredes mais expostas, podendo o fenómeno de destacamento ser potenciado pela aplicação de revestimentos pouco resistentes, frágeis e de baixa coesão (esquinas). Por outro lado, e apesar de resistentes, não se pretendem revestimentos excessivamente rígidos, dado que podem fissurar e destacar, por não acompanharem os movimentos do suporte. Assim, o destacamento dos revestimentos em argamassas deve-se à incompatibilidade entre as argamassas de reparação utilizadas e o suporte em causa (Ferreira Pinto *et al.*, 2014). Nas Figuras 2.8 a 2.10 apresentam-se as principais evidências de degradação dos revestimentos encontradas na fortaleza de Juromenha.



(a)



(b)

Figura 2.8 – (a) Destacamento de argamassas e perda de secção do suporte e (b) avançado estado de degradação do suporte e das argamassas de revestimento, [Fonte – Autor]



(a)



(b)

Figura 2.9 – Derrocadas parciais por falta de coesão das argamassas de junta e insuficiente drenagem de águas pluviais (a) de parte da muralha e (b) de um torreão, [Fonte – Autor]



(a)



(b)

Figura 2.10 – (a) Destacamento das argamassas de revestimento (fase construtiva da zona inferior) e fissuração das argamassas (fase construtiva da zona superior) e (b) perda de argamassa de revestimento e de junta [Fonte – Autor]



### **3. Argamassas**

#### **3.1. Considerações gerais**

Apresenta-se neste capítulo uma introdução às argamassas de cal aérea, começando por um curto enquadramento histórico, desde a origem da sua utilização até ao final da primeira metade do século XX, altura em que caiu em desuso devido à descoberta do cimento Portland. Procede-se depois a uma breve descrição dos materiais constituintes das argamassas, bem como das características físicas e mecânicas destes materiais. Procura-se também caracterizar de forma sumária as argamassas antigas de revestimento, com ênfase nas encontradas em estruturas militares, com base em informações recolhidas em estudos já realizados, e descrevem-se os seus principais mecanismos de degradação. Por último, são indicados os princípios básicos de intervenção no Património Construído e de formulação de argamassas de substituição.

#### **3.2. Enquadramento histórico**

A cal terá sido descoberta na idade da pedra, provavelmente no paleolítico; pensa-se que a sua utilização inicial terá sido na atual Turquia, por volta de 1200 a 5000 a.C. (Coelho *et al.*, 2009). Também os egípcios terão desenvolvido a técnica da utilização da cal, identificada nos dias de hoje, em juntas de pedra e em revestimentos de câmaras interiores nas pirâmides de Quéops e Quéfren (Coelho *et al.*, 2009).

Mais tarde, a civilização romana desenvolve as primeiras técnicas de utilização do que se pode identificar como pozolanas, incorporando na cal o pó de tijolo, conferindo resistência mecânica adicional. Contudo, com o fim do império, é retomada uma prática de utilização de argamassas de cal mais pobres. Só mais tarde (século VII a XII), os árabes voltam a adicionar novos elementos na formulação, como o gesso, com aplicação específica no interior dos edifícios de elevada riqueza estética (Tavares, 2009). A Tabela 3.1 apresenta um resumo da utilização da cal em argamassas ao longo do tempo.

Recentemente, têm sido desenvolvidos estudos sobre argamassas antigas, particularmente as aplicadas a partir do século XII, concluindo-se que as argamassas mais recentes apresentam menor quantidade de ligante relativamente às antigas, constatando-se também que Portugal segue esta mesma tendência, verificada em outras partes da Europa (Tavares, 2009). Na Tabela 3.2, é possível observar a evolução e regressão da qualidade das misturas das argamassas entre os séculos IX e XV.

Tabela 3.1 – Resumo histórico da utilização das argamassas de cal, [Fonte - adaptado de Tavares, 2009]

Época		Tipo de argamassa
Pré-história	Neolítico (6000 a.C.)	A cal utilizada como acabamento e pintura.
Antiguidade	Egípcio (3110 a.C. a 30 a.C.)	Maior utilização do gesso.
	Gregos (VII a.C. a II a.C.)	Argamassas de cal, utilização de terra de Santorini como pozolana.
	Romanos (III a.C. a V d.C.)	Argamassas de cal com pozolanas de excelente qualidade (betão romano); aperfeiçoamento e difusão da técnica.
Período medieval	Românico e Gótico (Séculos V e XIII)	Argamassas de cal, mas de baixa qualidade.
Período moderno	Renascimento e Barroco (Séculos V a XIII)	Argamassa de cal, uso demasiado no barramento, estuques e revestimentos decorativos como os fingidos. Início dos estudos sobre os ligantes hidráulicos.
Contemporâneo	Do Neoclássico (século XIX) ao presente	Argamassas de cal até meados do século XIX (em Portugal utilizou-se até meados do século XX); descoberta do cimento. Atualmente a argamassa de cal volta a ser utilizada nos edifícios antigos.

Tabela 3.2 – Classificação das argamassas medievais segundo Voillet-Le-Duc, [Fonte - Tavares, 2009]

Época (séculos)	Qualidade das Argamassas
IX, X, XI	Medíocre, devido à perda dos conhecimentos romanos. Contudo, foram encontrados nestas argamassas fragmentos de telha.
XII	Misturas mais homogêneas; a quantidade começa a melhorar. Porém, foi observada a mistura de carvão às argamassas e introdução de maior quantidade de areia.
XIII	Introdução de uma maior quantidade de areia e terra às argamassas de cal, devido às restrições económicas impostas na época.
XIV e XV	Novas melhorias nas argamassas, sobretudo na introdução de areia de qualidade.

Com a descoberta do cimento Portland no início do século XIX, a utilização de cal aérea na construção entrou em declínio, uma vez que o novo ligante endurecia mais rapidamente permitindo o encurtamento da duração da execução das construções. Adicionalmente, as argamassas produzidas com aquele ligante apresentavam desempenhos mecânicos muito superiores aos das argamassas de cal.

### 3.3. Argamassas de cal

As argamassas de cal constituem um elemento fundamental de proteção dos suportes estruturais (por exemplo, paredes de alvenaria de pedra; paredes de taipa militar), estando também presentes na sua constituição (por exemplo, juntas das paredes de alvenaria de pedra; incorporação na mistura ligante utilizada na taipa militar). Este material compósito (no geral, constituído por cal e areia) encontra-se particularmente exposto às ações de degradação pelos agentes atmosféricos, bem como a ações mecânicas, sendo por isso um elemento de sacrifício. Assim, as argamassas de cal utilizadas como revestimentos devem integrar em si mesmas preocupações de caráter estético, mas também funcional. Como tal, devem ser objeto de ações de conservação ou, quando tal não é possível, de substituição (Algarvio, 2010).

#### 3.3.1. Materiais constituintes

Uma argamassa é uma mistura, em proporções variáveis, de um ligante, neste caso cal, agregado fino (areia) e água. Para além destes materiais, pode contar adições e/ou adjuvantes. Nas subsecções seguintes, será feita uma breve introdução às propriedades dos principais materiais constitutivos das argamassas de cal aérea.

#### **Cal**

Em termos mineralógicos, a cal aérea é resultante da decomposição de rochas cálcicas ou dolomíticas, com uma percentagem mínima de  $\text{CaCO}_3$  ou  $\text{CaMgCO}_3$ , no caso de um ou outro tipo de rocha, de 95% (Margalha, 2011). Os componentes argilosos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) devem constituir, no máximo, 5% (Coelho *et al.*, 2009). A rocha é recolhida, britada e posteriormente calcinada a cerca de 700 °C. A Equação 3.1 mostra os produtos resultantes da calcinação da rocha calcária:

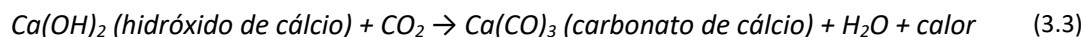


Posteriormente, ao óxido de cálcio (cal viva) é adicionada uma determinada quantidade de água, produzindo-se assim a cal hidratada, como descreve a Equação 3.2:



Na produção de uma argamassa de cal, ao hidróxido de cálcio junta-se a água (de amassadura) e o agregado. O endurecimento das argamassas de cal aérea dá-se posteriormente por carbonatação da cal hidratada, ou seja, através da transformação do hidróxido de cálcio em

carbonato de cálcio por reação com o dióxido de carbono naturalmente presente no ar. De um modo simplificado, essa reação pode exprimir-se pela Equação 3.3:



Ao processo descrito pelas Equações 3.1 a 3.3 dá-se o nome de ciclo da cal. Isto porque, o material que se obtém da reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono tem uma composição semelhante ao da rocha que lhe deu origem.

No entanto, o processo é, na verdade, mais complexo e requer que o dióxido de carbono esteja dissolvido em água para que a reação se desenvolva (Veiga, 2016). Assim, a carbonatação exige o contacto da argamassa com o CO<sub>2</sub> e requer alguma humidade para permitir a dissolução deste gás. Por outro lado, é necessário que os poros da argamassa não estejam saturados para existirem condições de difusão do CO<sub>2</sub> dissolvido na rede porosa. Desde modo, as condições adequadas de humidade relativa (HR) são intermédias, situando-se aproximadamente no intervalo 40 %HR – 80 %HR (Silva, 2010).

A carbonatação é uma reação lenta e longa, que pode demorar anos, e depende particularmente da permeabilidade do material, para a evaporação da água, que por sua vez dá acesso à penetração do dióxido de carbono, ao interior da argamassa, favorecendo o processo de endurecimento (Silva, 2010). Assim, no caso das argamassas de revestimento, a espessura da camada de argamassa é muito importante, uma vez que menores espessuras permitem um endurecimento mais rápido. Espessuras maiores, que não sejam executadas por camadas e com tempos de espera entre camadas para permitir o endurecimento, dificultam a penetração do dióxido de carbono no interior da argamassa, impedindo a carbonatação da argamassa junto do suporte.

### **Agregado**

Os agregados estruturam as argamassas e promovem a sua resistência, sendo os mesmos classificados de acordo com as suas dimensões, e podendo ter diversas origens (siliciosa, calcária, basáltica etc.). Os agregados têm grande influência no comportamento das argamassas pelo que a sua seleção, dimensão e limpeza, são fundamentais na qualidade final das mesmas (Silva, 2010).

### **Água de amassadura**

A água é um elemento preponderante na produção das argamassas de cal, já que este ligante necessita de água para garantir a sua capacidade de aglutinar os restantes elementos da argamassa no estado fresco. A razão água/ligante é de fundamental importância, pois interfere decisivamente nas características no estado fresco, especialmente na facilidade com que é aplicada a argamassa no suporte, e também nas suas características no estado endurecido (mecânicas e físicas). A água a utilizar nestes materiais deve estar isenta de impurezas, particularmente de sais (Algarvio, 2010).

### **Adições**

As adições são materiais finos, inorgânicos e em pó que são adicionados à argamassa fresca em quantidades geralmente superiores a 5% da massa de ligante, para melhorar as suas propriedades de forma permanente (no estado endurecido). Como exemplos de adições, tem-se as cinzas volantes ou a sílica de fumo, que são utilizadas para incrementar a resistência mecânica e reduzir a porosidade das argamassas (Silva, 2010; Margalha 2011).

### **Adjuvantes**

Os adjuvantes são substâncias orgânicas ou inorgânicas, sob a forma de pó ou de líquido, que são adicionadas em quantidades inferiores a 5%, em relação à massa de ligante durante o processo de amassadura (Silva, 2010). Estes têm como objetivo alterar as propriedades de um material, neste caso a argamassa, durante um determinado momento (estado fresco e/ou estado endurecido) e de forma temporária (por exemplo, um retardador de presa) ou permanente (por exemplo, um introdutor de ar).

#### **3.3.2. Características físicas**

O comportamento físico das argamassas de cal é altamente dependente da sua composição, em especial do tipo de cal, do tipo e características dos agregados, das proporções destes materiais na mistura (traço), e da relação água/ligante (Silva, 2010).

A estrutura porosa das argamassas (porosidade, dimensão dos poros e sua conectividade - permeabilidade) é de extrema importância pois influi nas suas propriedades mecânicas, mas também nas suas propriedades relacionadas com a durabilidade, associadas à presença de água. Entre as propriedades físicas comumente caracterizadas destacam-se a absorção de água por capilaridade, o teor em água, a permeabilidade ao vapor e a velocidade de secagem. Em argamassas de cal aérea, a estrutura porosa é essencialmente composta por poros capilares

interligados, de dimensões diversas (entre 0,5 e 100  $\mu\text{m}$ ), que resultam da evaporação da água de amassadura (Coelho *et al.*, 2009). Assim, quanto menor for a quantidade de água de amassadura utilizada menor será a porosidade do material, como verificado por Algarvio (2010) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 — Argamassas de cal produzidas com diferentes relações água/ligante e correspondente porosidade aberta, determinada por, [Fonte - Algarvio,2010]

Argamassa	Relação água/ ligante	Porosidade aberta [%]
CA1	1,68	27,5
CA2	1,65	27,2
CA3	1,60	26,9
CA4	1,53	26,4
CA5	1,48	25,6

Assim, com o aumento da porosidade, também a capacidade de absorção de água das argamassas aumenta, aumentando também a penetração de todos os materiais que na água estejam dissolvidos (exemplo, sais). Na Figura 3.1 é possível observar esta correlação, quase perfeita, obtida por Algarvio (2010) entre a porosidade aberta e a capacidade de absorção de água de argamassas de cal (com diferentes razões água ligante).

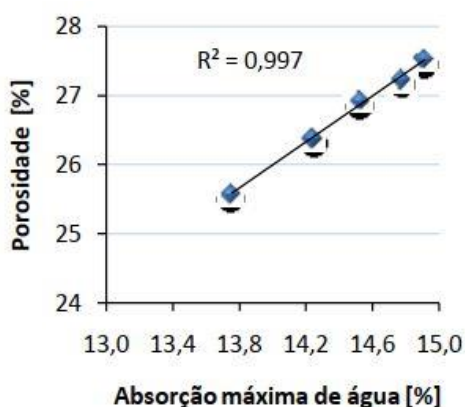


Figura 3.1 — Variação da porosidade aberta com o teor máximo de absorção de água (Algarvio 2010)

No que se refere às características de transporte de água por parte das argamassas de cal, é importante também olhar para a sua absorção de água por capilaridade. Neste contexto, um dos fatores preponderantes neste comportamento é o coeficiente de capilaridade, o qual traduz a velocidade inicial de absorção de água de uma dada argamassa. Um valor elevado de coeficiente capilar poderá ser indicativo de elevada porosidade (para uma dada distribuição de

diâmetros de poros capilares) ou de poros de elevado diâmetro (para um dado valor de porosidade). Nogueira *et al.* (2016) estudaram também a influência do traço e da dimensão dos agregados nos valores dos coeficientes de capilaridade de argamassas de cal. Estes autores concluíram que argamassas mais ricas em ligante (traço 1:1) e com utilização de agregados mais finos apresentam um coeficiente de capilaridade superior (em cerca de 60%) a argamassas com agregados mais grossos e um traço mais pobre em ligante (1:3).

### 3.3.3. Características mecânicas

As argamassas de cal são caracterizadas por um lento processo de endurecimento por carbonatação, associado por isso a uma reduzida resistência mecânica, sobretudo nas primeiras idades. O avanço do CO<sub>2</sub> até às camadas interiores da argamassa está muito dependente das características físicas da argamassa, conforme referido anteriormente. Coelho *et al.* (2009) concluíram que argamassas de cal mais porosas poderão possuir maiores resistências mecânicas por verem facilitada a difusão de CO<sub>2</sub>. No entanto, apesar da mais fácil difusão de CO<sub>2</sub> numa estrutura mais porosa, é também sabido que o aumento de porosidade conduz a uma maior existência de pontos críticos para a iniciação de fendas, que ao propagarem conduzem à rotura deste tipo de materiais. Assim, uma maior (e excessiva) porosidade irá conduzir a um decréscimo de resistência mecânica. Como referido anteriormente, um dos principais fatores que influencia a porosidade é a relação água/ligante utilizada na amassadura. Tendo esta relação em consideração, Algarvio (2010) estudou também a variação da resistência mecânica das suas argamassas em função da relação água ligante, Figura 3.2.

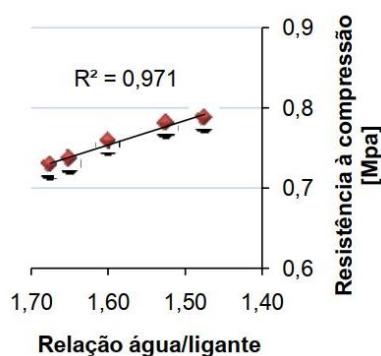


Figura 3.2 —Variação da resistência à compressão com a relação água/ligante de argamassas de cal, estudadas por Algarvio (2010)

Como se pode observar, à medida que a relação água/ligante aumenta a resistência mecânica das argamassas de cal diminui. Tendo em consideração os dois estudos anteriores é possível perceber que um ligeiro aumento de porosidade pode levar a um aumento da resistência

mecânica (por mais fácil difusão de CO<sub>2</sub>) mas uma porosidade muito elevada levará necessariamente a um decréscimo desta propriedade.

Outro aspeto de elevada relevância associado à resistência mecânica das argamassas de cal é a sua evolução com o tempo. Mendes (2017) avaliou a evolução com o tempo (28 dias, 90 dias e 180 dias) da resistência à compressão de argamassas de cal em dois ambientes de cura distintos, laboratório (0,05% de CO<sub>2</sub> e humidade não controlada, mas na ordem dos 50%) e câmara saturada (0,05% de CO<sub>2</sub> e humidade relativa de 95%). As argamassas estudadas têm como ligantes, cal aérea (ACL/PP), cal aérea e cal hidráulica (ACL/HL) e cal (aérea) em pasta (ASPL e ASPL/PP). Como se pode observar pela Tabela 3.4 as argamassas curadas em ambiente laboratorial atingiram resistências superiores às curadas em câmara saturada. No primeiro ambiente de cura o CO<sub>2</sub> teve maior facilidade em difundir através dos poros do que no segundo, no qual os poros se encontravam preenchidos (saturados) com água. Por outro lado, é possível verificar em ambos os casos a evolução (aumento) da resistência com o aumento do tempo.

Tabela 3.4 - Resistência à compressão de acordo com as idades das argamassas, [Fonte - Adaptado de Mendes 2017]

Argamassas	Laboratório			Câmara		
	28 dias [MPa]	90 dias [MPa]	180 dias [MPa]	28 dias [MPa]	90 dias [MPa]	180 dias [MPa]
ASPL	0,61	0,90	0,85	0,15	0,83	0,48
ACL/HL	0,49	0,77	0,78	0,37	0,44	0,56
ACL/PP	0,41	0,83	0,76	0,30	0,38	0,69
ASPL/PP	0,27	1,17	1,15	0,12	1,28	1,15

Relativamente aos constituintes das argamassas de cal, um outro fator de elevada importância na sua resistência mecânica é a escolha dos agregados, que só por si pode alterar dramaticamente o seu comportamento. Neste contexto, Santos *et al.* (2016), estudaram o papel dos agregados naturais nas propriedades das argamassas de cal para rebocos de paredes, tendo investigado os seguintes: areia siliciosa (rolada), areia siliciosa britada, areia calcária, areia granítica e areia basáltica. Os autores sujeitaram também as amostras a ciclos de envelhecimento (não abordado aqui). Assim, a Tabela 3.5 apresenta a influência dos diversos agregados estudados por estes autores nas resistências à tração por flexão (R<sub>t</sub>) e à compressão (R<sub>c</sub>) antes dos ciclos de envelhecimento. Como se pode observar, a areia calcária foi a que conduziu a resistências mais elevadas, sobretudo à compressão. Verifica-se também que a maior

irregularidade da areia siliciosa britada contribuiu para uma maior resistência mecânica por comparação com a sua contraparte rolada.

Tabela 3.5 - Resistência à compressão de acordo com as idades das argamassas [Fonte - adaptado de Santos *et al.*, 2016]

Composição [traço 1:3]	Rt [MPa]	Rc [MPa]
Cal aérea + areia siliciosa	0,50	1,10
Cal aérea + areia siliciosa britada	0,70	1,60
Cal aérea + areia calcária	0,70	2,30
Cal aérea + areia basáltica	0,70	1,60
Cal aérea + areia granítica	0,70	1,30

Por fim, faz-se também uma alusão à influência da quantidade de ligante nas propriedades mecânicas das argamassas de cal. Na Tabela 3.6 apresenta-se um resumo de algumas propriedades mecânicas de diversas argamassas de cal, aos 90 dias de idade, com diferentes teores em ligante apresentadas por Veiga (2016): os traços estudados variam entre o 1:4 e o 1:1. Como se pode observar, no geral, à medida que o teor em ligante aumenta, as resistências à flexão e à compressão e o módulo de elasticidade tendem a aumentar. A influência do teor em ligante parece ser maior na resistência à compressão do que na resistência à flexão.

Tabela 3.6 - Influência do traço nas principais propriedades de argamassas de cal aérea aos 90 dias de idade [Fonte - adaptado de Veiga, 2016]

Traço cal: areia (volumétrico)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1:4	0,2 a 0,5	0,3 a 0,6	-
1:3	0,2 a 0,8	0,6 a 0,6	2330 a 4440
1:2	0,3 a 0,6	0,6 a 1,5	2090 a 4710
1:1	0,5	1,2	2860

### 3.4. Argamassas antigas

#### 3.4.1. Composição das argamassas antigas

Estudos de caracterização de argamassas antigas (Magalhães e Veiga, 2006; Santos Silva *et al.*, 2015) têm revelado que o ligante utilizado era principalmente a cal aérea (calcítica ou dolomítica) e que os seus agregados eram maioritariamente de natureza siliciosa. No entanto, em certos casos, foram encontrados agregados de origem diferente, como os de proveniência

calcária e basáltica. Veiga (2016) refere a existência de uma correlação forte entre os materiais utilizados na produção das argamassas antigas e os existentes em cada região. A forma dos agregados e a granulometria estão também particularmente associados à geologia local, e eram controladas com processos simples de peneiração ou obtida através de misturas de vários materiais. Por exemplo, Matos (2021) refere a introdução de elementos cerâmicos grosseiramente moídos para complementar a granulometria de finos.

Além dos fatores mencionados anteriormente, a composição das argamassas era também fortemente condicionada pelas características do suporte, espessura das camadas, pelos materiais que a compõem (como referido) e pelo clima local. Assim, a quantidade de água adicionada à mistura era um fator importante na qualidade final da mesma, já que dela depende a facilidade de aplicação no suporte.

Outro fator que influía na composição das argamassas, era o tipo de edifício onde esta era aplicada, tendo sido notada uma composição mais cuidada, com maior proporção de ligante, das argamassas presentes em edifícios nobres (militares, religiosos ou para famílias da nobreza) do que em edifícios correntes. Neste contexto, a Tabela 3.7 apresenta a composição de amostras de argamassa retiradas de edifícios militares, datados entre os séculos I e XIX, com diferentes graus de degradação dos revestimentos, obtida por diversos autores. A maioria destas argamassas mostrou ser composta por cal aérea e areia siliciosa, com traços ligante/agregado em massa variando entre 1:3 e 1:6 (Damas *et al.*, 2016).

Tabela 3.7 – Composição de diferentes argamassas antigas, [adaptado de Damas *et al.*, 2016]

Referência	Tipo de edifício	Composição	Traço
Magalhães <i>et al.</i> , 2006	Militar	Cal aérea e areia siliciosa	1:4; 1:5; 1:6
		Cal aérea e areia siliciosa	1:6
		Cal aérea e agregado silicioso	1:3
		Cal aérea e agregado silicioso	1:5
		Cal aérea e areia siliciosa	1:3
Magalhães <i>et al.</i> , 2011	Militar	Cal aérea e areia siliciosa	n.d.
		Cal aérea e areia	n.d.
	Religioso	Cal aérea e areia	1:3.5

n.d. – não determinado

Damas *et al.* (2016) constataram que as argamassas pertencentes a edifícios do tipo militar apresentavam uma maior resistência e durabilidade, sendo as suas composições, no geral, mais ricas em ligante e constituídas essencialmente por cal aérea cálcica e agregado silicioso e

calcário, por vezes com grãos basálticos e conchas. A preocupação com a introdução de grãos basálticos nas argamassas de edifícios do tipo militar revela conhecimento e técnica uma vez que estes desencadeiam reações pozolânicas que, embora muito lentas, são responsáveis por conferir propriedades mecânicas melhoradas às argamassas.

As mesmas autoras (Damas *et al.*, 2016), na sua análise a argamassas de edifícios militares que se encontram junto à costa (Cascais e Oeiras), concluiu que estas possuem como único ligante a cal aérea cálcica e apresentam compostos hidráulicos resultantes de reações do ligante com agregados siliciosos alterados e basálticos. Tal teve como consequência a obtenção de argamassas muito compactas e resistentes. As argamassas recolhidas de edifícios religiosos apresentam composições com dosagens de ligante inferiores às anteriores e apresentam também uma maior variedade de ligantes e agregados.

#### 3.4.2. Características das argamassas antigas

As argamassas de revestimento antigas funcionavam, à imagem das atuais, como uma camada de sacrifício evitando a degradação precoce do suporte. Contudo, sempre que possível, e dependendo do contexto do edifício, assumiam também uma componente estética. As paredes das construções antigas apresentam espessuras geralmente bastante superiores às das paredes atuais, existindo por isso a necessidade primordial de serem elementos mais porosos, que permitam a absorção e evaporação de água. Neste contexto, os rebocos antigos tinham também como função essencial, por um lado, evitar que as paredes absorvessem demasiada água (com as consequências que tal acarretava), mas também permitir que estas perdessem facilmente a água absorvida.

Para alcançar uma capacidade razoável de impermeabilização e proteção dos suportes, os revestimentos antigos eram constituídos por várias camadas, sobrepostas entre elas. Appleton (2003) refere que estes rebocos antigos eram na sua maioria constituídos por três camadas, à imagem do que atualmente se recomenda para argamassas de substituição. As referidas camadas, de reduzida espessura, para além de permitirem a carbonatação de toda a espessura da argamassa, promoviam a redução da fissuração e retração, garantindo melhor proteção à penetração de água.

No que se refere às características físicas e mecânicas das argamassas antigas, existem algumas dificuldades na sua avaliação já que, muitas vezes, é impossível extrair amostras de revestimentos antigos de dimensão suficiente para a realização de ensaios. Por outro lado, quando essa extração é possível, a utilização direta de métodos normalizados é frequentemente

impraticável, devido à sua reduzida coesão e forma irregular. Neste contexto, Magalhães *et al.* (2006) no seu estudo sobre a resistência de argamassas históricas, propuseram um método de ensaio para avaliar a resistência à compressão, por forma a conseguir comparar resultados obtidos em amostras recolhidas com os resultados de argamassas produzidas em laboratório, com composições semelhantes. Os resultados, apresentados na Figura 3.3, permitem verificar que as argamassas antigas apresentam resistências médias à compressão muito próximas das argamassas preparadas em laboratório.

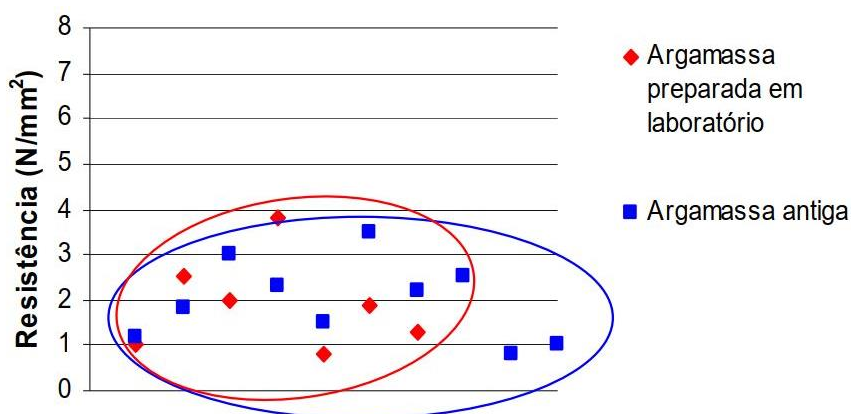


Figura 3.3 – Comparação da resistência à compressão de argamassas antigas com a de produzidas em laboratório com um só tipo de agregado (Magalhães *et al.*, 2006).

As argamassas antigas podem apresentar resistências à compressão muito variadas (devido à variabilidade de composições, pureza dos materiais, estado de conservação, utilização de aditivos), e mais elevadas do que as referidas por Sá (2005, citado por Coelho *et al.* 2009). Na Tabela 3.8 apresentam-se gamas de variação para as resistências à compressão de argamassas antigas.

Tabela 3.8 – Resistência à compressão de argamassas antigas, [Fonte - adaptado de Magalhães *et al.*, 2006 e Veiga, 2012 e Damas *et al.*, 2016]

Referências	Resistência à compressão [MPa]
Magalhães <i>et al.</i> , 2006	0,8 a 7,1
Veiga, 2012	1,2 a 7,1
Damas <i>et al.</i> , 2016	0,5 a 13,4

### 3.4.3. Principais anomalias e mecanismos de degradação de argamassas

Por estarem expostos e constituírem uma camada sacrificial que protege a alvenaria contra as ações agressivas de natureza física, mecânica, química ou biológica, os revestimentos estão especialmente sujeitos a degradação, requerendo, por isso, frequentes intervenções de conservação. Isto justifica o interesse do conhecimento das anomalias mais correntes nas argamassas de revestimento.

De acordo com Magalhães (2002), o desconhecimento das principais anomalias, das suas formas de manifestação e das suas possíveis causas, tem levado, por vezes, a diagnósticos incorretos e, por isso, à adoção de medidas inadequadas de intervenção e reparação. Nesse sentido, a investigadora resumiu as principais anomalias encontradas em rebocos e as suas causas mais frequentes, os quais são apresentados na Tabela 3.9.

A água é um dos principais fatores de degradação de argamassas de revestimento, já que está associada a fenómenos de degradação tais como, o transporte de sais solúveis, a humidade e a ação dos ciclos gelo/degelo. A ação de outros fatores estruturais e não estruturais é de menor evidência, apesar de também ter um impacto significativo nas argamassas antigas (Sousa, 2005).

Tabela 3.9 – Anomalias predominantes em rebocos antigos, [Fonte - adaptado de Magalhães, 2002]

<b>Tipo</b>	<b>Causas mais prováveis</b>
<b>Humidade</b> 1. De obra ou construção 2. De terreno 3. De precipitação 4. De condensação 5. Devida a fenómenos de higroscopicidade 6. Devida a causas fortuitas	1. Aplicação do reboco antes da secagem adequada do suporte; 2. Existência de zonas de paredes em contacto com a água do solo; existência de materiais de elevada capilaridade nas paredes; inexistência ou deficiente posicionamento de barreiras estanques nas paredes; 3. Revestimentos com elevada permeabilidade à água; 4. Condensação do vapor de água; 5. Existência de sais higroscópicos no interior dos revestimentos que fixam água em grandes quantidades, constituindo uma espécie de depósito de água; 6. Roturas de canalizações; entupimento de caleiras, algerozes e tubos de queda; deficiências de remates da cobertura, etc.
<b>Biodeterioração (algas, musgos, líquenes, fungos, plantas diversas e animais de porte)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Falta de ventilação;</li><li>• Iluminação;</li><li>• Acumulação de pó, terra e sujidade na superfície do revestimento;</li><li>• Acumulação de poluentes resultantes da atividade industrial (óxido de nitrogénio, óxido de enxofre, etc.);</li><li>• Porosidade elevada do revestimento.</li></ul>

Tabela 3.9 – Anomalias predominantes em rebocos antigos (adaptado de Magalhães, 2002) (cont.)

<b>Eflorescências e Criptoflorescências</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sais solúveis presentes no reboco, no suporte ou na água infiltrada;</li> </ul>
<b>Fendilhação e Fissuração</b>	<p>Causas atribuíveis à constituição do reboco:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retração do reboco;</li> <li>• Dilatações e contrações higrotérmicas;</li> <li>• Gelo/degelo;</li> <li>• Deficiente formulação das argamassas;</li> <li>• Espessura inadequada do revestimento;</li> </ul> <p>Causas atribuíveis ao suporte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deslocamentos do suporte;</li> <li>• Presença de sais solúveis no suporte;</li> <li>• Absorção excessiva do suporte;</li> </ul> <p>Outras causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração de tensões junto a aberturas;</li> <li>• Corrosão de elementos metálicos: ligadores, canos.</li> </ul>
<b>Perda de Aderência (descolamento, abaulamento, destacamento)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de sais;</li> <li>• Dilatações e contrações térmicas;</li> <li>• Movimentos do suporte;</li> <li>• Erros de execução do revestimento: excesso de água na amassadura, falta de humedecimento conveniente do suporte, composição pouco adequada da argamassa;</li> <li>• Revestimentos com reduzida permeabilidade;</li> </ul>
<b>Perda de Coesão ou Desagregação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de sais solúveis;</li> <li>• Reboco fraco, sem dureza superficial;</li> <li>• Ação de microrganismos e organismos;</li> <li>• Reação química entre os materiais que constituem os revestimentos e os compostos naturais ou artificiais (poluição) contidos na atmosfera.</li> </ul>
<b>Erosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esforços mecânicos de natureza diversa (atritos, golpes, etc.);</li> <li>• Ações físicas dos agentes atmosféricos (vento, chuva, variação de temperatura);</li> <li>• Perda de coesão.</li> </ul>

### 3.5. Argamassas de substituição

#### 3.5.1. Princípios de intervenção

As intervenções em revestimentos antigos devem ter por base o conhecimento dos mesmos, assim como as suas principais causas de degradação, recorrendo a bibliografia e ensaios de caracterização específicos. Os revestimentos, elementos de sacrifício sujeitos a degradação acentuada, formalizam também o aspeto estético da maior parte dos edifícios, pelo que o desconhecimento da sua constituição (materiais), e técnicas de aplicação, podem dar origem a intervenções pouco cuidadas e de curta durabilidade (Silva, 2010).

Assim, a primeira opção a considerar deve ser sempre a conservação das argamassas antigas, a sua manutenção e reparação, e só em último caso se deve recorrer à sua substituição (Silva, 2010). Isto porque a mais-valia do edificado antigo reside na forma da sua arquitetura. Como tal, é fundamental garantir a sua durabilidade, através de reparações pontuais de conservação, que evitam o escalar da degradação, reduzindo a necessidade e os custos de intervenções futuras, mesmo que com recurso a mão de obra e técnicas mais especializadas. Nestas intervenções, é fundamental promover a compatibilidade dos materiais novos com os materiais e sistemas construtivos (suportes) antigos, não devendo estes contribuir para a sua degradação ou destituir o edifício do seu aspeto estético.

### 3.5.2. Requisitos para a formulação de argamassas de substituição

No caso concreto de argamassas de revestimento, em que a proteção do suporte é uma das principais funções, o novo revestimento deverá, assim, proteger o suporte da ação da água, da ação direta dos agentes climáticos, de ações mecânicas de choque e erosão, da ação química da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo (Veiga, 2003). A sua função estética também não deve ser descurada: o novo revestimento não deverá alterar o aspeto estético do edifício, de modo a manter a autenticidade histórica da construção.

A durabilidade é outro requisito de extrema importância. Embora, no limite, o reboco possa ser encarado como camada sacrificial, deverá manter as características que garantam a proteção do suporte, bem como a manutenção do seu aspeto estético, durante um longo período. A durabilidade implica ainda um bom comportamento em presença de água. As construções do passado são geralmente constituídas maioritariamente por materiais porosos, que permitem que a água penetre nos seus componentes. No entanto, as características dos revestimentos antigos permitem que esta água seja rapidamente libertada por evaporação, pelo que é essencial que o novo revestimento respeite este comportamento (Veiga, 2003).

Para satisfazer os requisitos atrás mencionados, uma argamassa de substituição para revestimento de paredes antigas deverá apresentar as seguintes características, de acordo com Veiga e Carvalho (2002):

- Características mecânicas (resistência à tração por flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade) semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte;
- Reduzida tendência para fissurar por retração;

- Boa aderência ao suporte;
- Capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhantes às das argamassas originais e superiores às do suporte;
- Estrutura porosa (porosidade, dimensão dos poros) semelhante à das argamassas originais e com maior percentagem de poros grandes que o suporte;
- Coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas originais e às do suporte;
- Baixo teor de sais solúveis;
- Resistência às ações climáticas e resistência à cristalização de sais solúveis (normalmente presentes em teor elevado em paredes antigas) média a elevada.

Para além destes requisitos, a reversibilidade da nova solução é outro aspeto a ter em consideração. Isto significa que o novo revestimento deverá ser facilmente removível (sem danificar o suporte), caso se verifique que este não era o mais adequado, ou reparável, caso haja necessidade de o reparar para retomar o seu desempenho original (Silva, 2010).

Como referido anteriormente, as intervenções sobre argamassas de revestimento de edifícios antigos devem respeitar os princípios da autenticidade material e histórica. Assim, a formulação das argamassas de substituição deve ter em atenção a composição das argamassas antigas (originais) e as suas características e funções, de forma a garantir, tanto quanto possível, a compatibilidade (sob os pontos de vista estético, mecânico, físico e químico) das argamassas de substituição com os materiais originais e com o suporte (Veiga *et al.*, 2004). Se existir possibilidade, sem que tal comprometa a compatibilidade e durabilidade, as argamassas de substituição podem até ser melhoradas, através da utilização, por exemplo, de adjuvantes ou adições.

## **4. Programa experimental**

### **4.1. Considerações gerais**

O presente capítulo apresenta todos os procedimentos experimentais que foram efetuados ao longo do trabalho desenvolvido. Em particular, este detalha os procedimentos (i) de recolha e catalogação das amostras antigas, (ii) de caracterização destas amostras e (iii) de produção das argamassas de substituição.

Todo o trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, com exceção da determinação do resíduo insolúvel que foi efetuada no Laboratório de Engenharia Química da mesma escola e da caracterização colorimétrica que foi efetuada no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

### **4.2. Metodologia experimental**

A metodologia experimental adotada para caracterizar as amostras antigas de argamassa recolhidas da Fortaleza de Juromenha bem como as argamassas de substituição produzidas em laboratório foi definida de forma a ser o mais semelhante possível de forma a possibilitar a comparação das suas propriedades.

Na Figura 4.1 é apresentado um esquema da metodologia utilizada para caracterizar as amostras antigas de argamassa. Após recolha, e já em laboratório, as amostras foram limpas com escovas macias e água, de forma a retirar partículas soltas e vestígios de colonização biológica (musgo, líquenes), ou fragmentos desagregados. As amostras foram pesadas e fotografadas antes e após este procedimento de limpeza, sendo posteriormente todas identificadas. Estas foram depois selecionadas para caracterização física, colorimétrica e da composição.

De notar que a caracterização não destrutiva foi efetuada primeiro, nomeadamente a caracterização colorimétrica seguida da caracterização física (determinação da absorção de água por capilaridade, porosidade aberta, massa volúmica real e aparente e teor em água às 48 horas). Apenas após obtenção dos resultados e confirmação dos mesmos se procedeu à caracterização destrutiva das amostras, isto é, à determinação do resíduo insolúvel por dissolução ácida e à análise granulométrica deste resíduo.

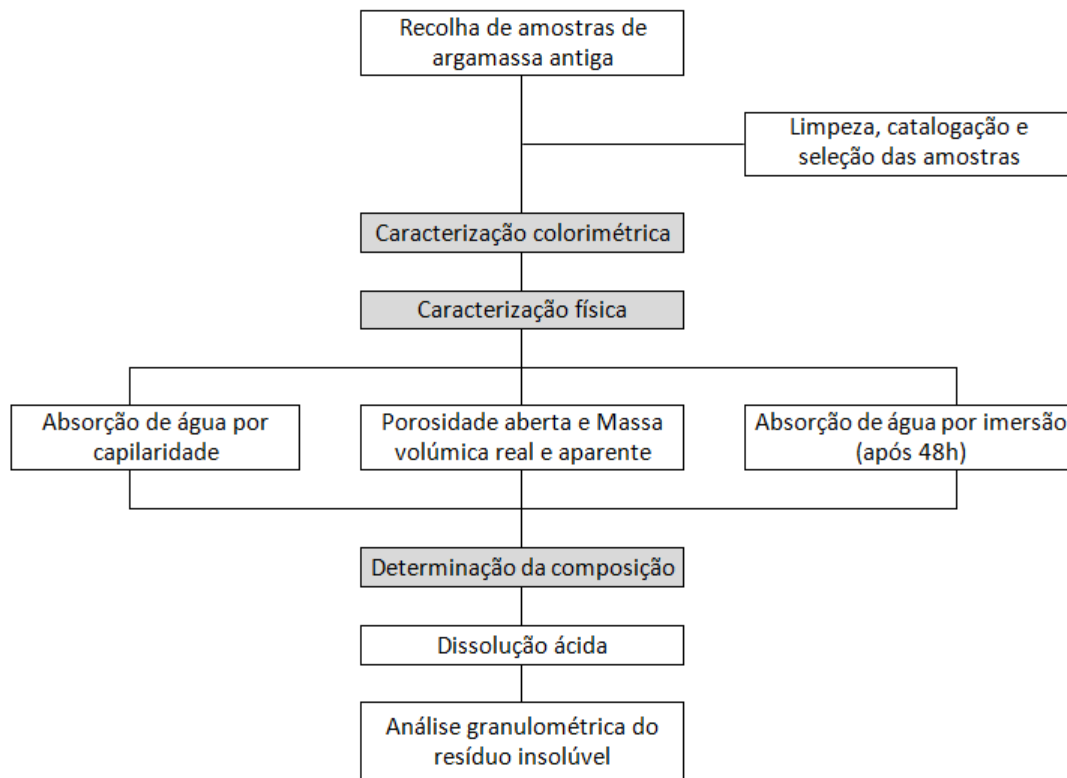


Figura 4.1 – Metodologia experimental seguida para a caracterização das amostras de argamassa antiga  
[Fonte – Autor]

No caso das argamassas produzidas em laboratório, a metodologia experimental adotada foi a constante na Figura 4.2. Para tal, foram produzidos seis provetes de argamassa de cada tipo para caracterização física (determinação da absorção de água por capilaridade, porosidade aberta, massa volúmica real e aparente e teor em água às 48 horas), mecânica (resistência à tração e à compressão) e colorimétrica. Esta parte do programa experimental foi iniciada apenas após conclusão da caracterização das amostras antigas de argamassa.

Também neste caso, a caracterização colorimétrica foi a primeira a ser feita, seguida da caracterização mecânica e da caracterização física. Esta última foi em parte feita recorrendo a meios-provetes decorrentes do ensaio de resistência à flexão, nomeadamente para a determinação da porosidade, massa volúmica e teor em água às 48 horas. Apenas o ensaio de absorção de água por capilaridade foi efetuado utilizando provetes completos.

Como foram realizados ensaios de caracterização em comum para as amostras antigas de argamassa e para as argamassas de substituição, a sua descrição é apresentada de forma geral nos subcapítulos 4.5 a 4.7, sendo apenas feita a discriminação caso haja diferenças no procedimento.

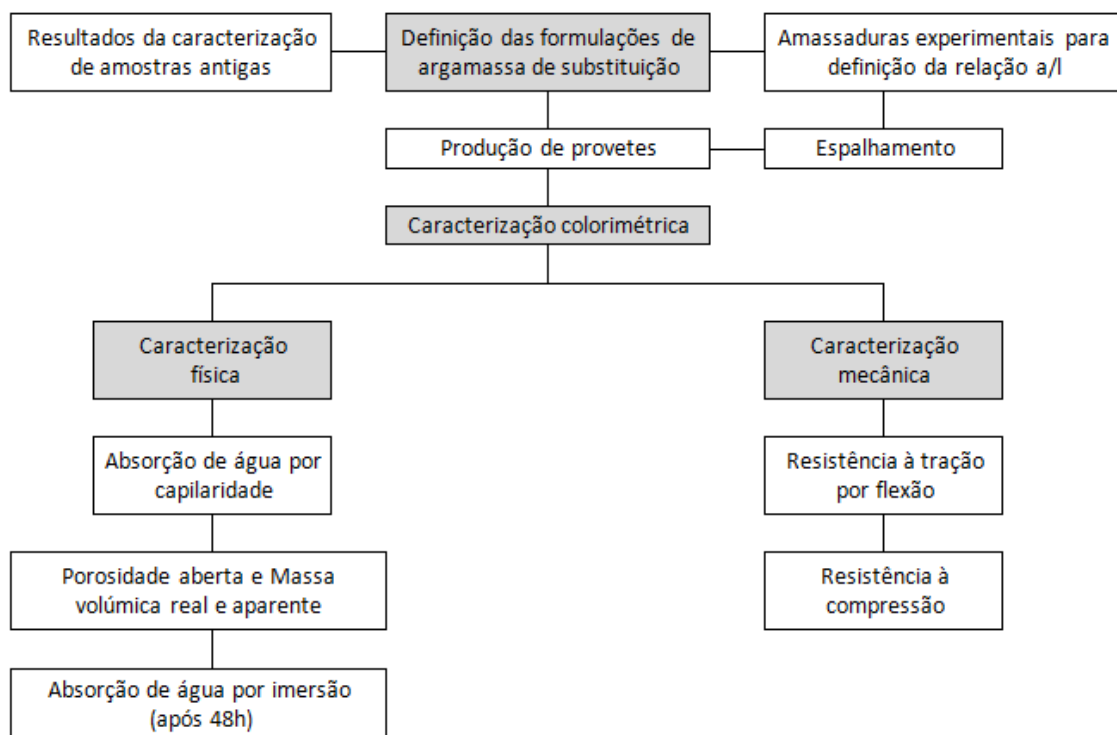


Figura 4.2 – Metodologia experimental seguida para a caracterização das argamassas de substituição [Fonte – Autor]

### 4.3. Recolha e amostragem das argamassas antigas

Todas as amostras analisadas foram recolhidas da Fortaleza de Juromenha no dia 27 de Janeiro de 2022, com o acompanhamento dos técnicos responsáveis pela obra em curso. Procurou-se retirar amostras de locais distintos e de diferentes épocas de construção, de forma a obter argamassas representativas da totalidade da estrutura militar. A Tabela 4.1 apresenta a identificação das amostras recolhidas e a Figura 4.3 a sua localização dentro da Fortaleza de Juromenha.

Tabela 4.1 – Nomenclatura das amostras antigas de argamassa

Referências	Descrição
J/I	Juromenha (J) Islâmica (I)- Argamassa de revestimento da taipa da muralha medieval Islâmica
J/C	Juromenha (J) Cristã (C) - Argamassa de revestimento da taipa da muralha medieval Cristã
ARAB	Argamassa de revestimento de pedra do baluarte seiscentista
ARP	Argamassa sobre revestimento de pedra
EJMS	Argamassa de revestimento entrada da muralha seiscentista
RTS	Revestimento de taipa da muralha seiscentista

Como muitas das amostras eram constituídas por diversos fragmentos, à nomenclatura indicada na Tabela 4.1 acresce ainda o número da zona (dentro de uma mesma época construtiva) e do

fragmento (exemplo, J/C/1.1). Uma caracterização mais detalhada de cada amostra pode ser encontrada no Anexo I.



Figura 4.3 – Planta da fortaleza de Juromenha, com identificação dos locais de onde foram retiradas as amostras, [Fonte – Autor, Adaptado de Bruno (2006)]

As amostras em causa, foram obtidas, em grande parte, a partir do desmonte de revestimentos existentes na fortaleza, realizados no decorrer da empreitada de conservação da fortificação em curso à data da elaboração deste trabalho. A amostra J/C/1 (Figura 4.4) é parte do revestimento retirado, em fase de obra, da passagem entre a muralha mediável e o baluarte seiscentista. Este espaço reporta à época medieval cristã, podendo efetivamente tratar-se de argamassas mais recentes, fruto de intervenções de conservação. As amostras J/I/1, J/I/2 e J/I/3 (Figuras 4.5 a 4.7) foram retiradas do suporte de taipa islâmica, provavelmente de revestimento de construções adossadas à muralha medieval, na primeira metade do Século XIX, não sendo conclusivo que as mesmas tenham exclusivamente como ligante a cal, podendo conter uma pequena percentagem de ligante hidráulico. Assim, será necessário (em trabalhos futuros) recorrer a análises químicas para obter a respetiva composição.

Relativamente às amostras que se descrevem em seguida, algumas poderão ter tido origem em intervenções de conservação, realizadas pela DGEM entre 1966 e 1984. A amostra ARAB (Figura

4.8) foi extraída do suporte de pedra na zona do baluarte seiscentista. A amostra ARP (Figura 4.9), retirada do suporte de pedra de construção adossada ao interior da muralha medieval, poderá ter origem na primeira metade do Século XIX ou de posteriores intervenções, como referido. A amostra EJMS (Figura 4.10), retirada do suporte de pedra na zona da entrada do baluarte seiscentista, podendo estar na sua origem, ou eventualmente objeto de intervenções de conservação referidas. Por fim, a amostra RTS (Figura 4.11) foi retirada do suporte de taipa na zona do baluarte seiscentista.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Amostra J/C/1 (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.5 – Amostra J/I/1 (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.6 – Amostra J/1/2 (a) Localização; (b) Amostra

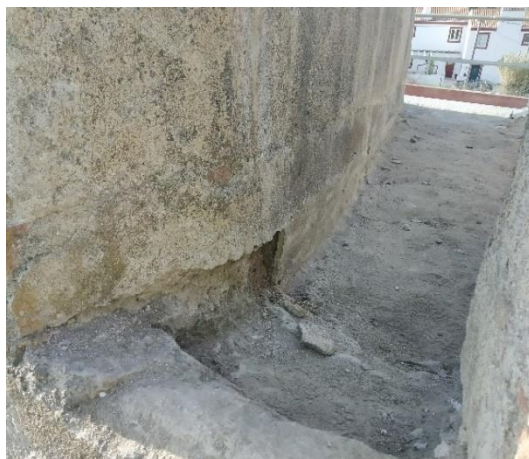


(a)



(b)

Figura 4.7 – Amostra J/1/3 (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.8 – Amostra ARAB (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.9 – Amostra ARP (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.10 – Amostra EJMS (a) Localização; (b) Amostra



(a)



(b)

Figura 4.11 – Amostra RTS (a) Localização; (b) Amostra

#### 4.4. Produção das argamassas de substituição

##### 4.4.1. Materiais utilizados

Na produção das argamassas de substituição procurou-se utilizar materiais (ligante e agregado) o mais semelhantes possível aos presentes nas argamassas originais, bem como utilizar relações constitutivas (traço) semelhantes. Por este motivo, as amostras antigas foram primeiramente caracterizadas quanto à sua composição e só depois foram definidas as formulações de argamassa de substituição.

##### Ligante

Como ligante, foi utilizada uma cal aérea hidratada do tipo CL80-S (de acordo com a NP EN 459-1:2015) da marca Calcidrata (Figura 4.12). A ficha técnica deste produto pode ser consultada no Anexo II.

##### Agregados

O agregado fino utilizado foi uma areia amarela (Pinhal Conde Cunha 4 – Seixal, da Soarvamil) com dimensão 0/4 mm (de acordo com a EN 12620:2002), devidamente lavada e calibrada. De acordo com a sua ficha técnica (Anexo III), é uma areia constituída por quartzo, feldspato e muscovite, ou seja, de origem siliciosa. A sua curva granulométrica encontra-se representada na Figura 4.13. Verificou-se que esta areia apresentava semelhanças em termos de granulometria, natureza e cor com a presente nas amostras antigas.



Figura 4.12 – Cal hidratada utilizada

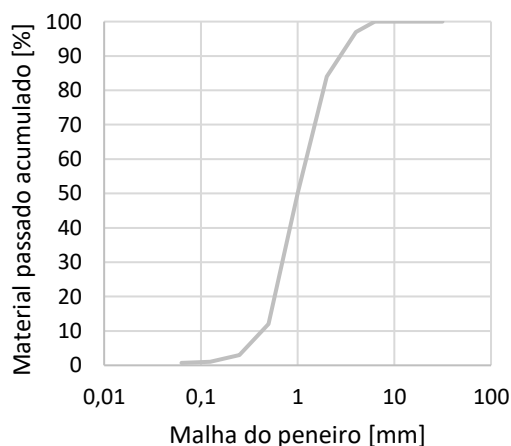


Figura 4.13 – Curva granulométrica da areia utilizada na produção das argamassas de substituição

Previamente à sua utilização na produção de argamassas, a areia foi seca em estufa a 100 °C até se obter massa constante.

### Água

A água utilizada foi a proveniente da rede pública, de acordo com o definido na EN 1008:2002.

#### 4.4.2. Produção de argamassa

A produção de argamassas foi efetuada com base na EN 196-1:2005 e na EN 1015-2:2007. Foram produzidas argamassas de dois tipos – com traços (ponderais) 1:2 e 1:4 – tendo estes sido definidos com base nas características das amostras de argamassa antigas. Como se pretendia fixar o espalhamento em  $155 \pm 5$  mm (EN 1015-3:1999), foram primeiramente efetuadas amassaduras experimentais com vista à definição da relação água/ligante apropriada.

O processo de produção das argamassas teve início com a pesagem de todos os materiais necessários à amassadura (cal, areia e água) numa balança digital com precisão de 0,1 g. Seguidamente, estes foram colocados na misturadora de argamassa (Figura 4.14 (a)) faseadamente. Após humedecer o recipiente metálico da misturadora, foi introduzida a água e em seguida a cal (Figura 4.14 (b) e (c)), dando-se início ao movimento lento da mesma, por um período de 30 segundos. Findo esse tempo, foi introduzida a areia, Figura 4.14 (d), reiniciando-se o movimento da misturadora por mais 30 segundos em movimento rápido, seguido de pausa de 90 segundos para raspagem do fundo do recipiente. Finalmente, colocou-se a misturadora em movimento rápido por mais 60 segundos, tendo-se obtido misturas homogéneas.

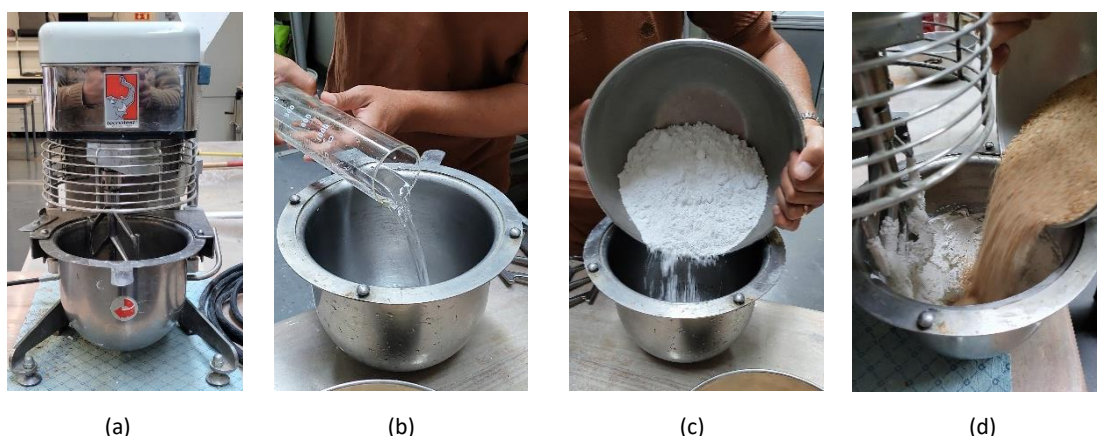


Figura 4.14 – Produção de argamassas: (a) misturadora utilizada; (b) adição da água; (c) adição do ligante; (d) adição da areia [Fonte – Autor]

#### 4.4.3. Consistência por espalhamento

A caracterização da consistência das argamassas foi avaliada logo após a produção da argamassa através do ensaio de espalhamento, cujo procedimento se baseou na EN 1015-3:1999. Segundo esta norma, o valor da consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez da argamassa e fornece uma indicação sobre a deformabilidade deste material quando submetido a um determinado tipo de tensão, no estado fresco.

Como referido anteriormente, para definição da relação água/ligante a utilizar nas argamassas para obtenção do espalhamento requerido ( $155 \pm 5$  mm), foram efetuadas amassaduras experimentais dos dois tipos de formulações estudadas. Nestas, foram utilizadas diferentes relações água/ligante e determinado o seu espalhamento. Esta propriedade foi também determinada nas amassaduras finais (para moldagem de provetes), como controlo.

Previamente ao ensaio, foram humedecidos a mesa de espalhamento e o molde tronco cónico com um pano húmido. Este último foi depois colocado no centro da mesa. Com o molde fixo, este foi preenchido em duas camadas com argamassa fresca. Cada camada foi compactada com 15 apiloamentos com um varão de aço, homogeneamente distribuídas na superfície de argamassa e de modo a atingir toda a espessura de cada camada. Em seguida, retirou-se cuidadosamente o molde na vertical (Figura 4.15 (a)) e aplicaram-se 15 pancadas a uma frequência constante, por rotação do volante da mesa, em cerca de 15 segundos. Com recurso a uma craveira, mediu-se o diâmetro do espalhamento da argamassa segundo os três diâmetros inscritos no prato da mesa (Figura 4.15 (b)).

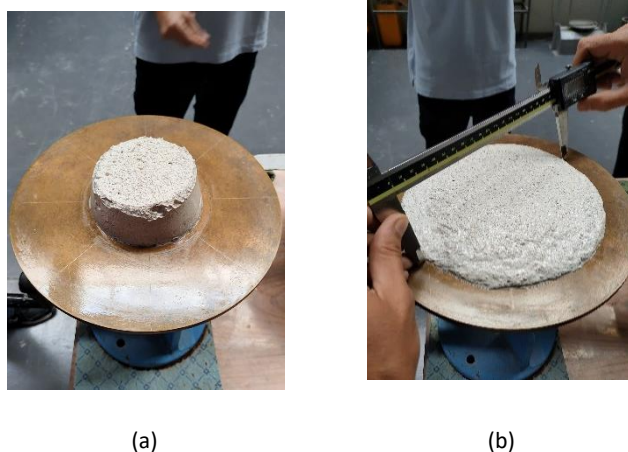


Figura 4.15 – Avaliação da consistência por espalhamento: (a) argamassa após retirada do molde troncocónico; (b) medição do espalhamento [Fonte – Autor]

O valor do espalhamento foi depois calculado com base na seguinte expressão:

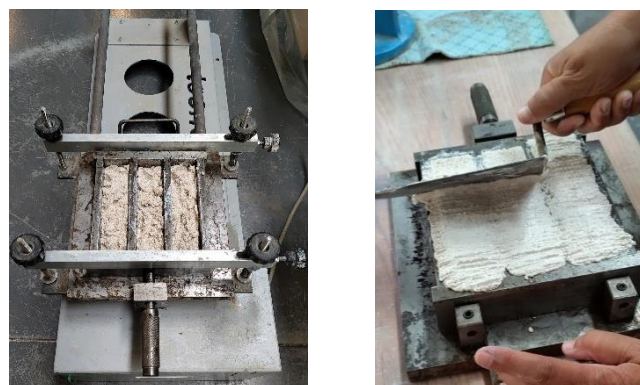
$$\text{Espalhamento} = \frac{\sum d_i}{3} \quad (\text{mm}) \quad (4.1)$$

em que  $d_i$  corresponde ao diâmetro numa dada direção  $i$  do espalhamento, medido em milímetros.

#### 4.4.4. Moldagem de provetes

Para dar resposta ao plano de ensaios, foram preparados doze provetes prismáticos (seis de cada formulação), com as dimensões 40x40x160 (mm), de acordo com a EN 196-1:2005. Estes foram preparados logo após a produção e posterior avaliação da consistência por espalhamento da argamassa.

O procedimento de moldagem começou com a colocação de um molde metálico (previamente pincelado com óleo mineral descofrante) no compactador de argamassa e após colocação e fixação da alonga no topo do molde, este foi preenchido até cerca de meia altura da sua capacidade com argamassa fresca. Esta foi espalhada numa camada uniforme com a ajuda de uma espátula metálica, e compactada mecanicamente com 60 pancadas. Foi depois colocada uma nova camada de argamassa, ligeiramente acima da capacidade do molde, e efectuado o mesmo procedimento de distribuição e de compactação da argamassa com 60 pancadas (Figura 4.16 (a)). Por último, o molde foi retirado do equipamento de compactação e a superfície dos provetes regularizada com uma colher de pedreiro (Figura 4.16 (b)). Depois de concluída esta operação, os moldes foram identificados com a designação da argamassa e data de amassadura.



(a)

(b)

Figura 4.16 – Processo de moldagem dos provetes: (a) compactação da argamassa no molde; (b) alisamento da superfície de argamassa [Fonte – Autor]

#### 4.4.5. Condições de cura e identificação dos provetes

Após produção, os moldes foram deixados sob ambiente laboratorial ( $20 \pm 5$  °C e  $60 \pm 10$  %HR) durante os primeiros sete dias, findos os quais foram desmoldados e devidamente identificados. Estes foram depois colocados outros sete dias numa câmara de carbonatação (a 20 °C, 60% HR e 5% CO<sub>2</sub>), a fim de acelerar o seu processo de endurecimento (carbonatação) em laboratório, e assim se obterem provetes de argamassa de cal carbonatados e com características semelhantes a provetes curados naturalmente por três anos (Silva *et al.*, 2021). Este procedimento teve como objetivo permitir comparar de forma mais direta as propriedades das argamassas produzidas em laboratório com as propriedades das argamassas antigas (com longos períodos de cura).

Após aferição da massa e dimensão dos provetes prismáticos, deu-se início aos ensaios de caracterização dos mesmos, no estado endurecido.

A nomenclatura dada aos provetes contém o traço (1:2 ou 1:4) seguido de uma letra do alfabeto (A a F) consoante o provete.

#### **4.5. Caracterização colorimétrica**

A caracterização colorimétrica tem como objetivo caracterizar de forma quantitativa a cor das amostras de argamassa de acordo com o espaço de cor CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ), ou CIELAB, e que permite definir a cor de um material com base nas coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (EN ISO/CIE 11664-4:2019). Nos parâmetros utilizados neste método, o  $L^*$  corresponde à luminosidade com um intervalo de valores entre 0 (preto) e 100 (branco). O parâmetro  $a^*$  corresponde à variação entre as cores vermelho (valores positivos de  $a^*$ ) e de verde (valores negativos de  $a^*$ ). Por fim, o parâmetro  $b^*$  corresponde à variação entre as cores amarelo (valores positivos de  $b^*$ ) e azul (valores negativos de  $b^*$ ). Na Figura 4.17 (a) é possível visualizar uma representação 2D do sistema de cor CIELAB.

A caracterização colorimétrica foi efetuada a oito amostras (Tabela 4.2) e a um provete de cada uma das duas formulações de argamassa produzida em laboratório (Tabela 4.3), tendo sido utilizado um colorímetro da marca Angguang®, modelo WSD-3A (Figura 4.17 (b)).

Tabela 4.2 – Amostras de argamassas antigas utilizadas na caracterização colorimétrica

Ensaio	Colorímetro						
Amostras	Fortaleza de Juromenha						
	J/C/1.1	J/I/2.1	J/I/3.2	RTS/1.1int	RTS/1.1ext	ARP	EJMS/1.1

Tabela 4.3 – Provetes de argamassas de substituição utilizadas na caracterização colorimétrica

Ensaio	Colorímetro	
Provetes	Argamassas de substituição	
	1:2E	1:4E

Após a calibração do equipamento, avaliou-se a cor de cada uma das amostras antigas sempre que possível em três pontos distintos da face interior da argamassa (de modo a evitar uma possível influência na cor da colonização biológica ou da sujidade) e, em cada um desses pontos, efetuaram-se três medições, o que fez nove medições por amostra. Já nos provetes de argamassa, as medições (nove por provete) foram efetuadas na face de enchimento dos provetes para evitar uma possível influência do óleo descofrante na cor.

Com base nos valores das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  é ainda possível calcular o croma,  $C^*$ , parâmetro está relacionado com a saturação da cor, de acordo com a seguinte expressão:

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (4.2)$$

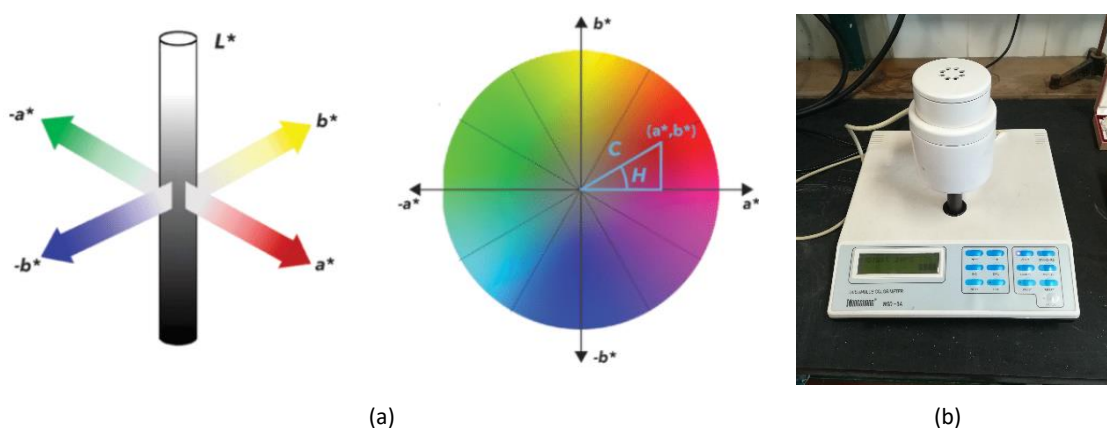


Figura 4.17 – Determinação da cor: (a) espaço de cor CIELAB; (b) colorímetro utilizado

[Fonte – Delazio *et al.* (2007) e Autor]

A caracterização colorimétrica é especialmente útil quando se pretende definir formulações de argamassa de substituição, uma vez que permite comparar a cor das argamassas antigas com a das formulações produzidas em laboratório, de forma a verificar se existe compatibilidade estética das argamassas de substituição com as antigas.

#### 4.6. Caracterização física

##### 4.6.1. Absorção de água por capilaridade

Este ensaio tem como objetivo determinar a absorção de água por capilaridade das amostras de argamassa recolhidas. Dada a reduzida dimensão e irregularidade das amostras de argamassa antiga, a determinação da sua capacidade de absorção de água por capilaridade seguiu o procedimento proposto por Veiga *et al.* (2002). Este ensaio foi realizado em nove amostras de argamassas antigas, conforme indicado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Amostras de argamassas antigas utilizadas na determinação da absorção de água por capilaridade

Ensaio	Absorção de água por capilaridade							
Amostras	Fortaleza de Juromenha							
	J/C/1.1	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	RTS 1.2	ARP	EJMS 1.1

Já nos provetes de argamassa produzidos em laboratório esta determinação baseou-se na metodologia presente na EN 1015-18:2002 e na RILEM Test I.6:1980. Este ensaio foi realizado a dois provetes de cada formulação de argamassa (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Provetes de argamassas de substituição utilizadas na determinação da absorção de água por capilaridade

Ensaio	Absorção de água por capilaridade			
Provetes	Argamassas de substituição			
	1:2A	1:2B	1:4A	1:4B

Por terem sido utilizadas metodologias diferentes consoante o tipo de argamassa (amostras antigas ou provetes novos), descrevem-se sequencialmente os procedimentos de ensaio.

##### Amostras de argamassa antiga

Previamente ao ensaio, foram determinadas as áreas em planta das amostras a ensaiar utilizando papel milimétrico (Figura 4.18 (b)). As amostras foram depois secas em estufa

ventilada a 60 °C (Figura 4.18 (a)) até atingirem massa constante (variação inferior a 0,01 g em 24 horas) e deixadas a arrefecer num exsicador com sílica gel (Figura 4.18 (c)) por algumas horas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.18 – Determinação da absorção de água por capilaridade das amostras de argamassa antiga: (a) determinação da área em contacto com água recorrendo a papel milimétrico (b) secagem em estufa; (c) arrefecimento em exsicador [Fonte – Autor]

O ensaio teve início com o registo da massa seca das amostras e dos cestos com o geotêxtil húmido. Os cestos com as amostras (Figura 4.19 (a)) foram depois colocados sobre suportes (varetas de plástico) e o tabuleiro preenchido com água, até esta entrar em contacto com o geotêxtil, mas não com a amostra. Para que o nível de água permanecesse constante ao longo do ensaio, foi sendo adicionada água sempre que necessário. Os tabuleiros mantiveram-se numa caixa fechada com água ao longo do ensaio (Figura 4.19 (b)), de forma a minimizar a evaporação de água, tendo estas sido abertas apenas para acerto do nível da água e pesagem dos cestos com as amostras.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.19 – Determinação da absorção de água por capilaridade das amostras de argamassa antiga: (a) aspeto das amostras no início do ensaio; (b) aspeto das amostras no final do ensaio; (c) caixas onde se encontravam os tabuleiros foram mantidas fechadas ao longo do ensaio [Fonte – Autor]

Devido à reduzida dimensão e espessura das amostras, as pesagens foram inicialmente realizadas de 3 em 3 min até aos 15 min, de 5 em 5 min até aos 60 min, de 15 em 15 min até aos 120 min e por último de 120 em 120 min, até aos 480 min (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Intervalos de tempo entre pesagem das amostras antigas

Tempo [min]	Intervalo de tempo
3, 6, 9, 15	3 em 3 min
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	5 em 5 min
75, 90	15 em 15 min
120, 240, 360, 480	120 em 120 min

Previamente a cada pesagem, os cestos foram pousados por instantes por cima de uma toalha húmida, para retirar o excesso de água. O ensaio decorreu num ambiente normal de laboratório.

A massa de água absorvida por unidade de área,  $M_i$ , foi depois ser calculada para cada amostra, para um dado instante, da seguinte forma:

$$M_i = \frac{(m_i - m_0)}{A} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (4.3)$$

em que,

$m_0$  – Massa da amostra seca, no início do ensaio (kg);

$m_i$  – Massa da amostra ao fim de um dado tempo  $i$ , descontando a massa do cesto e do geotêxtil (kg);

$A$  – Área da superfície de argamassa em contacto com a água ( $\text{m}^2$ ).

Com estes dados, foi então possível traçar a curva de absorção de água por capilaridade de cada amostra, que relaciona a massa de água absorvida por unidade de área ( $\text{kg/m}^2$ ) com a raiz quadrada do tempo ( $\text{s}^{1/2}$ ). Para argamassas à base de cal aérea, esta curva é geralmente caracterizada por dois troços: um troço inicial, em que a absorção de água é mais rápida e se dá a taxa aproximadamente constante e por um troço final em que a taxa de absorção de água é bastante mais lenta (Figura 4.20) e tende para um patamar horizontal (assíntota). A transição entre os dois corresponde ao preenchimento total dos poros capilares com água.

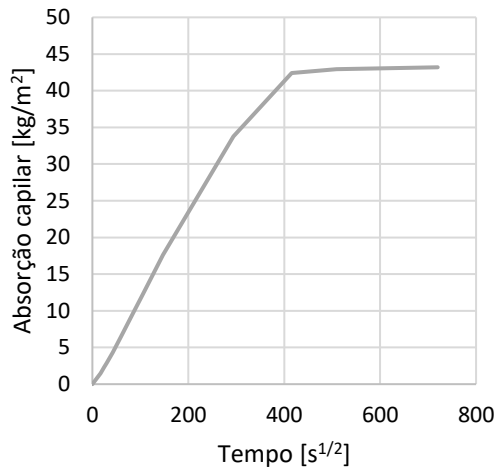


Figura 4.20 – Exemplo de curva de absorção capilar [Fonte – Autor]

O coeficiente da absorção de água por capilaridade ( $CC$ ), que traduz a velocidade inicial de absorção de água, pode também ser calculado para cada amostra. Este cálculo foi efetuado considerando os instantes iniciais ( $t_1$ ) e finais ( $t_2$ ) do troço inicial da curva em que a absorção de água ocorre a taxa constante, de acordo com a seguinte expressão e as massas por unidade de área ( $M_i$ ):

$$CC = \frac{(M_2 - M_1)}{(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})) \quad (4.4)$$

#### Argamassas produzidas em laboratório

O ensaio dos provetes foi efetuado de forma semelhante ao anteriormente descrito para as amostras de argamassas antigas, mas sem a utilização dos cestos. Para tal, após secagem e arrefecimento, os provetes prismáticos de argamassa foram pesados. Estes foram depois colocados na vertical, sobre varetas de plástico, num tabuleiro com água (Figura 4.21). O nível da água foi depois acertado de forma a ficar 5 mm acima da base dos provetes.

Ao longo do ensaio, foram efetuadas pesagens aos 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 360 min, 1440 min (24 h), e daí em diante, diariamente (Tabela 4.7). Cada medição implicou secar a água superficial da base do provete com um pano húmido para retirar o excesso de água, avaliando-se em seguida a sua massa.

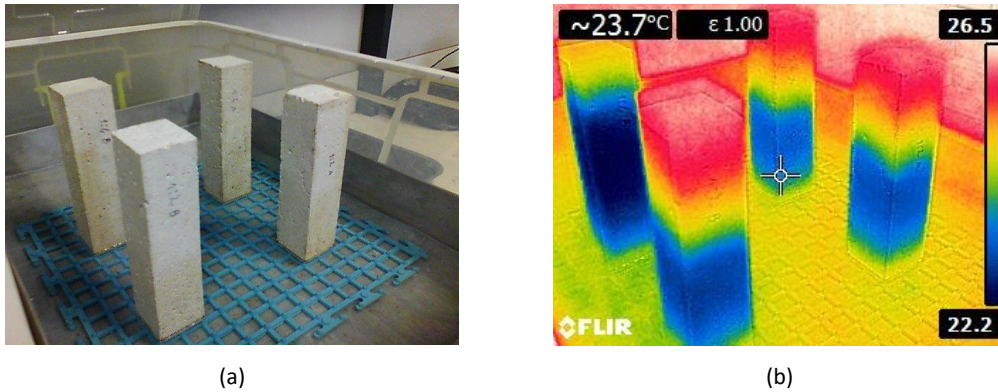


Figura 4.21 – Determinação da absorção de água por capilaridade em provetes de argamassa de substituição: (a) ensaio a decorrer; (b) imagem térmica dos provetes, sendo notório o nível de ascensão capilar [Fonte – Autor]

Tabela 4.7 – Intervalos de tempo entre pesagem dos provetes de argamassa de substituição

Tempo [min]	Intervalo de tempo
5, 10, 15	5 em 5 min
15, 30	15 em 15 min
30, 60, 90, 120	30 em 30 min
120, 180	60 em 60 min
180, 360	180 em 180 min
360, 1440	1080 em 1080 min
1440, 2880, (...)	1440 em 1440 min

Com base nos resultados, foi traçada a curva de absorção capilar e calculado o coeficiente de absorção de água por capilaridade, de acordo com o referido anteriormente para as amostras antigas. Foi ainda ser determinado o valor assintótico, que traduz a quantidade total de água que penetra na argamassa, por unidade de superfície e que corresponde ao valor de  $M_i$  (kg/m<sup>2</sup>) quando a diferença entre dois valores  $M_i$  e  $M_{i-1}$  for inferior a 1%.

#### 4.6.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente

A porosidade aberta, ou porosidade acessível à água, das argamassas foi determinada de acordo com a RILEM Test I.1 (1976). Este ensaio foi efetuado a oito amostras de argamassa antigas (Tabela 4.8), bem como a dois meios-provetes (decorrentes do ensaio de resistência à flexão) de cada tipo de argamassa estudada em laboratório (Tabela 4.9).

Previamente à realização do ensaio, as amostras foram secas em estufa ventilada a 60 °C até atingirem massa constante e deixadas a arrefecer num exsiccador com sílica gel durante algumas

horas. Foi depois registada a sua massa seca ( $m_1$ ). Estas foram depois colocadas num exsicador, tendo-se reduzido gradualmente a pressão até 2,667 kPa (20 mm Hg). Ao fim de 24 horas em vácuo, foi adicionada água lentamente ao exsicador (tal que a franja líquida (capilar) se mantivesse sempre acima do nível da água), mantendo o vácuo, até as amostras estarem totalmente imersas. Estas condições foram mantidas durante 24 horas, findas as quais se fez aumentar a pressão até ao valor atmosférico. As amostras permaneceram imersas sob pressão atmosférica durante outras 24 horas. No final desse período, procedeu-se à determinação da massa imersa das amostras ( $m_2$ ), através de pesagem hidrostática. Imediatamente a seguir, limpou-se a superfície destes materiais com um pano húmido e procedeu-se à determinação da sua massa saturada ( $m_3$ ).

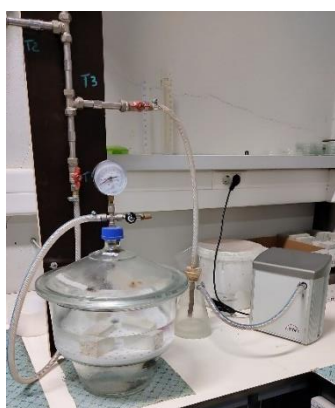
O ensaio foi conduzido de forma idêntica à descrita para os provetes de argamassa de substituição (Figura 4.22).

Tabela 4.8 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação da porosidade aberta e massa volúmica real e aparente

Ensaio	Porosidade aberta e massas volúmicas							
Amostras	Fortaleza de Juromenha							
	J/C/1.1	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	RTS/1.2	ARP	EJMS/1.1

Tabela 4.9 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da porosidade aberta e massa volúmica real e aparente

Ensaio	Porosidade aberta e massas volúmicas			
Provetes	Argamassas de substituição			
	1:2C	1:2D	1:4C	1:4E



(a)



(b)



(c)

Figura 4.22 – Determinação da porosidade aberta e massa volúmica: (a) provetes no exsicador sob vácuo; (b) pesagem hidrostática dos provetes; (c) pesagem no estado saturado [Fonte – Autor]

Com base nos resultados anteriores, foi possível determinar a porosidade aberta,  $P_{ab}$ , de acordo com a expressão:

$$P_{ab} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_3 - m_2)} \times 10^3 \quad (\%) \quad (4.5)$$

em que,

$m_1$  – Massa do material seco;

$m_2$  – Massa do material saturado, pesado dentro de água;

$m_3$  – Massa do material saturado, com superfície seca.

Com os dados obtidos no ensaio de porosidade aberta foi ainda possível calcular a massa volúmica real e a massa volúmica aparente das argamassas. A massa volúmica real diz respeito à relação entre a massa sólida seca e o volume da mesma massa sólida seca sem o volume dos vazios acessíveis à água. Já a massa volúmica aparente de um material diz respeito à relação entre massa sólida seca, e o seu volume aparente.

Assim, a massa volúmica real,  $MVR$ , foi determinada com base na expressão:

$$MVR = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \times 10^3 \quad (\%) \quad (4.6)$$

e a massa volúmica aparente,  $MVA$ , com base em:

$$MVA = \frac{m_1}{(m_3 - m_2)} \times 10^3 \quad (\%) \quad (4.7)$$

#### 4.6.3. Absorção de água por imersão (após 48 horas)

Com a realização do ensaio de determinação da absorção de água por imersão pretende-se caracterizar a capacidade de absorção de água da argamassa quando submetida a um período de imersão de 48 horas à pressão atmosférica. Este ensaio foi efetuado a nove amostras de argamassa antiga (Tabela 4.10), bem como a quatro meios-provetes (decorrentes do ensaio de resistência à flexão) de cada tipo de argamassa de substituição (Tabela 4.11) de acordo com a especificação LNEC E394 (1993).

Previamente ao ensaio, as amostras foram secas até atingirem massa constante (cerca de 48 horas) em estufa ventilada a 60 °C e posteriormente deixadas a arrefecer num exsiccador com sílica gel durante algumas horas. Procedeu-se então à determinação da sua massa seca, e à sua imersão numa caixa plástica com água (Figura 4.23(a)). Estas foram deixadas imersas à pressão atmosférica por 48 horas, período após o qual as amostras foram retiradas, cuidadosamente

limpas com um pano húmido para retirar o excesso de água superficial e novamente pesadas (Figura 4.23(b)).

Tabela 4.10 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação do teor de água (após 48 h)

Ensaio	Absorção de Água por Imersão							
Amostras	Fortaleza de Juromenha							
	J/C/1.1	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	RTS/1.2	ARP	EJMS/1.1

Tabela 4.11 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação do teor de água (após 48h)

Ensaio	Absorção de água às 48 h			
Provetes	Argamassas de substituição			
	1:2A	1:2F	1:4A	1:4F



(a)



(b)

Figura 4.23 – Determinação do teor em água às 48 horas das amostras de argamassa antiga: (a) amostras imersas, durante o ensaio; (b) pesagem da amostra no estado saturado com superfície seca [Fonte – Autor]

O ensaio dos provetes de argamassa de substituição foi realizado de forma idêntica ao anteriormente descrito para as amostras antigas. Neste caso, teve-se o cuidado de colocar os provetes inclinados a cerca de 45° na caixa plástica para evitar a acumulação de bolhas de ar na superfície dos provetes conforme ilustrado na Figura 4.24.

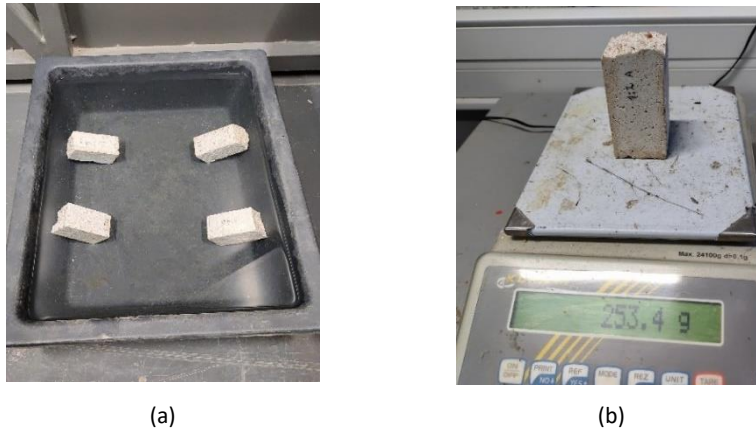


Figura 4.24 – Determinação do teor em água às 48 horas em provetes de argamassa de substituição: (a) provetes imersos, durante o ensaio; (b) pesagem de provete no estado saturado com superfície seca [Fonte – Autor]

O teor de água pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\text{Teor de água (48h)} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\%) \quad (4.8)$$

em que,

$M_0$  – Massa seca (g);

$M_1$  – Massa da argamassa saturada, com superfície seca (g).

#### 4.7. Resíduo insolúvel por dissolução ácida

A dissolução ácida foi utilizada para determinar a fração insolúvel das amostras antigas e assim obter uma estimativa da sua relação ligante/agregado (traço) em massa. Neste procedimento, é utilizado um ácido (geralmente ácido clorídrico ou nítrico), para dissolver os materiais carbonatados (cal e agregados calcíticos), obtendo-se um resíduo insolúvel. Este pode ser considerado como a fração de agregado, caso se verifique que os agregados presentes nas argamassas antigas são de origem siliciosa (o que era o caso). O ensaio foi realizado com base nos trabalhos de Sena da Fonseca *et al.* (2020) e de Matos (2021) a quatro amostras (Tabela 4.12). De notar que este ensaio é destrutivo e irreversível.

Tabela 4.12 – Amostras de argamassa antiga utilizadas na determinação do resíduo insolúvel por dissolução ácida

Ensaio	Dissolução ácida			
Amostras	Fortaleza de Juromenha			
	RTS 1.2	J/C/1.1	J/I/3.2	EJMS/1.1

O ensaio começou com a preparação das amostras antigas de argamassa. Estas foram desagregadas com o auxílio de um almofariz e de um pilão de borracha para facilitar a reação de dissolução (Figura 4.25). Foram depois retiradas cerca de 50 g de cada amostra e colocadas em estufa a secar a 60 °C até massa constante (24 horas). Fimdo esse período, as amostras foram deixadas a arrefecer por algumas horas num exsiccador com sílica gel.



Figura 4.25 – Argamassas desagregadas para determinação do resíduo insolúvel [Fonte – Autor]

Em seguida, procedeu-se ao registo da massa seca das amostras e colocou-se cada uma delas num recipiente de vidro (*gobelet*) sobre um agitador magnético. Preparou-se depois a solução diluída de ácido clorídrico (1:5), a qual permitiu a separação do resíduo insolúvel do ligante. Foram colocados 600 ml desta solução em cada um dos recipientes de vidro, gradualmente e sob agitação. As soluções permaneceram sob agitação constante por duas horas, e posteriormente sob repouso por uma hora (Figura 4.26). No final deste processo, o ligante carbonatado encontra-se totalmente dissolvido e o resíduo insolúvel remanescente corresponde aos agregados. Este último foi recolhido através de um processo de filtragem sob vácuo da solução, seco em estufa a 60 °C e posteriormente pesado (Figura 4.27).



Figura 4.26 – Determinação do resíduo insolúvel: soluções ácidas com o material após repouso

(1 - RTS 1.2; 2 - J/C/1.1; 3 - J/I/3.2; 4 - EJMS/1.1) [Fonte – Autor]

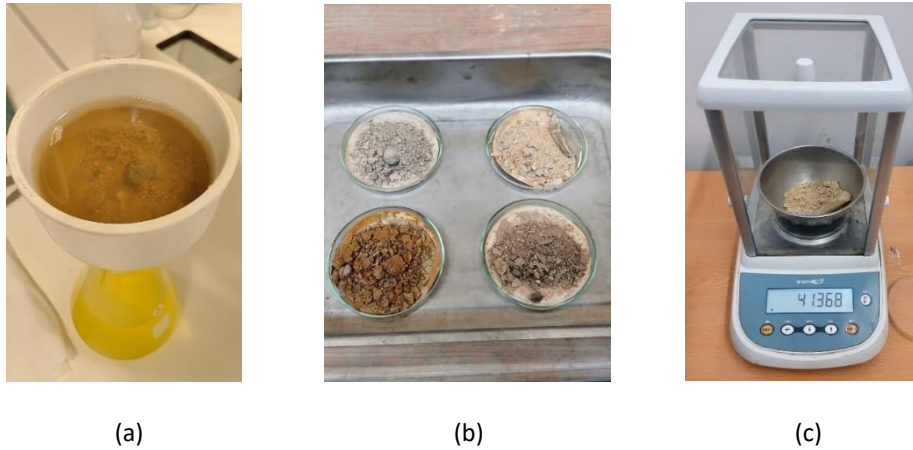


Figura 4.27 – Determinação do resíduo insolúvel: (a) processo de filtragem; (b) resíduo insolúvel após secagem em estufa; (c) pesagem da massa seca [Fonte – Autor]

O procedimento de dissolução ácida permite determinar o rácio massa solúvel/massa insolúvel, isto é, uma aproximação do traço (em massa) original das argamassas antigas, a partir da seguinte expressão:

$$r\acute{a}c\acute{i}o = \frac{M_{total} - M_{insol\acute{u}vel}}{M_{insol\acute{u}vel}} \quad (4.9)$$

em que,

$M_{total}$  – Massa total da amostra seca (g);

$M_{insol\acute{u}vel}$  – Massa do resíduo insolúvel seco (g).

#### Análise granulométrica do resíduo insolúvel

O resíduo insolúvel obtido com o procedimento anterior (sub-sub-capítulo 4.6.1) foi sujeito a uma análise granulométrica por peneiração com o objetivo de identificar por percentagem a dimensão dos agregados presentes nas amostras de argamassa antiga, e assim caracterizar de forma mais detalhada a composição destes materiais. O ensaio de peneiração foi realizado com base na NP EN 933-1:2014 tendo sido utilizados os resíduos insolúveis obtidos para as amostras constantes na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Amostras utilizadas na peneiração do resíduo insolúvel

Ensaio	Análise granulométrica			
Amostras	Fortaleza de Juromenha			
	RTS 1.2	J/C/1.1	J/I/3.2	EJMS/1.1

Para o ensaio, procedeu-se à montagem vertical da bateria de peneiros (Figura 4.28), com dimensão da malha crescente da base até ao topo. Os peneiros utilizados foram os com abertura da malha de dimensões 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063, e respetivo fundo (Tabela 4.14), de acordo com a série principal da EN 933-2:1999. Colocou-se depois o resíduo insolúvel de cada amostra previamente pesada no topo da coluna (Figura 4.29).



Figura 4.28 – Agitador com bateria de peneiros [Fonte – Autor]

Tabela 4.14 – Relação, Peneiros/ Malhas (mm)

Peneiros/ Abertura (mm)	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063

Os peneiros já com o material no seu interior foram colocados no agitador, tendo sido o seu processo de vibração mantido durante sete minutos. Após este processo, pesaram-se as massas retidas em cada um dos peneiros.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.29 – Resíduo insolúvel das amostras para determinação da granulometria: (a) RTS 1.2; (b) J/C/1.1; (c) J/I/3.2; (d) EJMS 1.1 [Fonte – Autor]

A percentagem do material retido, por peneiro, pode calcular-se de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Agregado retido} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (\%) \quad (4.10)$$

em que,

$m_1$  – Massa retida em cada peneiro (g);

$m_2$  – Massa inicial da amostra (g).

Com base nesta informação pode ser traçada a curva granulométrica para cada amostra, com a dimensão dos peneiros em abcissas (utilizando uma escala logarítmica) e a percentagem de material retido nas ordenadas.

#### 4.8. Caracterização mecânica

##### 4.8.1. Resistência à tração por flexão

O ensaio de determinação da resistência à tração por flexão foi realizado a seis provetes de cada formulação de argamassa de substituição (Tabela 4.15), segundo a EN 1015-11:1999. Para tal, foi utilizada uma prensa MATEST CE403, ilustrada na Figura 4.29.

Os provetes foram ensaiados aos 14 dias de idade, logo após terem sido retirados da câmara de carbonatação. Previamente ao ensaio, foram registadas as dimensões e a massa de cada provete. Cada um deles foi depois posicionado na máquina de ensaio com uma face lateral de moldagem sobre os roletes, centrada, e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios (Figura 4.30 (b)). A carga foi aplicada a uma velocidade de 0,024 MPa/s, sendo posteriormente registado o valor da força de rotura.

Tabela 4.15 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da resistência à flexão

Amostras	Argamassa novas												
	1:2A	1:2B	1:2C	1:2D	1:2E	1:2F	1:4A	1:4B	1:4C	1:4D	1:4E	1:4F	

A resistência à tração por flexão,  $f_f$ , foi obtida através da seguinte equação:

$$f_f = 1,5 \frac{F_f l}{bd^2} \quad (\text{MPa}) \quad (4.11)$$

em que,

$F_f$  – Força máxima aplicada no ensaio aquando da rotura do provete (N);

$l$  – Distância entre os apoios onde é colocado o provete (100 mm);

$b$  – Largura da secção do provete (40 mm);

$d$  – Altura da secção do provete (40 mm).

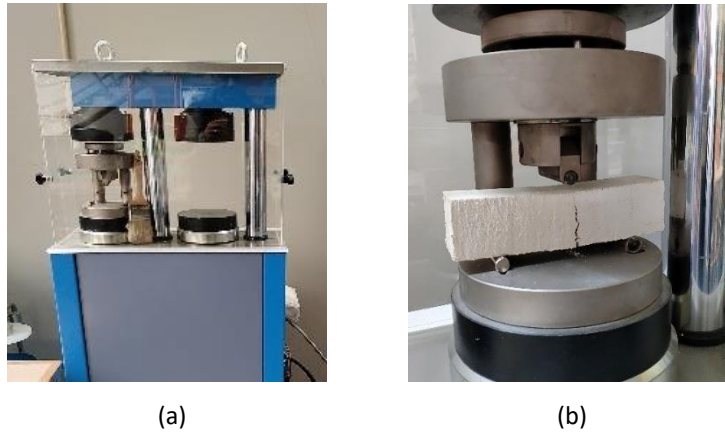


Figura 4.30 – Determinação da tensão de flexão: (a) máquina de ensaio de à tração por flexão; (b) rotura do provete à tração por flexão [Fonte – Autor]

#### 4.8.2. Resistência à compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi realizado com base nas indicações presentes na EN 1015-11:1999 a seis provetes de cada tipo de argamassa de substituição, como indicado na Tabela 4.16. Neste ensaio, foi utilizada a mesma máquina de ensaio (MATEST CE403) que a utilizada na determinação da tensão de flexão (Figura 4.30).

Tabela 4.16 – Provetes de argamassa de substituição utilizados na determinação da resistência à compressão

Amostras	Argamassas novas												
	1:2A	1:2B	1:2C	1:2D	1:2E	1:2F	1:4A	1:4B	1:4C	1:4D	1:4E	1:4F	

Neste ensaio, cada meio-provete (resultante do ensaio de resistência à flexão) foi cuidadosamente centrado, por uma das faces laterais de moldagem, no prato da máquina de ensaio. Foi depois imposta uma força crescente, a uma velocidade de 0,031 MPa/s, até à rotura do provete (Figura 4.31). De referir que, antes da realização do ensaio, se confirmou que os meios-provetes se encontravam totalmente carbonatados, ao borrifar a sua superfície com uma solução de fenolftaleína.



Figura 4.31 – Determinação da resistência compressão e rotura do provete [Fonte – Autor]

A resistência à compressão de um provete de argamassa,  $f_c$ , foi determinada a partir da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (4.12)$$

em que,

$F_c$  – Força máxima aplicada no ensaio aquando da rotura do provete (N);

$A$  – Área de aplicação da carga (40x40 mm).

## 5. Resultados e discussão

### 5.1. Considerações gerais

O presente capítulo pretende apresentar e discutir os resultados obtidos no âmbito do programa experimental desenvolvido, e encontra-se dividido em duas partes. Na primeira são apresentados e discutidos os resultados da caracterização física e colorimétrica efetuada às amostras de argamassa antiga recolhidas na Fortaleza de Juromenha. Na segunda parte, são definidas e justificadas as formulações de argamassa de substituição utilizadas e são apresentados e discutidos os resultados da sua caracterização física, mecânica e colorimétrica. Ao longo desta última parte é ainda realizada uma comparação com as propriedades obtidas para as argamassas antigas, com vista a uma avaliação sumária da potencial adequabilidade das argamassas de substituição estudadas.

### 5.2. Argamassas antigas

#### 5.2.1. Caracterização colorimétrica

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios ( $\pm$  desvio padrão) obtidos para as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e de  $C^*$  das amostras de argamassa antiga e as Figuras 5.1 e 5.2 a sua representação gráfica.

Tabela 5.1 – Caracterização colorimétrica das amostras de argamassa antiga

Amostras	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$C^*$
J/C/1.1	$4,25 \pm 0,48$	$13,82 \pm 0,56$	$67,76 \pm 2,86$	$14,46 \pm 0,06$
J/I/2.1	$3,24 \pm 0,11$	$10,93 \pm 0,03$	$69,49 \pm 1,82$	$11,40 \pm 0,06$
J/I/3.2	$3,35 \pm 0,31$	$11,77 \pm 0,26$	$63,65 \pm 1,03$	$12,23 \pm 0,04$
RTS/1.1.int	$4,51 \pm 1,15$	$14,01 \pm 4,31$	$48,20 \pm 7,30$	$14,72 \pm 2,24$
RTS/1.1.ext	$4,89 \pm 0,28$	$14,39 \pm 0,41$	$45,19 \pm 3,17$	$15,20 \pm 0,10$
ARP	$4,56 \pm 0,36$	$13,91 \pm 0,51$	$63,97 \pm 1,94$	$14,64 \pm 0,11$
ARAB	$3,53 \pm 0,85$	$14,06 \pm 0,51$	$65,20 \pm 3,37$	$14,49 \pm 0,24$
E.J.M.S.1.1	$5,01 \pm 0,11$	$15,11 \pm 0,24$	$61,01 \pm 0,23$	$15,91 \pm 0,09$

Os resultados presentes na Tabela 5.1 permitem concluir que as amostras apresentam cores semelhantes, ainda que as amostras RTS apresentem uma tonalidade mais escura que as restantes (menor valor de  $L^*$ ). Não obstante, todas as amostras encontram-se no espaço de cor entre o encarnado e amarelo, apresentando diversas tonalidades de bege/cinzentos.

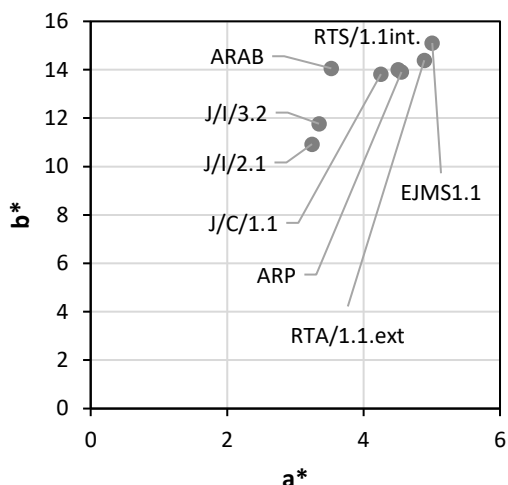


Figura 5.1 – Coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  obtidas para as amostras de argamassa antigas

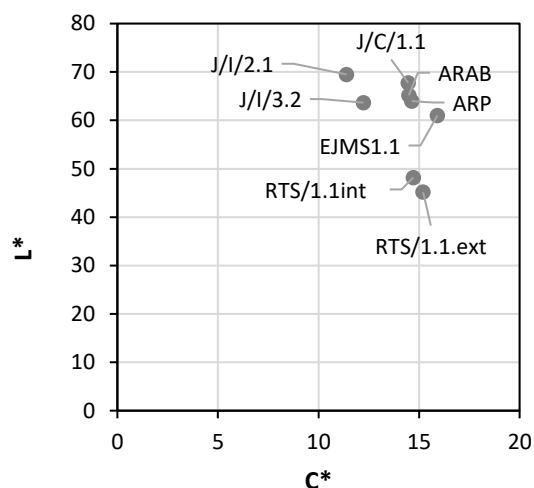


Figura 5.2 – Coordenadas  $C^*$  e  $L^*$  obtidas para as amostras de argamassa antigas

Comparando as amostras, a análise da Figura 5.1 permite verificar que as amostras J/I/2.1 e J/I/3.2 se destacam das restantes, apresentando valores ligeiramente mais baixos para os parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ . Também a amostras ARAB (Figura 5.3) apresenta um valor mais reduzido de  $a^*$  (3 a 4) do que as restantes amostras (4 a 6), ou seja, está mais perto da gama dos cinzentos, enquanto as restantes se aproximam mais da cor bege.

Já através da Figura 5.2 é possível concluir que as amostras se concentram entre os valores 10 e 20 de  $C^*$  e entre os 40 e 70 de  $L^*$ , destacando-se a amostra RTS/1.1 por apresentar valores de luminosidade significativamente mais baixos do que as restantes e as amostras J/I/1.1 e J/I/3.2 com valores de croma também mais baixos.

Apesar da análise efetuada, não se conseguiu agrupar por características as amostras de uma determinada época construtiva ou local, já que estas demonstram alguma variabilidade na cor, contudo, julga-se que as amostras ARAB e ARP são mais recentes do que as restantes.



Figura 5.3 – Aspeto da amostra ARAB

## 5.2.2. Caracterização física

### 5.2.2.1. Absorção de água por capilaridade

As curvas de absorção de água por capilaridade obtidas para as amostras recolhidas na Fortaleza de Juromenha são apresentadas na Figura 5.4.

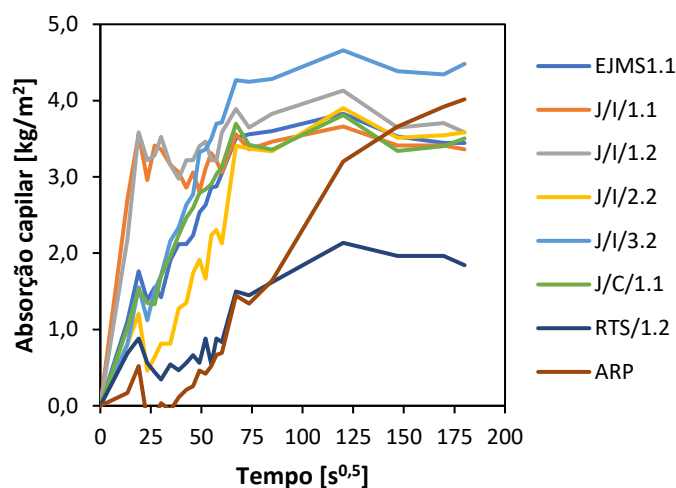


Figura 5.4 – Curvas de absorção capilar das argamassas antigas

De forma geral, as amostras em estudo apresentam numa primeira fase de absorção capilar mais rápida (ainda que com algumas oscilações), mas com tendência a estabilizar na fase final, correspondente ao momento em que a água atinge o topo das amostras. As oscilações, no troço inicial, podem decorrer da irregularidade em planta das amostras que impede um contacto perfeito com o geotêxtil, de heterogeneidades na composição das amostras de argamassa, ou de imprecisões nas pesagens (como as amostras eram de reduzidas dimensões o facto de o cesto vir com mais ou menos água, apesar de ter sido limpo com um pano húmido previamente à pesagem, poderá ter interferido nos valores). Neste contexto, importa salientar que algumas amostras, tais como a RTS/1.2 (Figura 5.5. (a)) e a EJMS, apresentavam uma superfície exterior muito irregular e ainda com alguma colonização biológica (que não possível remover na sua totalidade sem danificar a argamassa durante a sua limpeza). Outras, por exemplo a ARP (Figura 5.5 (b)), apresentavam um acabamento por pintura, o que poderá ter interferido com os resultados. Estas oscilações nas curvas de absorção capilar parecem ser, no entanto, frequentes no ensaio a amostras antigas, sendo notórias também nos trabalhos de Coradinho (2018) e Matos (2021).



Figura 5.5 – Aspeto da face exterior das amostras de argamassa antiga: (a) RTS/1.2, (b) ARP

A observação das curvas capilares (Figura 5.4) permite ainda verificar o que aparentam ser três conjuntos de argamassas com características semelhantes entre si: (i) o conjunto J/I/1.1 e J/I/1.2, (ii) o conjunto J/C/1.1, J/I/3.2 e EJMS1.1 (iii) e o conjunto ARP, RTS1.2 e J/I/2.2. Estes grupos, por não incluírem argamassas apenas de um determinado período construtivo ou localização, denotam uma grande variabilidade nas propriedades das argamassas, o que de resto se verifica nas restantes propriedades.

A Tabela 5.2 apresenta os coeficientes de capilaridade calculados para as amostras, verificando-se que estas variam significativamente entre amostras (entre 0,037 e 0,192  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ ), especialmente as referentes ao período Islâmico (J/I). Estes valores encontram-se um pouco abaixo dos valores obtidos por Matos (2021) para argamassas de cal do século XVI, que reporta coeficientes de capilaridade de 0,10 a 0,20  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ , mas dentro da gama obtida por Ferreira Pinto *et al.* (2014), que indicam valores de 0,01 a 0,40  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ , para argamassas de cal dos séculos X a XI. Note-se que estes últimos autores obtiveram igualmente uma grande variabilidade nos valores obtidos ao caracterizar argamassas do período Islâmico.

Tabela 5.2 – Coeficientes de capilaridade das amostras de argamassa antiga

Amostras	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	J/C/1.1	EJMS 1.1	RTS 1.2	ARP
Coeficiente capilaridade [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ ]	0,192	0,180	0,051	0,063	0,055	0,052	0,048	0,037

#### 5.2.2.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente

Apresentam-se, na Tabela 5.3, os resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta às amostras recolhidas. Verifica-se que as amostras estudadas apresentaram valores de porosidade aberta (entre os 29 e os 38%) dentro do expectável para argamassas antigas à base de cal aérea dos mesmos períodos construtivos de acordo com a bibliografia. Ferreira Pinto *et al.* (2014), por exemplo, reportam valores compreendidos entre os 33 a 46% para amostras de

argamassa das Muralhas do Castelo dos Mouros (séculos X a XI), enquanto Matos (2021) obteve valores entre os 25 a 45% para argamassas do Convento dos Capuchos (século XVI). Também Coelho *et al.* (2009), indicam valores dentro destas gamas (21 a 53%) para a porosidade aberta de argamassas antigas de diferentes épocas construtivas e locais (Tabela 5.4).

Tabela 5.3 – Porosidade aberta das amostras de argamassa antiga

Amostras	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	J/C/1.1	EJMS 1.1	RTS 1.2	ARP
Porosidade Aberta [%]	37,5	34,8	35,6	32,3	30,8	30,8	29,2	29,7

Tabela 5.4 – Valores médios de porosidade aberta obtidos para argamassas antigas  
[Fonte – adaptado de Coelho *et al.*, 2009]

Época construtiva	Local	Porosidade aberta [%]
Séc. XII	Catedral Irlanda	33-41
Séc. XII	Igreja Irlanda	21-41
Séc. XI - XIV	Igreja Espanha	21-45
Séc. XI - XVI	Igreja Espanha	34-35
Séc. XVII	Castelo Irlanda	32-36
Séc. XVIII	Hospital Irlanda	30-34
Séc. XVIII	Castelo Irlanda	30-33
Séc. XVIII	Catedral Espanha	35-53

Pode ainda observar-se que as amostras J/I/1.1 e J/I/1.2 revelaram uma maior porosidade aberta, o que explica os elevados coeficientes de capilaridade (Tabela 5.2). Já as amostras RTS/1.2 e ARP apresentaram os menores valores de porosidade (29,1% e 26,7%), o que se coaduna também com os reduzidos coeficientes de capilaridade apresentados (Tabela 5.2). Com efeito, verificou-se que a porosidade aberta explica bem ( $R^2=0,90$ ) os coeficientes de capilaridade obtidos para as amostras antigas (Figura 5.6), isto porque (e desconhecendo a dimensão dos poros), quanto maior a porosidade aberta, maior a quantidade de água por unidade de área e de tempo que o material absorve. A exceção a este comportamento é a amostra J/I/2.2, que apesar de ter apresentado uma porosidade elevada (35,6%), apresentou um coeficiente de capilaridade reduzido ( $0,051 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ ). Neste caso, outra propriedade do espaço poroso (por exemplo, a conectividade ou a dimensão dos poros) poderá explicar este resultado ou este poderá advir de algum erro na realização dos ensaios.

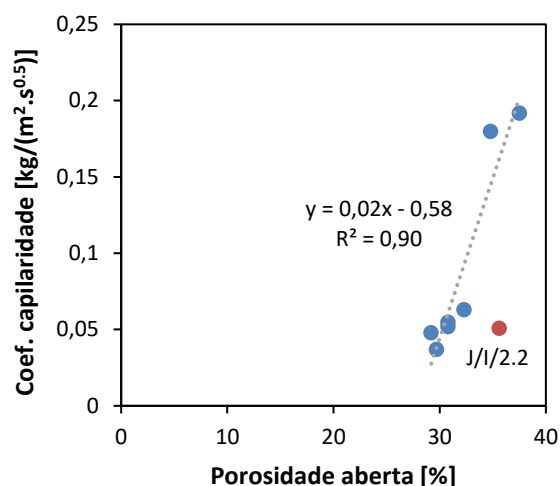


Figura 5.6 – Correlação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade

Para além da exceção, a Figura 5.6 permite verificar também a existência de dois grupos: um grupo constituído pelas amostras J/I/1.1 e J/I/1.2, mais porosas e com maior coeficiente de capilaridade, e outro grupo constituído pelas restantes amostras. Isto permite confirmar que de facto as amostras do período Islâmico apresentam uma composição bastante variável.

A massa volúmica real e a massa volúmica aparente foram também determinadas, cujos resultados se apresentam na Tabela 5.5. Os resultados permitem verificar que os valores para a massa volúmica real variam de 2610 a 2690 kg/m<sup>3</sup>, o que seria de esperar pois as massas volúmicas dos materiais que as compõem (cal e agregado) estão geralmente em torno desse valor. A amostra J/C/1.1 apresentou os menores valores de massa volúmica real, o poderá significar que esta amostra tem vazios não acessíveis à água, não contabilizados no ensaio de porosidade aberta, ou uma composição ligeiramente diferente das restantes.

Tabela 5.5 – Massas volúmicas real e aparente das amostras de argamassa antigas

Amostras	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	J/C/1.1	EJMS 1.1	RTS 1.2	ARP
Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2653	2665	2685	2692	2613	2657	2662	2662
Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1658	1738	1731	1821	1808	1838	1885	1873

Já os valores de massa volúmica aparente variaram de forma mais significativa, de 1660 a 1900 kg/m<sup>3</sup>, pois têm em conta a porosidade do material. Desta forma, as amostras mais porosas são aquelas que apresentam também os menores valores de massa volúmica aparente, e que foram as pertencentes ao período Islâmico, designadamente as amostras J/I/1.1, J/I/1.2 e J/I/2.2. Este

resultado, juntamente com os elevados valores de porosidade e do coeficiente de capilaridade obtidos para estas argamassas, poderá denotar um menor cuidado na sua aplicação (foi menos apertada contra o suporte, ficando com mais vazios). Na literatura foram encontrados valores de massa volúmica aparente entre 1400 e 1900 kg/m<sup>3</sup> para argamassas antigas de cal aérea (Papayianni (2006); Moropoulou *et al.*, (2005); Ferreira Pinto *et al.*, 2014; Matos, 2021).

### 5.2.2.3. Absorção de água por imersão (após 48 horas)

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água após 48 horas são apresentados na Tabela 5.6. Como pode ser observado, os valores obtidos variam de 11,5% a 18,8%, os quais se encontram dentro da gama de valores obtidos por outros autores (20 a 28%, de acordo com Matos (2021)). Verificou-se que as amostras J/I absorveram uma maior quantidade de água do que as restantes amostras, o que se coaduna com a sua maior porosidade. Com efeito, foi obtida uma relação praticamente linear e bastante significativa ( $R^2=0,97$ ) entre a porosidade e o teor em água das amostras (Figura 5.7), o que seria de esperar uma vez que argamassas com maior espaço poroso terão mais espaço disponível para reter água (Rato, 2006). Como as amostras J/I apresentam os maiores teores em água, terão mais apetência para absorver água e, desta forma, para se degradarem por ação de ciclos gelo/degelo, de humedecimento/secagem ou por cristalização de sais solúveis, do que as restantes amostras.

Tabela 5.6 – Absorção de água por imersão (após 48h) das amostras de argamassa antiga

Amostras	J/I/1.1	J/I/1.2	J/I/2.2	J/I/3.2	J/C/1.1	EJMS 1.1	RTS 1.2	ARP
Teor em água [%]	18,8	16,6	17,0	14,4	12,8	11,7	11,5	12,1

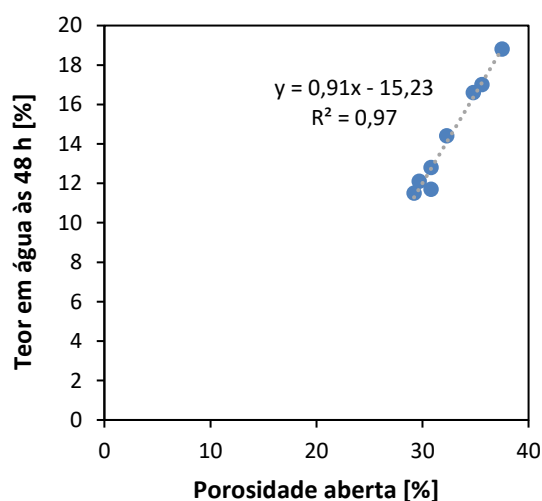


Figura 5.7 – Correlação entre a porosidade aberta e o teor em água às 48 h

### 5.2.3. Determinação da composição

#### 5.2.3.1. *Resíduo insolúvel por dissolução ácida*

Na Tabela 5.7 apresentam-se os resultados obtidos na determinação do resíduo insolúvel e a determinação da relação ligante/agregado (em massa) estimada.

As relações ligante/agregado obtidas (1:2 a 1:4 em massa) encontram-se dentro da gama de traços geralmente encontrados em argamassas pertencentes a estruturas religiosas ou militares (Tabela 5.8). Estas normalmente apresentam maior quantidade em ligante do que aquelas presentes em edifícios antigos correntes, por serem consideradas estruturas nobres e por isso haver mais cuidado na sua construção.

Tabela 5.7 – Resultado do resíduo insolúvel das amostras de argamassa antiga e traço estimado

<b>Amostras</b>	<b>Resíduo insolúvel [%]</b>	<b>Traço estimado (em massa)</b>
<b>J/I/3.2</b>	72,10	1:3
<b>J/C/1.1</b>	80,06	1:4
<b>EJMS 1.1</b>	67,60	1:2
<b>RTS 1.2</b>	73,60	1:3

Relativamente ao período construtivo, nota-se que as argamassas mais antigas apresentam traços tendencialmente mais ricos em agregado, especialmente a amostra J/C/1.1. De referir que, anteriormente, se verificou que esta argamassa apresentou a menor massa volúmica real.

Tabela 5.8 – Traço estimado de argamassas de revestimento de edifícios militares e religiosos, determinados por diversos autores [Fonte – adaptado de Magalhães *et al.* (2006), Veiga (2012) e Silva *et al.* (2015)]

<b>Referência</b>	<b>Tipo de Edifício</b>	<b>Função da argamassa</b>	<b>Traço estimado (em massa)</b>	
Magalhães e Veiga (2006)	<b>Militar</b>	Revestimento exterior	1:3	
Magalhães e Veiga (2006)			<b>Mértola</b>	1:3
Veiga (2012)			<b>Amieira do Tejo</b>	1:2
Silva <i>et al.</i> (2015)			<b>Forte de N.ª S.ª da Luz</b>	1:2; 1:3; 1:4; 1:5; 1:6
Veiga (2012)	<b>Religioso</b>		<b>Forte de N.ª S.ª da Graça</b>	1:2,5;4,5
Veiga (2012)			<b>Catedral de Elvas</b>	1:4
Matos (2021)			<b>Igreja matriz de Mértola</b>	1:2; 1:2,3; 1:2,4; 1:6,2
		<b>Convento dos Capuchos</b>		

### 5.2.3.2. Análise granulométrica do resíduo insolúvel

As curvas granulométricas obtidas para os resíduos insolúveis encontram-se representadas na Figura 5.8. Como se pode observar, as curvas são bastante próximas entre si, denotando agregados com granulometria bastante extensa, mas em que a maior parte das partículas apresenta diâmetros compreendidos entre os 0,0625 e os 4 mm. No entanto, o agregado da amostra J/I/3.2 revelou ser o mais grosso, apresentando uma maior quantidade de material retido nas malhas de maior dimensão, enquanto o agregado presente da amostra J/C/1.1 mostrou ser o mais fino. Estas considerações podem ser confirmadas visualmente na Figura 5.9, que retrata os resíduos insolúveis obtidos.

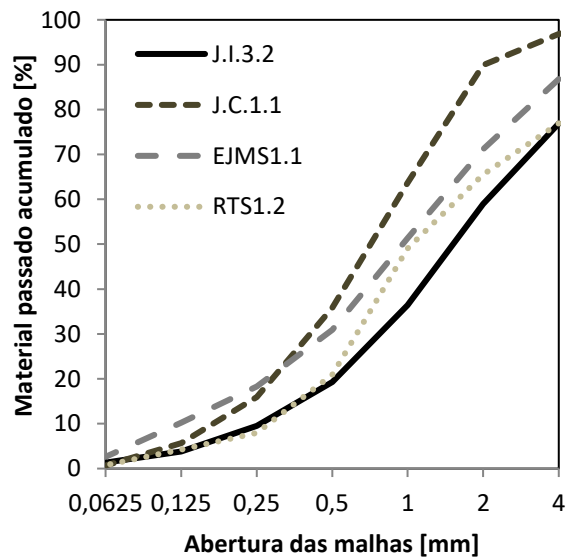


Figura 5.8 – Curvas granulométricas dos resíduos insolúveis das amostras de argamassa antigas

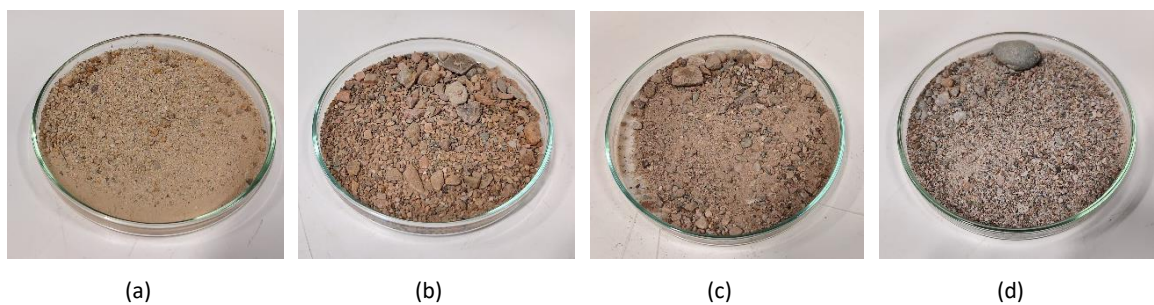


Figura 5.9 – Aspetto dos resíduos insolúveis das amostras (a) J/C/1.1; (b) J/I/3.2; (c) EJMS/1.1; (d) RTS/1.2

### 5.3. Argamassas de substituição

#### 5.3.1. Formulações estudadas

Com base na caracterização efetuada, no subcapítulo 5.2, para as amostras de argamassa antiga, foram definidas as formulações de argamassa de substituição. Como tinham sido obtidos anteriormente traços (em massa) compreendidos entre 1:2 e 1:4, foram seleccionados estes extremos como os traços das duas formulações de substituição a serem estudadas. As razões água/ligante das argamassas 1:2 e 1:4 foram, respetivamente, de 0,80 e 0,95.

Como ligante, foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó (baridade de  $590 \text{ kg/m}^3$ ), dada a sua maior facilidade de utilização face a uma cal em pasta. Como agregado, pretendia-se usar areia do rio Guadiana, local de onde se pensa derivarem os agregados presentes nas amostras antigas, dada a proximidade do rio à Fortaleza de Juromenha. No entanto, não se conseguiu obter agregados dentro da gama de dimensões requerida no local nem junto de fornecedores. Dada esta impossibilidade, foi utilizado um agregado silicioso da Soarvamil (baridade de  $1550 \text{ kg/m}^3$ ), com uma curva granulométrica dentro da gama das obtidas para os resíduos insolúveis das amostras, como ilustra a Figura 5.10. Contudo, é assumido que o facto de a areia ter uma pequena percentagem de argila pode, juntamente com a elevada proporção de cal aérea, originar uma eventual fissuração por retração das argamassas de revestimento.

Procurou-se assim utilizar materiais semelhantes aos originais de forma a tentar garantir a compatibilidade física, mecânica, química/mineralógica e estética entre as argamassas de substituição e as argamassas antigas.

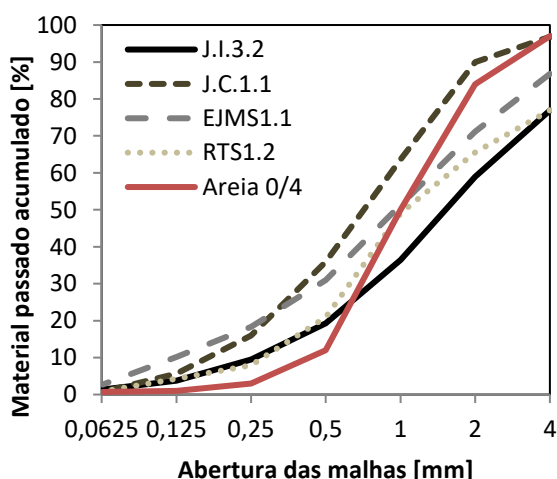


Figura 5.10 – Comparação entre as curvas granulométricas da areia utilizada nas argamassas de substituição (areia 0/4) e dos resíduos insolúveis das amostras de argamassa antiga

### 5.3.2. Caracterização colorimétrica

Os valores obtidos no ensaio da caracterização colorimétrica para as argamassas de substituição, são apresentados na Tabela 5.9, que apresenta o valor médio ( $\pm$  desvio padrão) das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e de  $C^*$ . Os mesmos resultados são representados graficamente nas Figuras 5.11 e 5.12.

Tabela 5.9 – Caracterização colorimétrica das amostras de argamassas de substituição

Provete	1:2E	1:4E
$a^*$	$0,95 \pm 0,22$	$1,39 \pm 0,3$
$b^*$	$4,45 \pm 1,23$	$5,28 \pm 1,04$
$L^*$	$92,2 \pm 0,34$	$90,4 \pm 3,05$
$C^*$	$4,55 \pm 0,73$	$5,46 \pm 0,65$

Os resultados obtidos permitem perceber que as argamassas de substituição apresentam cores semelhantes, sendo a argamassa 1:2 ligeiramente mais clara (maior valor de  $L^*$  e menores valores para as restantes coordenadas) devido à maior quantidade de cal do que a argamassa 1:4. Foram também obtidos, para ambas as formulações, valores positivos para as coordenadas  $a^*$  e  $b^*$ , mas reduzidos (cerca de 1 para  $a^*$  e entre 4 e 5 para  $b^*$ , sendo que a escala vai de -100 a 100 para estas coordenadas), o que permite situar a tonalidade das argamassas no espaço de cor entre o encarnado e o amarelo, nomeadamente na cor bege claro.

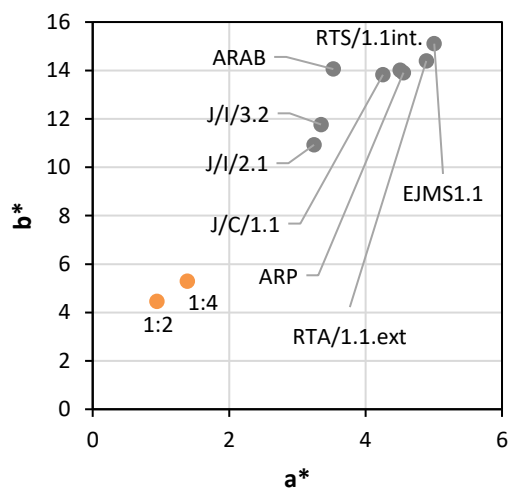


Figura 5.11 – Coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  obtidas para as argamassas de substituição e comparação com as obtidas para as amostras de argamassa antiga

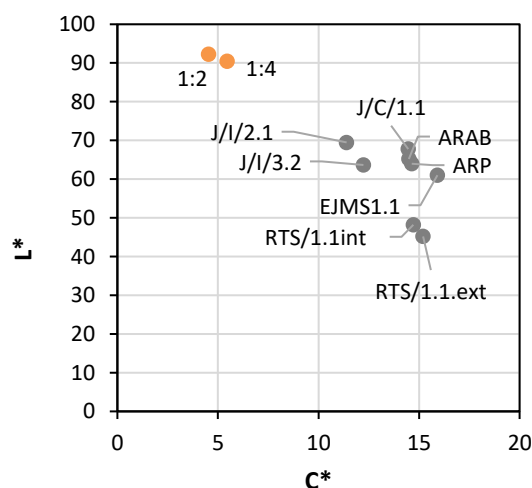


Figura 5.12 – Coordenadas  $C^*$  e  $L^*$  obtidas para as argamassas de substituição e comparação com as obtidas para as amostras de argamassa antiga

As Figuras 5.11 e 5.12 permitem também comparar a cor das argamassas de substituição com a das argamassas antigas. A sua análise permite concluir que as argamassas novas apresentam uma tonalidade mais clara e menos amarelada do que as amostras antigas. De notar que estas últimas poderão apresentar uma tonalidade mais amarelada devido à utilização de materiais constituintes diferentes (por exemplo, cal menos pura, agregados possivelmente com uma componente argilosa ou não lavados) ou devido à presença material orgânico não totalmente removido durante a fase de limpeza.

As diferenças de cor registadas entre as argamassas de substituição e as antigas levam a crer que seria benéfico para a compatibilidade estética usar, por exemplo, uma areia ligeiramente mais argilosa, isto é, com uma cor mais amarelada (respeitando os limites normativos).

### 5.3.3. Caracterização física

#### 5.3.3.1. *Absorção de água por capilaridade*

Apresenta-se, na Figura 5.13, as curvas de absorção capilar obtidas para os dois tipos de argamassas de substituição estudadas.

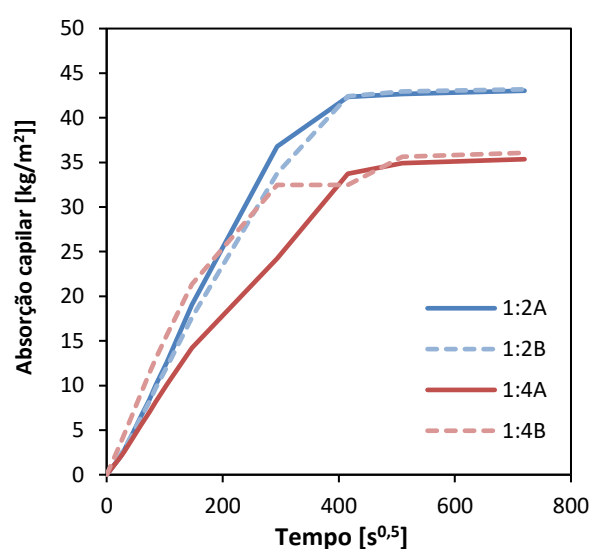


Figura 5.13 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de substituição

Como é possível observar, ambos os tipos de argamassa apresentaram curvas de absorção capilar típicas de argamassas de cal aérea e compostas por um troço inicial linear em que a absorção decorre rapidamente seguido de um troço final em que a absorção de água é bastante mais lenta. Neste caso, a fase de transição entre estes dois segmentos de reta ocorreu entre as 24 e as 48 horas de ensaio.

Comparando os dois tipos de argamassa, verifica-se que a argamassa com traço 1:2 apresentou uma maior velocidade de absorção de água, isto é, um maior coeficiente de capilaridade (Figura 5.14), bem como uma maior quantidade total de água absorvida, isto é, um maior valor assintótico (Figura 5.15), do que a argamassa com traço 1:4. Importa referir que se considerou nesta análise que o provete 1:4B poderá ser um *outlier*, como discutido abaixo.

Tendo em consideração que foram ensaiados dois provetes, foram obtidas curvas de absorção capilar muito próximas para a argamassa mais rica em ligante (1:2). Já as curvas obtidas para a argamassa 1:4, apresentaram alguma variabilidade na velocidade de absorção inicial (coeficiente de capilaridade), ainda que o valor assintótico tenha sido similar. Esta variação pode decorrer de vários fatores, tais como uma deficiente compactação da argamassa, que pode ter dado origem a vazios de grandes dimensões, ou ao surgimento de fissuração por retração num dos provetes. Com efeito, ao desmoldar os provetes verificou-se que alguns apresentam algumas fissuras finas decorrentes da retração por secagem.

Comparando estes valores com os das argamassas antigas, verifica-se que as argamassas de substituição apresentaram valores para o coeficiente de capilaridade (0,096 a 0,153 kg/m<sup>2</sup>.s<sup>0,5</sup>) dentro da gama de valores registada para as argamassas antigas (0,037 a 0,192 kg/m<sup>2</sup>.s<sup>0,5</sup>).

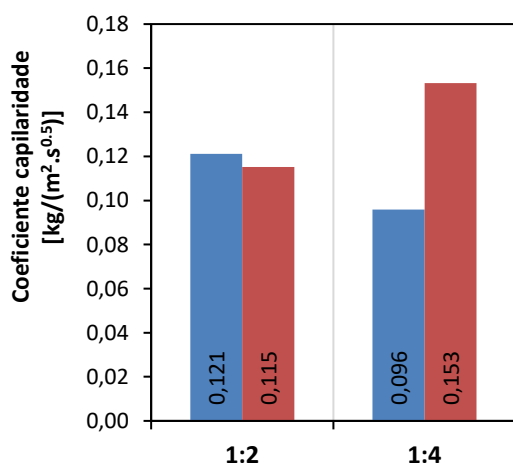


Figura 5.14 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as argamassas de substituição

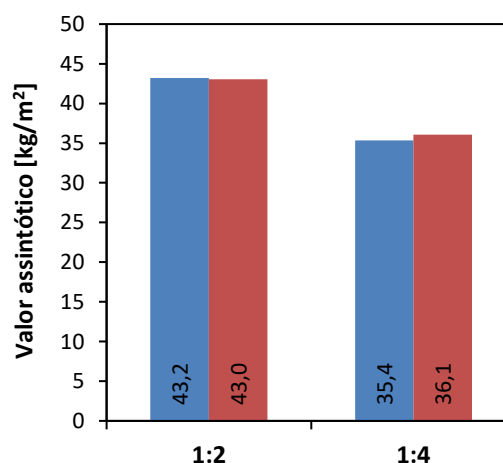


Figura 5.15 – Valores assintóticos obtidos para as argamassas de substituição

### 5.3.3.2. Porosidade aberta e massas volúmicas real e aparente

Os valores obtidos no ensaio de porosidade aberta encontram-se representados na Figura 5.16. A partir da sua observação, é possível concluir que as argamassas com traço 1:2 apresentaram valores de porosidade aberta superiores ao das argamassas com traço mais pobre em ligante, o que está de acordo com o verificado por Lanas e Alvarez (2003).

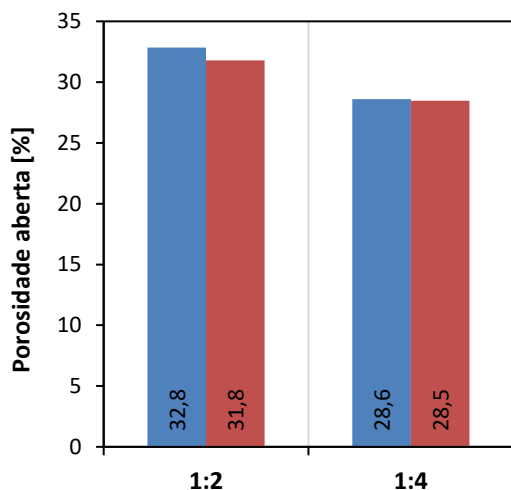


Figura 5.16 – Porosidade aberta obtida para as argamassas de substituição

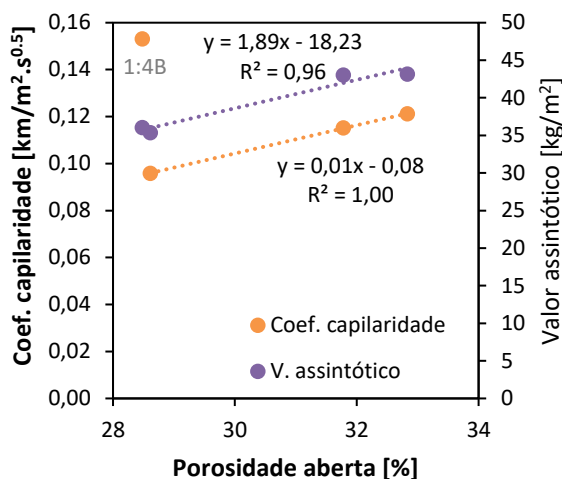


Figura 5.17 – Correlação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade e entre a porosidade aberta e o valor assintótico

Verifica-se também neste caso uma boa correlação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico, sendo que a valores superiores do primeiro, correspondem valores superiores das outras propriedades (Figura 5.17). Como já referido, o valor obtido para o coeficiente de capilaridade do provete 1:4B parece ser um *outlier*, pelo que foi excluído da regressão linear.

Se se cruzar os dados das argamassas de substituição com os obtidos para as argamassas antigas, é possível concluir que as amostras J/C/1.1 e EJMS 1.1 possuem uma porosidade idêntica (cerca de 31%) às da argamassa de substituição 1:2, enquanto as restantes, em particular as amostras RTS1.2 e ARP apresentam valores de porosidade (cerca de 29%) mais semelhante à da argamassa de substituição 1:4.

No que diz respeito à massa volúmica real das argamassas de substituição, cujos valores são apresentados na Tabela 5.10, verificou-se que os valores obtidos para ambos os tipos de argamassa são muito semelhantes. Já os valores de massa volúmica aparente (Tabela 5.10) são superiores nas argamassas menos porosas (Figura 5.16), como seria de esperar. Ambos estão dentro da gama de valores apresentada pelas argamassas antigas.

Tabela 5.10 – Massas volúmicas real e aparente obtidas para as argamassas de substituição

Provetes	1:2C	1:2D	1:4C	1:4E
Massa volúmica real [kg/m³]	2623	2620	2629	2620
Massa volúmica aparente [kg/m³]	1762	1788	1874	1874

### 5.3.3.3. Absorção de água por imersão (após 48 horas)

Na Tabela 5.11 apresentam-se os resultados da absorção de água após 48 horas em imersão das argamassas de substituição. Verificou-se que a argamassa de substituição com traço 1:2 apresentou um maior teor em água, relativamente à argamassa com traço 1:4, o que se coaduna com a sua maior porosidade e valor assintótico (Figuras 5.15 e 5.16). Contudo, os valores são ligeiramente superiores aos obtidos por Silva *et al.* (2022), para argamassas de cal sujeitas ao mesmo tipo de cura, provavelmente por as argamassas estudadas terem uma maior proporção de ligante do que as do trabalho citado (foi utilizado um traço de 1:5 em massa).

Tabela 5.11 – Absorção de água por imersão (após 48h) obtida para as argamassas de substituição

Provetes	1:2A	1:2F	1:4A	1:4F
Teor em água [%]	15,3	13,7	9,4	12,0
Média	14,5		10,7	

Comparando estes valores com os das argamassas antigas, verifica-se que a gama de valores obtidos está próxima dos valores determinados para as amostras menos permeáveis (J/I/3.2, J/C/1.1, EJMS 1.1, RTS 1.2 e ARP).

### 5.3.4. Caracterização mecânica

#### 5.3.4.1. Resistência à tração por flexão

Apresentam-se, na Tabela 5.12, os resultados da resistência à tração por flexão das argamassas de substituição. Como pode ser observado, ambos os tipos de argamassa apresentam valores similares de resistência. De acordo com Lanas e Alvarez (2003), que estudaram argamassas de cal aérea com diversos traços, a resistência à flexão é maior em argamassas com maior teor de ligante, o que se verifica neste caso, apesar de a diferença não ser muito significativa.

Os valores obtidos são superiores aos obtidos pela maioria dos autores, porque neste caso se sujeitou as argamassas a carbonatação acelerada. Silva *et al.* (2022), apesar de terem utilizado as mesmas condições de cura no seu trabalho, obtiveram menores valores de resistência à flexão também porque utilizaram um traço mais pobre em ligante (1:5 em massa).

Tabela 5.12 – Resistência à tração por flexão obtida para as argamassas de substituição

Provetes	1:2A	1:2B	1:2C	1:2D	1:2E	1:2F
R. tração por flexão (MPa)	1,97	2,13	2,67	2,32	2,36	1,74
Média ± desvio padrão	2,20 ± 0,33					

Provetes	1:4A	1:4B	1:4C	1:4D	1:4E	1:4F
R. tração por flexão (MPa)	2,12	1,88	2,26	2,13	2,05	2,28
Média ± desvio padrão	2,12 ± 0,15					

Na bibliografia são indicados como adequados para a resistência à flexão de argamassas de substituição valores inferiores a 0,8 MPa (Veiga *et al.*, 2001), mas obtidos em condições de cura em ambiente normal e aos 90 dias de idade, não sendo por isso comparáveis aos valores obtidos neste trabalho. Já valores para a resistência à flexão de argamassas antigas são difíceis de encontrar, ainda que Válek e Veiga (2005) reportem valores até 1,2 MPa e Moropoulou *et al.* (2005) valores inferiores a 0,35 MPa, os quais são bastante inferiores aos valores obtidos.

#### 5.3.4.2. Resistência à compressão

Os resultados da resistência à compressão das argamassas de substituição são apresentados na Tabela 5.13. Ao contrário do verificado na resistência à flexão, é notório que a argamassa com traço 1:2 apresenta valores significativamente superiores (aumento de 71%) de resistência à compressão face às argamassas com traço mais pobre em ligante. Estes resultados estão de acordo com os reportados por Lanas e Alvarez (2003), que também registaram um incremento na resistência à compressão de argamassas de cal aérea quando o seu teor em ligante aumenta. A maior resistência das argamassas mais porosas (Figura 5.16) pode justificar-se como uma carbonatação mais completa, de acordo com os autores citados acima. Porém, tal como o verificado para a resistência à tração por flexão, os resultados obtidos são superiores aos revelados por estes autores e por Silva *et al.* (2022).

Dada a impossibilidade de se fazer a caracterização mecânica às amostras de argamassa antiga (devido às suas dimensões reduzidas e irregularidade), verificou-se que na bibliografia são indicados valores de resistência à compressão de argamassas antigas de cal aérea até cerca de 7 MPa (Papayianni, 2004; Válek e Veiga, 2005; Damas *et al.*, 2016). Neste caso, a argamassa 1:4 poderia ser considerada apropriada, por apresentar uma resistência à compressão dentro dessa gama. Contudo, Veiga *et al.* (2001) propõe como adequada a gama de valores 0,4 a 2,5 MPa para argamassas de revestimento e 0,6 a 3 MPa para argamassas de refechamento de juntas, mas

obtidas em condições de cura em ambiente normal e aos 90 dias de idade, não sendo por isso comparáveis aos valores obtidos neste trabalho.

Tabela 5.13 – Resistência à compressão obtida para as argamassas de substituição

<b>Provetes</b>	<b>1:2A</b>	<b>1:2B</b>	<b>1:2C</b>	<b>1:2D</b>	<b>1:2E</b>	<b>1:2F</b>
<b>R. compressão (MPa)</b>	10,32	10,20	8,23	7,82	10,11	11,36
Média ± desvio padrão	9,67 ± 1,36					
<b>Provetes</b>	<b>1:4A</b>	<b>1:4B</b>	<b>1:4C</b>	<b>1:4D</b>	<b>1:4E</b>	<b>1:4F</b>
<b>R. compressão (MPa)</b>	6,18	5,43	5,18	4,84	5,96	6,44
Média ± desvio padrão	5,67 ± 0,62					



## 6. Conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros

### 6.1. Conclusões

O estudo realizado teve como objetivo a caracterização de amostras de argamassa de revestimento pertencentes à fortaleza de Juromenha (Alentejo, Portugal). Adicionalmente, pretendeu fornecer uma contribuição para a sua conservação e reabilitação através do estudo de potenciais argamassas de substituição.

Para tal, foi desenvolvido um amplo programa experimental. Numa primeira fase, procedeu-se à recolha das amostras de argamassa, à sua limpeza e catalogação. Posteriormente, procedeu-se a uma caracterização colorimétrica e física (que incluiu ensaios de absorção de água por capilaridade, porosidade aberta, massas volúmicas real e aparente e de absorção de água às 48 horas) das amostras recolhidas, bem como à avaliação da sua composição (através da determinação do resíduo insolúvel e sua peneiração e caracterização visual). Importa referir que é possível que algumas das amostras estudadas (J/I/2, J/I/3, J/C, ARP, EJMS e RTS) não sejam materiais originais, sendo antes fruto de intervenções de conservação na segunda metade do século XX. Adicionalmente, não é conclusivo que as mesmas tenham sido formuladas exclusivamente com cal, podendo conter uma pequena percentagem de ligante hidráulico, sendo necessário recorrer a análises químicas para obter a respetiva composição. A exceção ao referido é a amostra do tipo J/I/1, que se julga efetivamente ser mais antiga (original).

Em seguida, e com base nos resultados da caracterização das amostras, foram definidas e caracterizadas as argamassas de substituição. Estas últimas foram sujeitas a uma caracterização física e mecânica semelhante à das argamassas antigas, de forma a possibilitar a comparação das suas propriedades, e a uma caracterização mecânica (ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão).

A caracterização das amostras antigas permitiu retirar as seguintes conclusões principais:

- 1) As amostras antigas, retiradas de diversos locais e de diferentes períodos construtivos, apresentam uma grande variabilidade de características colorimétricas e físicas. No entanto, das amostras analisadas, a J/I/1.1, a J/I/1.2 e a J/I/2.2 apresentaram maior porosidade e permeabilidade à água do que as restantes;
- 2) No que diz respeito à sua composição, as amostras antigas mostraram ser compostas por cal aérea e areia siliciosa. A caracterização granulométrica do resíduo insolúvel permitiu observar que as curvas granulométricas dos agregados eram bastante extensas (maioria

das partículas com diâmetros entre os 0,0625 e os 4 mm), e próximas entre si. Os traços aproximados em massa obtidos por dissolução ácida variaram entre 1:2 e 1:4 (cal: agregado), os quais estão dentro da gama de traços geralmente obtida para argamassas pertencentes a estruturas religiosas ou militares. Verificou-se também uma relação entre a época construtiva e as argamassas mais antigas que apresentam traços mais ricos em agregado.

Como base nos resultados anteriores, foram definidas e estudadas duas argamassas de substituição com traços iguais aos extremos do intervalo de traços obtidos (1:2 e 1:4), utilizando cal aérea hidratada em pó e areia siliciosa comercial com granulometria próxima da utilizada nas argamassas antigas. Comparando as argamassas de substituição, concluiu-se que a argamassa 1:2 é mais porosa e apresenta maior capacidade de absorção de água (por capilaridade e às 48 horas), do que argamassa 1:4, mas é mais resistente à compressão, corroborando as conclusões de outros autores.

Os resultados permitiram também efetuar a comparação das propriedades das amostras de argamassa antigas com as obtidas para as argamassas de substituição, sendo possível retirar as seguintes conclusões:

- 1) A caracterização colorimétrica permitiu verificar que as argamassas de substituição apresentam uma tonalidade mais clara e menos amarela que as argamassas antigas. Este facto pode estar relacionado com a utilização de materiais menos puros nas argamassas antigas, como a cal e agregados mais argilosos ou mal lavados, ou até a presença de algum material orgânico, que lhes atribuiu uma tonalidade amarelada;
- 2) O ensaio de absorção de água por capilaridade permitiu concluir que as argamassas de substituição apresentam um coeficiente de capilaridade (valores de 0,096 a 0,153  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ ) dentro da gama de valores registada para as argamassas antigas (0,037 a 0,192  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ );
- 3) Relativamente ao ensaio de porosidade aberta, concluiu-se que as amostras J/C/1.1 e EJMS/1.1, apresentam uma porosidade idêntica à da argamassa de substituição 1:2 (cerca de 31%). Já as restantes argamassas, em especial as amostras RTS/1.2 e ARP, apresentavam valores de porosidade (cerca de 29%) próximos do das argamassas de substituição 1:4;
- 4) Já ao nível da absorção de água às 48 horas, verificou-se que os valores obtidos (11 a 15%) para as argamassas de substituição estão próximos dos valores determinados para as

amostras de argamassa antiga menos permeáveis (J/I/3.2, J/C/1.1, EJMS/1.1, RTS 1.2 e ARP);

- 5) Dada a impossibilidade de efetuar a caracterização mecânica das argamassas antigas, comparou-se antes os valores obtidos para as argamassas de substituição com os reportados para argamassas antigas em outros estudos. Deste modo, verificou-se que a argamassa 1:4 seria a argamassa de substituição mais apropriada do ponto de vista da resistência à compressão, visto apresentar valores mais próximos (cerca de 5,6 MPa) da gama de resistências apontada para argamassas antigas (até cerca de 7 MPa). Contudo, a resistência à flexão por tração de ambas as argamassas de substituição aparenta ser excessiva.

## **6.2. Propostas de desenvolvimentos futuros**

O trabalho realizado e apresentado neste documento não constitui um fim em si mesmo, no que diz respeito à caracterização das argamassas antigas da fortaleza de Juromenha e de potenciais argamassas de substituição, pretendendo ser um contributo para o conhecimento dos materiais presentes na referida fortaleza e para a sua conservação. Assim, propõem-se de seguida alguns tópicos que poderão ser alvo de desenvolvimentos futuros.

Considera-se que será relevante prosseguir com a caracterização das argamassas estudadas realizando ensaios adicionais e/ou análises de caracterização mineralógica e microestrutural. Como exemplos, propõe-se a realização de análises de Difração de Raios-X, de Porosímetria por Intrusão de Mercúrio e de Microscopia Eletrónica de Varrimento. Estas análises permitiriam uma caracterização mais detalhada da composição e quantidades de cada elemento presentes nas amostras de argamassa recolhidas da fortaleza, bem como da sua microestrutura, em particular, da sua estrutura porosa. Por sua vez, este maior conhecimento, permitirá desenvolver uma segunda proposta de investigação futura e que passa pela produção de novas argamassas de substituição com uma maior aproximação às existentes. Adicionalmente, estas poderiam ser alvo de mais ensaios de caracterização, tais como ensaios de secagem ou de determinação do módulo de elasticidade.

Por fim, propõe-se alargar o âmbito do estudo, através da caracterização de argamassas (e/ou de outros materiais) pertencentes a outras fortificações da mesma época e com o mesmo sistema construtivo (por exemplo, as existentes em Alcácer do Sal, Paderne ou Moura) e assim

contribuir para incrementar o conhecimento sobre os materiais utilizados nestas épocas e neste tipo de edificações.

## Referências

Aguiar J, Pacheco P (2019). “Projeto de consolidação e restauro dos paramentos do perímetro abaluartado exterior e cerca islâmica e medieval interior”, Lisboa, Portugal.

Algarvio MP (2010). “Influência da razão água/ligante nas características das argamassas de cal aérea para rebocos de edifícios antigos”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, IST, Universidade Técnica de Lisboa: Lisboa, Portugal.

Appleton J (2003). “Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e tecnologias de intervenção”, Edições ORION: Lisboa, Portugal.

Brilhante MC (2015). “Juromenha: A chave do Guadiana – O Lugar, A Fortificação e o Futuro”, Dissertação de Mestrado em História da Arte, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa, Portugal.

Bruno P (2006). “A Fortaleza de Juromenha. Contributo para o estudo e conservação da muralha islâmica da taipa militar”, Academia: Lisboa, Portugal.

Coelho A, Torgal F, Jalali S. (2009). “A cal na construção”, Edição TechMinho – Universidade do Minho: Guimarães, Portugal.

Coradinho M (2018). “Castelo de Paderne – caracterização histórica e material”, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa: Caparica, Portugal.

Damas AL, Veiga MR, Faria P (2016). “Caraterização de argamassas antigas de Portugal – contributo para a sua correta conservação”, Congresso Ibero-Americano Património, suas Matérias e Imatérias: Lisboa, Portugal.

Delazio A, Israr A, Klatzky RL (2017). “Cross-modal correspondence between vibrations and colors”, IEEE World Haptics Conference (WHC): Munique, Alemanha.

Espanca T (1978). “Inventário Artístico de Portugal – Distrito de Évora”, Nº IX, I Vol.1, Academia Nacional de Belas Artes: Lisboa, Portugal.

Ferreira Pinto AP, Silva B, Vaz Silva D, Lamas A (2014). “Characterisation of historical mortars from the Moorish Castle in Sintra, Portugal”. 9<sup>th</sup> International Masonry Conference: Guimarães, Portugal.

Lanas J, Alvarez-Galindo JI (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, **33**(11), 1867-1876.

Magalhães AC (2002). "Patologia de Rebocos Antigos", Cadernos de Edifícios nº 2 – LNEC: Lisboa, Portugal.

Magalhães AC, Veiga MR (2006). "Avaliação da resistência de amostras de argamassas históricas recolhidas em obra - Metodologia e correlação de resultados", Relatório técnico, LNEC: Lisboa, Portugal

Margalha MG (2011). "Argamassas - Documento de apoio às aulas de Conservação e recuperação do Património", Universidade de Évora: Évora, Portugal.

Matos BRMA (2021). "Estudo de argamassas do Convento dos Capuchos", Dissertação de mestrado integrado em Engenharia Civil. IST, Universidade de Lisboa: Lisboa, Portugal.

Mendes CA (2017). "Análise comparativa de argamassas de cal", Dissertação em Reabilitação Urbana da Construção, Instituto Politécnico de Tomar: Tomar, Portugal.

Moropoulou A, Bakolas A, Anagnostopoulou S (2005). Composite materials in ancient structures, *Cement and Concrete Composites* **27**(2): 295-300.

Nogueira R, Ferreira Pinto AP, Gomes A (2016). "Rebocos á base de cal: passado e presente. Conhecimento empírico versus conhecimento científico", V Jornadas Fical, Fórum Ibérico da Cal: Lisboa, Portugal.

Papayianni I (2006). The longevity of old mortars, *Applied Physics A* **83**: 685-688.

Rato V (2006). "Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa: Caparica, Portugal.

Santos AR, Veiga MR, Silva AS, de Brito J (2016) "O papel dos agregados naturais na durabilidade das argamassas de cal", V Jornadas Fical, Fórum Ibérico da Cal: Lisboa, Portugal.

Sena da Fonseca B, Ferreira Pinto AP, Silva DV (2020). Compositional and textural characterization of historical bedding mortars from rubble stone masonries: Contribution for the design of compatible repair mortars, *Construction and Building Materials* **247**, 118627.

Silva AS, Santos AR, Veiga MR (2015). “O Forte de Nossa Senhora da Graça, Elvas Bases para uma intervenção – a caracterização dos materiais”, Relatório LNEC: Lisboa, Portugal.

Silva B (2010). “Influência da mistura ligante no desempenho de argamassas bastardas para rebocos de edifícios antigos”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, IST, Universidade de Lisboa: Lisboa: Portugal.

Silva B, Ferreira Pinto AP, Gomes A, Candeias A (2021). Effects of natural and accelerated carbonation on the properties of lime-based materials, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* **49**, 101552

Silva B, Ferreira Pinto AP, Gomes A, Candeias A (2022). Effect of air-entraining and water-repellent admixtures and of their dosage on the performance of lime mortars, *International Journal of Architectural Heritage*, **16**(4): 630-644.

Tavares ML (2009). “A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos - uma metodologia de estudo e reparação”, Tese de Doutoramento em Arquitectura, FAL, Universidade de Lisboa: Lisboa, Portugal.

Válek J, Veiga MR (2005). “Characterisation of mechanical properties of historic mortars—testing of irregular samples”, *WIT Transactions on The Built Environment*, **20**: 365-374.

Veiga MR (2012). “Argamassas de alvenarias históricas. Funções e características”, Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, Universidade Nova de Lisboa, Campus de Campolide: Lisboa, Portugal.

Veiga MR (2016). “Argamassas de cal: o que falta saber para a sua utilização em conservação e reabilitação”, V Jornadas Fical, Forum Ibérico da Cal: Lisboa, Portugal.

Veiga MR, (2003). “Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes”. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC: Lisboa, Portugal.

Veiga MR, Aguiar J, Silva AS, Carvalho F (2001). “Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings”, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar Historical Constructions*: Guimarães, Portugal.

Veiga MR, Aguiar J, Santos Silva A, Carvalho F (2004). “Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos”, *Colecção Edifícios n.º 9*, LNEC: Lisboa, Portugal.

Veiga MR, Carvalho F (2002). "Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar", Cadernos de Edifícios, nº 2 – LNEC: Lisboa: Portugal-

## **Sites consultados**

Arquivo Nacional, Torre do Tombo (2022). <https://digitarq.arquivos.pt/viewer?id=3909707> (acedido em outubro de 2022).

Ali Israr (2017). "Three-dimensional CIELAB color space where the L\* axis represents the color's lightness; B: Two-dimensional CIELAB a\*b\* plane where C represents chroma and H represents hue", [https://www.researchgate.net/publication/318751900\\_Cross\\_modal\\_correspondence\\_between\\_vibrations\\_and\\_colors/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/318751900_Cross_modal_correspondence_between_vibrations_and_colors/figures?lo=1) (acedido em novembro de 2022).

Google Earth (2022). <https://earth.google.com/> (acedido em outubro de 2022).

Nicolau de Langres (2022). [https://fortalezas.org/?ct=fortaleza&id\\_fortaleza=686](https://fortalezas.org/?ct=fortaleza&id_fortaleza=686) (acedido em outubro de 2022).

Sipa (2022). [http://www.monumentos.gov.pt/site/app\\_pagesuser/Default.aspx](http://www.monumentos.gov.pt/site/app_pagesuser/Default.aspx) (acedido em outubro de 2022).

## **Referências normativas**

EN 1015-11 (1999). "Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar", CEN: Brussels, Belgium

EN 1015-18 (2002). "Methods of test mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar", CEN: Brussels, Belgium.

EN 1015-2 (2007). "Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars", CEN: Brussels, Belgium

EN 1015-3 (1999). "Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)" CEN: Brussels, Belgium

EN 13139 (2002). "Aggregates for mortar", CEN: Brussels, Belgium

EN 196-1 (2005). "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength", CEN: Brussels, Belgium.

EN ISO/CIE 11664-4 (2019). "Colorimetria — Parte 4: CIE 1976 L\*a\*b\* espaço de cor", ISO: Genebra, Suíça.

Especificação LNEC E394 (1993). "Betões. Determinação da absorção de água por imersão - Ensaio à pressão atmosférica", LNEC: Lisboa, Portugal.

NP EN 459-1 (2002). "Cal de construção - Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade", Instituto Português da Qualidade: Caparica, Portugal.

NP EN 933-1 (2014). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método da peneiração, Instituto Português da Qualidade: Caparica, Portugal

NP EN 933-2 (1999). "Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados - Parte 2 : Determinação da distribuição granulométrica : peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas", Instituto português da Qualidade: Caparica, Portugal.

RILEM I.1 (1976). "Porosity accessible to water. RILEM 25-PEM – Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Matériaux et Construction, Vol.13, No 75", RILEM: Champs-sur-Marne, France.

RILEM II.6 (1980). "Water absorption coefficient (capillarity). RILEM 25-PEM – recommandations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Matériaux et Construction, vol. 13, No. 75", RILEM: Champs-sur-Marne, France.



## **ANEXOS**



**Anexo I**  
**Caracterização visual das amostras recolhidas**

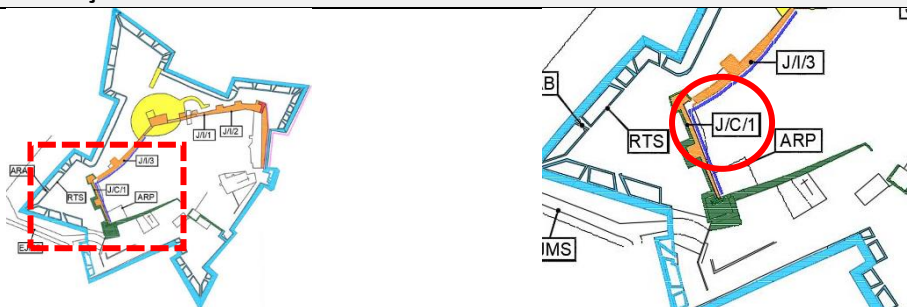
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Muralha Cristã	J/ C/ 1
AMOSTRA	J/ C/ 1.1	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra de parte do revestimento retirado, em fase de obra, da passagem entre a muralha mediável e o baluarte seiscentista. Este espaço reporta à época medieval cristã, podendo efetivamente tratar-se de argamassas mais recentes, fruto de intervenções de conservação.

### Planta de Localização



### Local da Amostra



### Amostra Original

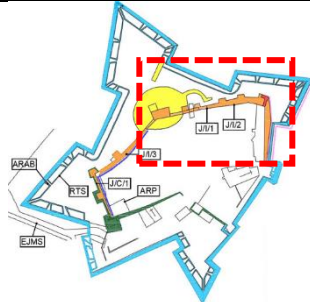
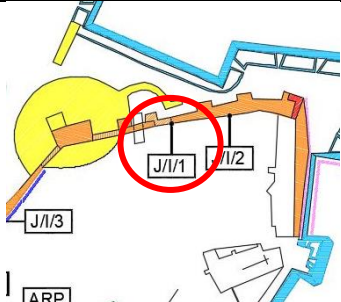





### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	1			Dimensão Aprox.			12x10cm		
Cor	amarelada			Superfície			Irregular		
Coesão	-		+		++	x	+++		
Colonização Biológica	-		+		++		+++	x	
Vazios	-		+		++	x	+++		
<b>AGREGADOS</b>									
Tipos de Agregados								Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++		Siliciosa
Nódulos de cal	-		+		++	x	+++		Cal aérea
<b>Observações</b>									

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

MATERIAL	Argamassa							REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Muralha Islâmica							J/ I/ 1
AMOSTRA	J/ I/ 1.1; J/ I/ 1.2							
<b>Descrição Sumária da Localização</b> Amostra retirada do suporte de taipa islâmica, provavelmente de revestimento de construções adossadas à muralha medieval, na primeira metade do Século XIX.								
<b>Planta de Localização</b>								
								
<b>Local da Amostra</b>				<b>Amostra Original</b>				
								
<b>Amostra Limpa</b>								
								
N.º Fragmentos	2			Dimensão Aprox.			7x4cm	
Cor	amarelada			Superfície			Irregular	
Coesão	-		+	x	++		+++	
Colonização Biológica	-		+	x	++		+++	
Vazios	-		+		++	x	+++	
<b>AGREGADOS</b>								
Tipos de Agregados							Descrição	
Areias	-		+	++	x	+++		Siliciosa
Nódulos de cal	-		+	++	x	+++		Cal aérea
<b>Observações</b>								

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

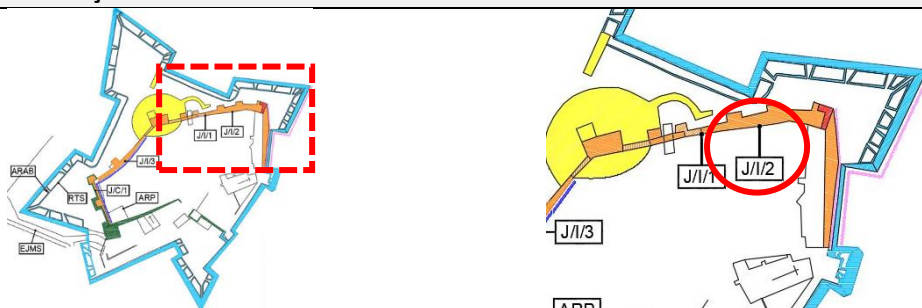
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Muralha Islâmica	J/ I/ 2
AMOSTRA		

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de taipa islâmica, provavelmente de revestimento de construções adossadas à muralha medieval, na primeira metade do Século XIX.

### Planta de Localização



### Local da Amostra



### Amostra Original



### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	1			Dimensão Aprox.			9x6cm		
Cor	amarelada			Superfície			Irregular		
Coesão	-		+		++	x	+++		
Colonização Biológica	-		+		++		+++	x	
Vazios	-		+	x	++		+++		
<b>AGREGADOS</b>									
Tipos de Agregados								Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++	Siliciosa	
Nódulos de cal	-		+		++	x	+++	Cal aérea	
<b>Observações</b>									

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

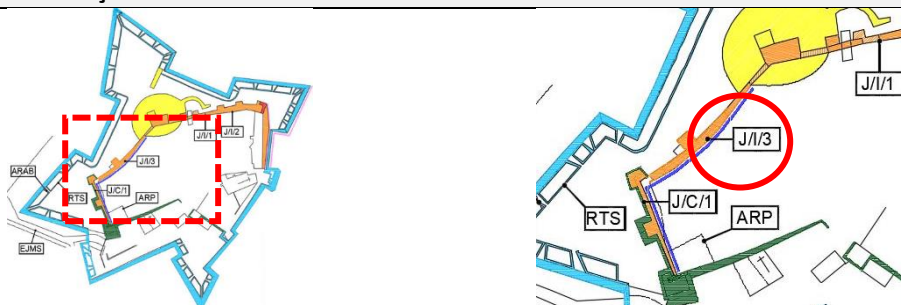
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Muralha Islâmica	J/ I/ 3
AMOSTRA	J/ I/ 3.1; J/I/3.2	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de taipa islâmica, provavelmente de revestimento de construções adossadas à muralha medieval, na primeira metade do Século XIX.

### Planta de Localização



### Local da Amostra



### Amostra Original



### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	2		Dimensão Aprox.			variadas		
Cor	amarelada		Superfície			Irregular		
Coesão	-		+		++	x	+++	
Colonização Biológica	-		+	x	++		+++	
Vazios	-		+		++	x	+++	
<b>AGREGADOS</b>								
Tipos de Agregados						Descrição		
Areias	-	+		++	x	+++		Siliciosa
Nódulos de cal	-	+		++	x	+++		Cal aérea
<b>Observações</b>								

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

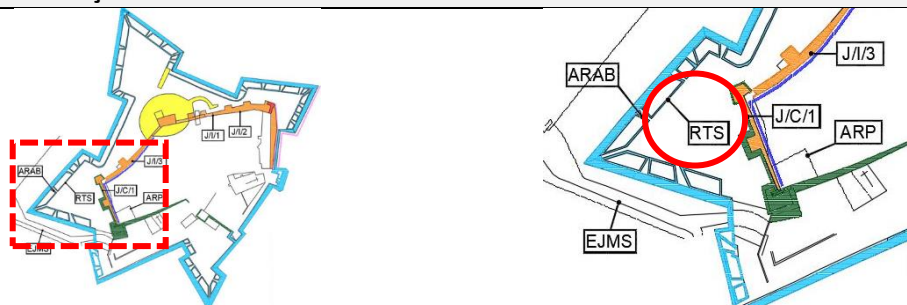
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Baluarte seiscentista	RTS
AMOSTRA	RTS1.1; RTS1.2; RTS int; RTS ext	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de taipa na zona do baluarte seiscentista, provavelmente de intervenções de conservação, realizadas pela DGEM entre 1966 e 1984.

### Planta de Localização



Local da Amostra	Amostra Original
------------------	------------------



### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	4			Dimensão Aprox.			20x8cm		
Cor	amarelada			Superfície			Irregular		
Coesão	-		+		++		x	+++	
Colonização Biológica	-		+		++			+++	x
Vazios	-		+		++		x	+++	
<b>AGREGADOS</b>									
Tipos de Agregados								Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++		Siliciosa
Nódulos de cal	-		+		++		+++	x	Cal aérea
<b>Observações</b>									

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

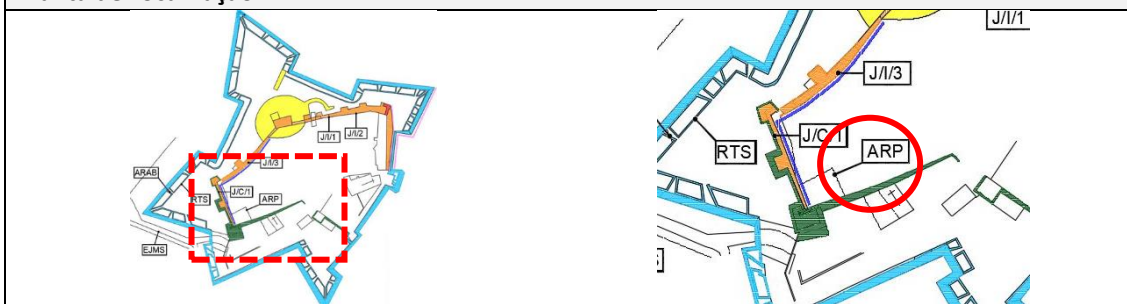
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS



MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Edificações adossadas	ARP
AMOSTRA	ARP	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de pedra de construção adossada ao interior da muralha medieval, podendo ter origem na primeira metade do Século XIX, ou de posteriores intervenções de conservação, realizadas pela DGEM entre 1966 e 1984.

### Planta de Localização



Local da Amostra	Amostra Original
	

### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	1			Dimensão Aprox.			20x20cm	
Cor	amarelada			Superfície			Irregular	
Coesão	-		+		++		+++	x
Colonização Biológica	-	x	+		++		+++	
Vazios	-		+	x	++		+++	
<b>AGREGADOS</b>								
Tipos de Agregados							Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++	Siliciosa
Nódulos de cal	-		+	x	++		+++	Cal aérea
<b>Observações</b>								

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

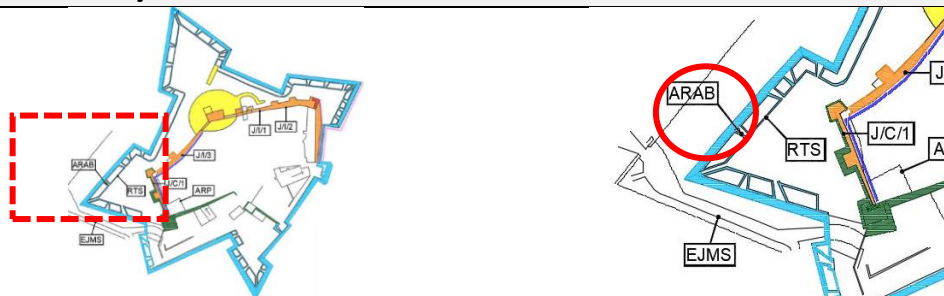
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Baluarte seiscentista	ARAB
AMOSTRA	ARAB	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de pedra na zona do baluarte seiscentista, provavelmente de intervenções de conservação, realizadas pela DGEM entre 1966 e 1984.

### Planta de Localização



Local da Amostra	Amostra Original
	

### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	1				Dimensão Aprox.			20x20cm	
Cor	amarelada				Superfície			Irregular	
Coesão	-		+		++			+++	x
Colonização Biológica	-		+		++		x	+++	
Vazios	-		+	x	++			+++	
<b>AGREGADOS</b>									
Tipos de Agregados								Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++	Siliciosa	
Nódulos de cal	-		+	x	++		+++	Cal aérea	
<b>Observações</b>									

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais

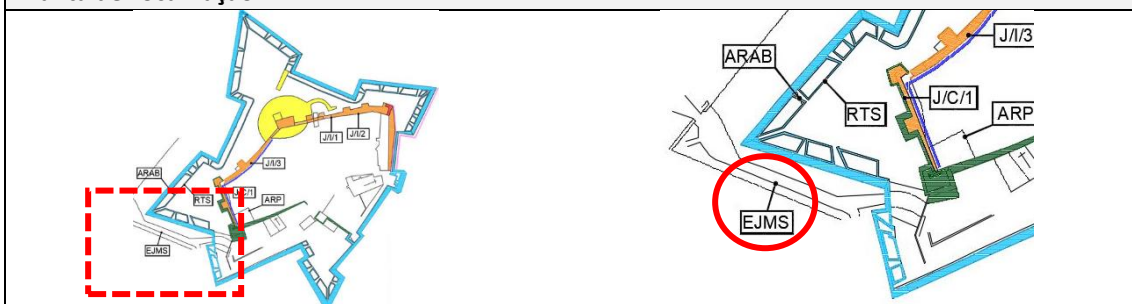
## CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

MATERIAL	Argamassa	REF.
LOCAL	Fortaleza Juromenha/ Baluarte seiscentista	EJMS
AMOSTRA	EJMS	

### Descrição Sumária da Localização

Amostra retirada do suporte de pedra na zona da entrada do baluarte seiscentista, podendo estar na sua origem, ou eventualmente objeto de intervenções de conservação, realizadas pela DGEM entre 1966 e 1984.

### Planta de Localização



### Local da Amostra



### Amostra Original



### Amostra Limpa



N.º Fragmentos	3			Dimensão Aprox.			variadas		
Cor	amarelada			Superfície			Irregular		
Coesão	-		+		++	x	+++		
Colonização Biológica	-		+		++	x	+++		
Vazios	-		+		++	x	+++		
<b>AGREGADOS</b>									
Tipos de Agregados								Descrição	
Areias	-		+		++	x	+++	Siliciosa	
Nódulos de cal	-		+		++	x	+++	Cal aérea	
<b>Observações</b>									

- mínimo; + menos; ++ médio; +++ mais



**Anexo II**  
**Ficha Técnica da cal**

**1. Código de identificação único do produto-tipo:**

Cal Hidratada EN 459-1 CL 80-S

**2. Utilização(ões) prevista(s):**

Preparação de ligante para argamassa para alvenaria, rebocos e estuques, para produção de outros produtos de construção e para utilizações de engenharia civil;



07

**3. Fabricante:**

 Calcidrata – Indústrias de Cal, S.A.  
 Estrada 5 de Outubro, Pé da Pedreira, 2025-161 Alcanede  
 Telefone: 243 40 90 30 | Fax: 243 40 90 39 | email: calcidrata@calcidrata.pt | web: www.calcidrata.pt

**5. Sistema(s) de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP):**

Sistema 2+

**6A. Norma harmonizada:**

EN 459-1:2010

**Organismo(s) notificado(s):**

APCER – Associação Portuguesa de Certificação, organismo notificado n.º 0866

**7. Desempenho(s) declarado(s):**

Características essenciais:		Desempenho	Especificação Técnica
Finura (resíduo em % de massa)	0.09 mm	≤ 7	EN 459-1:2010
	0.2 mm	≤ 2	
Penetração / água necessária (mm)		> 10 e < 50	
Expansibilidade (mm)		≤ 20	
Teor de ar (%)		≤ 12	
Água livre (%)		≤ 2	
Cal disponível (% em massa)		≥ 65	
SO <sub>2</sub> (% em massa)		≤ 2	
CO <sub>2</sub> (% em massa)		≤ 7	
CaO + MgO (% em massa)		≥ 80	
MgO (% em massa)		≤ 5	

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.

A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (UE) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do fabricante:


**CALCIDRATA**  
 indústrias de cal, s.a.  
 Em Pé da Pedreira, 10 de Julho de 2019  
 O Administrador


 António M. da Piedade Pereira  
 Administrador



**FICHA DE ESPECIFICAÇÕES DE PRODUTO  
CAL HIDRATADA NORMAL**

Código: DSG.30.3  
Edição: 03  
Data: 19-10-2017

PRODUTO: Cal Hidratada  
REFERÊNCIA INTERNA: CHN

**Especificações / Informações:**

ANÁLISE QUÍMICA E FÍSICA		
Parâmetro	Valores Típicos	Metodologia
Humidade	≤ 1.5	Gravimetria
Massa específica aparente	de ≥ 300 kg/m <sup>3</sup> a 600 kg/m <sup>3</sup>	Laboratório Exterior
Hidróxido de Cálcio (expresso em % de Ca(OH) <sub>2</sub> )	≥ 83.0%	
Carbonato de Cálcio (expresso em % de CaCO <sub>3</sub> )	≤ 9.0%	
Óxido de Manganês (expresso em % de MnO <sub>2</sub> )	≤ 0.5%	
Silica (expresso em % de SiO <sub>2</sub> )	≤ 4.0%	
Alumina (expresso em % de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	≤ 2.0%	
Ferro (expresso em % de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	≤ 1.5%	
Matéria insolúvel em água	≤ 17%	
Arsénio (As)	≤ 5 mg/kg	
Cádmio (Cd)	≤ 2 mg/kg	
Crómio (Cr)	≤ 20 mg/kg	
Mercurio (Hg)	≤ 0.3 mg/kg	
Níquel (Ni)	≤ 10 mg/kg	
Chumbo (Pb)	≤ 10 mg/kg	
Antimónio (Sb)	≤ 3 mg/kg	
Selénio (Se)	≤ 3 mg/kg	

ANÁLISE FÍSICA				
Parâmetro	Valores Típicos		Metodologia	
Granulometria:	% De Amostra Retida	% De Amostra Passada Acumulada	Laboratório Interno	
Malha do peneiro (mm)	0,6	≤ 0,1		≥ 99,9
	0,09	≤ 5,5		≥ 94,4
	Fundo	≥ 94,4		

**OBSERVAÇÕES:**

- > Este produto encontra-se em conformidade com os limites estipulados pela norma EN 12518:2014 – "Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - High-calcium lime", que estabelece os critérios de pureza específicos dos aditivos alimentares, classificando-a de Classe 3, Grau 3-C, Tipo 1.
- > Validade 6 meses.
- > Armazenamento – Ao abrigo da luz e da humidade.

	NOME	DATA	ASSINATURA
Elaborado por:	Célia Martins	19-10-2017	
Aprovado por:	Nuno Baptista	19-10-2017	



**Anexo III**  
**Ficha Técnica da areia amarela**

Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

**CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO**

**Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>**

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100	100	100
6,3	100	98	100
4	97	92	99
2	85	65	99
1	52	32	72
0,5	12		
0,25	3	0	23
0,125	1		
0,063	0,4	0,0	3,0

<sup>1)</sup> Valores em percentagem de passados

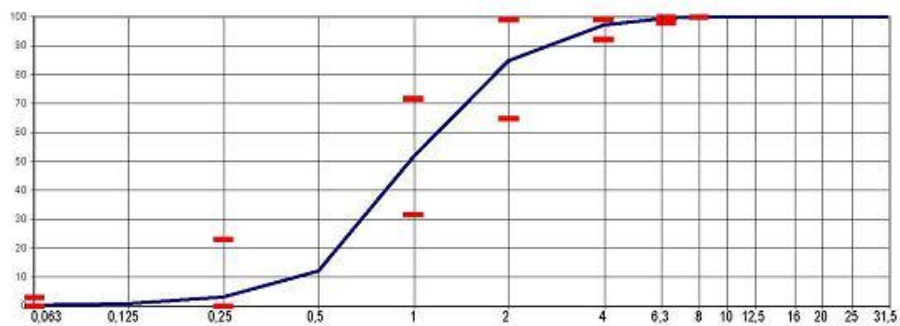
**Controlo da produção**

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,49	2,99	3,99
CF	3,81	3,31	4,31

**Outras características**

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	<b>0/4</b>	
Granulometria	G <sub>85</sub>	G <sub>90</sub> -G <sub>Tc20</sub>
Massa Volumétrica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>02</sub>	
Enxofre total	0,07%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

NA- Não aplicável DND-Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

