



**Patrícia Santos Pascoal**

Licenciada

**Estudo de Produtos para Conservação de  
Revestimentos Antigos:  
Consolidação e Reintegração Cromática**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil  
– Perfil de Construção

Orientador: Doutora Maria do Rosário Veiga, Investigadora Principal,  
Chefe do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, LNEC

Co-orientador: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues,  
Professora Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques  
Arguente: Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato  
Vogais: Doutora Maria do Rosário Veiga  
Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



## **Estudo de Produtos para Conservação de Revestimentos Antigos: Consolidação e Reintegração Cromática**

“Copyright” Patrícia Santos Pascoal, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o final de um longo percurso, e o qual contou com a colaboração de várias pessoas a quem não posso deixar de prestar os meus sinceros agradecimentos.

À minha orientadora científica Doutora Maria do Rosário Veiga, pela orientação, disponibilidade e partilha de conhecimentos ao longo desta etapa. À minha co-orientadora científica Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, pela sugestão e incentivo em aceitar este tema de dissertação e pela orientação e disponibilidade sempre demonstradas. Foi especialmente gratificante ver o entusiasmo manifestado por ambas com os resultados obtidos com a realização deste trabalho. Toda a revisão e correcção dos textos e conteúdos também não teria sido possível sem a colaboração de ambas as orientadoras científicas.

Ao bolseiro do projecto Giovanni Borsoi, pelo apoio prestado na realização de toda a campanha experimental, pelas sugestões e partilha de conhecimento. À Sofia Malanho, pelos conselhos e apoio manifestado durante a minha permanência no NRI (LNEC) para a realização deste trabalho. Aos técnicos Bento Sabala e Ana Maria Duarte pela ajuda na realização de alguns ensaios. Aos restantes funcionários do NRI. Ao André Gameiro, ao colega Daniel Cardoso, e aos funcionários do NMM (LNEC), pela ajuda na realização de alguns ensaios.

Às minhas companheiras de curso Débora Fernandes e Ana Rute Ferreira, por todos os momentos vividos ao longo destes anos e, principalmente, pela amizade que iniciámos e que decerto continuará. Em especial à Débora, porque caminhámos lado a lado nesta “luta” desde o primeiro dia de faculdade.

À minha família, e em particular aos meus avós, à minha tia Fernanda e à minha “irmã” Susana. E por fim, o mais importante, aos meus pais José e Augusta porque sem eles nada teria sido possível, pelo apoio incondicional e pelos valores que sempre me transmitiram e que fizeram de mim quem sou hoje.



## RESUMO

A consolidação de revestimentos antigos com perda de coesão acontece, geralmente, quando os mesmos apresentam um valor artístico elevado. Este tipo de intervenção deve ser levado a cabo através da utilização de produtos compatíveis com o revestimento; os produtos normalmente aplicados dividem-se em dois grupos - os consolidantes orgânicos e os consolidantes inorgânicos ou minerais. Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, apresentam pouca compatibilidade com os suportes antigos; os consolidantes mais compatíveis encontram-se no grupo dos inorgânicos, onde se inserem a água de cal ou o silicato de etilo, que também se caracterizam pela maior durabilidade.

Neste estudo foram utilizados produtos consolidantes à base de hidróxido de cálcio, metacaulino, água e pigmentos inorgânicos, em duas concentrações diferentes. A suspensão de hidróxido de cálcio em água é quimicamente comparável à água de cal, um dos consolidantes mais antigos de que se tem conhecimento; a adição do metacaulino prende-se com o facto de conferir ao produto propriedades pozolânicas, aumentando a sua resistência mecânica e durabilidade; a adição dos pigmentos inorgânicos pretende avaliar a viabilidade da reintegração cromática e também verificar a sua influência na consolidação das argamassas. O produto consolidante considerado é um meio fortemente alcalino, sendo os pigmentos inorgânicos os que apresentam melhor resistência e durabilidade quando incorporados nesta solução.

Os produtos estudados foram aplicados em provetes de revestimento de argamassa de cal aérea com simulação de perda de coesão, e conseqüente necessidade de tratamento. Realizaram-se ensaios de carácter mecânico, físico, microestrutural e cromático, que possibilitaram aferir a eficácia dos produtos consolidantes aplicados. Executaram-se também ensaios de envelhecimento natural e de envelhecimento artificial acelerado, para avaliar a variação das características das superfícies tratadas quando expostas às condições atmosféricas naturais e, no caso do envelhecimento artificial, quando sujeitas a ciclos climáticos com condições mais agressivas. Concluiu-se que os produtos consolidantes estudados são compatíveis, eficazes, apresentam boa durabilidade e que a adição de pigmentos pode influenciar ligeiramente as resistências mecânicas.

Este trabalho insere-se no projecto LIMECONTECH financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

### **Palavras-chave:**

Consolidantes, reintegração cromática, revestimento histórico, metacaulino, pigmentos minerais, compatibilidade.



## **ABSTRACT**

The consolidation of historical renders with loss of cohesion usually occurs when they have a high artistic value. The products used in this kind of interventions should be compatible, being the most common ones divided into two groups – organic consolidants and inorganic or mineral consolidants. Organic products are based on acrylic, vinyl or silicon resins and have shown reduced compatibility with historical mortars. Inorganic products are more compatible and have greater durability; being lime water and ethyl silicate examples of these products.

In this study the products used consisted of calcium hydroxide, metakaolin, water and mineral pigments with two different concentrations. The suspension of calcium hydroxide in water is chemically similar to lime water, one of the oldest consolidants. The addition of metakaolin aims to increase the mechanical strength and durability, due to its pozzolanic characteristics. Mineral pigments are added to verify the viability of chromatic reintegration and their influence on the consolidation of mortars. The inorganic pigments are those who show better resistance and durability in the strong alkaline environment of the consolidant products.

The products were applied in lime mortar specimens simulating loss of cohesion and therefore requiring treatment. In order to evaluate the efficacy of the products some tests and analysis were carried out. Mechanical, physical, microstructural and chromatic tests were performed. Natural and accelerated aging tests were also achieved to assess the consolidants durability when exposed in natural environment and subjected to more aggressive conditions. Results showed that the consolidant products were compatible, effective and possessed good durability. The addition of mineral pigments can cause a slightly decrease on the mechanical resistances.

This study is part of the project LIMECONTECH financed by the Foundation for Science and Technology of Portugal.

### **Key-words:**

Consolidation products, chromatic reintegration, historical render, metakaolin, mineral pigments, compatibility.



## PUBLICAÇÕES

### *Congressos nacionais*

**PASCOAL, P.; BORSOI, G.; VEIGA, R.; FARIA, P.** – *Consolidação e reintegração cromática de revestimentos históricos – Estudo da influência da adição de pigmentos*. Artigo aceite para comunicação oral no congresso Construção 2012. Coimbra: Universidade de Coimbra, 18-20 Dez. 2012.



# ÍNDICE DE TEXTO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
Enquadramento.....	1
Objectivos e metodologia.....	2
Organização do texto.....	3
<b>PARTE I – ESTADO ACTUAL DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Revestimentos Antigos .....</b>	<b>7</b>
1.1 Generalidades.....	7
1.2 Caracterização e composição dos revestimentos antigos .....	7
1.2.1 Constituição dos revestimentos.....	8
1.2.2 Características dos revestimentos.....	9
1.3 Anomalias em revestimentos.....	10
1.3.1 Principais anomalias, sintomas e causas associadas .....	10
1.3.2 A perda de coesão.....	14
1.4 Restituição da coesão dos revestimentos antigos.....	15
1.4.1 A consolidação dos revestimentos .....	15
1.4.2 Principais produtos consolidantes utilizados ao longo do tempo .....	16
1.4.3 Requisitos importantes dos produtos consolidantes .....	17
<b>2 Matérias-primas utilizadas.....</b>	<b>19</b>
2.1 Cal aérea .....	19
2.1.1 Definição .....	19
2.1.2 Calcinação, hidratação e carbonatação – ciclo da cal.....	19
2.2 Metacaulino .....	20
2.2.1 Materiais pozolânicos .....	20
2.2.2 Metacaulino .....	22
2.2.3 Reactividade pozolânica e produtos formados .....	22
2.3 Pigmentos.....	23
2.3.1 Generalidades sobre pigmentos.....	23
2.3.2 Ocre amarelos e vermelhos .....	24

<b>PARTE II – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>29</b>
<b>3 Plano da campanha experimental .....</b>	<b>31</b>
3.1 Generalidades.....	31
3.2 Produtos consolidantes em estudo .....	31
3.3 Descrição das várias fases experimentais .....	34
3.3.1 Primeira fase experimental – realização dos provetes .....	34
3.3.2 Segunda fase experimental – aplicação dos consolidantes .....	34
3.3.3 Terceira fase experimental – realização de ensaios .....	35
3.4 Identificação dos provetes.....	36
<b>4 Preparação de argamassas e provetes.....</b>	<b>39</b>
4.1 Matérias-primas utilizadas.....	39
4.1.1 Cal aérea.....	39
4.1.2 Areias .....	39
4.1.3 Massa volúmica aparente .....	40
4.2 Preparação de argamassas.....	40
4.2.1 Procedimento adoptado .....	40
4.2.2 Traço volumétrico .....	41
4.2.3 Amassaduras.....	41
4.2.4 Consistência por espalhamento .....	42
4.2.5 Teor de ar incorporado.....	43
4.3 Execução de provetes.....	45
4.3.1 Provetes prismáticos.....	45
4.3.2 Provetes em tijolos.....	47
<b>5 Consolidação de argamassas endurecidas.....</b>	<b>51</b>
5.1 Ensaio preliminares – escolha dos pigmentos.....	51
5.1.1 Pigmentos .....	51
5.1.2 Análise das aplicações preliminares.....	51
5.1.3 Caracterização dos pigmentos escolhidos.....	53
5.1.4 Resíduos secos e pH dos produtos.....	57
5.2 Aplicação dos produtos consolidantes.....	59
5.2.1 Composição dos produtos consolidantes .....	59

---

5.2.2	Materiais utilizados .....	61
5.2.3	Preparação dos produtos consolidantes.....	63
5.2.4	Aplicação dos produtos em provetes.....	64
5.2.5	Aplicação dos produtos no painel de estação de envelhecimento natural .....	66
<b>6</b>	<b>Procedimentos de ensaios realizados nas argamassas endurecidas e consolidadas.....</b>	<b>69</b>
6.1	Módulo de elasticidade dinâmico.....	69
6.2	Resistência à tracção por flexão.....	70
6.3	Resistência à compressão .....	72
6.4	Profundidade de carbonatação.....	73
6.5	Dureza superficial – durómetro Shore A .....	74
6.6	Dureza superficial – esclerómetro de pêndulo .....	75
6.7	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten.....	76
6.8	Velocidade de propagação dos ultra-sons .....	77
6.9	Envelhecimento artificial acelerado.....	79
6.10	Envelhecimento natural – evolução cromática .....	80
6.11	Observações em microscopia óptica e microscopia electrónica de varrimento MEV-EDS de superfícies polidas e superfícies de fractura.....	81
6.12	Análise por difracção de raios X (DRX).....	82
6.13	Profundidade de penetração dos consolidantes.....	83
<b>7</b>	<b>Apresentação e discussão dos resultados obtidos .....</b>	<b>85</b>
7.1	Generalidades.....	85
7.2	Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassas consolidadas .....	85
7.2.1	Módulo de elasticidade dinâmico.....	86
7.2.2	Resistência à tracção por flexão .....	88
7.2.3	Resistência à compressão .....	89
7.2.4	Profundidade de carbonatação .....	91
7.2.5	Dureza superficial – durómetro Shore A.....	92
7.2.6	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	93
7.2.7	Velocidade de propagação dos ultra-sons.....	95
7.2.8	Ensaio de envelhecimento artificial acelerado .....	96
7.2.9	Profundidade de penetração dos consolidantes .....	104

7.3	Resultados obtidos nos ensaios realizados no painel da Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC.....	105
7.3.1	Dureza superficial – durómetro Shore A.....	105
7.3.2	Dureza superficial – esclerómetro de pêndulo.....	107
7.3.3	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	109
7.3.4	Evolução cromática.....	110
7.4	Resultados obtidos nas análises microestruturais e de composição mineralógica.....	112
7.4.1	Observações em microscopia óptica e em MEV-EDS .....	112
7.4.2	Análise por difracção de raios X (DRX) .....	122
7.4.3	Relação entre os resultados da análise microestrutural e mineralógica .....	123
7.5	Discussão e apreciação global dos resultados.....	124
7.5.1	Quadros de resumo dos resultados.....	124
7.5.2	Análise global dos resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental .....	130
	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>135</b>
	Conclusões gerais .....	135
	Trabalhos futuros.....	138
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>139</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>147</b>
	Anexo 1 – Gráficos DRX dos pigmentos.....	149
	Anexo 2 – Imagens antes e após envelhecimento artificial .....	153
	Anexo 3 – Mapas MEV-EDS das superfícies polidas.....	155
	Anexo 4 – Gráficos DRX dos consolidantes sujeitos a curas diferentes .....	159
	Anexo 5 – Artigo submetido ao congresso Construção 2012 .....	161

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Manchas de humidade; b) e c) Manchas de humidade e biodeterioração (fotografias a) e c) de Débora Fernandes) .....	13
Fig. 1.2 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Eflorescência; b) Fissura; c) Perda de aderência .....	13
Fig. 1.3 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Perda de aderência; b) Erosão; c) Marcas de escorrência de água (fotografias a) e b) de Débora Fernandes) .....	13
Fig. 1.4 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Perda de coesão; b) Alteração cromática (TAVARES, 2009) .....	13
Fig. 2.1 - Ciclo da cal .....	20
Fig. 2.2 a) Ocre amarelo; b) Azurite; c) Malaquite; d) Ocre vermelho; e) Ocre castanho .....	25
Fig. 3.1 - Esquema dos provetes utilizados em ensaios mecânicos .....	35
Fig. 3.2 - Metodologia de caracterização do efeito dos produtos consolidantes.....	37
Fig. 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados (BORSOI <i>et al.</i> , 2012) .....	39
Fig. 4.2 – a) Pesagem dos constituintes sólidos; b) Mistura mecânica; c) Aspecto final da argamassa .....	41
Fig. 4.3 - Mesa de espalhamento com molde tronco-cónico e argamassa a ensaiar .....	42
Fig. 4.4 - Determinação do espalhamento da argamassa .....	43
Fig. 4.5 - Aparelho de medição do teor de ar com identificação das válvulas .....	44
Fig. 4.6 – a), b) e c) Realização do ensaio de determinação do teor de ar da argamassa .....	45
Fig. 4.7 – a) Moldes utilizados; b) Compactação da argamassa .....	46
Fig. 4.8 – a) Preenchimento completo do molde; b) Razamento da superfície (retirada do excesso de material) .....	46
Fig. 4.9 – a) Material utilizado; b) Aspecto final de um molde preenchido .....	47
Fig. 4.10 - Provetes desmoldados e numerados em cura seca .....	47
Fig. 4.11 - Aplicação do salpico.....	48
Fig. 4.12 - Molde do tijolo para aplicação da camada de argamassa .....	49
Fig. 4.13 – a) Rasamento da superfície da camada de argamassa; b) Aspecto final da argamassa ...	49
Fig. 5.1 – a) e b) Aplicações das soluções pigmentadas nas várias concentrações .....	52
Fig. 5.2 – a) e b) Aplicações das soluções pigmentadas nas várias concentrações .....	52
Fig. 5.3 – a) e b) Aplicações preliminares em provetes prismáticos .....	53
Fig. 5.4 – a), b) Pigmento Rosso Ercolano .....	54
Fig. 5.5 – a), b) Pigmento Vermelho Bayer .....	56
Fig. 5.6 - a) e b) Pigmento Ocre Alvalade.....	56
Fig. 5.7 - Pigmentos estudados em solução aquosa.....	57
Fig. 5.8 – Microfotografias ao microscópio óptico: a) Resíduo seco do RE com % em relação à massa total; b) Resíduo seco do RE com % em relação à massa dos constituintes sólidos	58
Fig. 5.9 – Microfotografias ao microscópio óptico: a) MK25% + OA3%; b) MK25% + RE5% .....	58

Fig. 5.10 - Ensaio de Chapelle: a) Montagem do ensaio; b) Solução de sacarose em agitação; c) Mistura das soluções de sacarose e de MK e CaO .....	62
Fig. 5.11 - Ensaio de Chapelle: a) Filtragem; b) Titulação.....	62
Fig. 5.12 – a) Pesagem de um pigmento; b) e c) Agitação de um consolidante pigmentado com OA .	64
Fig. 5.13 – a) e b) Aplicação dos produtos consolidantes em provetes .....	65
Fig. 5.14 – a) Câmara dos 95% HR; b) Provetes sujeitos à cura de 95% HR.....	65
Fig. 5.15 – a) e b) Tijolos sujeitos à cura de 95 % HR.....	66
Fig. 5.16 – a) Painel de envelhecimento natural; b) Escovagem; c) Aplicação do produto consolidante .....	66
Fig. 5.17 - Identificação dos produtos aplicados no painel de envelhecimento .....	67
Fig. 6.1 – a) e b) Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	70
Fig. 6.2 – a) Equipamento de ensaios mecânicos; b) Determinação da resistência à tracção por flexão.....	71
Fig. 6.3 – a) Meios provetes; b) Determinação da resistência à compressão; c) Proвете após rotura .	72
Fig. 6.4 – a) Medição da dureza superficial com durómetro num provete-tijolo; b) Medição da dureza superficial com durómetro no murete .....	75
Fig. 6.5 - a) e b) Medição da dureza superficial com o esclerómetro.....	76
Fig. 6.6 – a) e b) Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) em provetes; c) Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) no painel .	77
Fig. 6.7 – a) e b) Ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.....	79
Fig. 6.8 - a) Condições de calor a 60°C; b) Arca frigorífica.....	80
Fig. 6.9 – a), b) e c) Medição das cores com a escala NCS no painel.....	81
Fig. 6.10 - a) Superfícies de fractura; b) Superfícies polidas .....	82
Fig. 6.11 - MEV-EDS.....	82
Fig. 6.12 - a) Difractorómetro de raios X Philips PW1830 generator; b) Amostras prontas para análise.....	83
Fig. 6.13 – a) e b) aplicações para medição da penetração das soluções.....	84
Fig. 6.14 – a) Recolha das amostras; b) Amostras de argamassa para medição da penetração das soluções .....	84
Fig. 7.1 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	87
Fig. 7.2 - Resistência à tracção por flexão dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	88
Fig. 7.3 - Resistência à compressão dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes.....	90
Fig. 7.4 - Relação entre os resultados da resistência à compressão e da resistência à tracção por flexão (90 dias) .....	91
Fig. 7.5 - a) Profundidade de carbonatação em provetes prismáticos com MK25% CC; b) Profundidade de carbonatação em provetes prismáticos com MK25% CS.....	91

Fig. 7.6 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	93
Fig. 7.7 - Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	94
Fig. 7.8 - Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	96
Fig. 7.9 - a) e b) Argamassa de referência (não tratada) após ensaio de envelhecimento artificial acelerado .....	98
Fig. 7.10 - Argamassas tratadas após ensaio de envelhecimento artificial acelerado: .....	98
Fig. 7.11 - Argamassas tratadas após ensaio de envelhecimento artificial acelerado: .....	98
Fig. 7.12 – Fendilhação dos bordos laterais das camadas de argamassa: a) MK25% CC; b) MK25%+OA5%; c) MK25%+VB5%.....	99
Fig. 7.13 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes e após o ensaio de envelhecimento artificial acelerado .....	100
Fig. 7.14 - Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes e após o ensaio de envelhecimento artificial acelerado .....	100
Fig. 7.15 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão, utilizando os tubos de Karsten horizontais: a) MK25%+OA5%; b) MK25%+VB3%.....	101
Fig. 7.16 - Relação entre os resultados de absorção de água sob baixa pressão, em provetes mantidos em ambiente controlado (90 dias) e sujeitos a envelhecimento artificial .....	101
Fig. 7.17 - Velocidade dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos consolidantes e após envelhecimento artificial acelerado .....	102
Fig. 7.18 - Profundidade de penetração: a) MK25% + 5%OA; b) MK25% + 5%VB.....	105
Fig. 7.19 - Dureza superficial (durómetro <i>Shore A</i> ) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	106
Fig. 7.20 - Relação entre os resultados de dureza superficial ( <i>Shore A</i> ) em provetes mantidos em ambiente controlado e no murete após o envelhecimento natural (90 dias) .....	107
Fig. 7.21 - Dureza superficial (esclerómetro de pêndulo) das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	108
Fig. 7.22 - Relação entre os resultados de dureza superficial com durómetro <i>Shore A</i> e com esclerómetro de pêndulo (90 dias) .....	109
Fig. 7.23 - Absorção de água sob baixa pressão das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	110
Fig. 7.24 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa não tratada: a) 10x; b) 20x; c) 40x .....	113
Fig. 7.25 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25% CS: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas...	113

Fig. 7.26 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25% CC: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas ..	113
Fig. 7.27 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+OA5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas.....	113
Fig. 7.28 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+RE5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas.....	114
Fig. 7.29 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+VB5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas.....	114
Fig. 7.30 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa não tratada: a) 20x; b) 40x.....	115
Fig. 7.31 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25% CS: a) 20x; b) 40x .....	115
Fig. 7.32 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25% CC: a) 20x; b) 40x.....	116
Fig. 7.33 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+OA5%: a) 20x; b) 40x.....	116
Fig. 7.34 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+RE5%: a) 20x; b) 40x .....	116
Fig. 7.35 - Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+VB5%: a) 20x; b) 40x .....	116
Fig. 7.36 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC, com formação de produtos pozolânicos; b) Respectivo espectro EDS .....	117
Fig. 7.37 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC, com formações esféricas de carbonato de cálcio (calcite); b) Respectivo espectro EDS .....	117
Fig. 7.38 – Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC – cobertura de um poro da argamassa pelo consolidante .....	117
Fig. 7.39 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CS, com identificação de produtos pozolânicos do tipo CSH; b) Respectivo espectro EDS.....	118
Fig. 7.40 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CS, com formação esférica de carbonato de cálcio (calcite); b) Respectivo espectro EDS.....	118
Fig. 7.41 - Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CS – pormenor da pasta de consolidante .....	118
Fig. 7.42 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+OA5%, com pormenor da pasta e formações esféricas de carbonato de cálcio (calcite); b) e c) Respective espectros EDS.....	119
Fig. 7.43 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+OA5%, com identificação de produtos pozolânicos; b) e c) Respective espectros EDS.....	119

Fig. 7.44 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+RE5%,  
pormenor da pasta de consolidante; b) Respectivo espectro EDS.....120

Fig. 7.45 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+RE5%,  
com formação esférica de calcite e produtos pozolânicos; b) Respectivo espectro EDS.120

Fig. 7.46 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+VB5%,  
com identificação de produtos pozolânicos do tipo CAH; b) e c) Respectivos  
espectros EDS.....121



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de alguns pigmentos, respectivas classificações e composições .....	25
Tabela 3.1 - Combinações estudadas: composição dos consolidantes, simbologia adoptada e condições de cura .....	33
Tabela 3.2 - Provetes, produtos aplicados e ensaios realizados .....	38
Tabela 4.1 - Massas volúmicas aparentes das matérias-primas utilizadas .....	40
Tabela 4.2 - Quantidades dos componentes da argamassa de cal aérea com traço 1:4 .....	41
Tabela 4.3 - Quantidades de amassadura correspondente à produção de 6 provetes prismáticos .....	42
Tabela 4.4 - Quantidades de amassadura para o revestimento de 2 tijolos .....	42
Tabela 4.5 - Resultados obtidos de teor de ar .....	45
Tabela 4.6 - Quantidades para aplicação de salpico em tijolos .....	48
Tabela 5.1 - Lista dos pigmentos analisados em fase preliminar .....	52
Tabela 5.2 - Características do pigmento Rosso Ercolano (CTS España, 2010) .....	54
Tabela 5.3 - Massa volúmica aparente do pigmento Rosso Ercolano (Candelária, 2008) .....	54
Tabela 5.4 - Massa volúmica aparente do pigmento Vermelho Bayer (Candelária, 2008) .....	56
Tabela 5.5 - Massa volúmica do pigmento Ocre Alvalade (Candelária, 2008) .....	56
Tabela 5.6 - Resíduos secos das soluções .....	57
Tabela 5.7 - pH do produto MK25% .....	59
Tabela 5.8 - Massas molares da cal e do metacaulino .....	60
Tabela 5.9 - Correspondência entre as razões molar e de massa .....	60
Tabela 5.10 - Exemplo das quantidades necessárias para produção de uma solução consolidante .....	60
Tabela 5.11 - Valores obtidos no ensaio de Chapelle com o MK Argical M1200S .....	63
Tabela 5.12 - Características dos materiais utilizados nos consolidantes .....	64
Tabela 5.13 - Quantidade de produto aplicado por metro quadrado (provetes) .....	65
Tabela 5.14 - Quantidade de produto aplicado por metro quadrado (painel) .....	67
Tabela 6.1 - Condições climatéricas do painel durante as idades de ensaios .....	81
Tabela 7.1 – Módulo de elasticidade dinâmico em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	87
Tabela 7.2 - Resistência à tracção por flexão em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	88
Tabela 7.3 - Resistência à compressão em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	90
Tabela 7.4 - Profundidade de carbonatação média em provetes prismáticos MK25%, aos 90 dias após aplicações .....	92
Tabela 7.5 - Dureza superficial (durómetro <i>Shore A</i> ) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	93
Tabela 7.6 - Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes .....	94

Tabela 7.7 - Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes.....	96
Tabela 7.8 - Ensaios $DS_D$ , $t_{TK}$ e $V_{US}$ realizados nas argamassas aplicadas sobre tijolos, antes e depois do envelhecimento artificial .....	99
Tabela 7.9 – Índices da escala NCS das argamassas aplicadas sobre tijolos, antes e depois do envelhecimento artificial .....	103
Tabela 7.10 – Valores médios, máximos e mínimos da profundidade de penetração dos produtos consolidantes em amostras de argamassas aplicadas sobre tijolos .....	104
Tabela 7.11 - Dureza superficial (durómetro <i>Shore A</i> ) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	106
Tabela 7.12 - Dureza superficial (esclerómetro de pêndulo) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	108
Tabela 7.13 - Absorção de água sob baixa pressão das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	110
Tabela 7.14 - Índices da escala NCS das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações .....	111
Tabela 7.15 - Razão Ca/Si nas amostras de superfícies polidas analisadas ao MEV-EDS.....	122
Tabela 7.16 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes prismáticos de argamassa .....	125
Tabela 7.17 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas camadas de argamassa aplicadas sobre tijolos .....	126
Tabela 7.18 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados no murete da estação de envelhecimento natural do LNEC .....	127
Tabela 7.19 - Resumo da informação obtida nos ensaios mecânicos, físicos, de envelhecimento, microestruturais e mineralógicos.....	129

# SIMBOLOGIA

## *Simbologia de Materiais*

- **A** – Anidrite
- **C** – Calcite
- **CAh** – Aluminatos de cálcio hidratados
- **CCA** – Carbo-aluminatos de cálcio hidratados
- **Gs** – Gesso
- **G** - Goetite
- **H** – Hematite
- **Hy** - Hydrogarnet
- **K** – Caulinite
- **M** - Mica
- **MK** – Metacaulino
- **OA** – Ocre Alvalade
- **P** – Portlandite
- **Q** - Quartzo
- **RE** – Rosso Ercolano
- **VB** – Vermelho Bayer

## *Simbologia de Ensaios*

- **HR** – Humidade Relativa
- **MVap** – Massa volúmica aparente
- **PE/R** – Procedimentos de ensaio para rebocos
- **E<sub>d</sub>** – Módulo de elasticidade dinâmico
- **R<sub>t</sub>** – Resistência à tracção por flexão
- **R<sub>c</sub>** – Resistência à compressão
- **P<sub>n</sub>** – Profundidade de penetração
- **t<sub>TK</sub>** – Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten)
- **DS<sub>D</sub>** – Dureza superficial utilizando um durómetro *Shore A*
- **DS<sub>E</sub>** – Dureza superficial utilizando um esclerómetro de pêndulo
- **V<sub>US</sub>** – Propagação de ultra-sons

### ***Simbologia de Entidades***

- **FCT** – Fundação para a Ciência e a Tecnologia
- **LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- **NRI** – Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
- **NCC** – Núcleo de Comportamento de Construções
- **NMM** – Núcleo de Materiais Metálicos
- **LERevPa** – Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes
- **IPQ** – Instituto Português de Qualidade
- **ASTM** – American Society for Testing and Materials
- **AFNOR** – Association Française de Normalisation
- **IM, I.P.** – Instituto de Meteorologia, I.P.

# INTRODUÇÃO

## **Enquadramento**

*“O património histórico arquitectónico surge-nos hoje como um valor inquestionável, em relação ao qual a consciência actual da sua génese, vicissitudes e significado nos leva a assumir um posicionamento claro em prol da sua salvaguarda. É presentemente considerado numa perspectiva de documento histórico, cuja salvaguarda se torna essencial para o estudo e conhecimento das nossas origens culturais. E, nesse contexto, um documento histórico não pode ser adulterado, razão pela qual as intervenções de conservação têm por objectivo primordial retardar o processo inexorável de degradação, por forma a que o “documento” possa perdurar o mais possível no tempo”* (HENRIQUES, 2004).

Por toda a Europa, e cada vez mais em Portugal, a conservação de edifícios antigos é um tema corrente e cuja importância tem vindo a aumentar. O património Português é composto por vários edifícios que necessitam de intervenção, em especial a nível de acabamentos exteriores, por razões de envelhecimento natural mas também por falta de manutenção ao longo de vários anos (FARIA *et al.*, 2010).

A investigação na área é crescente, não só pelo abrandamento da construção nova mas também pela necessidade de reparação de construções antigas. O reconhecimento do valor do património construído, tanto a nível cultural, como histórico e arquitectónico é igualmente crescente, não só por parte dos intervenientes no processo de investigação e conservação mas também por parte da população em geral. Quando se fala em edifícios antigos, fala-se em edifícios anteriores à adopção de estruturas em betão armado e, sejam eles monumentos, edifícios classificados ou edifícios correntes *“contribuem para manter o carácter de um centro urbano ou de um bairro histórico e preservar a sua atmosfera”*, garantindo a sua presença para as gerações futuras. Em Portugal, a maioria destes edifícios pode datar até cerca de 1950, altura a partir da qual o uso do cimento Portland se generalizou e veio alterar o modelo de funcionamento das paredes dos edifícios (VEIGA, 2011).

Nesta área de reabilitação do património edificado insere-se a conservação e o restauro dos revestimentos exteriores de edifícios, cujo estudo tem adquirido grandes avanços metodológicos, técnicos e científicos. Foram inúmeros os casos em que o desconhecimento e a falta de investigação e formação levaram a operações de reparação desastrosas, utilizando-se materiais e técnicas que, em vez de aumentarem a durabilidade, provocaram a deterioração e descaracterização dos edifícios intervencionados. Os revestimentos exteriores são importante parte do edificado, já que ao longo dos séculos desempenharam funções de protecção e influenciaram o seu aspecto estético (TAVARES *et al.*, 2004; VEIGA *et al.*, 2004).

Os materiais a utilizar em operações de reparação devem ser adequados e compatíveis com os suportes antigos, considerando-se sempre em primeiro lugar a conservação do revestimento antigo

pré-existente (princípio da intervenção mínima) e, só depois, pensar na substituição parcial ou integral em virtude do estado de degradação apresentado. Em qualquer um dos casos, é fundamental que seja conhecida a constituição dos revestimentos antigos e o seu modo de funcionamento. As argamassas de substituição nunca vão ser totalmente compatíveis com os suportes antigos, já que a reprodução da argamassa antiga é praticamente impossível, o que leva a que a manutenção do revestimento original seja a opção que conduz a maior durabilidade (VEIGA, 2011).

Pela sua exposição, os revestimentos exteriores são dos elementos dos edifícios mais sujeitos à degradação e onde a mesma é também mais detectável à vista desarmada. A perda de coesão é uma das anomalias frequentemente observada em revestimentos antigos, e cuja solução pode passar pela sua substituição ou consolidação. Perante esta patologia, a estratégia de intervenção vai depender do grau de degradação e do valor histórico ou artístico do revestimento em causa. Os materiais utilizados podem ser vários, mas a técnica de consolidação de rebocos é ainda uma área de estudo recente e pouco explorada; tem sido aplicada noutros tipos de materiais como é o caso da pedra, mas a adaptação da técnica para os revestimentos encontra-se ainda em fase inicial. Além da acção de consolidação propriamente dita, deve ser feito um trabalho de reintegração, integrando a parte do revestimento intervencionada na totalidade do revestimento antigo, criando-se um aspecto estético idêntico.

Na presente dissertação estudar-se-á a consolidação superficial de argamassas antigas com perda de coesão e o seu possível contributo para a reintegração cromática, recorrendo a soluções consolidantes que incorporam cal, metacaulino (pozolana artificial) e pigmentos minerais. O referido estudo insere-se no âmbito de um projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT): LIMECONTECH – Conservação e durabilidade de revestimentos históricos: técnicas e materiais compatíveis.

### ***Objectivos e metodologia***

Esta dissertação tem como objectivo principal o estudo de produtos com propriedades pozolânicas e incorporação de pigmentos minerais, que visam a consolidação e a reintegração de revestimentos antigos que apresentam perda de coesão e necessidade de intervenção. Mais em particular, pretende avaliar-se:

- A eficácia dos consolidantes pigmentados, em termos de consolidação e reintegração cromática, e a sua compatibilidade com as argamassas de cal aérea tradicionais;
- De que modo a adição dos pigmentos pode interferir na consolidação das argamassas;
- A influência das condições de cura na formação de produtos pozolânicos dos consolidantes aplicados nas argamassas.

Estes produtos são constituídos à base de cal, metacaulino (pozolana artificial) e água, com adição de pigmentos minerais ou inorgânicos. Vai estudar-se a consolidação de argamassas recorrendo a produtos pigmentados com três pigmentos distintos (cada pigmento com duas concentrações

diferentes), comparando-a com o comportamento de argamassas sem consolidação e com a consolidação com os mesmos produtos sem adição de pigmentos e sujeitos a dois tipos de cura diferentes.

Deste modo, quer-se contribuir para o aumento do conhecimento a nível da consolidação de revestimentos antigos com reintegração cromática, e perceber quais os produtos de conservação mais adequados para utilização neste tipo de intervenções.

### **Organização do texto**

O texto desta dissertação está organizado em introdução, 7 capítulos divididos em duas partes – estado actual do conhecimento e desenvolvimento experimental – e conclusões. Na primeira parte do texto, o estado actual do conhecimento, faz-se uma revisão teórica acerca dos temas relacionados com o trabalho efectuado e baseada numa recolha bibliográfica; na segunda parte do texto é feita toda a descrição da campanha experimental realizada, assim como a apresentação e discussão de todos os resultados obtidos.

- Introdução – apresenta um texto de enquadramento do tema, assim como os objectivos que se pretendem atingir com este trabalho, e a organização do texto da dissertação;
  
- Parte I – Estado actual do conhecimento:
  - Capítulo 1 (Revestimentos antigos) – descrição das características e composição dos revestimentos antigos, as principais anomalias observadas em revestimentos e, visto este trabalho tratar da consolidação da perda de coesão, faz-se uma descrição mais aprofundada da perda de coesão em revestimentos, de que modo pode ser tratada e que produtos consolidantes têm vindo a ser utilizados;
  
  - Capítulo 2 (Matérias-primas utilizadas) – principais características e propriedades das matérias-primas utilizadas nos produtos consolidantes estudados neste trabalho;
  
- Parte II – Desenvolvimento experimental:
  - Capítulo 3 (Plano da campanha experimental) – descrição das várias fases da campanha experimental, com apresentação dos produtos consolidantes estudados, os ensaios realizados e a metodologia de caracterização do efeito dos produtos nas argamassas tratadas;
  
  - Capítulo 4 (Preparação de argamassas e provetes) – como o próprio nome indica, neste capítulo são apresentados os procedimentos de preparação das argamassas e de execução de provetes onde, posteriormente, são aplicados os produtos

consolidantes; o traço das argamassas utilizado permite a simulação de perda de coesão;

- Capítulo 5 (Consolidação de argamassas endurecidas) – na primeira parte deste capítulo faz-se uma descrição dos ensaios preliminares efectuados, tendo em vista a selecção dos pigmentos a utilizar; na segunda parte, é apresentado o procedimento de aplicação dos produtos consolidantes, assim como os materiais utilizados e a composição e preparação dos mesmos;
- Capítulo 6 (Procedimentos de ensaios realizados nas argamassa endurecidas e consolidadas) – descrição dos procedimentos seguidos na realização dos vários ensaios de caracterização do efeito dos produtos consolidantes nas argamassas tratadas;
- Capítulo 7 (Apresentação e discussão dos resultados obtidos) – apresentação e discussão dos resultados obtidos nos vários ensaios realizados em provetes de argamassa e no murete da estação de envelhecimento natural, com uma análise global no final do capítulo e algumas conclusões parciais;
- Conclusões – resumo das principais conclusões obtidas a partir do estudo realizado e que respondem aos objectivos propostos inicialmente, propondo algumas sugestões para trabalhos futuros;

No final, apresentam-se em capítulos distintos as referências bibliográficas e os anexos.

## **PARTE I – ESTADO ACTUAL DO CONHECIMENTO**



# 1 REVESTIMENTOS ANTIGOS

## 1.1 *Generalidades*

Os revestimentos são parte importante das edificações, desempenhando uma função de protecção das alvenarias contra as acções externas, e definindo o seu aspecto estético. O estudo e caracterização dos revestimentos antigos e das suas camadas representa uma tarefa importante sobre o conhecimento dos materiais e das técnicas construtivas utilizadas, para que assim, as melhores opções de intervenção para conservação e preservação do património possam ser aplicadas.

Neste primeiro capítulo do estado actual do conhecimento, é feita uma descrição da composição geral dos revestimentos antigos, e as principais anomalias associadas aos mesmos. Visto este estudo tratar da consolidação de argamassas com perda de coesão, vai dar-se particular importância às causas que levam à ocorrência deste tipo de anomalia, de que modo pode ser tratada, e quais os produtos que têm vindo a ser utilizados ao longo do tempo para restituir a coesão dos revestimentos.

## 1.2 *Caracterização e composição dos revestimentos antigos*

*“Durante milénios e até meados do século XX, as argamassas de cal com diferentes tipos de agregados, geralmente de proveniência local, utilizaram-se tanto nos acabamentos interiores como exteriores dos edifícios”* (VEIGA *et al.*, 2004).

As argamassas têm sido utilizadas desde a antiguidade, nas mais variadas aplicações, para assentamento de tijolo ou pedra, ou no revestimento de acabamento de paredes interiores e exteriores, de pavimentos e até mesmo no revestimento de condutas de água. A composição das argamassas antigas pode ser variada, mas a maioria tem como ligante a cal aérea (ELSEN, 2006); e em obras tão emblemáticas como as Pirâmides de Gizé (2500 a.C.), os Templos Gregos a Apolo e Elis (450 a.C.) e a Muralha da China (VELOSA, 2006). De uma forma geral, os revestimentos exteriores dos edifícios antigos são compostos por argamassas de cal aérea e areia, acabados com barramentos ou com pinturas de cal, sendo constituídos pelas seguintes camadas principais (VEIGA *et al.*, 2003; VEIGA, 2011):

- Camadas de regularização e protecção: emboço; reboco; esboço;
- Camadas de protecção, acabamento e decoração: barramento (ou guarnecimento); pintura, normalmente mineral; ornamentação.

A irregularidade das alvenarias antigas e a aplicação de várias camadas levou a que os revestimentos antigos tenham atingido espessuras substancialmente superiores às dos revestimentos actuais, com alguns casos a ultrapassar os 5 cm de espessura total (PINHO, 2008).

### 1.2.1 Constituição dos revestimentos

#### a) Camadas de regularização e protecção

As camadas de regularização e protecção eram constituídas principalmente por argamassas de cal aérea e areia, com algumas adições minerais (por exemplo, pozolanas) e orgânicas. Estas argamassas eram aplicadas em várias subcamadas, com as camadas internas com um traço mais rico em ligante e uma granulometria mais grosseira em relação às camadas externas. Deste modo, era conferida uma deformabilidade e porosidade crescentes das camadas internas para as externas, promovendo assim um bom comportamento tanto às deformações estruturais como à água, e por isso uma maior durabilidade dos revestimentos (VEIGA, 2011).

A camada de regularização dividia-se em três subcamadas principais: o emboço, o reboco e o esboço. A primeira subcamada, o emboço, era a mais grosseira devido à sua função de anular as irregularidades do suporte e permitir uma boa ligação para as camadas que se seguiam. As camadas seguintes eram progressivamente mais fracas em ligante e com agregados de granulometria mais fina, especialmente o esboço que iria servir de base para as camadas de acabamento e decoração (PINHO, 2008; VEIGA, 2011). Em relação aos traços das argamassas, estes variavam normalmente entre 1:1 e 1:4 (cal aérea:areia) dependendo das características dos materiais, ou seja, de acordo com a granulometria e forma dos grãos das areias usadas, e com a finura e modo de utilização da cal (VEIGA, 2007; VEIGA, 2011).

Tal como actualmente, também nos revestimentos antigos há a presença de adições; os materiais também constituintes das argamassas mas que são designados por aditivos ou, mais recentemente, por adições, pretendem geralmente contribuir para o melhoramento de certas características das argamassas ou diminuir certos aspectos negativos das mesmas. As adições mais comuns em argamassas antigas são as pozolanas, utilizadas na sua composição desde a época dos romanos, para melhorar o comportamento em ambientes húmidos ou em contacto com a água, e assim conferir propriedades hidráulicas às argamassas de cal aérea (VELOSA, 2006).

#### b) Camadas de acabamento e decoração

As camadas de acabamento e decoração dos revestimentos antigos são muito variadas. A camada de barramento ou guarnecimento era constituída por uma pasta de cal com agregados bastante finos e aplicada sobre o esboço, previamente humedecido, em duas a três camadas com finura crescente (VEIGA, 2011). A coloração da camada de acabamento podia ser realizada pela incorporação de pigmentos na camada de barramento, ou através de pinturas ou outras técnicas decorativas sobre o barramento. Em Portugal, é comum encontrarem-se técnicas decorativas elaboradas como: os fingidos (pinturas e texturas para simulação de materiais mais ricos); os esgrafitos (efeitos em baixo relevo com recurso a contrastes claro-escuro); os *stuccos* (elementos decorativos em alto-relevo) (VEIGA *et al.*, 2004).

### 1.2.2 Características dos revestimentos

De uma forma genérica, os revestimentos exteriores têm como função regularizar as alvenarias, proteger os suportes contra os agentes de degradação, impermeabilizar e atribuir um aspecto estético às edificações. Para garantir que estas funções são asseguradas, os seguintes requisitos devem ser cumpridos (VEIGA, 2005):

- Aderência ao suporte;
- Resistência à fendilhação;
- Capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada;
- Capacidade de promover a expulsão do vapor de água;
- Durabilidade face às acções externas;
- Aspecto estético.

As exigências funcionais das argamassas recentes e das argamassas antigas são um pouco diferentes, uma vez que as paredes antigas possuíam uma constituição diferente e um modelo de funcionamento também diferente das paredes actuais, especialmente no que diz respeito à permeabilidade à água. As argamassas actuais, quase sempre com o cimento como ligante, são argamassas muito menos porosas e com menor permeabilidade ao vapor de água; atingem, no entanto, resistências mecânicas muito maiores. As argamassas de cal aérea e areia aplicadas nas paredes antigas possuíam características que as tornavam adequadas aos suportes (FARIA, 2004; PINHO, 2008):

- Baixa retracção;
- Fraca resistência mecânica (obtida a longo prazo);
- Boa deformabilidade (baixa rigidez);
- Boa porosidade (promovendo uma boa permeabilidade ao vapor de água e absorção capilar);
- Boa aderência à base;
- Boa trabalhabilidade.

Uma das propriedades mais importantes dos revestimentos antigos é a sua permeabilidade ao vapor de água e à água. As paredes antigas são constituídas à base de materiais porosos, com elevada espessura e sem cortes de capilaridade, pelo que a absorção de água por capilaridade é inevitável. A porosidade elevada dos revestimentos aplicados, assim como a presença de várias camadas de argamassa, promoviam uma saída rápida da água para o exterior. Actualmente acontece exactamente o contrário: os revestimentos aplicados são concebidos de modo a evitar ao máximo a entrada de água, já que também as soluções construtivas das paredes são igualmente concebidas com esse objectivo (VEIGA, 2011).

Por serem materiais compatíveis com os suportes, as argamassas antigas proporcionaram um bom funcionamento das paredes, além de que também as técnicas construtivas tiveram um papel importante na durabilidade destes sistemas, pois são muitos os casos que chegaram até aos dias de hoje em bom estado de conservação.

### 1.3 Anomalias em revestimentos

#### 1.3.1 Principais anomalias, sintomas e causas associadas

A elevada exposição dos revestimentos exteriores dos edifícios às mais diversas acções agressivas torna-os bastantes susceptíveis à degradação e por isso com necessidade de intervenção a nível da sua conservação e restauro (VEIGA *et al.*, 2004). A exposição dos revestimentos com o meio ambiente coloca-os em contacto com diversas acções, como as acções climáticas e os agentes de ordem química, física, mecânica e biológica (MAGALHÃES, 2002).

A correcta identificação das anomalias presentes num revestimento contribui de forma importante para a adopção de acções de reparação adequadas. As anomalias dependem de factores ligados aos materiais e técnicas construtivas utilizadas, de processos naturais ou artificiais da sua alteração ao longo do tempo (factores ambientais e humanos) (VEIGA *et al.*, 2004). Segundo Magalhães (2002), as principais anomalias em rebocos antigos são a humidade, a fendilhação e fissuração, as eflorescências e criptoflorescências, a biodeterioração, a perda de aderência, a perda de coesão ou desagregação, a erosão e a sujidade; Tavares (2009) considera ainda a alteração cromática como anomalia, no caso dos revestimentos coloridos.

De seguida, faz-se uma descrição dos sintomas e das principais causas associadas às anomalias mais comuns em revestimentos (HENRIQUES, 2001; MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009); entende-se por sintoma a forma de manifestação de degradação ou de anomalia (ABREU *et al.*, 2002).

#### **Humidade (Fig. 1.1)**

- **Sintomas** – manchas nos revestimentos;
- **Causas associadas:**
  - Elevada permeabilidade à água dos revestimentos, ou de materiais do suporte;
  - Contacto de zonas da parede com água do solo;
  - Deficiente posicionamento de barreiras estanques;
  - Condensação de vapor de água no interior ou superfície do revestimento;
  - Presença de sais higroscópicos que fixam água;
  - Causas fortuitas (rotura de canalizações, entupimento de tubos de queda, caleiras, etc.).

#### **Fendas e fissuras (Fig. 1.2b)**

- **Sintomas** – aberturas longitudinais que atravessam toda a espessura do revestimento (fendas), ou aberturas longitudinais curtas e finas apenas a nível superficial (fissuras);
- **Causas**
  - Retracção do reboco;
  - Dilatações e contracções higrotérmicas;

- Gelo;
- Espessura inadequada do revestimento;
- Erros de dosagem das argamassas;
- Movimentos do suporte;
- Reação com sais presentes no suporte;
- Absorção excessiva do suporte;
- Concentração de tensões junto a zonas de aberturas;
- Corrosão de elementos metálicos.

### **Eflorescências e criptoflorescências (Fig. 1.2a)**

- **Sintomas** – substâncias esbranquiçadas de aspecto cristalino na superfície exterior do revestimento, devido à cristalização de sais (eflorescências); cristalização de sais solúveis no interior dos poros do revestimento (criptoflorescências);
- **Causas associadas:**
  - Presença prolongada de água;
  - Presença de sais solúveis no revestimento, no suporte ou na água infiltrada;
  - Cal não carbonatada.

### **Biodeterioração (Figs. 1.1b e 1.1c)**

- **Sintomas** – presença ou deposição superficial de organismos biológicos (plantas, musgos, fungos, etc.);
- **Causas associadas:**
  - Presença prolongada de humidade;
  - Falta de ventilação;
  - Iluminação;
  - Acumulação de sujidades ou poluentes;
  - Textura superficial do revestimento rugosa.

### **Perda de aderência (Figs. 1.2c e 1.3a)**

- **Sintomas** – separação entre as diferentes camadas de revestimento, ou entre o revestimento e o suporte (descolamento, abaulamento, destacamento);
- **Causas associadas:**
  - Presença de humidade e/ou sais solúveis;
  - Variações higrotérmicas;
  - Movimentos do suporte;
  - Impermeabilidade elevada do suporte ou revestimento;
  - Erros de execução do revestimento (excesso de água na amassadura, falta de humedecimento do suporte, etc.).

### **Perda de coesão (Fig. 1.4a)**

- **Sintomas** – enfraquecimento das ligações entre as várias partículas do revestimento; pode provocar desagregação, farinação ou pulverização das partículas;
- **Causas associadas:**
  - Presença de humidade;
  - Cristalização de sais solúveis;
  - Revestimento fraco (baixa dureza superficial);
  - Acção de organismos ou microrganismos;
  - Reacção química entre os materiais que constituem os revestimentos e as substâncias presentes na atmosfera.

### **Erosão (Fig. 1.3b)**

- **Sintomas** – desgaste do revestimento com perda de material, ou alteração da sua superfície (modificação do aspecto ou textura);
- **Causas associadas:**
  - Presença de humidade;
  - Perda de coesão;
  - Desgaste provocado por agentes de degradação (agentes mecânicos, físicos, químicos, biológicos ou atmosféricos).

### **Sujidade (Fig. 1.3c)**

- **Sintomas** – sujidades na superfície dos revestimentos (deposição de partículas, poeiras, etc.);
- **Causas associadas:**
  - Escorrência da água da chuva;
  - Acção do vento com partículas em suspensão;
  - Textura superficial dos revestimentos (rugosidade).

### **Alteração cromática (Fig. 1.4b)**

- **Sintomas** – variação dos parâmetros que definem a cor (esmaecimento, deslavamento, amarelecimento, descoloração, deslavamento, escurecimento, etc.);
- **Causas associadas:**
  - Presença de humidade;
  - Acções ambientais (especialmente a radiação solar);
  - Absorção irregular da camada de pintura pelo revestimento;
  - Irregularidades na superfície do revestimento.



Fig. 1.1 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Manchas de humidade; b) e c) Manchas de humidade e biodeterioração (fotografias a) e c) de Débora Fernandes)

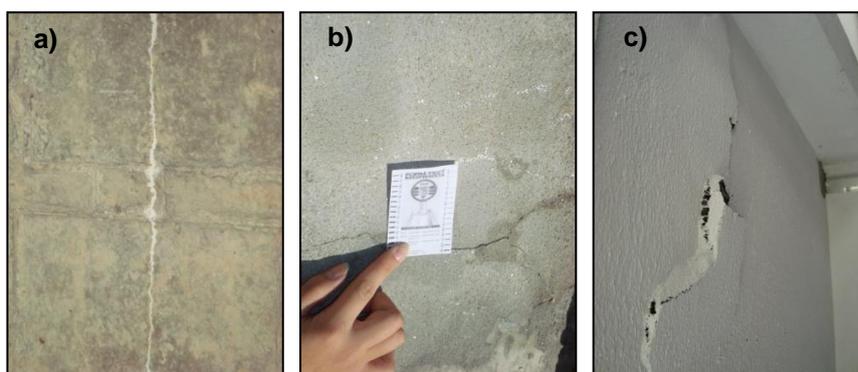


Fig. 1.2 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Eflorescência; b) Fissura; c) Perda de aderência

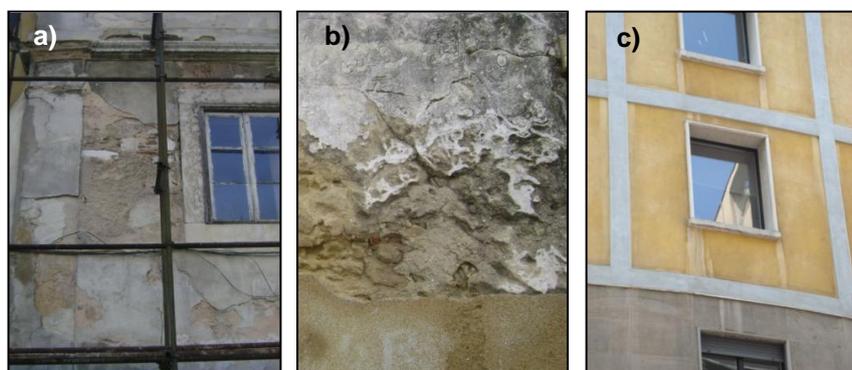


Fig. 1.3 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Perda de aderência; b) Erosão; c) Marcas de escorrência de água (fotografias a) e b) de Débora Fernandes)

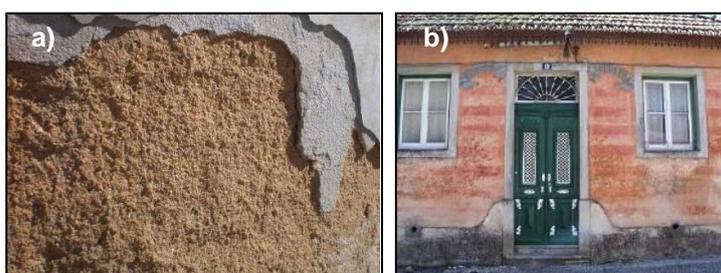


Fig. 1.4 - Exemplos de anomalias em revestimentos: a) Perda de coesão; b) Alteração cromática (TAVARES, 2009)

### 1.3.2 A perda de coesão

Um revestimento demonstra perda de coesão quando existe um enfraquecimento das ligações entre as várias partículas, levando à diminuição da sua resistência mecânica; a argamassa torna-se friável em consequência da perda de ligante devida a acções físicas ou químicas (VEIGA *et al.*, 2007; VEIGA, 2011). A perda de coesão pode dar origem a outras anomalias como a desagregação (ou arenização), farinação e pulverização. A desagregação caracteriza-se pelo destacamento grão a grão das partículas do revestimento; a pulverização ocorre quando o desprendimento se dá sob a forma de pó ou grânulos; a farinação ocorre quando o desprendimento ocorre sob a forma de um pó bastante fino (TAVARES, 2009).

Esta anomalia afecta tanto a função protectora como a função decorativa, pondo em causa a durabilidade do revestimento. As causas mais prováveis para a ocorrência da perda de coesão em revestimentos são as que se referem de seguida (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009).

#### i. Presença de humidade

A presença prolongada de humidade e água nos revestimentos pode provocar à solubilização e dissolução do ligante, levando ao enfraquecimento das ligações entre as várias partículas do revestimento.

#### ii. Cristalização de sais solúveis ou acção do gelo/degelo

A cristalização de sais solúveis no interior dos poros de um revestimento ou a acção do gelo/degelo pode provocar o aumento do seu volume e, por consequência, dar origem a tensões no seu interior que provocam a desagregação do material. No caso dos sais, as criptoflorescências podem provocar a perda de coesão dos revestimentos.

#### iii. Reboco fraco, sem dureza superficial

Também as próprias características do revestimento podem contribuir para o desenvolvimento da perda de coesão. Isto acontece quando se trata de um reboco fraco, com pouca dureza superficial e no qual a ligação entre partículas é fraca. Um revestimento com estas características apresenta-se ainda mais susceptível ao enfraquecimento das ligações entre partículas

#### iv. Acção de microorganismos e organismos

A simples presença de organismos e os produtos que expelem podem ser nocivos para os revestimentos, levando à sua degradação. Os produtos resultantes do seu metabolismo podem ser do tipo ácido, provocando assim a desagregação do material. Outro caso bastante prejudicial é o caso em que os organismos em questão conservam humidade na superfície dos materiais.

#### v. Reacção química entre os materiais que constituem os revestimentos e as substâncias presentes na atmosfera

Os compostos presentes na atmosfera também contribuem para a degradação dos revestimentos, sendo eles naturais ou artificiais. Quando se dão reacções químicas entre estes compostos e os constituintes do reboco, ocorre uma transformação molecular do material, que pode contribuir para a desintegração do revestimento e a formação de subprodutos potencialmente perigosos.

Entre todas as causas, a cristalização de sais solúveis é considerada como a principal causa para a deterioração de materiais porosos (CHAROLA, 2000).

## **1.4 Restituição da coesão dos revestimentos antigos**

### **1.4.1 A consolidação dos revestimentos**

A intervenção é admissível para impedir a degradação de onde poderia derivar uma ulterior grave danificação. Uma intervenção de restauro pretende dar novamente eficiência e funcionalidade a um produto da actividade humana (BRANDI, 2006).

A consolidação é a opção a tomar no tratamento de revestimentos antigos com perda de coesão, quando se pretende a conservação do revestimento original, o que acontece geralmente quando o mesmo apresenta um valor patrimonial elevado. A presença de pinturas murais, de ornamentos, ou vestígios de técnicas raras, pode justificar a consolidação do revestimento uma vez que, em geral, a perda de coesão se apresenta como uma anomalia de degradação profunda, tanto a nível pontual como generalizado. Os materiais a adoptar neste tipo de intervenções devem, acima de tudo, ser materiais idênticos e compatíveis com o revestimento original, de modo a não acelerar o processo de degradação e de modo a que as suas características físico-químicas não sejam significativamente alteradas (VEIGA, 2003).

A consolidação é um método que tem sido utilizado há bastante tempo para o tratamento de pinturas murais (mais ligado à área da conservação e restauro) e também para o tratamento de materiais como a pedra. No entanto, a adaptação deste método para a área dos rebocos não é automática; os produtos a utilizar devem ser previamente estudados, as melhores soluções devem ser investigadas, considerando sempre a compatibilidade dos mesmos ao revestimento, e a viabilidade técnica e económica do método de tratamento. A investigação na área da consolidação de revestimentos de argamassa é recente, são poucos os documentos científicos sobre o assunto, e os casos em que o método foi já aplicado em Portugal são muito reduzidos (VEIGA *et al.*, 2003; TAVARES 2009).

A restituição da coesão de um revestimento (consolidação) é conseguida através da aplicação de produtos consolidantes com baixa viscosidade (líquidos) na sua superfície degradada que, penetrando no interior do revestimento, vai reconstituir a ligação entre as partículas através da solidificação ou polimerização do consolidante, dependendo do produto utilizado (TONIOLO *et al.*, 2011). Os produtos consolidantes normalmente disponíveis são produtos orgânicos ou inorgânicos, e cuja aplicação pode ser feita por pulverização ou pincelagem, com a primeira opção a ser a mais viável tendo em vista a extensão que as superfícies a tratar podem ter; a aplicação por pulverização proporciona ainda uma distribuição do produto mais homogénea e controlada (VEIGA, 2012).

A penetração em profundidade do produto aplicado vai melhorar a coesão entre as partículas do material desintegrado e também as suas características mecânicas; além da compatibilidade, a penetração do produto é uma das características mais importantes que deve ser considerada na sua escolha (TAVARES *et al.*, 2005). Este é um método de tratamento essencialmente a nível superficial do revestimento, e no qual se pretende devolver ao revestimento características próximas das que possuía originalmente, quer a nível de resistência mecânica quer a nível da capacidade de protecção à água (TAVARES, 2009). É fundamental que não ocorram alterações drásticas das características do revestimento, de modo a não introduzir tensões e barreiras que podem contribuir rapidamente para a degradação de outros elementos antigos em contacto com o revestimento (VEIGA, 2010).

Após tratamento, as zonas consolidadas devem apresentar um aspecto estético idêntico ao revestimento na sua globalidade. Nos produtos estudados nesta dissertação, a adição de pigmentos inorgânicos aos consolidantes é bastante importante quando se fala de intervenções em revestimentos coloridos, sendo necessário reintegrar a nível cromático as zonas tratadas com as restantes zonas do revestimento. A adição dos pigmentos pode facilitar esta tarefa; no entanto, previamente à consolidação, deve proceder-se a estudos preliminares para que o pigmento correcto seja o escolhido e o aspecto após tratamento seja idêntico e passe despercebido quando integrado na totalidade do revestimento. Quando necessário, a reintegração cromática pode ainda ser completada com técnicas específicas da área da conservação de pintura mural (*ilusionismo, pontilhismo, tratteggio*, etc.) (VEIGA, 2011).

Entende-se por reintegração o preenchimento de lacunas com materiais novos que permitem a inserção harmoniosa no conjunto do objecto de arte, e simultaneamente, possibilitem, futuramente, o reconhecimento da época em que foi executado (HENRIQUES, 1991).

#### **1.4.2 Principais produtos consolidantes utilizados ao longo do tempo**

Os produtos consolidantes geralmente utilizados são produtos orgânicos ou produtos inorgânicos. Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, apresentam pouca compatibilidade com os suportes antigos; os consolidantes mais compatíveis encontram-se no grupo dos inorgânicos, onde se inserem a hidróxido de cálcio, o hidróxido de bário ou o silicato de etilo, que também se caracterizam pela maior durabilidade. Quando se usam consolidantes à base de resinas, a consolidação das partículas é feita por colagem; no caso dos produtos minerais a consolidação é conseguida através da regeneração do ligante degradado ou perdido (VEIGA, 2012).

Os consolidantes orgânicos apresentam, em regra, maior facilidade de aplicação, maior flexibilidade e maior capacidade adesiva, mas são pouco compatíveis (VEIGA, 2011). A aplicação destes produtos pode provocar alterações significativas das características físico-químicas das superfícies tratadas (TAVARES *et al.*, 2005); também a sua durabilidade a longo prazo é geralmente baixa, uma vez que as suas propriedades iniciais podem alterar-se rapidamente em ambientes exteriores (PIGINO *et al.*, 2012).

Os consolidantes inorgânicos são os produtos mais utilizados, principalmente devido à sua maior compatibilidade e durabilidade demonstradas (DEI *et al.*, 2006; ZENDRI *et al.*, 2007; VEIGA, 2011). No caso das argamassas de cal, o consolidante à base de hidróxido de cálcio é claramente o produto mais compatível, mas que necessita de um número elevado de aplicações para que se obtenha um tratamento com eficácia aceitável (VEIGA, 2011). No seu estudo, Tavares realizou uma recolha bibliográfica onde descreveu os principais produtos consolidantes inorgânicos utilizados ao longo do tempo (TAVARES, 2009):

- i. Água de cal (água + hidróxido de cálcio);
- ii. Silicato de etilo (séc. XIX);
- iii. Hidróxido de bário (séc.XIX);
- iv. Polimeros, acetatos de polivinilo, resinas acrílicas, metacrilatos (meados séc.XX);
- v. Bactérias (finais séc. XX);
- vi. Produtos nanoestruturados (séc.XXI).

A água de cal, obtida de uma mistura de água e hidróxido de cálcio, é um dos consolidantes mais antigos de que se tem conhecimento, com Vitruvius (séc. I a.C.) a referir-se na sua obra à utilização de água de cal para a consolidação de rebocos (HANSEN *et al.*, 2003). No entanto, a maioria dos produtos desenvolvidos ao longo do tempo, foram essencialmente para a aplicação na consolidação de pedras rochosas e pinturas murais. Em 2009, Tavares (2009) concluiu que os produtos mais estudados continuavam a ser os silicatos de etilo (especialmente na consolidação de pedra) e, em menor escala, os hidróxidos de cálcio e de bário (consolidação de pinturas murais e rebocos de cal).

Actualmente a investigação na área dos consolidantes está bastante focada em produtos à base de nanopartículas, ainda que principalmente para aplicação na consolidação de pedra e pinturas murais; a grande vantagem destes produtos relaciona-se com uma maior capacidade de penetração, devido à menor dimensão das partículas (nível nanométrico). Muitos destes produtos são constituídos por nanopartículas de hidróxido de cálcio, devido à elevada compatibilidade com a maioria das superfícies arquitectónicas (DEI *et al.*, 2006; DANIELE *et al.*, 2007). A aplicação destes produtos na consolidação de argamassas de cal aérea também já foi abordada, recorrendo também a produtos nanoestruturados de cal (BORSOI *et al.*, 2011a; BORSOI *et al.*, 2011b).

### **1.4.3 Requisitos importantes dos produtos consolidantes**

A definição de requisitos para os materiais a utilizar, e para o desempenho dos revestimentos tratados, apenas recentemente começou a ser objecto de estudo e investigação (VEIGA, 2011). No entanto, alguns destes parâmetros são comuns a vários estudos, e relacionam-se directamente com as principais características que um produto consolidante eficaz deve possuir: efeito estético inalterado; melhoria das propriedades mecânicas e da microestrutura; boa capacidade de penetração (TONIOLO *et al.*, 2011). Além da capacidade de penetração, outros autores referem ainda outras características importantes como: a compatibilidade com o substrato; a capacidade consolidante; a durabilidade (resistência aos agentes atmosféricos e biológicos); efeito na absorção de água e

permeabilidade ao vapor de água; facilidade de aplicação; baixa toxicidade para o operador e para o ambiente (CASAL, 2001; HANSEN *et al.*, 2003; TAVARES, 2009; BORSOI *et al.*, 2012).

A **profundidade de penetração** de um produto consolidante é essencial para o sucesso do processo de consolidação. O consolidante deve atingir a profundidade suficiente para consolidar a espessura degradada do material (CASAL, 2001). Este parâmetro depende de vários factores, tais como: a composição e viscosidade do produto consolidante; a técnica de aplicação do produto; o grau de degradação e a composição do material a ser tratado (TAVARES, 2009). O produto deve recobrir as superfícies internas dos poros em vez de os preencher totalmente, e estender-se gradualmente entre os vários poros.

Os consolidantes devem ter **compatibilidade** físico-química com os revestimentos tratados, não dando origem a compostos que possam afectar a estrutura cristalina e a estabilidade mecânica da argamassa (TAVARES *et al.*, 2005). Seja no tratamento de revestimentos antigos, de materiais rochosos ou de pinturas murais, os consolidantes inorgânicos são os mais compatíveis, uma vez que as características, tanto físicas como químicas, são semelhantes às dos materiais consolidados.

O produto consolidante não deve modificar a estrutura porosa, nem reduzir excessivamente a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor de água (VEIGA, 2012). Desta forma, evita-se a acumulação de água nas zonas tratadas, que pode dar origem a várias formas de degradação.

## 2 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

Neste segundo capítulo do estado actual do conhecimento, descrevem-se as principais características dos materiais utilizados nos produtos consolidantes estudados nesta dissertação – a cal aérea, o metacaulino, e os pigmentos inorgânicos (ocre amarelo e vermelho).

### 2.1 Cal aérea

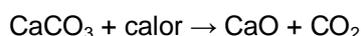
#### 2.1.1 Definição

Segundo Coutinho (2006), a cal aérea é o ligante que resulta da decomposição, por acção da temperatura, de rochas cuja constituição em carbonato de cálcio (rocha cálcica,  $\text{CaCO}_3$ ) ou em carbonato de cálcio e magnésio (rocha dolomítica,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), não é inferior a 95%. Trata-se de um ligante aéreo, que necessita do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera para endurecer, e assim não consegue endurecer dentro de água (COUTINHO, 2006).

*“A cal terá sido um dos materiais mais antigos utilizado na construção, antecedido apenas, provavelmente, pela pedra, barro, madeira e gesso”* (MARGALHA, 2010). A cal aérea foi utilizada desde a antiguidade e durante vários séculos em argamassas de reboco e de assentamento, tendo caído em desuso desde o desenvolvimento dos ligantes hidráulicos, com maior resistência e um endurecimento a curto prazo também maior.

#### 2.1.2 Calcinação, hidratação e carbonatação – ciclo da cal

A **calcinação** ou cozedura das rochas cálcicas pode dar-se entre os 800 e os 1000°C, mas geralmente por volta dos 900°C, temperatura a que se dá a decomposição do carbonato de cálcio da rocha em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), libertado para a atmosfera. Obtém-se assim a cal viva.



Em primeiro lugar, a rocha vai libertar a água que contém até que, a partir de uma dada temperatura, se inicia a decomposição do dióxido de carbono. A temperatura de decomposição vai depender do grau de pureza do material; a temperatura vai ser inferior quanto menos puro for o material, como é o caso das rochas dolomíticas, em que o processo de calcinação é idêntico ao das rochas calcárias mas com uma temperatura inferior – entre os 400°C e os 480°C (FARIA, 2004; MARGALHA, 2010).

A cal viva é um produto instável que necessita de **hidratação**; o produto da calcinação pode apresentar-se sobre a forma de pedra ou em pó. A hidratação da cal viva é uma reacção exotérmica (pode ultrapassar os 150°C), que pode ser executada por aspersão ou através da sua imersão em água; o óxido de cálcio passa a hidróxido de cálcio, e a cal viva transforma-se em cal apagada, extinta ou hidratada.



O contacto da cal viva com a água provoca um aumento do seu volume, com a sua desagregação acompanhada de efervescência e libertação de vapores. Dependendo do processo de extinção obtém-se a cal em pó ou em pasta. A cal extinta é a cal utilizada na construção para produção de argamassas.

A cal hidratada, em contacto com o dióxido de carbono da atmosfera, retorna à composição química da rocha de que provém, e transforma-se novamente em carbonato de cálcio; é o processo de **carbonatação** da cal hidratada.



O processo de carbonatação das argamassas de cal aérea é bastante lento (pode levar anos), e a sua velocidade pode ser afectada por vários factores: teor em água; quantidade de cal; temperatura; concentração em  $\text{CO}_2$ ; espessura da argamassa; humidade relativa ambiente (FARIA, 2004).

O retorno da cal hidratada ao ponto de partida fecha o chamado ciclo da cal, que se apresenta na figura 2.1.

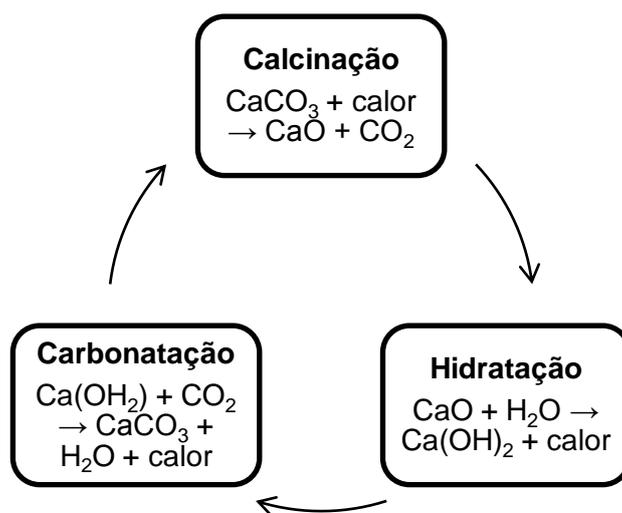


Fig. 2.1 - Ciclo da cal

## 2.2 Metacaulino

### 2.2.1 Materiais pozolânicos

As pozolanas são produtos que podem ser naturais ou artificiais, e que são constituídos maioritariamente à base de sílica e alumina. À temperatura ambiente e na presença de água, estes constituintes combinam-se com o hidróxido de cálcio da cal, dando origem a compostos bastante estáveis em água e com propriedades aglomerantes, do tipo dos que são obtidos quando se utilizam ligantes hidráulicos (COUTINHO, 2006). Os materiais pozolânicos não têm características hidráulicas

por si só; quando combinados com a cal aérea hidratada dá-se a formação dos compostos hidráulicos (VEIGA, 2011).

As pozolanas são materiais utilizados desde a antiguidade, com a sua incorporação em argamassas de cal aérea, de modo a conferir-lhes propriedades hidráulicas, maior resistência e durabilidade, tendo chegado aos dias de hoje. Muitas argamassas antigas já caracterizadas em vários estudos, como é o exemplo das argamassas romanas, apresentam adições de pozolanas naturais de origem vulcânica ou artificiais à base de produtos cerâmicos, como o pó de tijolo; a aplicação destas argamassas era realizada principalmente em locais com humidade relativa elevada ou com presença de água, como depósitos de água, tanques ou termas (MARGALHA, 2010; VEIGA, 2011). As argamassas de cal aérea com pozolanas na sua constituição adquirem uma maior capacidade de endurecimento em ambientes húmidos, as suas resistências mecânicas aumentam e também a sua durabilidade é incrementada, já que, por exemplo, resistem melhor à acção dos sais solúveis.

Os materiais pozolânicos podem ser classificados em pozolanas naturais e pozolanas obtidas por tratamento térmico, e assim designadas por pozolanas artificiais. Os subprodutos industriais são outro tipo de material que tem vindo a ser utilizado como pozolana, devido à sua reactividade pozolânica demonstrada e ao interesse da sua re-inserção no processo produtivo.

#### **a) Pozolanas naturais**

As pozolanas naturais são constituídas por rochas com propriedades pozolânicas, cujo tratamento engloba apenas a sua extracção e moagem. A formação destas rochas dá-se devido a um arrefecimento brusco e uma solidificação rápida de magmas ricos em sílica, após a erupção vulcânica e que ficaram num estado amorfo ou semi-cristalino. A acção dos agentes atmosféricos provoca a alteração destas rochas, que se podem encontrar soltas ou consolidadas em tufo vulcânicos; a meteorização das lavas vulcânicas resulta num aumento da reactividade pozolânica (FARIA, 2004; COUTINHO 2006). Como exemplos de pozolanas naturais, têm-se a nível nacional as pozolanas dos Açores e de Porto Santo na Madeira, enquanto a nível europeu se destacam as pozolanas italianas com diferentes proveniências, ou as pozolanas gregas de Santorini e as espanholas das ilhas Canárias.

#### **b) Pozolanas artificiais**

As pozolanas artificiais podem ser produtos argilosos sujeitos a tratamento térmico suficiente para a sua desidratação, geralmente entre os 500°C e os 950°C dependendo do material, aumentando-se assim a porosidade das partículas e a sua superfície activa. Como exemplos destas pozolanas artificiais, tem-se o metacaulino, a diatomite, as argilas cozidas ou as cinzas de casca de arroz. No caso da diatomite ou terra diatomácea, resultante da acumulação de fósseis de conchas siliciosas de organismos unicelulares, pode ser também utilizada em cru sem qualquer tipo de tratamento térmico, uma vez que já possui propriedades pozolânicas, embora essas propriedades possam ser optimizadas através de um tratamento térmico (FARIA, 2004; VELOSA, 2006; COUTINHO, 2006).

### c) Subprodutos industriais

Os subprodutos industriais têm sido cada vez mais utilizados como pozolanas artificiais, devido a questões de sustentabilidade ambiental. Estes produtos resultantes de processos industriais, possuem uma reactividade pozolânica semelhante à das pozolanas artificiais pois são obtidas de forma semelhante. Como exemplos têm-se as cinzas volantes provenientes da queima do carvão nas centrais termoeléctricas, ou a sílica de fumo proveniente da extração do silício a partir do quartzo.

No caso do estudo realizado com esta dissertação, a pozolana utilizada é o metacaulino (pozolana artificial).

#### 2.2.2 Metacaulino

O metacaulino é um material silicoaluminoso ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) obtido por tratamento térmico (calcinação) de argilas cauliníticas entre os 600°C e os 800°C. O caulino ou caulinite, cuja fórmula química é  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , pode resultar da degradação do feldspato de granitos (caulinos residuais) ou em bacias por transporte e deposição (caulinos sedimentares). Por volta dos 100°C o caulino perde a água adsorvida, e por dos 500°C dá-se a sua desidroxilação originando o metacaulino (FARIA, 2004; VELOSA, 2006).

A calcinação do caulino provoca o colapso total ou parcial da sua estrutura cristalina e dá-se a formação de uma fase desordenada e reactiva, que assim confere as propriedades pozolânicas ao metacaulino produzido (BORSOI *et al.*, 2012). Após ou antes do tratamento térmico, o caulino ou o metacaulino obtido é moído para obtenção de uma superfície específica elevada e, por consequência, um aumento do grau de pozolanicidade.

As argamassas de substituição aplicadas em casos de conservação de revestimentos antigos são por vezes compostas por argamassas de cal com aditivos pozolânicos. A introdução de metacaulino em argamassas e betões tem como vantagens o aumento das resistências mecânicas, a redução da sua permeabilidade, o aumento da resistência a ataques químicos, a redução dos efeitos da reactividade álcali-sílica, o aumento da compacidade do betão e o aumento da trabalhabilidade, o que se traduz numa maior durabilidade das argamassas e betões (SIDDIQUE, 2009).

No caso das argamassas e betões de ligante hidráulico, a utilização do metacaulino na substituição de parte dos ligantes surge como uma alternativa para a redução dos gastos energéticos, já que a energia para a sua produção é menor.

#### 2.2.3 Reactividade pozolânica e produtos formados

A reactividade pozolânica caracteriza-se pela capacidade da sílica e da alumina amorfa se combinarem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando-se assim silicatos e aluminatos de cálcio hidratados do género dos que se formam na hidratação do cimento Portland (FARIA, 2004). A adição da pozolana vai modificar o equilíbrio químico e, por meio da fixação do

hidróxido de cálcio, dá-se origem então a elementos hidráulicos com propriedades ligantes e coesivas.

Para que haja esta reacção é importante que a sílica e alumina não estejam num elevado grau de cristalinidade, o que os tornaria inertes; por isso a reactividade pozolânica está ligada à estrutura interna da pozolana e será tanto maior quanto mais afastada estiver do estado cristalino (COUTINHO, 2006). No caso do metacaulino, o estado amorfo é conseguido pela acção da temperatura não demasiadamente elevada

São vários os factores que podem igualmente afectar a reactividade de uma pozolana (VELOSA, 2006), entre os quais:

- Tipo de pozolana – a composição química da pozolana é bastante importante, a quantidade de aluminatos e silicatos activos em estado amorfo ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) capazes de reagir com o hidróxido de cálcio é essencial para o sucesso da reacção;
- Superfície específica - deve ser a maior possível, de modo a facilitar a reacção por aumento da área de contacto entre as partículas de sílica e alumina e as partículas de hidróxido de cálcio;
- Tempo de cozedura – este factor aplica-se a pozolanas artificiais e encontra-se ligado à quantidade de sílica amorfa presente; a temperatura de cozedura irá depender da composição mineralógica da matéria-prima;
- Relação cal/pozolana – dependerá da pozolana em questão, devendo ser fundamentada na quantidade de sílica e alumina reactivas;
- Condicionamento – como a reacção ocorre na presença de água, a reacção pozolânica é altamente favorecida com curas de humidade relativa muito elevada;

Os principais produtos hidráulicos, resultantes da reacção pozolânica entre a cal, o metacaulino e a água, são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e os aluminatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados (geralmente stratlingite,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ , e aluminato tetracálcico hidratado,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ). A formação de stratlingite é importante para o aumento das resistências mecânicas (GAMEIRO *et al.*, 2012).

## 2.3 Pigmentos

### 2.3.1 Generalidades sobre pigmentos

Os pigmentos são substâncias sólidas e finas, brancos ou corados, não solúveis em água, utilizados para conferir cor e opacidade (MARQUES, 1996). As cores de cada pigmento surgem da interacção dos mesmos com a luz, e relacionam-se com os comprimentos de onda característicos de cada pigmento. Quando a luz incide sobre um material, a sua cor irá ser a que corresponde ao comprimento de onda da luz que não é absorvida, e por isso reflectida. O olho humano distingue as cores que correspondem a comprimentos de onda entre 400 nm e 700 nm da radiação electromagnética.

Os pigmentos podem ser classificados de acordo com a sua proveniência ou processo de obtenção, e de acordo com a sua natureza química. Em relação ao processo de obtenção, os pigmentos podem ser classificados em naturais ou sintéticos; já quanto à natureza química, podem distinguir-se pigmentos orgânicos e pigmentos inorgânicos (CRUZ, 2005):

- Pigmentos naturais (N) – provêm de produtos naturais sujeitos apenas a processos de moagem ou peneiração para purificação e separação de outros materiais a que possam estar associados;
- Pigmentos sintéticos (S) – são obtidos a partir de reacções químicas, com a utilização de materiais simples ou por decomposição de outros mais complexos;
- Pigmentos orgânicos (O) – são obtidos por tratamento de produtos vegetais e animais;
- Pigmentos inorgânicos (I) – podem ser extraídos da natureza (origem mineral) ou sintetizados.

Os pigmentos são materiais utilizados desde a antiguidade, em especial no caso dos pigmentos naturais com a sua utilização em pinturas murais com mais de 4.000 anos; veja-se o exemplo do pigmento azul egípcio, que data de 3.000 a.C. e que é considerado o primeiro pigmento sintético alguma vez produzido (ROCHA-GOMES *et al.*, 2007; TAVARES, 2009).

Na Tabela 2.1 referem-se alguns exemplos de pigmentos, divididos de acordo com a sua cor e classificados quanto ao seu processo de obtenção e à sua natureza química. As figuras 2.2a a 2.2e referem-se também a alguns exemplos de pigmentos.

Em geral, as principais características que os pigmentos devem possuir são (MARQUES, 1996):

- Opacidade (poder de cobertura);
- Poder corante;
- Finura e propriedade de suspensão;
- Estabilidade à luz, calor, humidade, radiação ultra-violeta e agentes de corrosão;

No caso da mistura de pigmentos com cal e água (tintas de cal ou caiações), estes devem ainda demonstrar compatibilidade com o ligante. Os pigmentos inorgânicos, naturais ou artificiais, são os que apresentam melhor resistência à cal, pela sua resistência ao meio fortemente alcalino onde são inseridos (RIBEIRO *et al.*, 2002). Também a sua granulometria bastante fina pode aumentar a capacidade de coesão e coloração nas bases de cal, e garantir uma melhor mistura entre os materiais. A capacidade de suspensão dos pigmentos vai também contribuir para atrasar a sedimentação da mistura com cal e água (SANTOS, 2008).

### **2.3.2 Ocre amarelo e vermelho**

Os pigmentos utilizados no estudo desta dissertação incluem-se no grupo dos ocre, com a cor amarela e vermelha. Portugal é um país geologicamente rico em pigmentos ocre com a cor amarela e vermelha, mas cuja tradição de extracção destes pigmentos naturais está praticamente

abandonada (GIL *et al.*, 2007; FARIA *et al.*, 2010). Os ocre amarelos e vermelhos estão entre os pigmentos mais facilmente encontrados em arqueologia (MORTIMORE *et al.*, 2004).

Tabela 2.1 – Exemplos de alguns pigmentos, respectivas classificações e composições (adaptado de CRUZ, 2000; TAVARES, 2009)

Cor	Pigmentos	Classificação	Composição
Branco	Branco de chumbo	(S) + (I)	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$
	Cré	(N) + (I)	$\text{CaCO}_3$
	Gesso	(N) + (I)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Branco de titânio	(S) + (I)	$\text{TiO}_2$
Amarelo	Ocre amarelo	(N) + (I)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{FeO(OH)}$
	Óxido de chumbo	(S) + (I)	$\text{PbO}$
	Amarelo de crómio	(S) + (I)	$\text{PbCrO}_4$
	Auripigmento	(N) + (I)	$\text{As}_2\text{O}_3$
Azul	Azul egípcio	(S) + (I)	$\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$
	Azurite	(N) + (I)	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$
	Azul de cobalto	(S) + (I)	$\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
	Azul da Prússia	(S) + (I)	$\text{Fe}_4[\text{Fe(CN)}_6]_3$
Verde	Malaquite	(N) + (I)	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$
	Verde de óxido de crómio	(S) + (I)	$\text{Cr}_2\text{O}_3$
	Verdete	(S) + (I)	$\text{Cu(CH}_3\text{COO)}_2 \cdot 2\text{Cu(OH)}_2$
	Terra verde	(N) + (I)	$\text{K}[(\text{Al}, \text{Fe}^{\text{III}}), (\text{Fe}^{\text{II}}, \text{Mg})](\text{AlSi}_3, \text{Si}_4)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Vermelho	Ocre vermelho	(N) + (I)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
	Terra de Siena	(N) + (I)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ + argila
	Vermelhão	(N) + (I)	$\text{HgS}$
	Vermelho de chumbo	(S) + (I)	$\text{Pb}_3\text{O}_4$
Castanho	Ocre castanho	(N) + (I)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Úmbria	(N) + (I)	Óxido de Fe, Mn, Al
Preto	Negro vegetal	(N) + (I)	C
	Negro de osso	(N) + (I)	$\text{C} + \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{CaCO}_3$

(N) – Natural; (S) – Sintético; (I) – Inorgânico.



Fig. 2.2 a) Ocre amarelo; b) Azurite; c) Malaquite; d) Ocre vermelho; e) Ocre castanho (retirado de [www.kremer-pigmente.com](http://www.kremer-pigmente.com))

O termo “ocre” refere-se, na sua generalidade, a pigmentos extraídos de terras coradas cuja cor pode variar desde o vermelho até ao castanho, amarelo ou roxo, e que são compostos à base de minerais

de ferro. São os distintos minerais de ferro existentes na natureza que conferem aos ocres a variedade de cores conhecidas (MACDONALD *et al.*, 2011).

A cor apresentada pelos ocres parece ser influenciada por três factores principais (MORTIMORE *et al.*, 2004; RAMOS *et al.*, 2008):

- Natureza do óxido de ferro presente – os ocres vermelhos possuem a sua composição maioritária à base de hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), enquanto que os ocres amarelos são ricos em goethite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{FeO}(\text{OH})$ );
- Presença de outros minerais ou impurezas – tais como minerais à base de argila facilmente encontrados em qualquer terra natural (por exemplo caulinite ou illite), ou outro tipo de óxidos metálicos, já que a presença de, por exemplo, dióxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ), pode dar origem a ocres castanhos; a presença de impurezas como gesso ou calcite, vai também interferir na cor do ocre;
- Granulometria do material – parece apresentar mais influência nos ocres cuja cor pode variar do vermelho até ao violeta.

Também a região de extracção pode influenciar as cores dos pigmentos, já que cada terra possui características cromáticas únicas a nível de tonalidade, saturação e luminosidade, influenciando o poder corante e de cobertura e tornando os pigmentos característicos do local de proveniência (RIBEIRO *et al.*, 2002). Dependendo igualmente das regiões de origem, também a presença de outros minerais ou impurezas pode ser bastante variável (quartzo, minerais argilosos ou do grupo das micas, etc.).

Os ocres de origem natural demonstram elevada capacidade de coloração, mas podem ser pouco homogéneos dependendo da zona de extracção (TAVARES, 2009). Já os ocres de origem artificial possuem um elevado grau de pureza, uma maior estabilidade térmica e química, e uma maior uniformidade de cor (ROCHA-GOMES *et al.*, 2007).

#### **Ocre Amarelo** (HRADIL *et al.*, 2003; EASTAUGH *et al.*, 2004)

O ocre amarelo é um pigmento que ocorre com abundância na natureza, devido à acção climática sobre depósitos ou solos ricos em ferro. A sua coloração, em tons de amarelo, é dada principalmente pela presença da goetite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{FeO}(\text{OH})$ ).

A goetite é o óxido de ferro mais facilmente encontrado em solos, com predominância em locais de alta latitude e alta humidade, onde os solos raramente ficam secos. Pode desenvolver-se sobre rochas com baixa acidez, em especial calcários e margas, mas também sobre rochas vulcânicas.

#### **Ocre Vermelho** (HRADIL *et al.*, 2003; EASTAUGH *et al.*, 2004)

O principal constituinte do ocre vermelho é a hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), e é este óxido de ferro que lhe confere a cor vermelha. A hematite é um mineral muito comum na natureza, que ocorre preferencialmente na superfície de rochas ou na parte superior de perfis sedimentares, submetidos diariamente às várias

ações climatéricas. A erosão dos depósitos ricos em minerais de óxido de ferro dá origem aos ocres vermelhos; estes pigmentos naturais ocorrem, muitas vezes, associados a depósitos provenientes de erupções vulcânicas. As “terras vermelhas” são típicas do clima mediterrânico e tropical.

No caso de produção artificial, o ocre vermelho pode ser produzido por calcinação de outros ocres, como o ocre amarelo ou castanho, através da conversão dos hidróxidos de ferro em óxido de ferro ou hematite. Muitos dos ocres vermelhos obtidos artificialmente são visualmente confundidos com ocres vermelhos naturais; a diferença pode ser observada a nível da estrutura cristalina, onde o ocre natural possui uma estrutura ordenada, ao contrário do ocre artificial.

Previamente à sua utilização, os pigmentos, naturais ou sintéticos, podem ter necessidade de tratamentos como a moagem, peneiração ou lavagem.



## **PARTE II – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**



## **3 PLANO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

### **3.1 Generalidades**

A campanha experimental desenvolvida ao longo desta dissertação divide-se em três fases distintas. Numa primeira fase, são preparados todos os provetes para posterior aplicação dos produtos em estudo. Depois, é feita a aplicação dos produtos consolidantes e são realizados os vários ensaios em idades de estudo definidas para avaliação da sua eficácia. Além da aplicação em provetes, também foram feitas aplicações dos produtos num painel da estação de envelhecimento natural existente no LNEC.

Os produtos consolidantes estudados são compostos por cal, metacaulino, água e têm a adição de pigmentos inorgânicos em alguns dos casos. O metacaulino confere propriedades pozolânicas aos consolidantes e, como já foi referido como sendo também um objectivo deste trabalho, a adição dos pigmentos inorgânicos em alguns dos produtos pretende avaliar a viabilidade da reintegração cromática e também verificar a sua influência na consolidação das argamassas. Uma vez que os revestimentos antigos apresentam uma grande variedade de cor, é importante o estudo da adição dos pigmentos aos produtos consolidantes.

Ao longo deste capítulo apresentam-se:

- Os produtos consolidantes estudados e as simbologias adoptadas para cada um deles;
- Uma descrição das várias etapas da campanha experimental, incluindo a referência a condições de cura e ensaios a realizar;
- A identificação escolhida para os provetes, e um resumo dos produtos aplicados e dos ensaios em cada provete;

Toda a campanha experimental foi desenvolvida nos laboratórios do NRI no LNEC.

### **3.2 Produtos consolidantes em estudo**

Os produtos de consolidação dos provetes de argamassa endurecida vão desde soluções não pigmentadas até às soluções com adição de pigmentos, sendo constituídos à base de cal, metacaulino, água e pigmentos. A água de cal é um dos produtos consolidantes com utilização mais antiga e que possui naturalmente compatibilidade com os revestimentos tradicionais antigos à base de cal aérea e areia. A adição de um produto pozolânico, como o metacaulino, tem em vista o incremento da resistência mecânica e da resistência à água dos revestimentos tratados; é necessário assegurar as condições para a ocorrência da reacção pozolânica.

Tanto a escolha da percentagem de metacaulino (MK) a utilizar na substituição da cal (25%), como as curas adoptadas, vieram no seguimento do trabalho já efectuado no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH*, tal como se refere a seguir.

O estudo do metacaulino em produtos de consolidação de argamassas foi iniciado no projecto com uma percentagem de 17%, e os provetes consolidados conservados num ambiente controlado de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e  $50 \pm 5\%$  de humidade relativa (HR). Verificou-se um aumento moderado na resistência mecânica e uma pequena redução da permeabilidade à água. A profundidade de penetração da solução consolidante foi suficiente para a ocorrência de uma consolidação da superfície da argamassa. No entanto, a observação microestrutural no microscópio electrónico de varrimento (MEV-EDS) demonstrou que os produtos pozolânicos eram quase inexistentes. O seu efeito consolidante pode ser atribuído à carbonatação da cal tendo o MK funcionado como *filler*. Após a aplicação da solução consolidante vai haver “competição” entre a reacção que dá origem à formação de produtos pozolânicos e a reacção de carbonatação da cal; os autores concluem que as condições de cura utilizadas após a consolidação dos provetes não favoreceram as reacções pozolânicas e a conseqüente formação de produtos pozolânicos (BORSOI *et al.*, 2012).

Assim, além do aumento da percentagem de metacaulino a utilizar, e da introdução de pigmento (Tabela 3.1), também as condições de cura foram alteradas. Os provetes consolidados foram sujeitos a 7 dias de cura com  $95 \pm 5\%$  HR, pretendendo-se assim avaliar se estas condições iniciais potenciam a formação de produtos pozolânicos. As primeiras 24 horas são cruciais na formação dos produtos pozolânicos, e a cura húmida vai “atrasar” as reacções de carbonatação da cal e favorecer a formação dos mesmos. Para verificação, foram aplicadas duas soluções não pigmentadas com 25% de MK, uma com cura combinada como nas soluções pigmentadas e outra apenas com cura única de  $65 \pm 5\%$  HR (Tabela 3.2).

Uma vez que, no caso dos consolidantes não pigmentados, vão ser estudados dois tipos de cura distintos, a simbologia de cada um deles irá fazer referência à cura:

- **MK25% CC** – caso em que o consolidante MK25% é sujeito à **cura combinada** de 7 dias a  $95 \pm 5\%$  HR e os restantes dias com condições de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  HR;
- **MK25% CS** – caso em que o consolidante MK25% é sujeito a uma cura integral de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  HR.

Na Tabela 3.1 apresenta-se os produtos estudados, as respectivas composições, terminologias adoptadas, e as combinações entre os produtos e as condições de cura.

Tabela 3.1 - Combinações estudadas: composição dos consolidantes, simbologia adoptada e condições de cura

<b>Combinação</b>	<b>Composição dos produtos consolidantes</b>	<b>Simbologia adoptada</b>	<b>Condições de cura</b>
A	Cal + Metacaulino 25% + H <sub>2</sub> O	MK25% CC	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
B	Cal + Metacaulino 25% + H <sub>2</sub> O	MK25% CS	Apenas 65% HR
C	Cal + Metacaulino 25% + Ocre Alvalade 3% + H <sub>2</sub> O	MK25% + OA3%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
D	Cal + Metacaulino 25% + Ocre Alvalade 5% + H <sub>2</sub> O	MK25% + OA5%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
E	Cal + Metacaulino 25% + Rosso Ercolano 3% + H <sub>2</sub> O	MK25% + RE3%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
F	Cal + Metacaulino 25% + Rosso Ercolano 5% + H <sub>2</sub> O	MK25% + RE5%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
G	Cal + Metacaulino 25% + Vermelho Bayer 3% + H <sub>2</sub> O	MK25% + VB3%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR
H	Cal + Metacaulino 25% + Vermelho Bayer 5% + H <sub>2</sub> O	MK25% + VB5%	7 dias de 95% HR + restantes dias de 65% HR

### **3.3 Descrição das várias fases experimentais**

#### **3.3.1 Primeira fase experimental – realização dos provetes**

Nesta primeira fase são realizados todos provetes de argamassa onde serão aplicados os consolidantes. A argamassa realizada pretende simular uma argamassa de cal aérea com perda de coesão e, assim, com necessidade de intervenção. A optimização das quantidades das matérias-primas para produção desta argamassa foi já feita no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH*, onde a presente dissertação se insere, pelo que toda a produção de argamassas partiu desde logo dessas quantidades optimizadas. Nenhum ensaio a matérias-primas das argamassas foi realizado, porque também os mesmos foram realizados no âmbito do projecto referido e as mesmas matérias-primas foram utilizadas (BORSOI *et al.*, 2012).

No que diz respeito à caracterização da argamassa em estado fresco, foram realizados dois ensaios – a determinação da consistência por espalhamento e a determinação do teor de ar.

#### **- Condições de Cura**

Todos os provetes realizados foram sujeitos a uma cura seca, em sala de ambiente controlado com temperatura ambiente média de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de HR, desde a sua moldagem até atingirem os 90 dias de carbonatação, data em que se considera que as argamassas de cal aérea atingem a sua tensão característica e a partir da qual será feita a aplicação dos consolidantes.

#### **3.3.2 Segunda fase experimental – aplicação dos consolidantes**

Como referido inicialmente, os consolidantes em estudo dividem-se em produtos pigmentados e não pigmentados. Nesta fase, são feitas todas as aplicações dos produtos consolidantes em provetes prismáticos de argamassa, em argamassas aplicadas no revestimento de tijolos e no revestimento de um painel da Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC.

Os pigmentos escolhidos são o ocre amarelo e o vermelho, visto tratar-se de pigmentos que foram muito utilizados em revestimentos antigos. A escolha dos pigmentos a utilizar, bem como as suas concentrações, foi baseada em estudos preliminares descritos mais adiante.

#### **- Condições de Cura**

Os provetes nos quais foram aplicadas soluções consolidantes pigmentadas foram sujeitos a uma cura combinada de 7 dias com  $95 \pm 5\%$  de HR e nos restantes dias em ambiente controlado com temperatura ambiente média de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  de HR. Os provetes onde foram aplicadas soluções consolidantes sem pigmentos foram sujeitos a dois tipos de cura distintas; a cura combinada idêntica à dos provetes consolidados pigmentados e a cura em que os provetes foram sujeitos apenas ao ambiente controlado com temperatura ambiente média de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  de HR. No caso das aplicações realizadas no painel da estação de envelhecimento natural, os produtos com

cura combinada foram sujeitos a 5 dias de cura considerada húmida ao invés dos 7 dias nos provetes, com aspersão de água duas vezes por dia.

### 3.3.3 Terceira fase experimental – realização de ensaios

Definiu-se que as idades de estudo para realização de ensaios seriam a 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Nesta fase são realizados ensaios mecânicos nos provetes prismáticos e ensaios físicos nos tijolos e no painel da estação de envelhecimento natural. O ensaio de envelhecimento artificial por meio de ciclos de calor-frio e chuva-frio é feito em tijolos, após serem completados os 90 dias da aplicação dos consolidantes. No caso das aplicações no painel, também foram realizados ensaios aos 7 dias após tratamento. São todos estes ensaios que permitem a caracterização dos produtos em estudo, assim como a avaliação da sua eficácia.

Os **ensaios mecânicos** realizados em provetes prismáticos são (Fig. 3.1):

- Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ );
- Resistência à tracção por flexão ( $R_t$ );
- Resistência à compressão ( $R_c$ );

São utilizados 3 provetes prismáticos em cada uma das idades de estudo; a determinação do módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio não destrutivo pelo que permite a utilização dos mesmos provetes no ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão. Este já é um ensaio destrutivo, mas que mesmo assim ainda possibilita a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão.

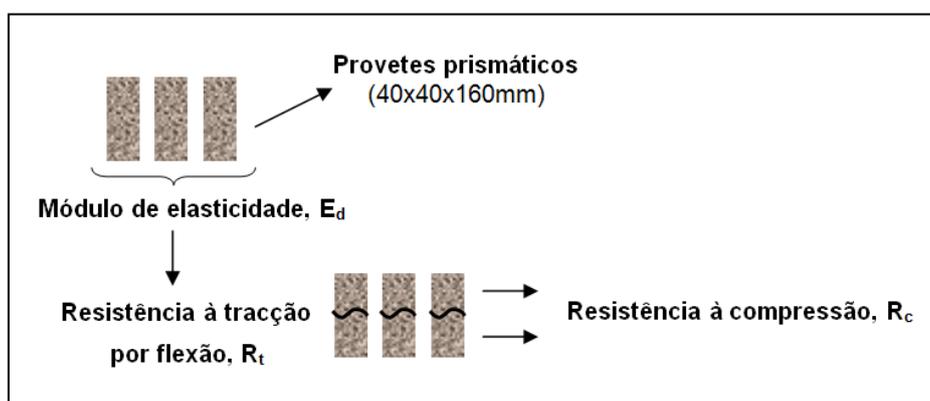


Fig. 3.1 - Esquema dos provetes utilizados em ensaios mecânicos

Os **ensaios físicos** realizados são:

- Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten -  $t_{TK}$ );
- Dureza superficial utilizando um durómetro Shore A ( $DS_D$ );
- Dureza superficial utilizando um esclerómetro de pêndulo ( $DS_E$ ) – apenas no painel de envelhecimento natural;
- Propagação de ultra-sons ( $V_{US}$ ) – apenas nos provetes em tijolos;

Estes ensaios não são destrutivos, pelo que os mesmos tijolos são utilizados em ambas as idades de estudo. No caso das aplicações no painel da estação de envelhecimento, as áreas de cada produto foram divididas em áreas mais pequenas para realização dos ensaios nas várias idades de estudo.

Além destes ensaios, foram feitas **análises a nível químico, mineralógico e microestrutural**, com o apoio do bolseiro Giovanni Borsoi:

- Determinação do pH da solução de consolidação;
- Análise por difracção de raios X de alguns pigmentos, e alguns dos produtos consolidantes utilizados;
- Observação microscópica dos resíduos secos das soluções de consolidação;
- Profundidade de carbonatação (por fenolftaleína);
- Profundidade de penetração dos produtos consolidantes (microscópio óptico);
- Análise da evolução cromática (escala NCS);
- Observação de amostras de argamassa tratada em microscopia óptica e microscopia electrónica de varrimento MEV-EDS.

A figura 3.2 apresenta a esquematização da metodologia de caracterização do efeito dos produtos consolidantes estudados.

### **3.4 Identificação dos provetes**

A identificação dos provetes é uma parte importante no planeamento da campanha experimental, para que não haja erros nos provetes a ensaiar.

Alguns desenvolvimentos no projecto levaram a que novas variáveis fossem tidas em conta e que outras fossem alteradas. Esta adaptação ao número de provetes já realizados e em processo de cura para conclusão dos 90 dias de carbonatação, levou a que algumas combinações ficassem restringidas a um menor número de provetes mas que são essenciais em termos de comparação e análise de resultados.

A numeração adoptada para os provetes prismáticos foi: RI 02/11 – P – n.º do provete. A sigla RI corresponde a Revestimentos e Isolamentos e provém do nome do NRI; o número 02 é colocado em concordância com o projecto FCT LIMECONTECH, pois também os provetes realizados no âmbito do projecto têm a numeração a iniciar-se RI 02; o número 11 corresponde ao ano em que os provetes são feitos, 2011; a letra P indica que se trata de um provete prismático; por fim vem o número do provete.

Além de provetes prismáticos de argamassa, também foi aplicada uma camada de argamassa no revestimento de tijolos; estes provetes têm numeração idêntica à dos provetes prismáticos, apenas a letra P é substituída pela letra T, indicando que se trata de um provete tijolo.

Na Tabela 3.2 é feita uma síntese das soluções de consolidação estudadas, respectivas curas, identificação dos provetes e ensaios a realizar nos mesmos.

Inicialmente, apenas um pigmento vermelho iria ser estudado. De acordo com as razões descritas no capítulo **5.1 Ensaios preliminares – escolha dos pigmentos**, dois pigmentos vermelhos acabaram por ser estudados, mas só a quantidade de provetes prismáticos permitiu as aplicações das soluções com os dois pigmentos (deu origem a duas novas variáveis a estudar). No caso dos tijolos, teve de optar-se apenas por um pigmento vermelho.

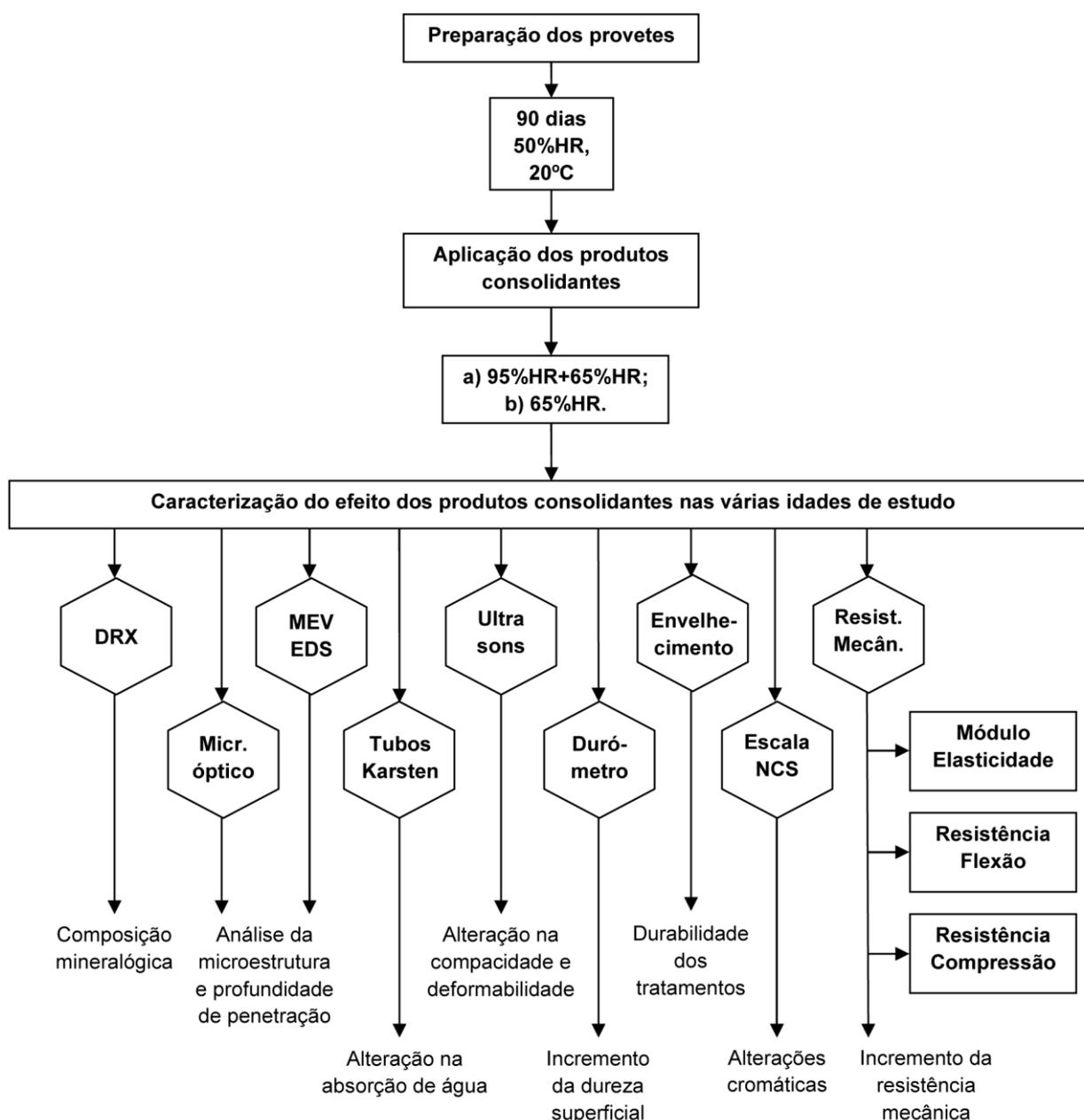


Fig. 3.2 - Metodologia de caracterização do efeito dos produtos consolidantes

Tabela 3.2 - Provetes, produtos aplicados e ensaios realizados

Idade de cura	Ensaio	Combinação em estudo								
		A	B	C	D	E	F	G	H	REF
		Provete	Provete	Provete	Provete	Provete	Provete	Provete	Provete	Provete
28 dias	E <sub>d</sub>	P1	P7	P14	P20	P26	P32	P199	P39	P45
	R <sub>t</sub>	P2	P9	P15	P21	P27	P33	P200	P40	P46
	R <sub>c</sub>	P3	P10	P16	P22	P28	P34	P202	P41	P47
	t <sub>TK</sub>	T2	T6	T8	T13	-	-	T18	T23	T28
	DS <sub>D</sub>	T3	T7	T9	T14	-	-	T19	T24	
	V <sub>US</sub>	T4		T10	T15			T20	T25	
90 dias	E <sub>d</sub>	P4	P11	P17	P23	P29	P35	P203	P42	P48
	R <sub>t</sub>	P5	P12	P18	P24	P30	P36	P204	P43	P49
	R <sub>c</sub>	P6	P13	P19	P25	P31	P37	P205	P44	P50
	t <sub>TK</sub>	T2	T6	T8	T13	-	-	T18	T23	T28
	DS <sub>D</sub>	T3	T7	T9	T14	-	-	T19	T24	
	V <sub>US</sub>	T4		T10	T15			T20	T25	
	Env. Artificial	T4	T6	T11	T16	-	-	T21	T26	T28
	T5	T7	T12	T17			T22	T27		

## 4 PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS E PROVETES

A preparação de argamassas e provetes está inserida na primeira fase desta campanha experimental. Neste capítulo, descrevem-se os procedimentos seguidos na realização das argamassas e dos provetes, assim como as matérias-primas utilizadas.

### 4.1 Matérias-primas utilizadas

#### 4.1.1 Cal aérea

A cal aérea utilizada em toda a campanha experimental desta dissertação foi a cal aérea hidratada em pó *BAPTISTA & IRMÃO* do grupo *CALCIDRATA, SA*. É também a cal aérea utilizada no projecto *FCT LIMECONTECH*.

Para conservação das suas características, procurou-se sempre armazenar a cal aérea em local seco e isento de humidades, com o saco sempre bem fechado e apenas aberto e exposto ao ar o tempo estritamente necessário.

#### 4.1.2 Areias

Foram utilizadas três granulometrias diferentes de areias siliciosas calibradas e lavadas da *AREIPOR* – a APAS12, a APAS20 e a APAS30 – sendo a primeira a de granulometria mais grossa e a última a de granulometria mais fina. A proporção volumétrica da mistura das areias é de 0,66:1,00:1,00 (ou igualmente 1,00:1,50:1,50), com a areia mais grossa APAS12 em menor proporção e uma dimensão das partículas inferior a 2 mm. A escolha e optimização da mistura de areias foram feitas no âmbito do projecto *FCT LIMECONTECH*, com base na análise de curvas granulométricas de várias misturas testadas. A granulometria final obtida é a apresentada na figura 4.1 (BORSOI *et al.*, 2012).

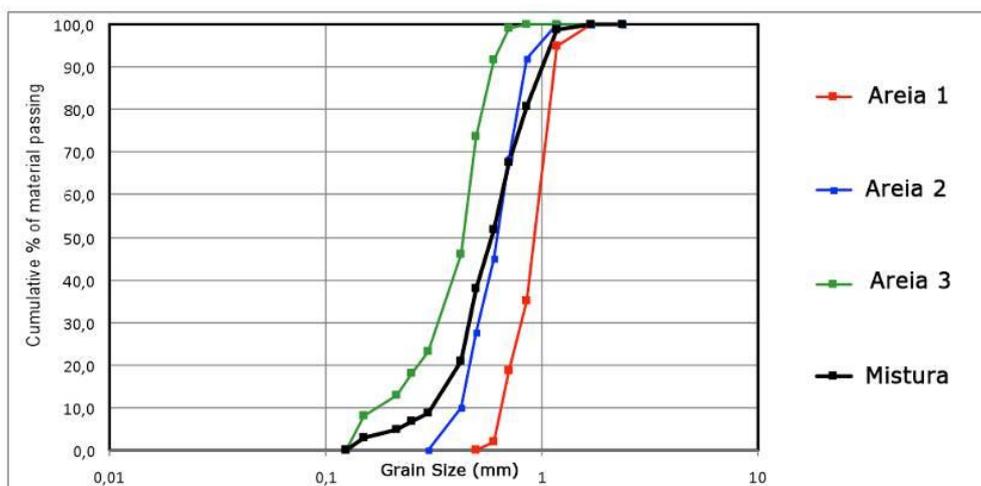


Fig. 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados (BORSOI *et al.*, 2012)

### 4.1.3 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente de um material em pó é determinada utilizando um recipiente troncocónico, onde se coloca a amostra. Depois do seu enchimento, é aberto um dispositivo de fundo para que se dê a queda do material para o interior de um recipiente cilíndrico, cuja massa e volume são conhecidos. Este procedimento é realizado de acordo com a norma NP 955 (LNEC, 1973) e deve ser realizado três vezes. A massa volúmica aparente do material é calculada com base na seguinte expressão:

$$MVap = \frac{\text{massa total} - \text{massa do recipiente}}{\text{volume do recipiente}}$$

Os valores das massas volúmicas aparentes das matérias-primas das argamassas foram obtidos no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH* (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Massas volúmicas aparentes das matérias-primas utilizadas

Material	MVap [g/dm <sup>3</sup> ]
Cal aérea hidratada	427,30
Areia APAS12	1411,90
Areia APAS20	1405,10
Areia APAS30	1387,70

## 4.2 Preparação de argamassas

### 4.2.1 Procedimento adoptado

A preparação de argamassas é referida na norma EN 1015-2 (CEN, 1998), sendo que o procedimento adoptado difere ligeiramente do apresentado na mesma em virtude da argamassa a produzir (a norma destina-se principalmente a argamassas de cimento), sobretudo no que diz respeito ao tempo de amassadura. Segundo Faria (2004): *“tradicionalmente, um dos segredos de uma boa argamassa de cal aérea é o tempo (e o vigor) da amassadura, que têm de ser elevados”*. O procedimento adoptado foi o mesmo que o levado a cabo em todas as amassaduras realizadas no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH*.

Todos os componentes sólidos da argamassa (areias e cal aérea) são pesados numa balança de precisão de 0,1 g, e colocados na cuba da misturadora (Fig. 4.2a). Verifica-se sempre se os materiais estão secos e limpos, de modo a não incluir impurezas ou alterar o teor de água da argamassa preparada. Antes da mistura mecânica, é feita uma mistura manual com colher de pedreiro para promoção de maior homogeneização final da argamassa e para minimizar a quantidade de pó que se liberta durante a mistura mecânica. A cuba é colocada na misturadora e dá-se início à homogeneização mecânica, ao mesmo tempo que a água é adicionada (colocada com proveta graduada). Depois de 30 segundos de mistura, é feita uma pausa que permite a remoção de material

depositado nas paredes da cuba. A mistura mecânica é reiniciada até que os 3 minutos totais de amassadura sejam atingidos (Fig. 4.2b).

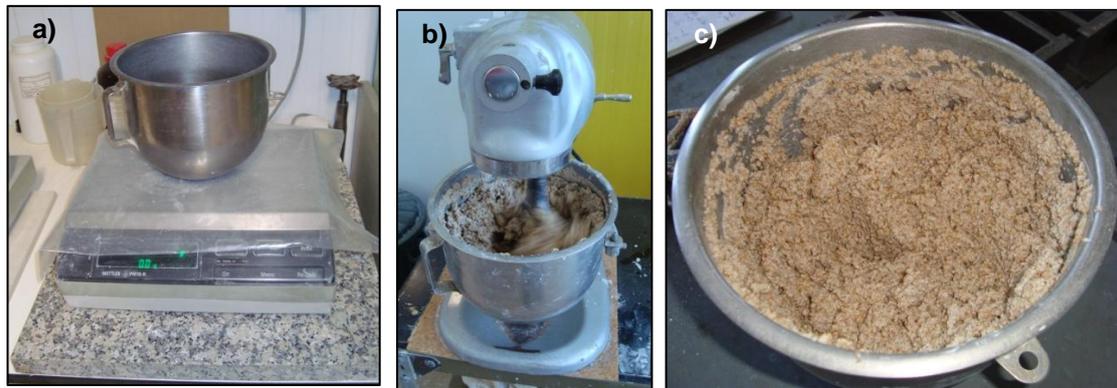


Fig. 4.2 – a) Pesagem dos constituintes sólidos; b) Mistura mecânica; c) Aspecto final da argamassa

Após cada amassadura, procurou-se sempre avaliar a trabalhabilidade e consistência da argamassa com a colher de pedreiro. Tendo em vista a simulação de uma argamassa com perda de coesão, esta apresenta-se sempre como uma argamassa com aspecto seco, muito porosa e com agregados de granulometria considerável. A figura 4.2c demonstra o aspecto final da argamassa.

#### 4.2.2 Traço volumétrico

Na fase preliminar do projecto FCT *LIMECONTECH* foram estudados diferentes traços de ligante:agregado para simular uma argamassa com perda de coesão superficial (TAVARES, 2010); assim, foram experimentados traços volumétricos de 1:2 a 1:8, tendo-se concluído que o traço volumétrico de 1:4 seria o mais adequado. Este traço permite assim obter uma argamassa com fraco teor de ligante e uma baixa coesão. São apresentadas de seguida as quantidades dos componentes da argamassa para 100 g de cal aérea (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Quantidades dos componentes da argamassa de cal aérea com traço 1:4

Argamassa de cal aérea – Traço 1:4		
	Cal aérea	100,0 g
Areias	APAS12	330,4 g
	APAS20	493,2 g
	APAS30	487,1 g
	Água potável	200 ml

#### 4.2.3 Amassaduras

As quantidades dos componentes utilizados em cada amassadura diferiram em função do tipo e do número de provetes a produzir. Foram aplicadas argamassas em moldes prismáticos e em tijolos (Tabelas 4.3 e 4.4).

Tabela 4.3 - Quantidades de amassadura correspondente à produção de 6 provetes prismáticos

Amassadura para 6 provetes prismáticos		
Cal aérea		220,0 g
Areias	APAS12	726,9 g
	APAS20	1085,0 g
	APAS30	1071,6 g
Água potável		440 ml

Tabela 4.4 - Quantidades de amassadura para o revestimento de 2 tijolos

Amassadura para revestimento de 2 tijolos		
Cal aérea		270,0 g
Areias	APAS12	892,1 g
	APAS20	1331,6 g
	APAS30	1315,2 g
Água potável		540 ml

#### 4.2.4 Consistência por espalhamento

A consistência por espalhamento da argamassa foi determinada de acordo com a norma EN 1015-3 (CEN, 1998) e o procedimento de ensaio PE/R 02 – LNEC/LERevPa (LNEC, 2006). De acordo com a norma indicada, a consistência por espalhamento de uma argamassa é determinada pela medição do diâmetro médio de uma amostra de argamassa fresca colocada no molde de uma mesa de espalhamento e sujeita a determinado número de impactos verticais.

A determinação da consistência por espalhamento da argamassa é feita com recurso a uma mesa de espalhamento com molde tronco-cónico, a um pilão para compactação da argamassa com cerca de 40 mm de diâmetro e a uma craveira para medição dos diâmetros da argamassa após ensaio (Fig. 4.3).



Fig. 4.3 - Mesa de espalhamento com molde tronco-cónico e argamassa a ensaiar

A argamassa fresca previamente preparada é colocada no molde tronco-cónico em 2 camadas, cada uma compactada com 10 pancadas do pilão. A superfície é regularizada com uma colher de pedreiro, sendo a mesa e o exterior do molde devidamente limpos. Retira-se o molde na vertical com cuidado, e são dadas 15 pancadas em 15 segundos rodando a manivela. São medidos os diâmetros de espalhamento da argamassa em duas direcções perpendiculares (Fig. 4.4).



Fig. 4.4 - Determinação do espalhamento da argamassa

Este ensaio foi realizado no início da campanha experimental para confirmação dos valores já obtidos no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH*, com os quais foram fixadas as quantidades dos materiais a utilizar em cada amassadura. Esperava-se então um diâmetro de espalhamento de 150 mm, mas que poderia estar enquadrado entre 140 e 170 mm. No ensaio realizado foi obtido um diâmetro de espalhamento de 150 mm, pelo que está dentro do esperado.

#### **4.2.5 Teor de ar incorporado**

O teor de ar incorporado foi determinado de acordo com a norma EN 1015-7 (CEN, 1998) e o procedimento de ensaio PE/R 04 – LNEC/LERevPa (LNEC, 2007), com aparelho adequado e pelo método da pressão (Fig. 4.5). De uma forma genérica, o ensaio compreende as seguintes etapas: a argamassa fresca é colocada no contentor; é introduzida água na sua superfície que, pela pressão do ar, é forçada a deslocar-se para os poros da argamassa; o nível de água baixa e reflecte o volume de ar expulso da argamassa.

Previamente à realização do ensaio, é feita a verificação da escala do aparelho para medição do teor de ar em argamassas. Sabendo que 50 ml de água expulsa pelo aparelho correspondem ao valor de 5% na escala do manómetro, a verificação da escala compreende as seguintes acções:

- Enchimento do contentor do aparelho com água;
- Fixação da tampa do aparelho;
- Com as válvulas abertas, introdução de água pela válvula A até sair pela válvula B sem bolhas (para expulsão do ar no interior);
- Bombeamento de ar em C para a câmara superior até que o ponteiro desça abaixo da marca vermelha do manómetro em cerca de 1 cm;
- Ajustamento do ponteiro até atingir a marca vermelha, e fechar as válvulas A e B;

- Abrir a válvula A e colocar uma proveta graduada;
- Pressionar a válvula de escape permitindo a saída de 50 ml de água;
- Deixar sair o ar residual ao abrir-se a válvula B;
- Bombear ar novamente, e ajustar a marca vermelha;
- Fechar as válvulas A e B, pressionar a válvula de escape durante um tempo de 20 segundos e, ao mesmo tempo, dar pequenas pancadas no mostrador do aparelho;
- Se o ponteiro indicar um valor de 5% a verificação está concluída, senão deve ser repetido todo este procedimento.

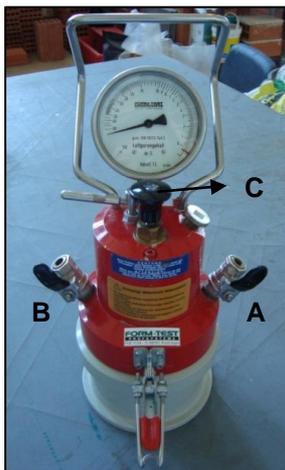


Fig. 4.5 - Aparelho de medição do teor de ar com identificação das válvulas

Estando a verificação da escala feita, segue-se para o procedimento do ensaio propriamente dito:

- A argamassa fresca, previamente preparada, é colocada no contentor do aparelho (capacidade de 1 litro) em 4 camadas, cada uma compactada com 10 pancadas de um pilão (Fig. 4.6a);
- A superfície é nivelada com auxílio de uma espátula, a argamassa em excesso é retirada e os bordos do contentor são devidamente limpos para garantir a estanquidade durante o ensaio;
- Após a fixação da tampa do aparelho no contentor preenchido de argamassa, expulsa-se o ar do interior através da introdução de água pela válvula A, até sair sem bolhas pela válvula B (Fig. 4.6b);
- Para ajustar o ponteiro do manómetro no zero, bombeia-se ar para a câmara superior até que o ponteiro desça um pouco abaixo do zero e assim seja possível ajustá-lo;
- Depois de todos estes passos realizados, fecham-se as válvulas A e B e pressiona-se a válvula de escape durante cerca de 20 segundos (tempo necessário para estabilização do ponteiro), ao mesmo tempo que se dão umas pancadas leves no manómetro (Fig. 4.6c);
- O valor do teor de ar incorporado na argamassa é o indicado no manómetro.

O ensaio foi realizado 3 vezes com amassaduras distintas, sendo os resultados obtidos os apresentados na Tabela 4.5.

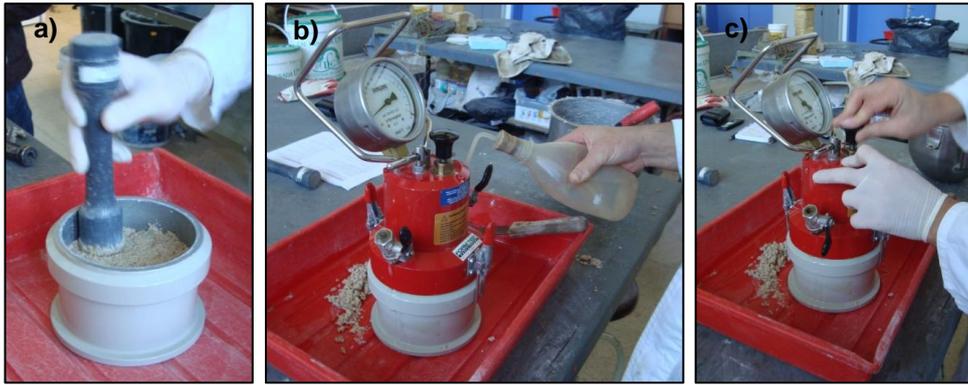


Fig. 4.6 – a), b) e c) Realização do ensaio de determinação do teor de ar da argamassa

Tabela 4.5 - Resultados obtidos de teor de ar

Ensaio	Teor de ar [%]	Teor de ar médio [%]
1	8,50	8,57 ± 0,21
2	8,80	
3	8,40	

A norma EN 1015-7 não indica qualquer limite para o teor de ar incorporado nas argamassas; no entanto, refere que no caso da determinação do teor de ar pelo método da pressão, o ensaio apenas é aplicável a argamassas com teor de ar inferior a 20%. Sabe-se que quanto maior o teor de ar numa argamassa, maior é a sua trabalhabilidade e, em princípio, a resistência ao gelo, mas menor é a sua compactidade e resistência mecânica.

### 4.3 Execução de provetes

Para obtenção de bons resultados na campanha experimental, é importante que o procedimento de execução dos provetes seja exactamente o mesmo ao longo de toda a produção dos mesmos. Só assim podem ser obtidos resultados coerentes em toda a gama de ensaios realizada, pouco susceptíveis de variações devido a alterações na produção dos vários provetes. Isto é aplicável também na realização de ensaios.

Foram realizados provetes prismáticos de argamassa e aplicação desta mesma argamassa também em tijolos de 40 mm de espessura. De seguida, são enunciados os procedimentos adoptados para a execução dos dois tipos de provetes.

#### 4.3.1 Provetes prismáticos

Para a produção dos provetes de argamassa foram utilizados moldes metálicos com três compartimentos horizontais, cada um com secção transversal de 40 mm x 40 mm e altura de 160 mm. Os provetes são feitos segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999), e o procedimento utilizado é o descrito de seguida.

**- Procedimento adotado**

Antes da execução propriamente dita dos moldes, deve assegurar-se que os mesmos estão limpos e lubrificadas com óleo mineral, para facilitar a posterior desmoldagem. A argamassa preparada de acordo com o referido anteriormente, é colocada nos moldes em duas camadas; a primeira camada de argamassa deve preencher cerca de metade de cada compartimento do molde, compactada com 25 pancadas utilizando um pilão de plástico (12 x 12 mm) (Fig. 4.7b); a segunda camada de argamassa preenche os compartimentos do molde na sua totalidade, e é novamente compactada com mais 25 pancadas. Depois de feita a compactação é colocado mais um pouco de material.

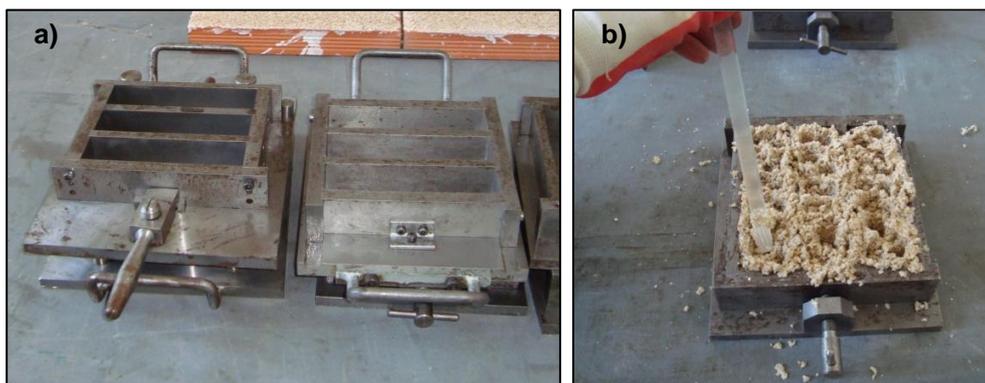


Fig. 4.7 – a) Moldes utilizados; b) Compactação da argamassa

O excesso de material no molde é retirado com uma talocha metálica; a superfície é rasada com a aresta contínua da talocha metálica, fazendo um movimento tipo serra (Fig. 4.8). De seguida, são dadas duas pancadas em cada um dos lados do molde, levanta-se o mesmo cerca de 30° com a horizontal e “deixa-se cair” o molde. Dá-se nova compactação do material, e é assim necessário colocar mais um pouco de argamassa e rasar novamente a superfície do molde; depois de rasada a superfície para retirar o excesso de material, o molde encontra-se pronto para cura (Fig. 4.9).

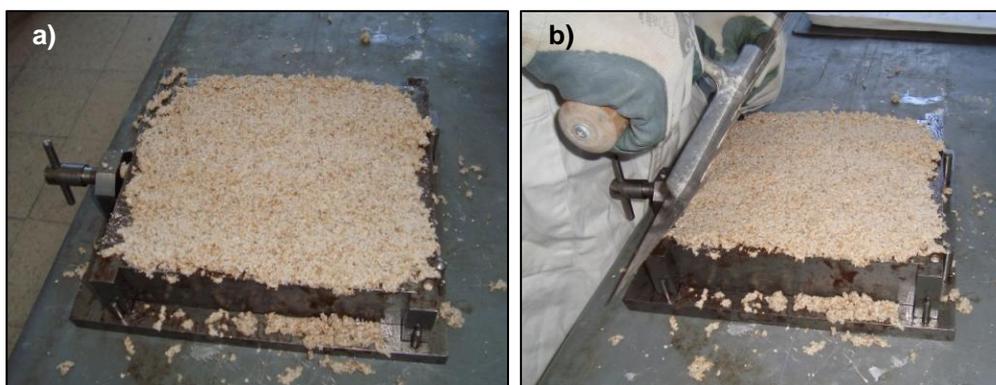


Fig. 4.8 – a) Preenchimento completo do molde; b) Razamento da superfície (retirada do excesso de material)

Todo o processo de execução dos provetes é feito de forma manual; não foi utilizado qualquer compactador mecânico.

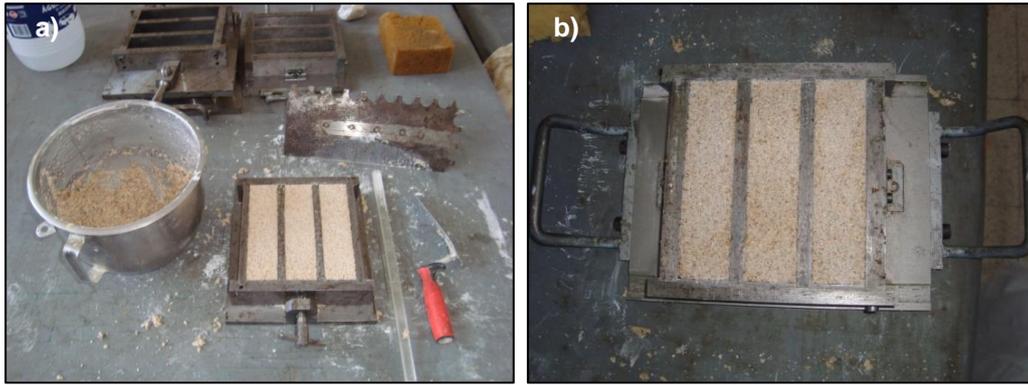


Fig. 4.9 – a) Material utilizado; b) Aspecto final de um molde preenchido

#### - Condições de cura e desmoldagem

Após preparação, os moldes foram colocados em cura seca, na sala de ambiente controlado com temperatura média de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de HR. Após um período mínimo de três dias os provetes foram na sua generalidade desmoldados, contudo houve situações em que foi necessário esperar mais um ou dois dias para fazer a desmoldagem. A desmoldagem dos provetes foi feita com extremo cuidado pois, tratando-se da recriação de uma argamassa com falta de coesão, os provetes desta tiveram que ser manuseados com muito cuidado e apenas desmoldados quando havia inteira certeza da sua possibilidade para assim prevenir a desagregação do provete no mesmo instante em que se pegava nele.

Após desmoldagem, todos os provetes foram numerados e colocados novamente em cura seca (Fig. 4.10).



Fig. 4.10 - Provetes desmoldados e numerados em cura seca

#### 4.3.2 Provetes em tijolos

A aplicação da argamassa em tijolos de 296 x 202 x 40 mm foi feita tendo em vista a realização de ensaios específicos (absorção de água sob baixa pressão, dureza superficial e ultra-sons) e a colocação em envelhecimento artificial.

**- Procedimento adotado**

Previamente à aplicação da argamassa nos tijolos, é aplicado um salpico, e só após 24 horas se coloca a camada de argamassa. O salpico deve ser uma camada rugosa e irregular, para assim permitir uma boa aderência da camada de argamassa ao suporte. Foram utilizadas apenas as areias de maior granulometria, ambas com a mesma proporção entre si. A Tabela 4.6 apresenta as quantidades utilizadas para a aplicação do salpico em 6 tijolos.

Tabela 4.6 - Quantidades para aplicação de salpico em tijolos

<b>Salpico para 6 tijolos – traço volumétrico 1:3</b>		
Cal aérea		162,0 g
Areias	APAS12	835,5 g
	APAS20	835,5 g
Água potável		570 ml

Para aplicação do salpico, o tijolo é inclinado cerca de 60° com o plano horizontal e, depois de molhado, o salpico é colocado com uma colher de pedreiro (Fig. 4.11).

Após 24 horas, é então colocada a camada de argamassa nos tijolos, previamente preparada de acordo com o que já foi referido anteriormente. Para facilitar a aplicação e para obtenção de uma camada uniforme com a mesma espessura de argamassa em todos os pontos, é criada uma espécie de molde com peças de madeira, suportadas por um varão de aço (Fig. 4.12). A camada de argamassa aplicada em todos tijolos possui cerca de 15 mm de espessura.

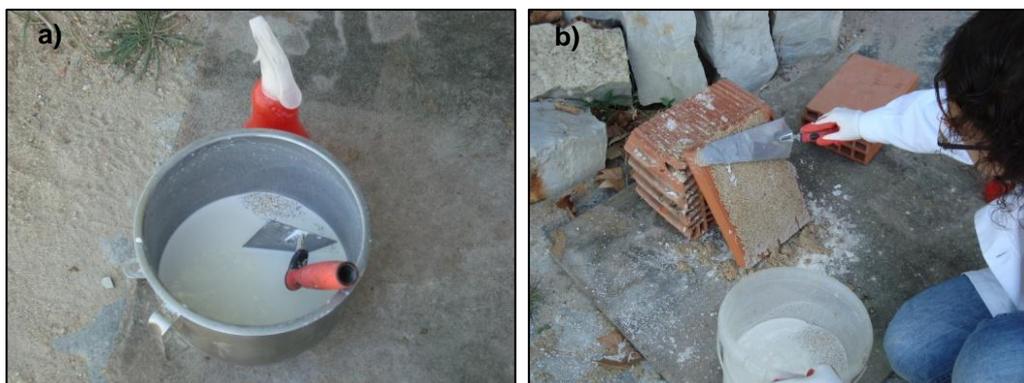


Fig. 4.11 - Aplicação do salpico

Com o molde “montado” e com recurso a uma régua metálica, verifica-se em quatro pontos do tijolo se a altura que irá ter a camada de argamassa corresponde à definida. Após esta verificação inicial, o suporte é molhado e a argamassa é colocada com uma colher de pedreiro até que toda a área esteja preenchida. O excesso de material é retirado com uma talocha plástica humedecida, a superfície é rasada fazendo um movimento do tipo serra (Fig. 4.13a). Com a mesma talocha, novamente humedecida, a superfície da camada de argamassa é alisada com movimentos circulares. Por fim, as

extremidades livres de argamassa são corrigidas, estas são como que rasadas de modo a possuir uma inclinação aproximada de 45°.



Fig. 4.12 - Molde do tijolo para aplicação da camada de argamassa

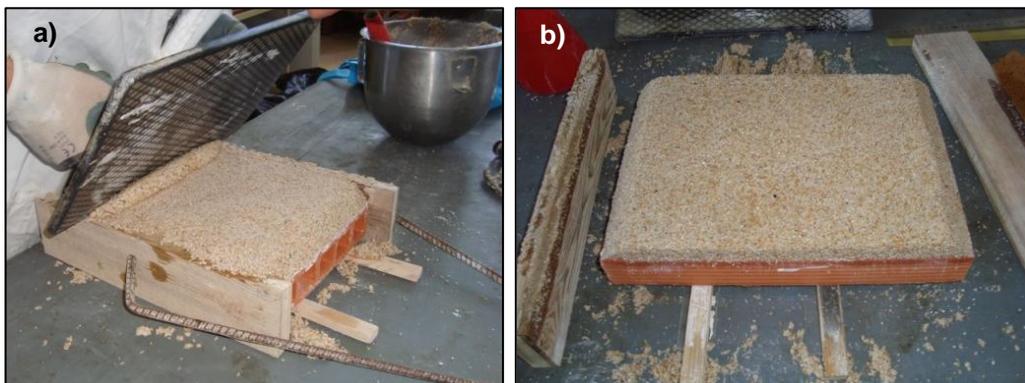


Fig. 4.13 – a) Rasamento da superfície da camada de argamassa; b) Aspecto final da argamassa

Depois de retirado o molde, passa-se com uma esponja húmida nas duas partes laterais do tijolo. A figura 4.13b apresenta o aspecto final da camada de argamassa aplicada sobre o tijolo.

#### - Condições de cura

Após preparação, os tijolos foram colocados em cura seca, na sala de ambiente controlado com temperatura média de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de HR. A cura dos tijolos é a mesma cura dos provetes prismáticos.



## 5 CONSOLIDAÇÃO DE ARGAMASSAS ENDURECIDAS

A consolidação das argamassas endurecidas foi conseguida pela utilização de produtos consolidantes à base de cal e metacaulino (MK) e, em certos casos, com adições de pigmentos inorgânicos.

Neste capítulo, faz-se uma descrição dos procedimentos adoptados para aplicação dos produtos, a sua composição e as matérias-primas utilizadas. A escolha dos pigmentos a utilizar foi feita com base em ensaios preliminares, ensaios estes que se apresentam de seguida.

### 5.1 *Ensaio preliminares – escolha dos pigmentos*

Os ensaios preliminares foram realizados tendo em vista a escolha dos pigmentos e respectivas concentrações a utilizar nas soluções de consolidação. Pretende-se observar a interacção dos pigmentos com a cal e o metacaulino, assim como a reprodução da cor depois da aplicação das soluções nos provetes de argamassa. Os pigmentos testados nesta fase preliminar são pigmentos existentes no laboratório e que foram estudados no âmbito de um estágio curricular realizado no LNEC (Candelária, 2008). Desta forma, houve acesso à caracterização de alguns dos pigmentos (massas volúmicas aparentes e composição química) e a conclusões relacionadas com o comportamento dos mesmos.

A composição e preparação pormenorizada das soluções de consolidação das argamassas está referida e explicada no subcapítulo **5.2 Aplicação das soluções consolidantes**. No subcapítulo actual é feita apenas uma descrição das várias etapas percorridas até à escolha dos pigmentos a utilizar.

#### 5.1.1 *Pigmentos*

Os pigmentos inorgânicos estudados em fase preliminar foram desde os pigmentos adquiridos em drogasias até aos pigmentos da CTS, empresa especializada em produtos para a área de conservação e restauro. A Tabela 5.1 apresenta os vários pigmentos estudados nesta fase de ensaios preliminares.

Começou-se por fazer aplicações com **concentrações de pigmentos de 1%, 3% e 5%** em relação ao peso total da solução, ou seja, relativamente ao peso da cal, do metacaulino e da água destilada. Começou-se por escolher dois pigmentos de cada cor, o Rosso Ercolano e o Rosso Veneto e os ocres Avana e Bairro Alto. O Ocre Bairro Alto revelou uma cor muito suave, pelo que se aplicou na concentração mais forte (5%) o ocre Dunkel, o ocre Alvalade, o ocre 1 e o ocre 2.

#### 5.1.2 *Análise das aplicações preliminares*

As aplicações iniciais foram efectuadas em tijolos; foi possível um maior número de aplicações em relação aos provetes prismáticos e a absorção das soluções nos tijolos é a que mais se assemelha a

um caso de reparação de um revestimento real; a argamassa está menos compactada que a argamassa dos provetes prismáticos.

Tabela 5.1 - Lista dos pigmentos analisados em fase preliminar

Pigmento	Origem	Cor
Rosso Ercolano [RE]	CTS	Vermelho
Rosso Veneto [RV]	CTS	Vermelho
Ocra Avana [OAv]	CTS	Amarelo
Ocre Dunkel [OD]	CTS	Amarelo
Ocre Bairro Alto [OB]	Drogaria	Amarelo
Ocre Alvalade [OA]	Drogaria	Amarelo
Ocre 1 [O1]	Drogaria	Amarelo
Ocre 2 [O2]	Drogaria	Amarelo
Vermelho Bayer [VB]	Drogaria	Vermelho

Apresentam-se de seguida os resultados das aplicações das várias soluções nos tijolos (Figs. 5.1 e 5.2).

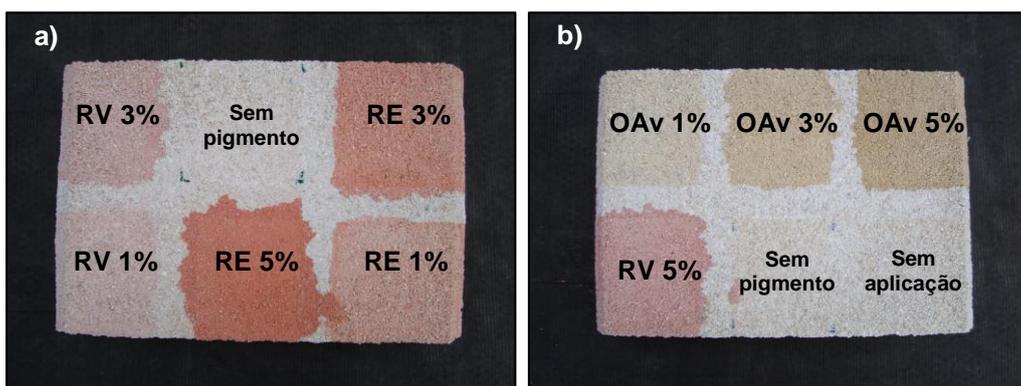


Fig. 5.1 – a) e b) Aplicações das soluções pigmentadas nas várias concentrações

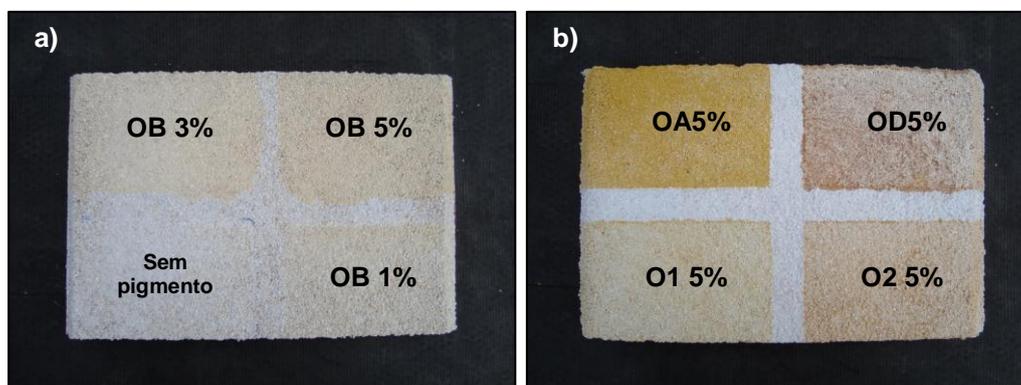


Fig. 5.2 – a) e b) Aplicações das soluções pigmentadas nas várias concentrações

Pode observar-se que, no caso dos ocre, o Ocre Alvalade é o que reproduz uma cor mais forte; já no caso dos vermelhos, a escolha recai sobre o Rosso Ercolano que apresenta também uma cor mais viva e forte; as concentrações a utilizar serão as mais elevadas em virtude da concentração de 1% reproduzir uma cor suave que ao longo do tempo iria, em princípio, degradar-se mais rapidamente. Estando escolhidos os dois pigmentos a utilizar e as respectivas concentrações (3% e 5%), prosseguiu-se para aplicação dos mesmos em provetes prismáticos para observação da absorção e posteriormente da penetração (Fig. 5.3). Verificou-se que a absorção é bastante lenta e, após secagem e corte transversal dos provetes, que a penetração é reduzida; deu-se a formação de uma película na superfície dos provetes.

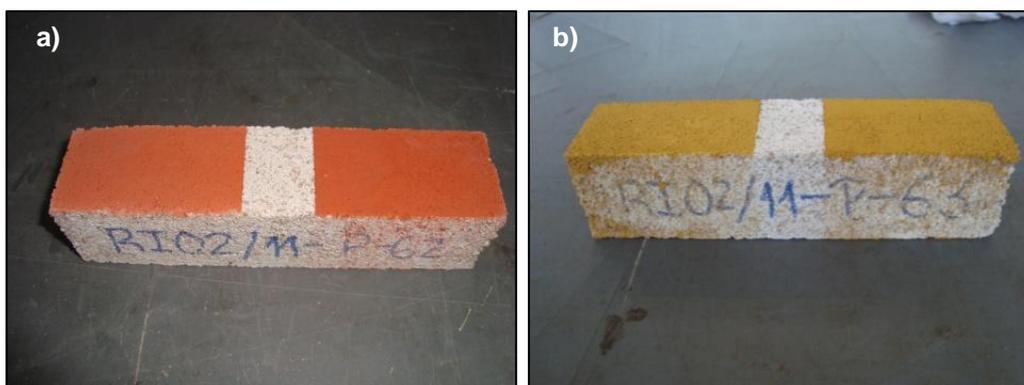


Fig. 5.3 – a) e b) Aplicações preliminares em provetes prismáticos

Devido às dificuldades de penetração, avançou-se para novas aplicações, em que o cálculo da concentração dos pigmentos foi feito em relação apenas ao peso da cal e do metacaulino. Obtiveram-se cores mais suaves, mas uma penetração superior dos consolidantes nos provetes de argamassa.

De facto, no caso de caiações, a concentração de pigmentos é indicada pela percentagem do seu peso em relação ao peso da cal; ao utilizar-se uma grande quantidade de pigmento este vai comportar-se como agregado, diminuindo a aderência ao suporte e a coesão interna (TAVARES, 2009).

### 5.1.3 Caracterização dos pigmentos escolhidos

#### - Rosso Ercolano

O pigmento Rosso Ercolano (Fig. 5.4) é um pigmento inorgânico natural comercializado pela CTS, empresa conhecida pelos seus produtos para a área da conservação e restauro. Segundo a empresa fabricante, o pigmento Rosso Ercolano possui as características apresentadas na Tabela 5.2 (CTS ESPAÑA, 2010).

O pigmento é preparado a partir da moagem de terras vermelhas ricas em hematite ( $Fe_2O_3$ ), que normalmente está associada a argilas e silicatos. As terras vermelhas são usualmente encontradas em regiões vulcânicas (CTS ESPAÑA, 2010).

A **massa volúmica aparente** do Rosso Ercolano foi determinada por Candelária (2008) (Tabela 5.3).

Tabela 5.2 - Características do pigmento Rosso Ercolano (CTS España, 2010)

<b>Composição</b>	Hematite ( $Fe_2O_3$ ), argila e silicatos
<b>Coordenadas CIE L*a*b</b>	L 41,46 a 36,4 b 36,32
<b>Tonalidade</b>	Vermelho alaranjado médio, quente
<b>Estabilidade química</b>	Boa
<b>Resistência à cal</b>	Elevada
<b>Resistência à humidade</b>	Elevada
<b>Resistência à luz</b>	Elevada
<b>Poder de cobertura</b>	Elevado

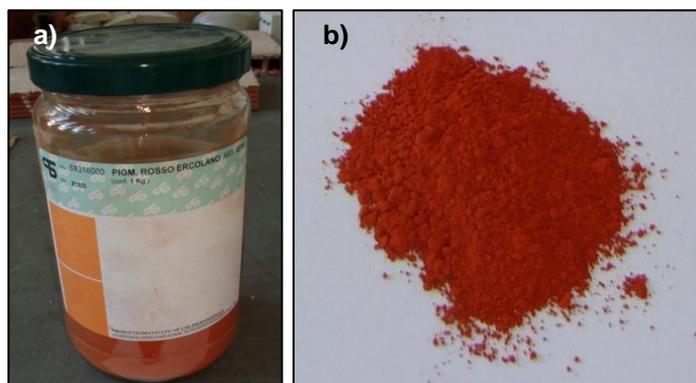


Fig. 5.4 – a), b) Pigmento Rosso Ercolano

Tabela 5.3 - Massa volúmica aparente do pigmento Rosso Ercolano (Candelária, 2008)

<b>Massa do recipiente [g]</b>	379,5	
<b>Volume do recipiente [dm<sup>3</sup>]</b>	0,5	
<b>Massa do recipiente + pigmento [g]</b>	1	735,5
	2	729,7
	3	727,4
<b>Massa do recipiente + pigmento média [g]</b>	730,9	
<b>Massa volúmica aparente [g/dm<sup>3</sup>]</b>	702,8	

Para este pigmento foi feita **análise por difracção de raios X (DRX)**, uma vez que Candelária não o realizou no seu trabalho, tendo pensado que os pigmentos da CTS seriam pigmentos mais controlados e por consequência mais puros.

A análise por DRX permite identificar todos os compostos cristalinos de uma amostra de material em pó, através da difracção dos raios X nos cristais da amostra segundo orientações bem definidas e características de cada composto; a análise foi realizada num difractómetro de raios X Philips PW1830 generator. Os registos difractométricos dos pigmentos foram efectuados utilizando a

radiação  $K\alpha$  do cobalto, produzida por uma unidade de raios X nas seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e  $74^\circ 2\theta$ ; velocidade varrimento de  $0,05^\circ 2\theta/s$ ; tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA.

No difractograma do pigmento Rosso Ercolano (**Anexo 1**), verificou-se que o pigmento possui principalmente na sua composição:

- Hematite (H);
- Gesso (Gs);
- Caulinite (K);
- Micas (M).

O pigmento revelou-se muito rico em hematite, o que já era esperado, mas também com bastante gesso na sua constituição. Em menor quantidade, foi identificada caulinite e mica; a presença de caulinite neste tipo de pigmentos é normal visto tratar-se de uma terra e onde é igualmente comum a presença de minerais argilosos. Também a presença de mica, pertencente ao grupo mineral dos silicatos, é constituinte usual em terras naturais.

Não era espectável a presença de gesso no pigmento; esta adição à terra natural torna o pigmento mais leve, com maior poder reflector, com granulometria mais fina e do ponto de vista económico com menor custo para a empresa que o comercializa, e com um maior poder de cobertura da superfície em que é aplicado. No entanto, a exposição do gesso à água ou a elevados teores de humidade, pode desencadear reacções de sulfatação e dissolução que vão provocar a sua degradação, não sendo portanto recomendado para aplicações em zonas exteriores. Por esta razão, e para que haja comparação e verificação de resultados, foi escolhido mais um pigmento vermelho para estudo cuja composição é apenas à base de hematite, o **vermelho bayer**.

Comparando a composição obtida pela análise por DRX e a composição fornecida pela CTS, apenas a presença do gesso não é referida no documento técnico da CTS; tanto a caulinite como a mica pertencem ao grupo mineral dos silicatos.

#### **- Vermelho Bayer**

O vermelho Bayer é um pigmento de drogaria, composto apenas por óxido de ferro ou hematite ( $Fe_2O_3$ ) que lhe confere a cor vermelha (Fig. 5.5). A análise por DRX foi realizada no trabalho de Candelária e o respectivo espectro é apresentado em anexo (**Anexo 1**). A **massa volúmica aparente** do Vermelho Bayer foi determinada por Candelária (2008) (Tabela 5.4).

#### **- Ocre Alvalade**

O Ocre Alvalade é um pigmento de drogaria composto apenas por goetite (Fig. 5.6); é este mineral de óxido de ferro ( $FeO(OH)$ ) que lhe dá a cor amarela. Apresenta-se em anexo o espectro da análise por DRX realizado no trabalho de Candelária (**Anexo 1**). A **massa volúmica aparente** do Ocre Alvalade foi determinada por Candelária (2008) (Tabela 5.5).



Fig. 5.5 – a), b) Pigmento Vermelho Bayer

Tabela 5.4 - Massa volúmica aparente do pigmento Vermelho Bayer (Candelária, 2008)

<b>Massa do recipiente [g]</b>	379,5	
<b>Volume do recipiente [dm<sup>3</sup>]</b>	0,5	
<b>Massa do recipiente + pigmento [g]</b>	1	800,6
	2	800,3
	3	800,4
<b>Massa do recipiente + pigmento média [g]</b>	800,4	
<b>Massa volúmica aparente [g/dm<sup>3</sup>]</b>	841,8	

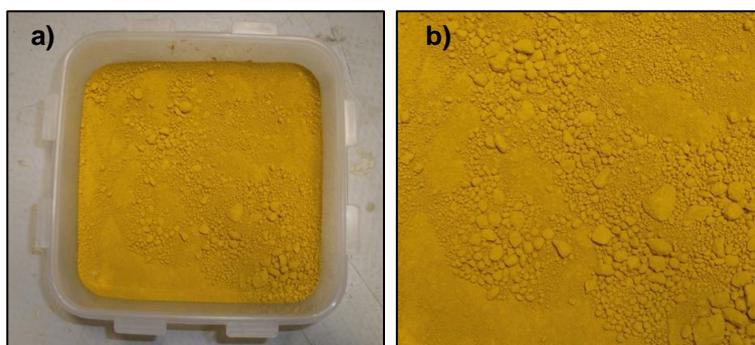


Fig. 5.6 - a) e b) Pigmento Ocre Alvalade

Tabela 5.5 - Massa volúmica do pigmento Ocre Alvalade (Candelária, 2008)

<b>Massa do recipiente [g]</b>	379,5	
<b>Volume do recipiente [dm<sup>3</sup>]</b>	0,5	
<b>Massa do recipiente + pigmento [g]</b>	1	575,1
	2	575,9
	3	576,1
<b>Massa do recipiente + pigmento média [g]</b>	575,7	
<b>Massa volúmica aparente [g/dm<sup>3</sup>]</b>	392,4	

Na Fig. 5.7 pode observar-se o aspecto dos pigmentos estudados em solução aquosa.



Fig. 5.7 - Pigmentos estudados em solução aquosa

#### 5.1.4 Resíduos secos e pH dos produtos

O **resíduo seco** é obtido por colocação da solução com volume conhecido em estufa, para evaporação da água nela contida. O resíduo seco é dado pela diferença entre o peso inicial e o peso após secagem na estufa. Este foi também um parâmetro tido em conta na escolha dos pigmentos; interessa que a solução consolidante tenha o menor resíduo seco possível e que o pigmento não aumente em demasia o resíduo seco em relação à solução consolidante não pigmentada, podendo comprometer a sua penetração na argamassa.

Na preparação das soluções de cada aplicação foi retirada uma porção para determinação do resíduo seco, tendo-se obtido os valores apresentados na Tabela 5.6. Como esperado, as soluções consolidantes em que a percentagem de pigmento é obtida em relação ao peso dos componentes sólidos apresentam um menor resíduo sólido, com o Ocre Alvalade a demonstrar um menor resíduo em relação a ambos os pigmentos vermelhos.

Tabela 5.6 - Resíduos secos das soluções

Constituição da solução	Resíduo seco [g/l]
MK25% + RE3%	96,0
MK25% + RE5%	116,0
MK25% + OA3%	91,5
MK25% + OA5%	113,5
MK25% + RE5% (S)	76,5
MK25% + OA5% (S)	74,5
MK25% + VB5% (S)	78,5

(S) – As percentagens de pigmento referem-se ao peso da cal e metacaulino

Os resíduos secos foram observados com um estereomicroscópio Olympus SZH10. Verificou-se que os resíduos secos provenientes de soluções em que a percentagem de pigmentos foi calculada em relação ao peso total, apresentam uma coloração heterogénea, encontrando-se zonas mais escuras e outras mais esbranquiçadas. Este efeito foi mais notório na solução com o pigmento Rosso Ercolano

(Fig. 5.8a). Já as soluções em que a percentagem de pigmento é obtida em relação ao peso conjunto da cal e do metacaulino, apresentam uma coloração menos forte mas mais homogênea (Fig. 5.8b).

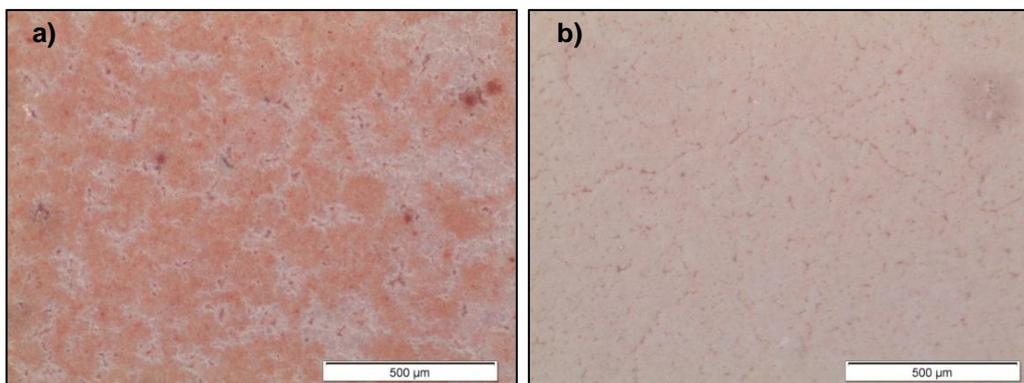


Fig. 5.8 – Microfotografias ao microscópio óptico: a) Resíduo seco do RE com % em relação à massa total; b) Resíduo seco do RE com % em relação à massa dos constituintes sólidos

Um resíduo seco elevado não favorece a penetração de uma solução, levando a uma compactação superficial elevada e à ocorrência de fendilhação. Estas ocorrências foram observadas no caso das aplicações em provetes prismáticos, e em que a massa do pigmento a incorporar no produto consolidante foi calculada em relação à massa total da solução, como se pode observar nas figuras 5.9a e 5.9b (tiradas 7 dias após a execução das aplicações). Há como que a formação de uma película de material sobre a argamassa, que a deixa quase totalmente coberta e com poucos poros; nota-se também a formação de fendas e fissuras. No caso das aplicações em que a massa de pigmento é obtida em relação à massa dos constituintes sólidos, a maioria da porosidade superficial é mantida e a formação de fendas é pontual.

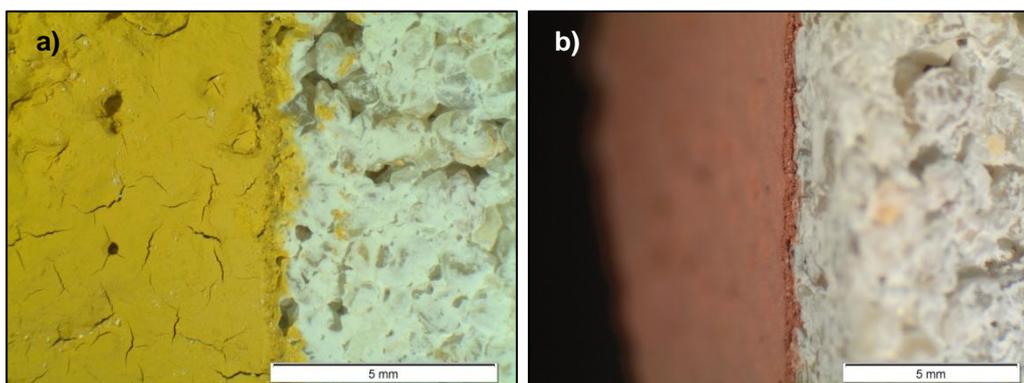


Fig. 5.9 – Microfotografias ao microscópio óptico: a) MK25% + OA3%; b) MK25% + RE5%

A **medição do pH** foi feita apenas no produto consolidante não pigmentado MK25%, já que a adição dos pigmentos inorgânicos não altera significativamente o pH das soluções (Tabela 5.7). Os pigmentos inorgânicos funcionam como inertes, não reagindo com os restantes materiais, o que pode já não acontecer no caso do pigmento Rosso Ercolano devido à presença de gesso. Efectuaram-se duas medições distintas, uma na totalidade da solução agitada e outra na parte líquida após decantação do material sólido.

Tabela 5.7 - pH do produto MK25%

Produto	Medição	pH
Cal + MK25% + H <sub>2</sub> O	Solução homogeneizada	12,44
	Solução decantada	12,49

Em suma, os factores que determinaram a escolha dos pigmentos a utilizar (Rosso Ercolano, Vermelho Bayer e Ocre Alvalade), assim como as suas concentrações, foram:

- A **cor reproduzida** pelos consolidantes pigmentados nas argamassas aplicadas em tijolos, que levou a uma primeira escolha dos pigmentos Rosso Ercolano e Ocre Alvalade nas concentrações mais elevadas (3% e 5% em relação à massa total da solução);
- A baixa **profundidade de penetração** dos consolidantes pigmentados nos provetes prismáticos, que levou à modificação do cálculo das concentrações de 3% e 5%, passando estas a serem calculadas em relação à massa dos materiais sólidos (a cal e o metacaulino);
- O estudo da **composição mineralógica** dos pigmentos, a partir da qual se verificou que o pigmento vermelho escolhido continha adições de outros materiais e assim se decidiu utilizar igualmente o pigmento Vermelho Bayer (pigmento sintético mas apenas à base de hematite).

## 5.2 Aplicação dos produtos consolidantes

### 5.2.1 Composição dos produtos consolidantes

Os produtos consolidantes estudados são constituídos à base de cal e metacaulino, com a adição ou não de pigmentos inorgânicos. A percentagem de metacaulino (MK25%) adoptada representa a percentagem da cal que é substituída pelo produto pozolânico; as adições de pigmentos inorgânicos (3% e 5%) são obtidas em função da massa da cal e do metacaulino. O estudo da adição dos pigmentos aos produtos consolidantes é especialmente importante no caso em que a reintegração cromática dos revestimentos tratados é necessária.

Além da compatibilidade físico-química entre os consolidantes e os revestimentos tratados, outra importante característica destes produtos deve ser a sua capacidade de penetração, que se quer tanto maior quanto possível, de modo a otimizar o tratamento de consolidação. A **razão sólido:líquido** é um factor que se relaciona directamente com a penetração do produto; a solução preparada quer-se diluída e com um resíduo seco aceitável.

A optimização da razão sólido:líquido foi realizada anteriormente, no âmbito do projecto FCT *LIMECONTECH*. Foram testadas várias razões de volume sólido:líquido, desde 1:1 até 1:5, sendo que a **razão 1:4** se revelou a mais apropriada e por consequência a razão adoptada. As aplicações preliminares com uma razão sólido:líquido de 1:4 e uma percentagem de MK17% demonstraram uma alteração cromática quase imperceptível e um resíduo seco aceitável. Esta razão sólido:líquido não

deve ser aumentada em demasia, uma vez que a reactividade pozolânica pode modificar-se e o incremento de resistência mecânica pretendido pode não ser atingido.

O **cálculo das quantidades** necessárias para produzir uma solução de MK25% é feito a partir da análise das massas molares do metacaulino e da cal. A metodologia de cálculo seguida foi a mesma adoptada no projecto FCT *LIMECONTECH* para o cálculo de outras percentagens de MK (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Massas molares da cal e do metacaulino

Material	Fórmula química	Elementos químicos	Massa atómica dos elementos	Massa molar [g/mol]
Cal	Ca(OH) <sub>2</sub>	Cálcio, Ca Oxigénio, O Hidrogénio, H	Ca = 40,08 u.m.a. O = 16,00 u.m.a. H = 1,01 u.m.a.	40,08 + 2x16,00 + + 2x1,00 = 74,08
Metacaulino	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	Alumínio, Al Oxigénio, O Sílica, Si	Al = 26,98 u.m.a. O = 16,00 u.m.a. Si = 28,09 u.m.a.	2x26,98 + 7x16,00 + 2x28,09 = 222,14

u.m.a – unidade de massa atómica (massa atómica dos elementos/partículas atómicas)

Observa-se que a massa molar do metacaulino é muito superior (cerca de 3 vezes superior) à massa molar da cal. Assim, a razão cal:metacaulino em massa de 3:1 (correspondente a um teor de substituição da cal de MK25%) é na verdade uma razão molar cal:metacaulino de 9:1 (Tabela 5.9).

O cálculo do volume de água para uma razão sólido:líquido 1:4 é feita com base na baridade dos materiais ( $V_{\text{líquido}} = 4 \cdot V_{\text{sólido}}$ ,  $V_{\text{sólido}} = (M_{\text{Ca(OH)}_2} / \sigma_{\text{Ca(OH)}_2}) + (M_{\text{MK}} / \sigma_{\text{MK}})$ ).

Tabela 5.9 - Correspondência entre as razões molar e de massa

Razão molar 9:1	Material	Massa molar [g/mol]
↔	Cal	74,08 x 9 = 666,72
Razão massa 3:1	Metacaulino	222,14 x 1 = 222,14

Assim, e a título exemplificativo, as seguintes quantidades podem ser utilizadas para produção de uma solução MK25% com adição de pigmentos (Tabela 5.10):

Tabela 5.10 - Exemplo das quantidades necessárias para produção de uma solução consolidante

Razão Cal:MK	Material	Quantidade
<b>1:0,3</b>	Cal	10 g
	Metacaulino	3 g
<b>Razão sól:líq 1:4</b>	Água destilada	151 ml
<b>Adição de pigmentos</b>	Pigmento 3%	0,39 g
	Pigmento 5%	0,65 g

### 5.2.2 Materiais utilizados

Foi estudada mais do que uma formulação de consolidantes. Como já foi referido, aplicaram-se consolidantes pigmentados e não pigmentados, em que está sempre presente a mesma concentração de cal, de metacaulino e água, e onde apenas é variável a presença e o tipo de pigmento.

#### - Cal

A cal utilizada nas soluções consolidantes é a mesma utilizada na produção dos vários provetes prismáticos e tijolos, e cuja caracterização foi já apresentada anteriormente.

#### - Metacaulino

O metacaulino utilizado é o *ARGICAL-M 1200S*, comercializado pela empresa francesa *AGS Mineraux* do grupo *Imerys*. Esta pozolana artificial é obtida pela moagem e calcinação da argila caulina da bacia de Charentes. Com a composição genérica  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ , é um material não cristalizado, amorfo, cujas partículas apresentam uma forma lamelar. Na ficha técnica deste produto podem ser consultadas algumas das suas características químicas e físicas, das quais se destacam: as percentagens de sílica ( $SiO_2$ ) de 55% e de alumina ( $Al_2O_3$ ) de 39% na sua composição; o índice de pozolanidade de 1400mg  $Ca(OH)_2/g$ ; a distribuição granulométrica inferior a 2  $\mu m$  em cerca de 55% do material; a massa volúmica de 400  $kg/m^3$ .

Quanto à reactividade pozolânica do metacaulino *ARGICAL-M 1200S*, foi realizado o **ensaio de Chapelle modificado** no Núcleo de Materiais Metálicos do LNEC, no âmbito do projecto FCT *METACAL*. Este ensaio é efectuado com base na norma francesa NF P18-513 (AFNOR, 2010), cujo princípio assenta na medição da quantidade de hidróxido de cálcio (portlandite) fixado pelo metacaulino, quando em contacto com o óxido de cálcio por um período de 16 horas a uma temperatura de  $85 \pm 5^\circ C$ .

O procedimento de ensaio realizado seguiu os seguintes passos:

- Pesagem de 1 g de metacaulino em pó, e colocação num copo de precipitação metálico;
- Com recurso a uma pipeta calibrada, adição de 250 ml de água destilada ao copo de precipitação;
- Adição de 2 g de óxido de cálcio ( $CaO$ ) ao copo de precipitação;
- Colocação do copo em placa de agitação magnética, devidamente tapado, com um termómetro e uma coluna de refrigeração (Fig. 5.10a);
- Ligação do aquecimento da placa de agitação magnética até se atingir uma temperatura de  $85 \pm 5^\circ C$ ;
- Manter em agitação magnética e com a temperatura atingida durante 16 horas;
- Após este período de aquecimento e agitação contínua, arrefecer á temperatura ambiente;

- Preparação de uma solução de sacarose de 250 ml (60 g de sacarose dissolvidas em 250 ml de água destilada) (Fig. 5.10b) e posterior adição ao conteúdo do copo de precipitação metálico; agitação durante 15 minutos (Fig. 5.10c);
- Filtragem de cerca de 200 ml da solução obtida anteriormente (Fig. 5.11a);
- Titulação de 25 ml da solução filtrada, utilizando uma bureta com solução de ácido clorídrico (HCl 0,1M), e a fenolftaleína como indicador de pH (Fig. 5.11b); repetiu-se 3 vezes;
- Os volumes de HCl utilizados nas 3 titulações realizadas são utilizados para o cálculo da quantidade de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado pelo MK.



Fig. 5.10 - Ensaio de Chapelle: a) Montagem do ensaio; b) Solução de sacarose em agitação; c) Mistura das soluções de sacarose e de MK e CaO



Fig. 5.11 - Ensaio de Chapelle: a) Filtragem; b) Titulação

Segundo a norma francesa NF P18-513, em que se baseou este ensaio, o cálculo da quantidade de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) fixado pelo MK obtém-se através expressão apresentada de seguida; a norma refere ainda que os resultados não devem ter uma variação superior a 10%.

$$\text{mg de Ca(OH)}_2 \text{ fixado} = 2 \times \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \times \frac{74}{56} \times 1000$$

Em que:

$V_1$  – Volume de HCl obtido pela titulação correspondente ao ensaio “em branco”, ou seja, o ensaio com a realização do procedimento descrito mas sem adição de MK, e apenas efectuado com óxido de cálcio; este volume deve respeitar a condição:  $(56/2) \times V_1 \leq 1000$ .

$V_2$  – Volume de HCl obtido pela titulação correspondente ao ensaio com o procedimento descrito (com MK e CaO).

De acordo com os volumes de HCl utilizados nas titulações dos três ensaios realizados, os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Valores obtidos no ensaio de Chapelle com o MK Argical M1200S

Ensaio	Ca(OH) <sub>2</sub> /g de MK [mg]	Média [mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g de MK] e desvio padrão
1	1290	1293 ± 53
2	1242	
3	1347	

Também Ferraz (2012) realizou o ensaio de Chapelle modificado com o metacaulino ARGICAL-M 1200S, tendo obtido um valor de reactividade pozolânica de 1320 mg de Ca(OH)<sub>2</sub> fixado por grama de metacaulino. Com o mesmo material obteve uma granulometria de 1,1 µm.

Em ambos os casos, a reactividade pozolânica do metacaulino é inferior ao valor que consta da ficha técnica (1400mg de Ca(OH)<sub>2</sub>/g).

#### - Água destilada

A água utilizada não é água potável, mas sim água destilada, de forma a minimizar as interferências nas reacções de formação dos produtos pozolânicos.

#### - Pigmentos

Os pigmentos utilizados nas soluções pigmentadas foram os pigmentos Rosso Ercolano (RE), Vermelho Bayer (VB) e Ocre Alvalade (OA) no caso dos provetes prismáticos, e os pigmentos Vermelho Bayer e Ocre Alvalade nos provetes em tijolos. A caracterização destes materiais é apresentada anteriormente no subcapítulo **4.1.3 Caracterização dos pigmentos escolhidos**.

Da Tabela 5.12 constam as características conhecidas dos materiais utilizados na preparação dos produtos consolidantes.

### 5.2.3 Preparação dos produtos consolidantes

Os vários produtos estudados foram preparados em soluções aquosas, de acordo com o seguinte procedimento:

- Pesagem dos vários materiais sólidos (cal, metacaulino e pigmentos) e adição dos mesmos num copo de precipitação (Fig. 5.10a);
- Mistura manual dos materiais sólidos, com recurso a uma espátula;

- Adição da quantidade de água destilada definida, seguida de mistura manual da solução;
- Colocação da solução em agitação magnética durante cerca de 5 minutos, podendo este tempo ser prolongado caso se verifique que a solução ainda não está completamente homogeneizada (Figs. 5.10b e 5.10c);
- Depois de preparada a solução, é de imediato realizada a sua aplicação nas argamassas endurecidas a consolidar.

Tabela 5.12 - Características dos materiais utilizados nos consolidantes

Material	Composição	MVap [g/dm <sup>3</sup> ]	Índice de pozolanicidade
Cal	Hidróxido de cálcio, Ca(OH) <sub>2</sub>	427,3	-
MK	Metacaulino, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	400,0	1293 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
OA	Goetite, FeO(OH)	392,4	-
RE	Hematite, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Gesso, CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O Caulinite, Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> Micas	702,8	-
VB	Hematite, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	841,8	-

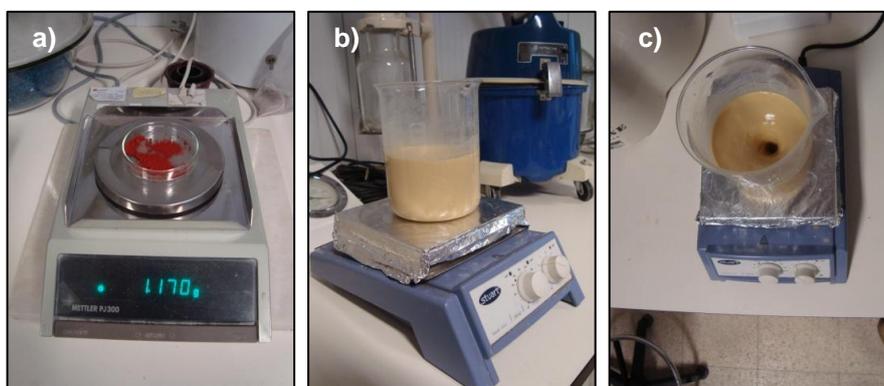


Fig. 5.12 – a) Pesagem de um pigmento; b) e c) Agitação de um consolidante pigmentado com OA

#### 5.2.4 Aplicação dos produtos em provetes

As soluções produzidas são soluções que permitem a aplicação por nebulização manual. O facto de ser uma mistura líquida e com partículas sólidas de fina granulometria, permite a aplicação por *spray* e uma boa cobertura dos provetes tratados.

No caso do tratamento em tijolos, foram feitas 10 aplicações consecutivas em 12 locais do tijolo, de modo a que toda a superfície fosse coberta pela solução consolidante mas não totalmente saturada (Fig. 5.11a). No caso de provetes prismáticos, as aplicações foram feitas com os mesmos sujeitos a uma inclinação de aproximadamente 45° e igualmente com 10 aplicações consecutivas em 3 locais

ao longo do provete (Fig. 5.11b). Metade das aplicações foram realizadas com o provete inclinado numa direcção e as restantes na outra direcção, de modo a homogeneizar o tratamento em toda a superfície do provete.

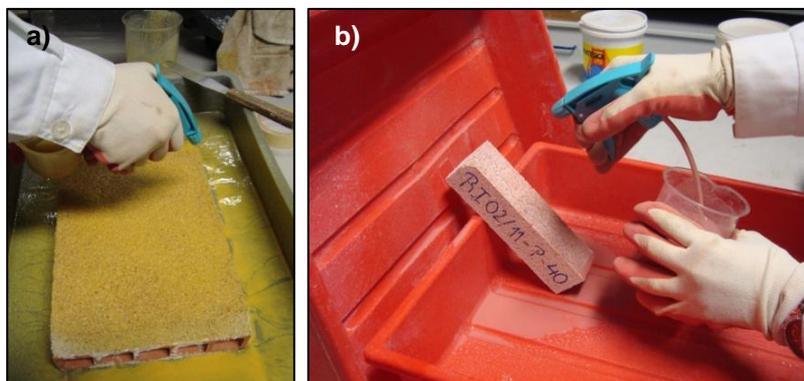


Fig. 5.13 – a) e b) Aplicação dos produtos consolidantes em provetes

Ao longo das aplicações foi medida a quantidade de produto aplicado, com o objectivo de quantificar a quantidade necessária por  $m^2$  e possibilitar o cálculo do custo inerente ao tratamento de consolidação (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 - Quantidade de produto aplicado por metro quadrado (provetes)

Quantidade de produto por tijolo [ml]	Área de aplicação do produto [ $cm^2$ ]	Quantidade de produto [ $l/m^2$ ]
80 a 90	597,9	1,34 a 1,51

Após consolidação, os provetes foram conservados nas condições de cura definidas inicialmente. Os provetes prismáticos foram colocados numa câmara com 95% HR no seu interior (Fig. 5.12), e os tijolos foram colocados em sacos de plástico, juntamente com um cadinho com água, para que sejam igualmente assegurados os 95% HR (Fig. 5.13b). Estas condições iniciais de cura, imediatamente após a aplicação dos consolidantes, foram asseguradas com recurso à utilização de humidímetro colocado junto dos provetes (Fig. 5.13a).



Fig. 5.14 – a) Câmara dos 95% HR; b) Provetes sujeitos à cura de 95% HR

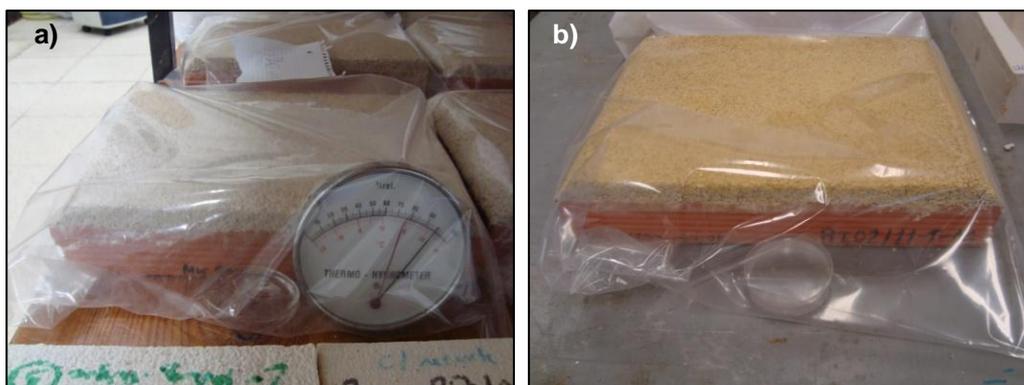


Fig. 5.15 – a) e b) Tijolos sujeitos à cura de 95 % HR

### 5.2.5 Aplicação dos produtos no painel de estação de envelhecimento natural

Além dos tratamentos realizados em provetes, também foram efectuados tratamentos num painel da estação de envelhecimento natural do LNEC. A superfície do painel da estação de envelhecimento foi dividida em áreas de aproximadamente 250 x 250 mm, onde foram efectuados os tratamentos. Este painel é revestido com uma única camada de argamassa de cal aérea e areia de 15 mm, com um traço de 1:3 e cuja aplicação data de 1999 (Fig. 5.14a).

O revestimento apresentava-se parcialmente degradado, com as zonas mais expostas a demonstrar maior grau de degradação. Com o objectivo de acelerar a degradação e limpar as zonas a tratar, efectuou-se uma escovagem manual das mesmas antes do tratamento (Fig. 5.14b). Foi feita uma primeira escovagem leve com uma escova metálica, e depois uma escovagem mais intensa com uma escova de plástico.

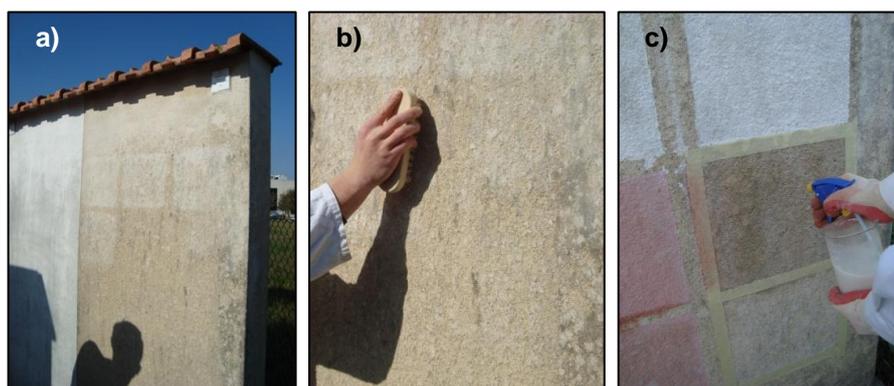


Fig. 5.16 – a) Painel de envelhecimento natural; b) Escovagem; c) Aplicação do produto consolidante

Também aqui foram feitas 10 aplicações consecutivas de produto por nebulização manual (Fig. 5.14c), com o cuidado de não deixar escorrer o produto específico da área em tratamento para as áreas inferiores onde o produto a aplicar não é o mesmo. As condições atmosféricas no decorrer das aplicações dos vários produtos demonstraram-se favoráveis, com a temperatura a variar entre os 16°C e os 22°C e a humidade relativa entre os 55% e os 60%, com sol e pouco vento.

Da figura 5.15 consta a identificação dos vários tratamentos aplicados no revestimento do painel da estação de envelhecimento natural.

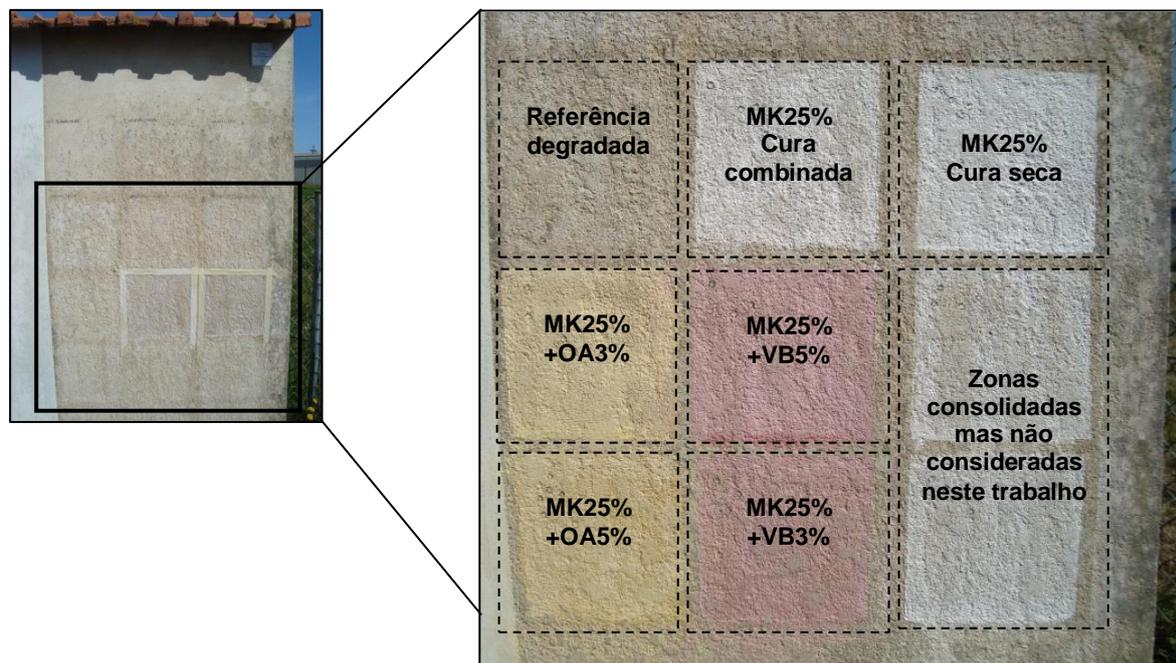


Fig. 5.17 - Identificação dos produtos aplicados no painel de envelhecimento

A quantidade de produto aplicado foi novamente medida e, à semelhança da aplicação em provetes, foi efectuado o cálculo da quantidade de produto por  $m^2$ . Como indicado de seguida, o valor obtido está bastante próximo do obtido no caso da aplicação em provetes (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 - Quantidade de produto aplicado por metro quadrado (painel)

Quantidade de produto por área [ml]	Área de aplicação do produto [ $cm^2$ ]	Quantidade de produto [ $l/m^2$ ]
80 a 100	625	1,28 a 1,60

As áreas com produtos consolidantes com curas combinadas foram sujeitos a uma cura húmida de 5 dias consecutivos, recorrendo à aplicação por *spray* de cerca de 20 ml de água potável duas vezes por dia. Após este período, todos os *spots* ficaram sujeitos integralmente às condições atmosféricas.



## 6 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS E CONSOLIDADAS

De acordo com os ensaios enunciados no subcapítulo **3.2 Plano de Ensaios**, apresentam-se neste capítulo os procedimentos de realização dos mesmos.

### 6.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado aos 28 e aos 90 dias após a aplicação do consolidante, utilizando 3 provetes em cada idade de estudo. O módulo de elasticidade, como o próprio nome indica, relaciona-se com a elasticidade de um material, fornecendo informações acerca da sua deformabilidade e rigidez.

No caso de edifícios antigos, é ideal a introdução de argamassas com módulo de elasticidade dentro dos intervalos recomendados, tendo em vista a compatibilidade com o suporte e a prevenção da introdução de tensões que possam vir a danificá-lo (VEIGA *et al.*, 2004). Nos provetes em estudo irá avaliar-se se a consolidação de uma das suas faces interfere nos valores do módulo de elasticidade dinâmico; a diminuição da porosidade da camada mais superficial do provete, onde o consolidante consegue penetrar, pode contribuir para um aumento do módulo de elasticidade, que não deve ser excessivo.

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico baseia-se na determinação da frequência fundamental de ressonância de um provete em vibração longitudinal, com a utilização de aparelho adequado para a emissão das vibrações (Fig. 6.1). O ensaio é realizado segundo a norma francesa NF B10-511 (AFNOR, 1975).

#### - Equipamento e material

- Aparelho de medição de frequência de ressonância longitudinal;
- Balança com precisão de 0,01 g;
- Régua digital com precisão de 0,01 mm.

#### - Procedimento de ensaio

- Medição das dimensões e massas dos provetes no dia do ensaio, para inserção no software associado ao aparelho de medição de frequência;
- Colocação do provete a ensaiar centrado sobre o suporte, estando o gerador de vibração e a extremidade receptora em contacto com o provete (ambas as extremidades devem exercer sobre o provete uma força com a mesma intensidade);
- O vibrador emite uma frequência que provoca uma vibração longitudinal no provete e que é recebida na extremidade receptora;

- Quando se obtém a amplitude máxima que corresponde à frequência mais baixa, estão atingidas as condições de ressonância; é com base nesta frequência de ressonância que o *software* associado ao aparelho de medição determina o módulo de elasticidade através da expressão:

$$E_d = \frac{4 \times L^2 \times F^2 \times \rho \times 10^{-6}}{g}$$

Sendo:

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

L – comprimento do provete [m];

F – frequência de ressonância longitudinal [Hz];

$\rho$  – peso volúmico [N/m<sup>3</sup>];

g – aceleração da gravidade [9,8 m/s<sup>2</sup>].

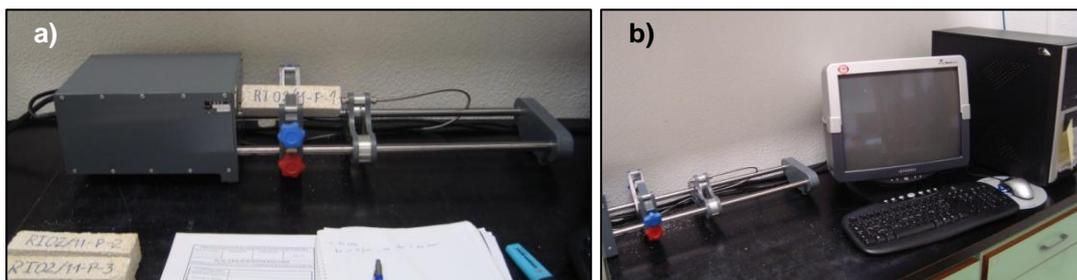


Fig. 6.1 – a) e b) Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dos provetes em estudo vai corresponder à média dos valores correspondentes aos 3 provetes ensaiados por combinação em estudo (solução de consolidação e tipo de cura).

## 6.2 Resistência à tracção por flexão

Após determinação do módulo de elasticidade dinâmico, os mesmos 3 provetes são ensaiados para determinação da sua resistência à flexão. O ensaio é realizado aos 28 e aos 90 dias após a aplicação do consolidante, e pretende verificar o incremento de resistência nas fibras traccionadas dado pela consolidação.

Este ensaio é realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (CEN, 1999) e com o procedimento de ensaio PE/R 06 – LNEC/LERevPa (LNEC, 2006). O provete em ensaio é sujeito a uma carga pontual a meio do comprimento da sua face superior, estando a sua face inferior apoiada em dois pontos que distam 100 mm entre si (Fig. 6.2). A rotura vai ocorrer pela face traccionada.

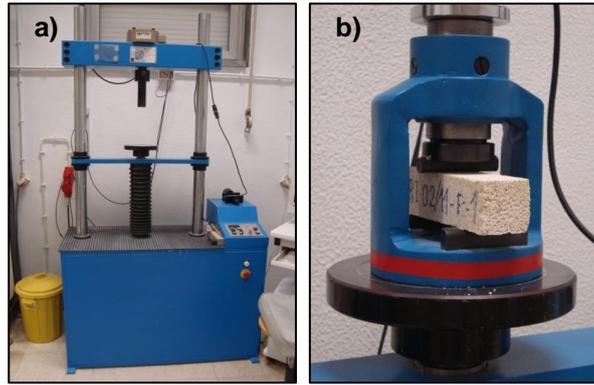


Fig. 6.2 – a) Equipamento de ensaios mecânicos; b) Determinação da resistência à tracção por flexão

#### - Equipamento e material

- Máquina de ensaios mecânicos Hoytom HM-S;
- Balança com precisão de 0,01 g;
- Régua digital com precisão de 0,01 mm.

#### - Procedimento de ensaio

- Medição das dimensões e massas dos provetes no dia do ensaio;
- Colocação da célula de carga correspondente ao ensaio em curso;
- Colocação do provete sobre os dois rolos de suporte da célula de carga;
- Aplicação da carga sem choque a uma velocidade de 50 N/s, verificando se a rotura ocorre entre 30 e 90 s; caso contrário, alterar a velocidade entre 10 a 50 N/s, até que a rotura aconteça dentro desse período de tempo;
- A resistência à flexão de cada provete é determinada utilizando a seguinte expressão (aproximação deve ser feita a 0,05 N/mm<sup>2</sup>):

$$\sigma_f = 1,5 \times F \times \frac{l}{(b \times d)^2}$$

Sendo:

$\sigma_f$  – resistência à tracção por flexão [N/mm<sup>2</sup>];

F – carga de rotura à tracção por flexão [N];

l – distância entre os dois apoios do provete [mm];

b – largura do provete [mm];

d – profundidade do provete [mm].

A resistência à tracção por flexão dos provetes em estudo vai corresponder à média dos valores correspondentes aos 3 provetes ensaiados por combinação em estudo (solução de consolidação e tipo de cura), com aproximação a  $0,1 \text{ N/mm}^2$ .

### 6.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão é realizada aos 28 e aos 90 dias após a aplicação do consolidante. São ensaiados os meios provetes resultantes do ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão.

Este ensaio é realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (CEN, 1999) e com o procedimento de ensaio PE/R 06 – LNEC/LERevPa (LNEC, 2006). O meio provete em ensaio é comprimido até à ocorrência de rotura (Fig. 6.3). É utilizada a mesma máquina de ensaios mecânicos que na determinação da resistência à tracção por flexão, sendo apenas colocada a célula de carga adequada à compressão.

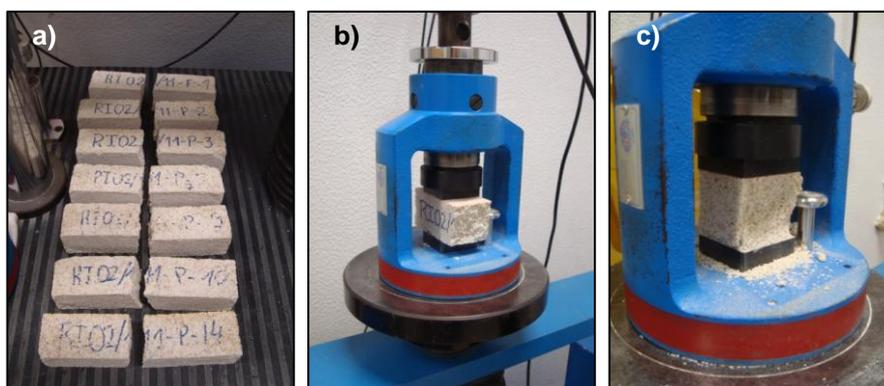


Fig. 6.3 – a) Meios provetes; b) Determinação da resistência à compressão; c) Provete após rotura

#### - Equipamento e material

- Máquina de ensaios mecânicos Hoytom HM-S;
- Balança com precisão de  $0,01 \text{ g}$ ;
- Régua digital com precisão de  $0,01 \text{ mm}$ .

#### - Procedimento de ensaio

- Medição das dimensões e massas dos provetes no dia do ensaio;
- Colocação da célula de carga correspondente ao ensaio em curso;
- Colocação do provete (meio prisma) com uma das faces laterais de moldagem de encontro aos marcadores, de modo a que a face superior seja a face consolidada;
- Aplicação da carga sem choque a uma velocidade de  $100 \text{ N/s}$ , verificando se a rotura ocorre entre 30 e 90 s; caso contrário, alterar a velocidade entre 50 a  $500 \text{ N/s}$ , até que a rotura aconteça dentro desse período de tempo;

- A resistência à compressão de cada provete é determinada utilizando a seguinte expressão (aproximação deve ser feita a 0,05 N/mm<sup>2</sup>):

$$\sigma_c = \frac{F}{\text{área da secção}}$$

Sendo:

$\sigma_c$  – resistência à compressão [N/mm<sup>2</sup>];

F – carga de rotura à compressão [N];

Área da secção – área de aplicação da carga [40x40 mm<sup>2</sup>];

A resistência à compressão dos provetes em estudo vai corresponder à média dos valores correspondentes aos 6 meios provetes ensaiados por combinação em estudo (solução de consolidação e tipo de cura), com aproximação a 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

#### **6.4 Profundidade de carbonatação**

*“A determinação da profundidade de carbonatação em argamassas de ligantes aéreos avalia-se quantitativamente através da extensão das zonas em que uma solução indicadora muda de cor por contacto com superfícies alcalinas” (FARIA, 2004).*

A profundidade de carbonatação foi determinada logo após o ensaio de tracção à flexão, aos 90 dias após aplicação do consolidante. Este ensaio teve um carácter apenas indicativo e não foi realizado em todos os provetes, apenas nos provetes com consolidantes não pigmentados mas com diferentes curas.

A fenolftaleína é um indicador de pH que apenas reage na presença de pH's altos, ou seja, no caso de zonas alcalinas muda de cor (pH entre 8,2 e 12). A reacção de carbonatação da cal aérea, que dá origem ao carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), é uma reacção neutra pelo que tem como consequência a diminuição do pH; pelo contrário, a presença de cal aérea ainda não carbonatada (Ca(OH)<sub>2</sub>) mantém o pH elevado, levando a fenolftaleína a reagir nestas zonas da argamassa.

##### **- Equipamento e material**

- Solução de 1% de fenolftaleína (60% etanol + 40% água destilada).

##### **- Procedimento de ensaio**

- Logo após o ensaio de tracção por flexão, colocação de pingos da solução de fenolftaleína sobre secção de corte do meio provete, sem contacto da pipeta com a secção do provete;
- A mudança ou não de cor na secção do provete fornece a indicação das zonas carbonatadas ou não carbonatadas:

- Zona carbonatada – zonas sem alteração de cor;
- Zona não carbonatada – zonas com cor púrpura.

A profundidade de carbonatação é medida nos quatro bordos do provete. Na apresentação de resultados constam as imagens dos provetes ensaiados e a percentagem de área carbonatada de cada provete.

### **6.5 Dureza superficial – durómetro Shore A**

A medição da dureza superficial das argamassas apoiadas em tijolos é realizada nos provetes, aos 28 e aos 90 dias após a consolidação, e no painel de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias. Para os provetes, estas medições são realizadas em 3 tijolos de cada variável de estudo, à excepção da variável de estudo com MK25% e cura de 65% HR com 2 tijolos, e a variável de referência com apenas 1 tijolo.

A dureza superficial das argamassas pode ser avaliada com um durómetro *Shore*; este equipamento mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra o material em estudo. Foi inicialmente desenvolvido para aplicação na indústria dos pneus automóveis, sendo posteriormente adaptado para ensaios em outros materiais; possui escalas *Shore A* a *D* consoante o tipo de material (macio a duro) cujos valores de resistência à penetração variam entre 0 e 100 para os materiais mais duros. Neste caso utiliza-se o durómetro *Shore A*, apropriado para materiais macios.

Com a realização deste ensaio pretende-se avaliar o incremento de dureza superficial das argamassas conseguido com a aplicação das várias soluções de consolidação em estudo, por comparação com a referência não tratada.

São feitas medições em 12 pontos de um mesmo tijolo, apresentando-se a média da dureza por tijolo e por variável em estudo; no painel de envelhecimento, são feitas 9 medições por variável de estudo. O ensaio baseia-se na norma ASTM D2240 (ASTM, 2000).

#### **- Equipamento e material**

- Durómetro *Shore A*, PCE Group.

#### **- Procedimento de ensaio**

- Segurar o durómetro e pressioná-lo contra a amostra em estudo, neste caso a argamassa consolidada (Fig. 6.4);
- Devem procurar-se sempre pontos da argamassa visivelmente consolidados;
- Registrar o valor de dureza e repetir o teste noutros pontos da amostra.

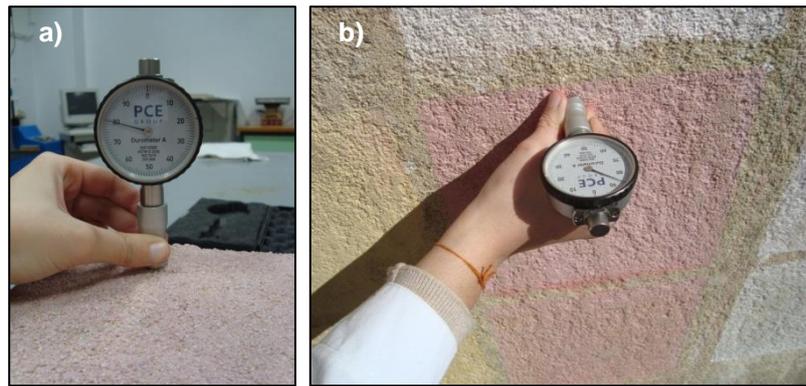


Fig. 6.4 – a) Medição da dureza superficial com durómetro num provete-tijolo; b) Medição da dureza superficial com durómetro no murete

### 6.6 Dureza superficial – esclerómetro de pêndulo

O ensaio com o esclerómetro de pêndulo é realizado apenas no painel da estação de envelhecimento natural, nas idades de estudo de 7, 28 e 90 dias. Este é um ensaio de avaliação da dureza superficial que, em comparação com o durómetro *Shore A*, avalia a dureza de camadas mais espessas do revestimento em análise e que possui uma escala numérica e funcionamento distintos. Com a realização deste ensaio é ainda possível aferir qualitativamente acerca da resistência do material ensaiado.

O funcionamento do esclerómetro de pêndulo é baseado no método do ressalto, isto é, o grau de dureza é avaliado através da medição do deslocamento de retorno de uma massa conhecida lançada contra o material em estudo, e onde este retorno se deve à reacção elástica provocada pelo choque. Tratando-se de um material com baixa dureza superficial, menor vai ser o ressalto em virtude da maior energia absorvida; em geral, quanto maior o ressalto da massa (índice esclerométrico ou valor de ressalto), significa que se está na presença de um material mais resistente (MALANHO *et al.*, 2010).

O esclerómetro de pêndulo utilizado foi um *Schmidt Hammer* do tipo PM, o indicado no caso de ensaios em revestimentos e alvenarias. Em cada idade de estudo são realizadas 5 medições mas apenas 3 são consideradas, com eliminação da maior e da menor leitura. O método de ensaio baseia-se nas normas ASTM C805 (ASTM, 2008).

#### - Equipamento e material

- Esclerómetro de pêndulo *Schmidt* PM;

#### - Procedimento de ensaio

- Escolha dos pontos a ensaiar;
- Colocação do esclerómetro bem encostado ao revestimento, com a zona de impacto da massa no ponto a ensaiar;

- Liberação do pêndulo, por carregamento no botão de disparo, sempre com o esclerômetro bem seguro e encostado de encontro ao revestimento (Fig. 6.5);
- Leitura do valor de ressalto do pêndulo na escala graduada do aparelho, e marcação no revestimento do ponto ensaiado;
- Repetir o procedimento para os vários pontos de ensaio, tendo em atenção que devem ser pontos de argamassa visivelmente consolidados;
- Deve ter-se sempre em atenção que a distância entre os pontos ensaiados deve ser no mínimo de 20 mm.

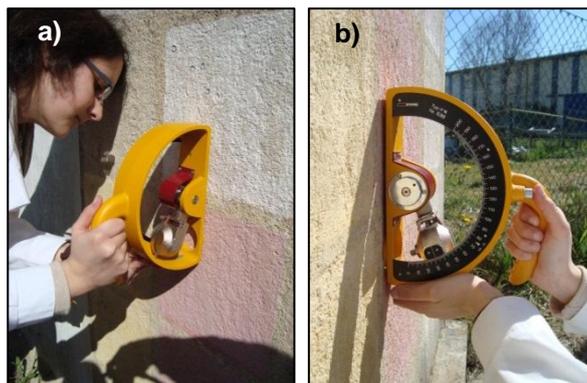


Fig. 6.5 - a) e b) Medição da dureza superficial com o esclerômetro

### **6.7 Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten**

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão é realizado nos provetes de argamassa aplicada em tijolos, aos 28 e aos 90 dias após a aplicação do consolidante, e no painel de envelhecimento natural aos 7, 28 e 90 dias. No caso dos provetes, utilizam-se 3 tijolos de cada variante estudada, à exceção da variável de estudo com MK25% e cura de 65% HR com 2 tijolos, e a variável de referência com apenas 1 tijolo.

Este ensaio permite caracterizar uma argamassa quanto à sua permeabilidade e quanto ao seu estado de degradação. No caso do estudo realizado nesta dissertação, este ensaio vai também permitir a avaliação da alteração da permeabilidade das argamassas por parte das várias soluções consolidantes, por meio de comparação com a referência não tratada; é importante que as soluções não tornem a argamassa impermeável, mas sim que alterem a sua permeabilidade dentro de intervalos razoáveis e não excessivos, de maneira que o modo de funcionamento do revestimento antigo não seja significativamente alterado e o prejudique.

Para realização do ensaio são utilizados tubos de Karsten que simulam uma pressão dinâmica de vento equivalente a cerca de 140 km/h. O procedimento de ensaio é feito com base na ficha de ensaio FE Pa n.º39 (LNEC, 2002), que tem como referência a recomendação de ensaio Test N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980).

**- Equipamento e material**

- Tubos de Karsten graduados de 0 a 4 ml;
- Mastique vedante para fixação dos tubos à argamassa;
- Cronómetro.

**- Procedimento de ensaio**

- Fixação dos tubos de Karsten com mastique nos provetes de argamassa (são colocados dois tubos por provete/área do painel em ensaio);
- Enchimento dos tubos com água até atingir a marca dos 0 ml e início da contagem do tempo que o provete demora até absorver os 4 ml (Fig. 6.6).

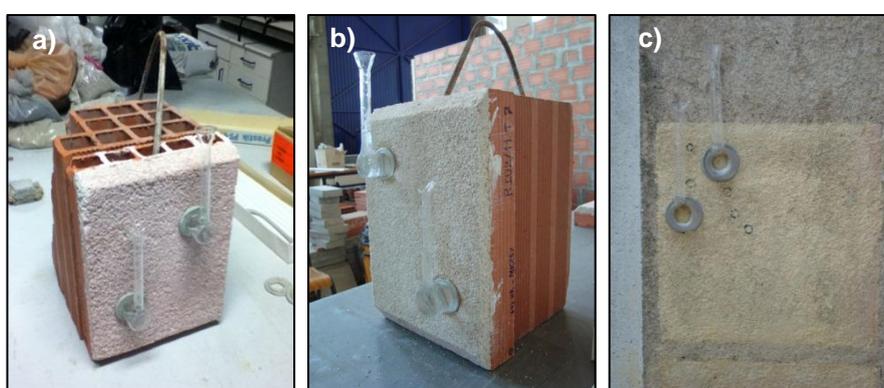


Fig. 6.6 – a) e b) Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) em provetes; c) Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) no painel

Os mesmos provetes são ensaiados em ambas as idades de estudo, mas os pontos de fixação dos tubos de Karsten são alterados no ensaio dos 90 dias para não coincidir com os pontos de ensaio aos 28 dias. É feita uma média dos tempos de absorção por tijolo e por variável de estudo. No painel da estação de envelhecimento, cada *spot* está dividido em áreas mais pequenas, cada uma para ensaios em diferentes idades de estudo.

### **6.8 Velocidade de propagação dos ultra-sons**

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons é realizada nos provetes em tijolos, aos 28 e aos 90 dias após a aplicação do consolidante. Tal como em ensaios anteriores em tijolos, utilizam-se 3 tijolos de cada variante estudada, à excepção da variável de estudo com MK25% e cura de 65% HR com 2 tijolos, e a variável de referência com apenas 1 tijolo. Pretende-se avaliar a influência da consolidação no nível de porosidade e compacidade da argamassa, quando em comparação com a argamassa de referência.

Os ensaios com ultra-sons são utilizados quando se quer avaliar a homogeneidade e compacidade de um betão ou argamassa, e detectar anomalias e defeitos tais como fissuras, grandes vazios ou perda de coesão no caso de argamassas. Na presença de vazios e porosidade elevada, o tempo de

percurso entre transdutores é maior, o que resulta numa velocidade de propagação dos ultra-sons mais baixa. Assim, argamassas mais porosas apresentam velocidades dos ultra-sons mais baixas.

É um ensaio não destrutivo, bastante útil quando a recolha de amostras *in situ* é limitada e se pretende caracterizar o revestimento (como é o caso de património histórico). No caso de argamassas de cal aérea, os parâmetros que mais influenciam a propagação dos ultra-sons são a porosidade, o grau de carbonatação e o nível de degradação (como por exemplo a perda de coesão ou a fissuração). O primeiro parâmetro está directamente relacionado com a quantidade de água adicionada na amassadura, enquanto o aumento do grau de carbonatação resulta numa alteração mineralógica da argamassa e numa redução da sua porosidade (ARIZZI *et al.*, 2012).

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12504-4 (IPQ, 2007) e com a ficha de ensaio FE Pa n.º43 (LNEC, 2010), em que a última adapta o ensaio de ultra-sons realizado em betão armado para o caso dos revestimentos de paredes. De um modo geral, este ensaio baseia-se na medição do tempo de percurso das ondas ultra-sónicas produzidas por um transdutor (transmissor) e recebidas por um segundo transdutor (receptor). Adoptou-se o método indirecto na transmissão de ondas, isto é, os transdutores transmissor e receptor são colocados na mesma face da argamassa. Neste tipo de transmissão dos ultra-sons o percurso não é medido; faz-se sim uma série de medições com os transdutores a diferentes distâncias.

#### **- Equipamento e material**

- Aparelho Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7.

#### **- Procedimento de ensaio**

- Escolha do percurso a ensaiar, que deve ser uma zona visivelmente consolidada, e fixação da escala com o percurso de pontos marcados para ensaio (Fig. 6.7a);
- Colocação do transdutor-transmissor num ponto fixo (ponto inicial/zero do percurso), fazendo 45° com a horizontal;
- Medição do tempo de percurso dos ultra-sons em  $\mu\text{s}$  nos vários pontos de percurso, colocando o transdutor-receptor nesses mesmos pontos também fazendo 45° com a superfície horizontal da argamassa (Fig. 6.7b);
- Os vários pontos do percurso distam 10 mm entre si, e os tempos de percurso são medidos até se atingir uma distância final de 100 mm entre transdutores;
- Realizam-se três medições do mesmo percurso, e no total são ensaiadas duas zonas por tijolo (uma na primeira metade do provete e outra na segunda metade do provete), com um total de 6 leituras por tijolo.

A velocidade de propagação dos ultra-sons na argamassa obtém-se através da construção de um gráfico que relaciona os tempos de transmissão das ondas e a distância entre os transdutores; a inclinação da recta resultante da regressão linear dos pontos marcados no gráfico representa a

velocidade média de propagação dos ultra-sons. Depois de obtidas as velocidades, é feita uma média das mesmas por tijolo e por variável de estudo.

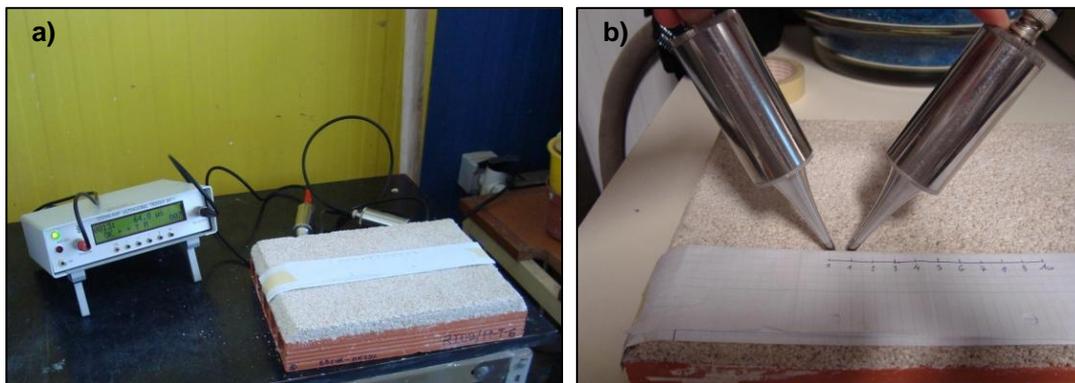


Fig. 6.7 – a) e b) Ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons

## 6.9 Envelhecimento artificial acelerado

O ensaio de envelhecimento artificial acelerado permite submeter os provetes tratados a condições atmosféricas extremas, através da simulação dessas condições, e assim verificar o comportamento e resistência dos produtos consolidantes pigmentados aos vários ciclos climáticos; pretende-se com este ensaio uma melhor perspectiva acerca da durabilidade dos tratamentos aplicados. As condições simuladas são condições atmosféricas extremas que poucas vezes são atingidas em Portugal:

### - Ciclos de calor-frio (8 ciclos):

- Calor a 60°C durante 8 h;
- Estabilização durante 30 min em ambiente condicionado com temperatura de 20°C e 65% HR;
- Frio a -15°C durante 15 h;
- Estabilização durante 30min em ambiente condicionado com temperatura de 20°C e 65% HR;

### - Ciclos de chuva-frio (8 ciclos):

- Chuva durante 8 h e à temperatura ambiente;
- Estabilização durante 30 min em ambiente condicionado com temperatura de 20°C e 65% HR;
- Frio a -8°C durante 15 h;
- Estabilização durante 30 min em ambiente condicionado com temperatura de 20°C e 65% HR.

As condições simuladas foram adoptadas da norma EN 1015-21 (CEN, 2002), tendo-se aumentado o número de ciclos de quatro para oito ciclos de cada tipo, e reduzido a temperatura de frio nos ciclos

de chuva-frio. Esta adaptação vem no seguimento da realização de outros ensaios de envelhecimento artificial acelerado realizados no NRI, LNEC.

Este ensaio foi realizado nas argamassas aplicadas em tijolos, e após o tratamento de consolidação ter completado 90 dias. Devido à necessidade de ensaio de outros trabalhos que ocuparam o equipamento, só foi possível iniciar o ensaio de envelhecimento aos 130 dias. No final de cada ciclo é observado o estado de cada provete, e no final de todos os ciclos são realizados os seguintes ensaios:

- Dureza superficial com durómetro *Shore A*;
- Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten);
- Velocidade de propagação dos ultra-sons;
- Evolução cromática (escala NCS).

As condições de calor e chuva são recriadas numa estrutura metálica equipada com lâmpadas de infra-vermelhos e um sistema de aspersão de água que recriam, respectivamente, os 60°C de calor e a chuva (Fig. 6.8a). O frio é simulado colocando os tijolos numa arca frigorífica (Fig. 6.8b), que foi regulada para a temperatura de -15°C no caso dos ciclos calor-frio, e -8°C no caso dos ciclos chuva-frio.

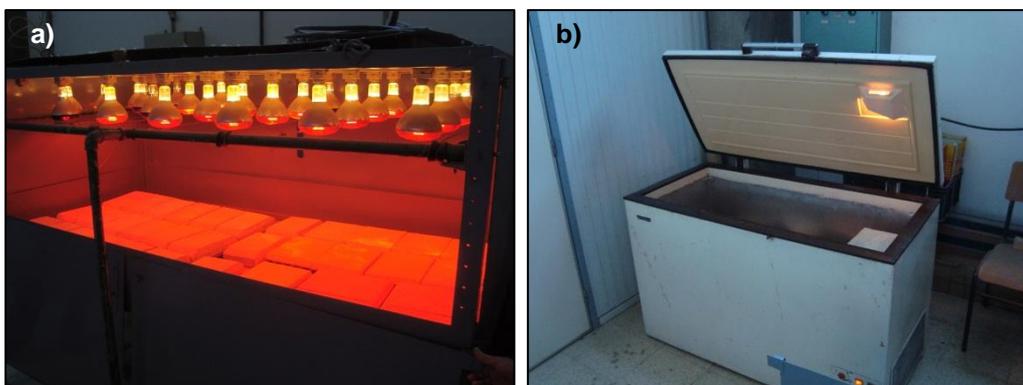


Fig. 6.8 - a) Condições de calor a 60°C; b) Arca frigorífica

### **6.10 Envelhecimento natural – evolução cromática**

O ensaio de envelhecimento natural tem como objectivo avaliar o comportamento das aplicações realizadas no painel da Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC, perante a exposição às condições atmosféricas naturais. Além dos ensaios físicos descritos anteriormente, pretende-se agora a avaliação do comportamento estético dos produtos aplicados no painel, com a medição com escala NCS da evolução cromática (Fig. 6.9). Foram efectuadas as leituras dos índices da escala NCS aos 7, 28 e 90 dias.

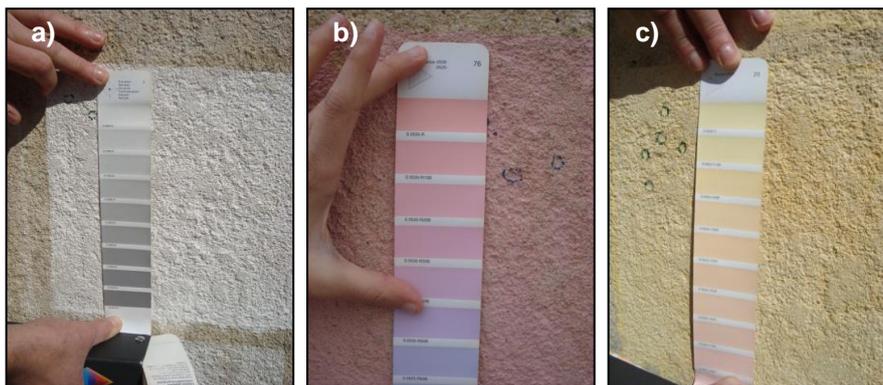


Fig. 6.9 – a), b) e c) Medição das cores com a escala NCS no painel

As aplicações foram realizadas dia 5 de Março de 2012, pelo que o tempo de exposição entre ensaios foi abrangido essencialmente pelos meses de Março, Abril e Maio. Com base nos registos do Instituto Meteorológico, as condições climáticas nestes 3 meses em Lisboa foram as apresentadas na Tabela 6.1 (IM, I.P., 2012).

Tabela 6.1 - Condições climáticas do painel durante as idades de ensaios

Mês	Intervalos de temperaturas		Precipitação acumulada [mm]
	Máxima [°C]	Mínima [°C]	
Março 2012	17 a 26	7 a 15	58
Abril 2012	16 a 24	8 a 14	60
Maio 2012	16 a 34	10 a 21	100

### 6.11 Observações em microscopia óptica e microscopia electrónica de varrimento MEV-EDS de superfícies polidas e superfícies de fractura

A observação em microscopia foi realizada com amostras de argamassas retiradas dos provetes ensaiados mecanicamente aos 90 dias. Foram observadas amostras de referência (não tratadas) e amostras tratadas:

- MK25% com cura de 95% HR durante 7 dias e de 65% HR nos restantes;
- MK25% com cura de 65% HR;
- MK25% + OA5% com cura de 95% HR durante 7 dias e de 65% HR nos restantes;
- MK25% + RE5% com cura de 95% HR durante 7 dias e de 65% HR nos restantes;
- MK25% + VB5% com cura de 95% HR durante 7 dias e de 65% HR nos restantes.

De entre as amostras recolhidas, dois tipos distintos de amostras foram preparados:

- Superfícies de fractura – pequenos pedaços de argamassa consolidada, com a observação das superfícies consolidadas das amostras (Fig. 6.10a);

- Superfícies polidas – as amostras de argamassa são, sob vácuo, impregnadas por uma resina epoxídica, cortadas e polidas com pastas de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ ; neste caso, observa-se a secção transversal das amostras de argamassa (Fig. 6.10b).

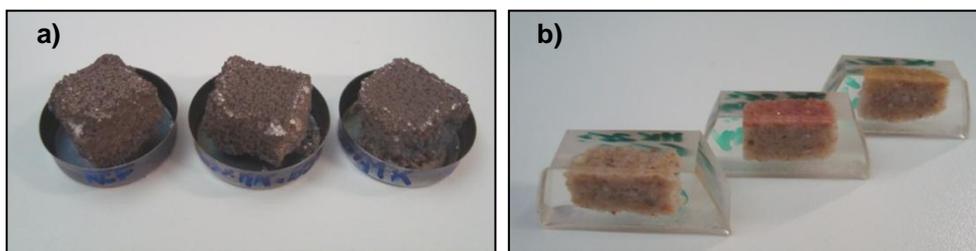


Fig. 6.10 - a) Superfícies de fractura; b) Superfícies polidas

A observação da microestrutura das argamassas é bastante importante, já que depende dela o desempenho da argamassa (RATO, 2006). No caso da consolidação de argamassas, a observação em MEV-EDS é especialmente importante pois permite uma visão mais pormenorizada do que acontece microestruturalmente após o tratamento, realizar análises químicas e mineralógicas, e detectar a formação de produtos pozolânicos. Também as observações no microscópio óptico permitem uma melhor observação da macroestrutura das amostras, que não é visível a olho nu.

Foi utilizado um estereomicroscópio Olympus SZH, e um microscópio electrónico de varrimento MEV JEOL JSM-6400, com um espectrómetro de dispersão de energia Oxford (EDS) (Fig. 6.11). Para observação no MEV-EDS, todas as amostras foram cobertas por um filme de ouro, tendo em vista o aumento da sua condutibilidade.



Fig. 6.11 - MEV-EDS

## 6.12 *Análise por difracção de raios X (DRX)*

Os produtos consolidantes MK25%, MK25%+OA5% e MK25%+VB5% foram analisados por difracção de raios X, após completarem sete dias de cura. Todos os produtos foram sujeitos a dois tipos de condições de cura distintos durante sete dias: 50% HR; 95% HR. Pretendeu-se assim observar as diferenças nos produtos pozolânicos formados devidas aos dois tipos de cura realizados.

A análise por difracção de raios X de amostras de material em pó permite identificar as fases minerais presentes; a difracção dos raios X sobre a matéria cristalina segundo orientações bem definidas e características de cada composto possibilita a identificação de cada composto cristalino presente na amostra (VEIGA *et al.*, 2004). A análise foi realizada num difractómetro de raios X Philips PW1830 generator (Fig. 6.12a).

Efectuaram-se os registos difractométricos dos vários produtos, tendo-se utilizado a radiação  $K\alpha$  do cobalto produzida por uma unidade de raios X, nas seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e  $74^\circ 2\theta$ ; velocidade de varrimento de  $0.05^\circ 2\theta/s$ ; tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA.

Após preparação, os produtos foram colocados a  $60^\circ\text{C}$  numa estufa para retirar o excesso de água. No caso da cura de 95% HR, os produtos foram retirados da estufa ainda em forma de pasta e colocados na câmara de 95% HR. Os restantes continuaram na estufa até apresentarem um aspecto seco, sendo depois colocados na sala de ambiente condicionado com 50% HR. Passados os sete dias de cura, foram retiradas amostras de cada um dos produtos, e preparadas para a análise por DRX (Fig. 6.12b).

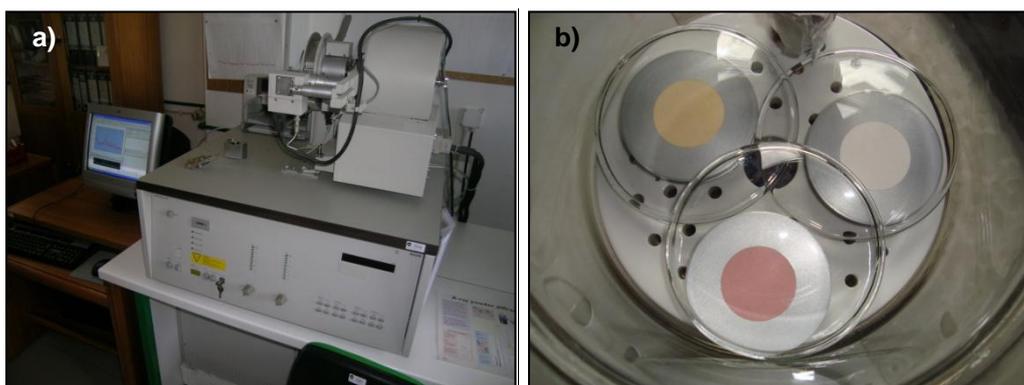


Fig. 6.12 - a) Difractómetro de raios X Philips PW1830 generator; b) Amostras prontas para análise

### 6.13 Profundidade de penetração dos consolidantes

A profundidade de penetração das soluções consolidantes foi observada e medida com recurso a um estereomicroscópio Olympus SZH10. Foram feitas aplicações num tijolo das soluções pigmentadas mais fortes e da solução não pigmentada (Fig. 6.13):

- MK25% (1);
- MK25% + OA5% (2);
- MK25% + VB5% (3);
- MK25% + RE5% (4).

A penetração das soluções na argamassa de um tijolo vai ser maior do que num provete prismático, já que o último possui a argamassa mais compactada em virtude da aplicação da norma europeia já

referida na sua realização. A argamassa de um tijolo vai aproximar-se mais de um caso real de uma argamassa num edifício antigo.

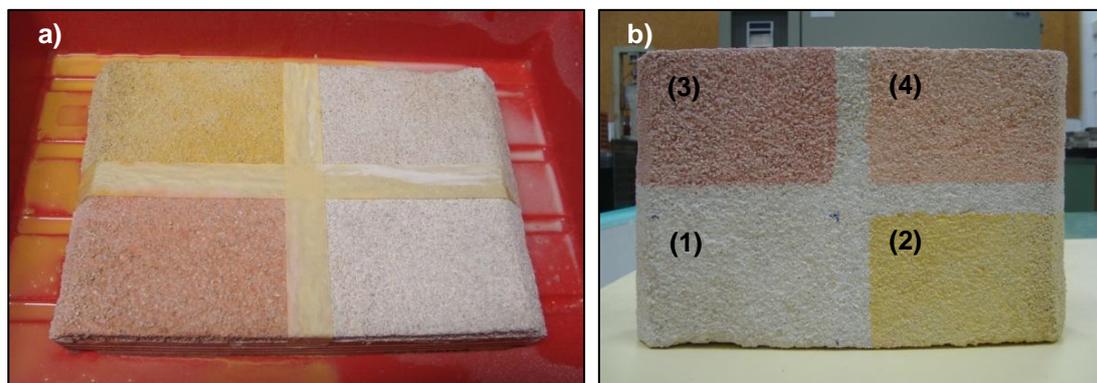


Fig. 6.13 – a) e b) aplicações para medição da penetração das soluções

A aplicação das soluções foi feita de acordo com o procedimento enunciado para a consolidação dos provetes no subcapítulo **4.2.3 Aplicação dos produtos em provetes**. Após um período de 24 horas, foram retiradas amostras de argamassa para posterior observação microscópica (Fig. 6.14). Foi medido um número mínimo de 12 pontos por amostra.

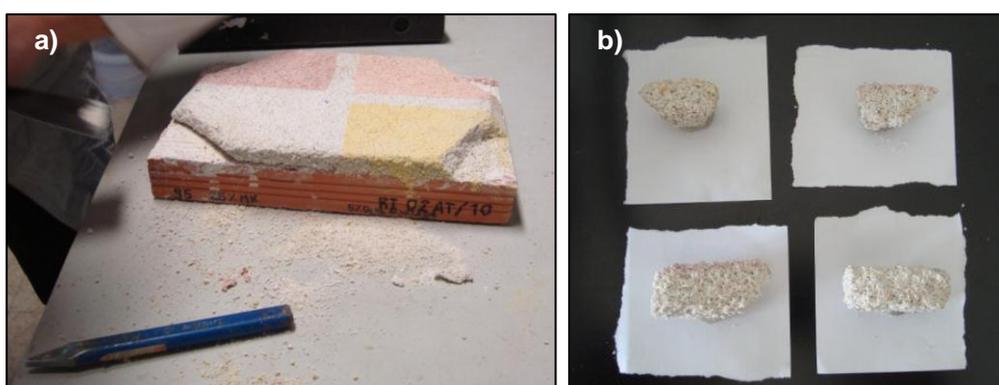


Fig. 6.14 – a) Recolha das amostras; b) Amostras de argamassa para medição da penetração das soluções

## 7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 7.1 *Generalidades*

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos em todos os ensaios descritos no subcapítulo anterior, assim como uma análise dos mesmos. O tratamento dos resultados foi feito com recurso ao Microsoft Office Excel 2010, com a compilação dos mesmos sob a forma de tabelas e gráficos.

Apresentam-se em primeiro lugar os resultados obtidos para os ensaios em provetes, em segundo lugar os resultados obtidos nas aplicações realizadas no painel da Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC, e de seguida os resultados obtidos nas análises efectuadas a nível microestrutural e da composição mineralógica dos produtos consolidantes.

Por fim, é apresentado um capítulo onde se relacionam os resultados obtidos em todos os ensaios, fazendo um cruzamento de toda a informação recolhida, para assim poder aferir sobre o desempenho dos consolidantes em relação aos objectivos inicialmente propostos.

Os ensaios realizados pretendem caracterizar e avaliar a compatibilidade e eficácia dos vários produtos estudados. Interessa que os produtos consolidantes promovam o aumento da coesão das partículas de argamassa, sem no entanto aumentar drasticamente as suas características, por uma questão de compatibilidade com os suportes e durabilidade dos revestimentos antigos.

Refere-se novamente a terminologia adoptada para os vários produtos consolidantes:

- *MK25%* – Cal + Metacaulino 25% + H<sub>2</sub>O;
  - *MK25% CC* – caso em que o consolidante *MK25%* é sujeito à cura combinada de 7 dias a 95% HR e os restantes dias a 65% HR; a sigla CC vem de cura combinada;
  - *MK25% CS* – caso em que o consolidante *MK25%* é sujeito a uma cura integral a 65% HR; a sigla CS vem de cura simples;
- *MK25% + OA3%* – Cal + Metacaulino 25% + Ocre Alvalade 3% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25% + OA5%* – Cal + Metacaulino 25% + Ocre Alvalade 5% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25% + RE3%* – Cal + Metacaulino 25% + Rosso Ercolano 3% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25% + RE5%* – Cal + Metacaulino 25% + Rosso Ercolano 5% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25% + VB3%* – Cal + Metacaulino 25% + Vermelho Bayer 3% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25% + VB5%* – Cal + Metacaulino 25% + Vermelho Bayer 5% + H<sub>2</sub>O.

### 7.2 *Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassas consolidadas*

Em relação aos ensaios realizados em provetes, várias vertentes foram abordadas:

- **Ensaio mecânicos**, para avaliação da interferência dos produtos nas resistências mecânicas (determinação do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências à tracção por flexão e à compressão);
- **Ensaio físicos**, para avaliação do aumento da compacidade, dureza superficial e diminuição da absorção de água (determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, da dureza superficial em graus *Shore A* e do tempo de absorção de água com utilização dos tubos de Karsten);
- **Ensaio de envelhecimento artificial acelerado**, para avaliação da resistência dos produtos a ciclos climáticos com temperaturas extremas;
- Observação microscópica para **avaliação da profundidade de penetração e da microestrutura** dos produtos consolidantes;

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com os vários ensaios realizados, assim como a discussão dos mesmos.

### 7.2.1 *Módulo de elasticidade dinâmico*

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) dos provetes prismáticos de argamassa foi obtido aos 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.1 e na figura 7.1 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, assim como a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada ( $\Delta$ ); o número de provetes de argamassa ensaiados foi sempre de três em cada uma das idades de estudo.

Em geral, os tratamentos consolidantes aplicados permitem o aumento do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa, e que se verifica tanto aos 28 dias como aos 90 dias. Em ambas as idades de estudo, o consolidante a demonstrar melhor desempenho é o MK25%+VB3%, com um aumento de 88% aos 28 dias e de 78% aos 90 dias.

Os provetes sujeitos a diferentes tipos de cura, onde foram aplicados **consolidantes não pigmentados** (MK25% CC e MK25% CS), apresentaram tendências diferentes nos ensaios dos 28 dias e dos 90 dias. Aos 28 dias, os provetes tratados e sujeitos a uma cura combinada indicam um módulo de elasticidade dinâmico superior aos provetes sujeitos apenas à cura de 65% HR, mas esta tendência inverte-se nos ensaios aos 90 dias. Esta inversão de tendência nos provetes sujeitos a curas distintas, acontece igualmente na determinação das resistências à tracção por flexão e à compressão, que se apresentam nos sub-capítulos seguintes.

Os provetes tratados com **consolidantes pigmentados** apresentam, em geral, módulos de elasticidade dinâmicos superiores ao produto não pigmentado MK25% CC, com excepção do pigmento amarelo que, em ambas as idades de ensaio, possui módulos de elasticidade inferiores. Aliás, os valores de módulo de elasticidade dos provetes com MK25%+OA, em qualquer concentração de pigmento, são bastante próximos do valor dos provetes de referência não tratados, chegando a ser inferior no caso do OA3% (aos 28 dias e 90 dias). Assim, a incorporação dos

pigmentos, dependendo do pigmento em questão, pode favorecer o aumento do módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 7.1 – Módulo de elasticidade dinâmico em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto consolidante	28 dias		90 dias	
	$E_d$ [MPa]	$\Delta$ [%]	$E_d$ [MPa]	$\Delta$ [%]
MK25% CC	889 ± 321	61	912 ± 31	23
MK25% CS	569 ± 71	3	1154 ± 35	56
MK25% + OA3%	538 ± 10	-2	698 ± 83	-6
MK25% + OA5%	613 ± 65	11	809 ± 191	9
MK25% + RE3%	985 ± 110	79	942 ± 173	27
MK25% + RE5%	966 ± 58	76	1017 ± 124	37
MK25% + VB3%	1032 ± 132	88	1320 ± 138	78
MK25% + VB5%	993 ± 94	81	964 ± 120	30
Referência	550 ± 7	-	740 ± 152	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

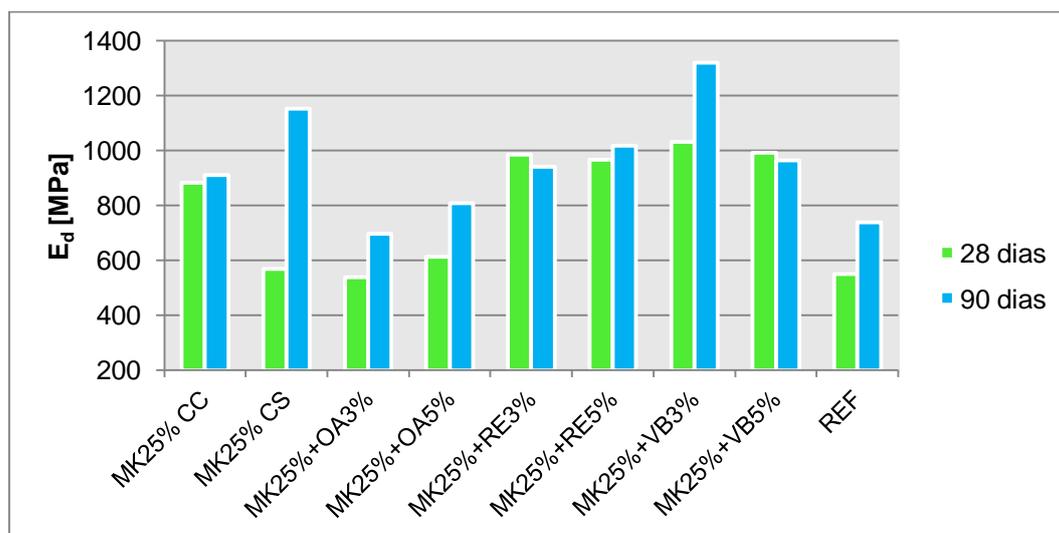


Fig. 7.1 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Em termos de concentrações dos pigmentos, aos 90 dias a maior percentagem de pigmento (5%) confere um aumento do módulo de elasticidade dinâmico para os casos em que se utilizaram pigmentos inorgânicos naturais; no caso do pigmento Vermelho Bayer (origem sintética), o maior aumento do módulo de elasticidade acontece quando é utilizada a menor percentagem de pigmento (MK25%+VB3%).

### 7.2.2 Resistência à tracção por flexão

A resistência à tracção por flexão ( $R_t$ ) dos provetes prismáticos de argamassa foi obtida aos 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.2 e na figura 7.2 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, assim como a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada ( $\Delta$ ); o número de provetes de argamassa ensaiados foi sempre de três em cada uma das idades de estudo.

Tabela 7.2 - Resistência à tracção por flexão em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto consolidante	28 dias		90 dias	
	$R_t$ [MPa]	$\Delta$ [%]	$R_t$ [MPa]	$\Delta$ [%]
MK25% CC	0,55 ± 0,05	31	0,50 ± 0,05	-6
MK25% CS	0,53 ± 0,10	26	0,53 ± 0,06	0
MK25% + OA3%	0,55 ± 0,05	31	0,60 ± 0,10	13
MK25% + OA5%	0,58 ± 0,03	38	0,53 ± 0,06	0
MK25% + RE3%	0,57 ± 0,06	36	0,52 ± 0,10	-2
MK25% + RE5%	0,57 ± 0,10	36	0,63 ± 0,06	19
MK25% + VB3%	0,58 ± 0,03	38	0,45 ± 0,10	-15
MK25% + VB5%	0,48 ± 0,08	14	0,48 ± 0,08	-9
Referência	0,42 ± 0,03	-	0,53 ± 0,03	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

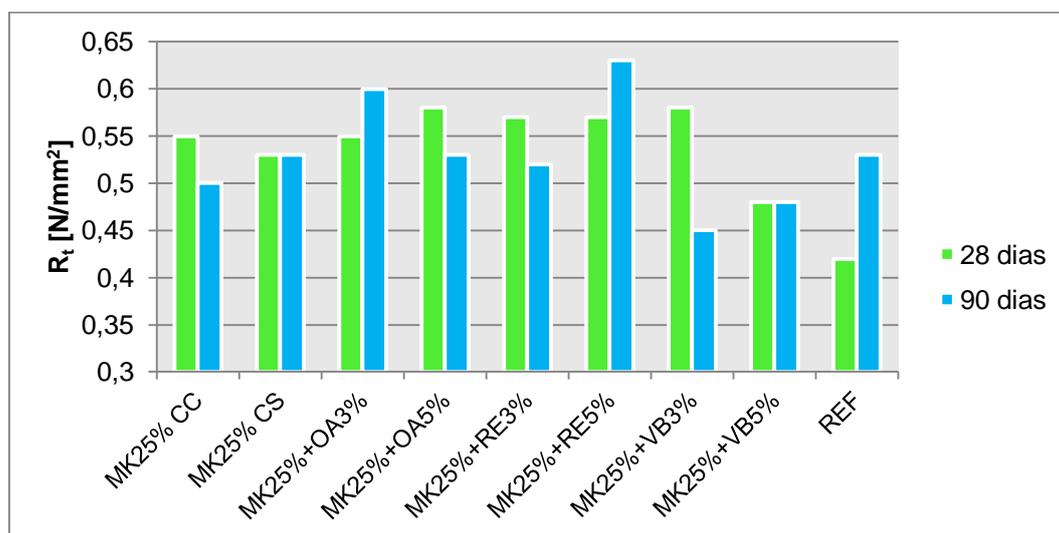


Fig. 7.2 - Resistência à tracção por flexão dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Nos ensaios realizados aos 28 dias após a aplicação dos consolidantes, é evidente o aumento da resistência à tracção por flexão dos provetes tratados, com um aumento de resistência quase similar em todos os casos. No entanto, nos ensaios dos 90 dias, os resultados obtidos nem sempre garantem o aumento da resistência, com algumas situações em que a resistência chega mesmo a ser

inferior. Aos 90 dias, os consolidantes que garantem o maior aumento da resistência à tracção por flexão são o MK25%+OA3% e o MK25%+RE5%, com **umentos na ordem dos 13% e 19%**, respectivamente.

A resistência à tracção por flexão é uma resistência que pode ser influenciada pela presença de zonas mais fracas no provete, o que pode levar mais rapidamente à sua rotura e por isso com menor resistência. De facto, os desvios padrão aos 90 dias são elevados (em especial nos casos em que  $\Delta$  é negativo), e também o valor da resistência da argamassa não tratada é cerca de 30% superior em relação ao resultado apresentado aos 28 dias (aumento elevado em relação a todos os outros valores). Refere-se ainda que este incremento de resistência da argamassa de referência não se verifica no caso da resistência à compressão, que possui o mesmo valor tanto aos 28 dias como aos 90 dias.

De igual forma ao verificado no módulo de elasticidade (e ao que sucede também nas resistências à compressão, que serão analisadas a seguir), aos 90 dias o **consolidante não pigmentado** com maior resistência é o MK25% CS. No caso dos **consolidantes pigmentados**, os melhores resultados são obtidos com o MK25%+OA3% e o MK25%+RE5%, já que os restantes resultados não apresentam qualquer melhoria de resistência, em particular com o pigmento Vermelho Bayer.

Fazendo agora uma comparação entre os consolidantes pigmentados e o consolidante não pigmentado sujeito à mesma cura, apenas o Vermelho Bayer obtém piores resultados; no caso dos pigmentos Ocre Alvalade e Rosso Ercolano, o desempenho do consolidante é melhorado pela adição destes pigmentos.

### **7.2.3 Resistência à compressão**

A resistência à compressão ( $R_c$ ) dos provetes prismáticos de argamassa foi obtida aos 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.3 e na figura 7.3 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, assim como a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada ( $\Delta$ ); o número de provetes de argamassa ensaiados foi sempre de três em cada uma das idades de estudo.

Em todos os casos houve uma melhoria da resistência à compressão dos provetes. A tendência dos resultados aos 28 dias é a mesma presente aos 90 dias, no caso dos consolidantes pigmentados; para os produtos não pigmentados, a tendência aos 28 dias é oposta à que se observou aos 90 dias, o que se verificou igualmente nos outros dois ensaios mecânicos realizados, como já referido. Os incrementos de resistência máximos obtidos rondam os 47% aos 28 dias e os 53% aos 90 dias, com os consolidantes MK25% CC e MK25%+OA3%, respectivamente.

A diferença de cura dos **consolidantes não pigmentados** demonstra um aumento da resistência à compressão a curto prazo maior para a cura combinada; aos 90 dias, o consolidante com cura integral de 65% HR torna-se um pouco mais resistente à compressão.

Tabela 7.3 - Resistência à compressão em provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto consolidante	28 dias		90 dias	
	R <sub>c</sub> [MPa]	Δ [%]	R <sub>c</sub> [MPa]	Δ [%]
MK25% CC	0,91 ± 0,12	47	0,80 ± 0,17	29
MK25% CS	0,68 ± 0,13	10	0,84 ± 0,11	35
MK25% + OA3%	0,73 ± 0,12	18	0,95 ± 0,05	53
MK25% + OA5%	0,68 ± 0,13	10	0,87 ± 0,11	40
MK25% + RE3%	0,78 ± 0,11	26	0,78 ± 0,14	26
MK25% + RE5%	0,68 ± 0,15	11	0,72 ± 0,08	16
MK25% + VB3%	0,70 ± 0,06	13	0,73 ± 0,08	18
MK25% + VB5%	0,73 ± 0,08	18	0,80 ± 0,05	29
Referência	0,62 ± 0,09	-	0,62 ± 0,09	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

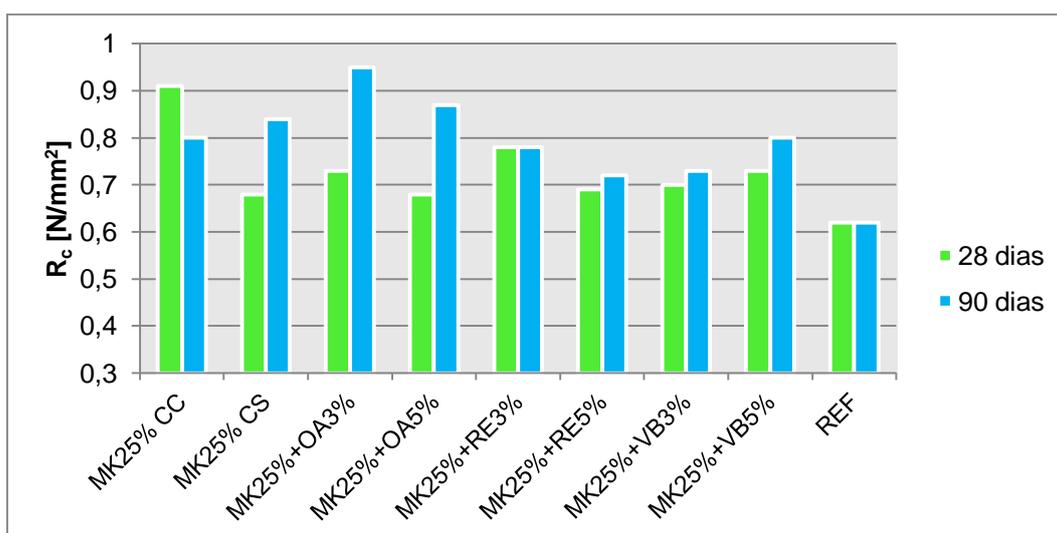


Fig. 7.3 - Resistência à compressão dos provetes prismáticos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Os **consolidantes pigmentados** com Ocre Alvalade e com Rosso Ercolano apresentam resistências à compressão superiores quando a concentração de pigmento é de 3%, tanto aos 28 dias como aos 90 dias; já para o pigmento Vermelho Bayer acontece o oposto, uma vez que em ambas as idades de estudo a resistência à compressão aumenta com o aumento da concentração de pigmento. A diferença entre os dois primeiros pigmentos e o último é a origem dos mesmos, sendo o Vermelho Bayer o único pigmento sintético.

Comparando os consolidantes pigmentados e não pigmentados, pode observar-se que: aos 28 dias, todos os consolidantes pigmentados apresentaram resistências à compressão inferiores ao MK25% CC; aos 90 dias, em virtude da diminuição do resultado do consolidante não pigmentado, os consolidantes com Ocre Alvalade obtiveram resultados superiores, enquanto que os consolidantes

com pigmentos vermelhos obtiveram valores abaixo mas próximos. Portanto, a adição do pigmento pode prejudicar o desempenho do consolidante quando se considera a resistência à compressão.

Fazendo a relação dos resultados obtidos aos 90 dias relativos às resistências à compressão e à tracção por flexão (Fig. 7.4), pode observar-se que as tendências dos resultados são idênticas em ambos os ensaios, à excepção do Rosso Ercolano. Este pigmento não é constituído apenas à base de óxidos de ferro, como os restantes pigmentos, e tem na sua composição outros materiais (gesso, caulinite, micas) que podem levar a um comportamento diferente.

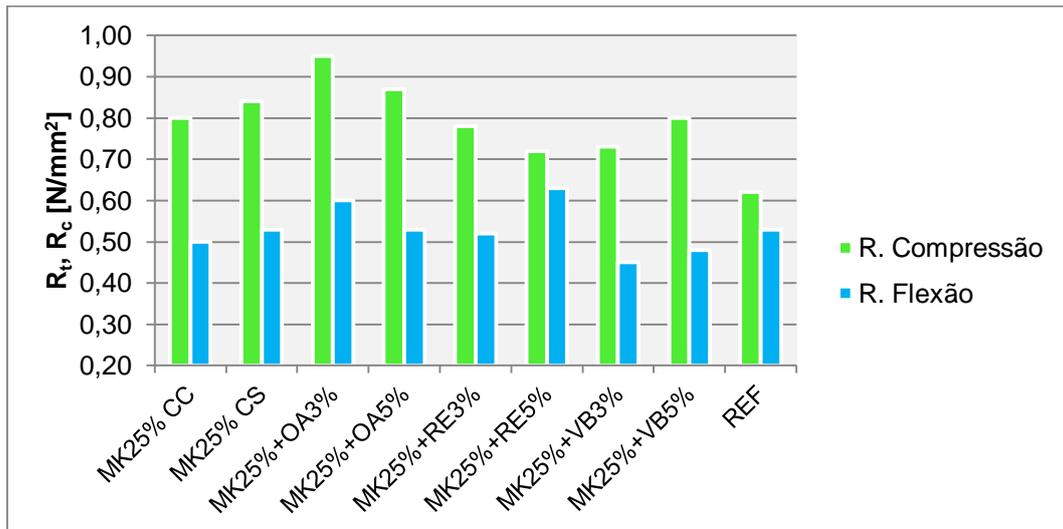


Fig. 7.4 - Relação entre os resultados da resistência à compressão e da resistência à tracção por flexão (90 dias)

#### 7.2.4 Profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi medida aos 90 dias após a aplicação dos consolidantes, no caso do produto MK25% com cura combinada de 95% HR e 65% HR e com cura apenas de 65% HR; as figuras 7.5a e 7.5b mostram os dois casos.

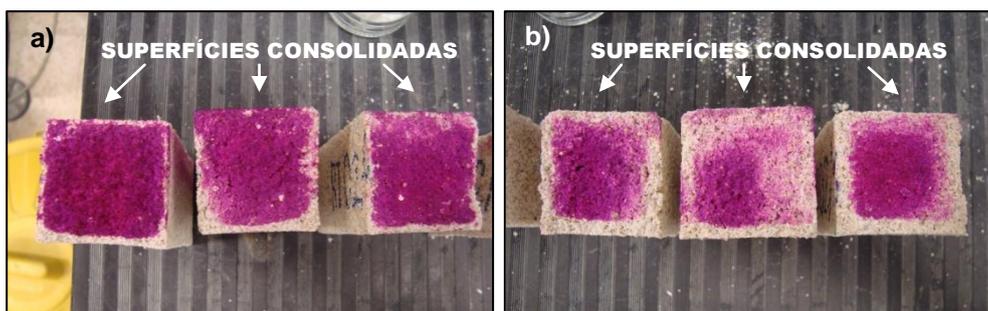


Fig. 7.5 - a) Profundidade de carbonatação em provetes prismáticos com MK25% CC; b) Profundidade de carbonatação em provetes prismáticos com MK25% CS

A Tabela 7.4 apresenta as percentagens de área de carbonatada em cada provete ensaiado; foram medidas as profundidades de carbonatação nos quatro bordos de cada provete, tendo-se posteriormente eliminado a medida mais baixa, que na maioria dos casos correspondeu à face consolidada do provete.

Observou-se que os provetes sujeitos a 7 dias de cura com 95% HR após a aplicação do consolidante MK25% apresentaram um menor grau de carbonatação em comparação com os provetes sujeitos apenas à cura de 65% HR após a aplicação do consolidante. Era espectável esta diferença, uma vez que a introdução dos dias de cura com 95% HR provoca um atraso na reacção de carbonatação da cal. O grau bastante elevado de humidade torna difícil a reacção de carbonatação da cal aérea, que depende do dióxido de carbono para se transformar em carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Nota-se, no entanto, que os 7 dias de cura com 95% HR provocam uma diferença considerável nas percentagens de áreas carbonatadas, e que foi apenas neste período que os provetes estiveram sujeitos a diferentes condições de cura.

Tabela 7.4 - Profundidade de carbonatação média em provetes prismáticos MK25%, aos 90 dias após aplicações

Produto Consolidante	Provete	Prof. carb. média [mm]	Área carb. [%]	
MK25% CC	P4	2,28 ± 0,65	22	25 ± 4
	P5	3,30 ± 1,18	30	
	P6	2,64 ± 0,55	25	
MK25% CS	P11	4,78 ± 0,58	42	40 ± 4
	P12	3,89 ± 0,26	35	
	P13	4,93 ± 0,15	43	

CC – Cura combinada; CS – Cura simples.

### 7.2.5 Dureza superficial – durómetro Shore A

A dureza superficial (DS<sub>D</sub>) das argamassas aplicadas em tijolos foi medida aos 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.5 e na figura 7.6 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, e a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada (Δ).

Qualquer um dos tratamentos aplicados proporcionou um aumento da dureza superficial das argamassas, quando em comparação com a argamassa de referência não tratada; este **incremento** tem um **valor médio** na ordem dos **11% aos 28 dias**, e dos **10% aos 90 dias**. A tendência verificada aos 28 dias é quase idêntica à tendência seguida pelos resultados obtidos aos 90 dias, com uma evolução pequena de valores entre as idades.

Nos **consolidantes não pigmentados**, a diferença entre o tipo de cura não introduziu uma diferença significativa nos resultados, mas ainda assim a consolidação sujeita a uma cura combinada apresenta melhor resultado, em especial aos 90 dias onde a diferença é maior.

Em relação aos **produtos pigmentados**, os resultados obtidos encontram-se bastante próximos ao resultado obtido para o produto consolidante sem incorporação de pigmento, com o MK25%+VB5% a surgir superior aos 90 dias; pode afirmar-se que a adição do pigmento não tem grande influência nos resultados de dureza superficial das argamassas consolidadas, o que vai depender sempre do pigmento utilizado e respectiva concentração. No caso do VB, o aumento da concentração de

pigmento de 3% para 5% resulta num valor de dureza superficial um pouco maior, e mais visível aos 90 dias; já o pigmento OA apresenta valores idênticos aos 90 dias.

Tabela 7.5 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto Consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		DS <sub>D</sub> [graus Shore A]	Δ [%]	DS <sub>D</sub> (90d) [graus Shore A]	Δ [%]
MK25% CC	3	80,6 ± 1,9	11	82,0 ± 2,5	11
MK25% CS	2	80,3 ± 1,8	11	80,9 ± 2,2	9
MK25% + OA3%	3	81,0 ± 2,1	12	81,4 ± 2,5	10
MK25% + OA5%	3	80,5 ± 1,9	11	81,3 ± 2,2	10
MK25% + VB3%	3	80,4 ± 1,8	11	81,5 ± 2,1	10
MK25% + VB5%	3	80,5 ± 1,9	11	82,4 ± 2,3	11
Referência	1	72,5 ± 1,9	-	74,2 ± 2,1	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

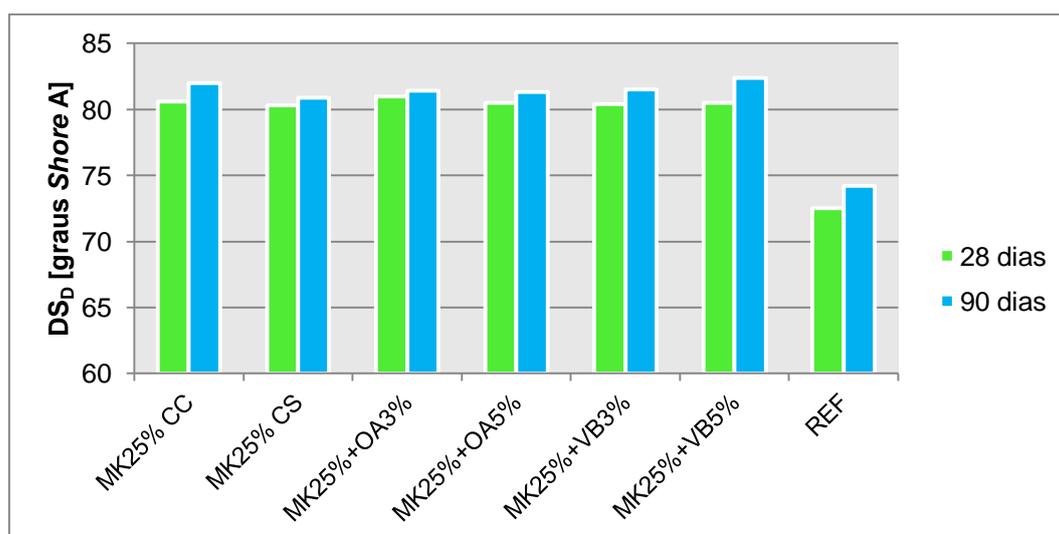


Fig. 7.6 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

### 7.2.6 Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão ( $t_{TK}$ ) das argamassas aplicadas em tijolos foi medida aos 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.6 e na figura 7.7 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, e a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada ( $\Delta$ ).

Qualquer um dos tratamentos provocou um aumento do tempo de absorção de água, com alguns resultados aos 90 dias a atingirem um aumento de quase 10 vezes o tempo de absorção de água da argamassa de referência. A tendência dos valores obtidos aos 28 dias é próxima da tendência demonstrada aos 90 dias, com quase todos os resultados a aumentar entre as duas idades.

Tabela 7.6 - Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten) nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto Consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		$t_{TK}$ [min'seg'']	$\Delta$ [%]	$t_{TK}$ [min'seg'']	$\Delta$ [%]
MK25% CC	3	3'20" ± 1'03"	545	3'38" ± 1'52"	561
MK25% CS	2	2'09" ± 0'42"	316	2'30" ± 1'33"	355
MK25% + OA3%	3	2'17" ± 0'22"	342	4'45" ± 1'59"	764
MK25% + OA5%	3	1'54" ± 1'03"	268	2'35" ± 1'10"	370
MK25% + VB3%	3	3'07" ± 1'00"	503	5'01" ± 2'16"	812
MK25% + VB5%	3	3'55" ± 1'28"	658	3'27" ± 0'47"	527
Referência	1	0'31"	-	0'33"	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

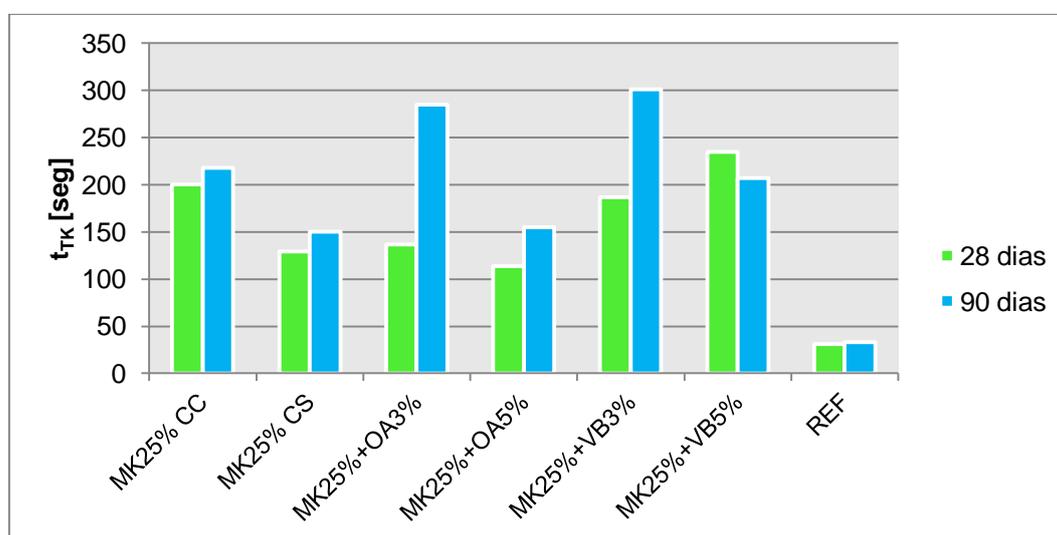


Fig. 7.7 - Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Observou-se uma diferença significativa entre os valores correspondentes aos **produtos não pigmentados** sujeitos a diferentes tipos de cura; tanto aos 28 dias, como aos 90 dias, o MK25% CC tornou a argamassa menos permeável à água que o MK25% CS.

Em relação aos **produtos pigmentados**, os resultados obtidos demonstram que a incorporação do pigmento tem influência nos mesmos, e até de forma diferente dependendo da concentração utilizada. Aos 90 dias, quando a concentração de pigmento é de 3%, ambos os consolidantes pigmentados tornam a superfície da argamassa menos permeável, comparando com o produto não pigmentado MK25% CC; já no caso dos produtos com pigmento a 5%, foram obtidos valores inferiores ao produto não pigmentado, o que demonstra que a adição dos pigmentos tem influência dependendo das concentrações utilizadas.

Apesar da diferença verificada entre os valores de absorção das argamassas tratadas e o valor da argamassa de referência, todos os resultados das argamassas consolidadas são perfeitamente compatíveis com os suportes antigos. De facto, a argamassa não tratada apresenta resultados muito baixos, também relacionados a perda de coesão, sendo positiva e aceitável esta redução da permeabilidade nesta gama de valores.

### **7.2.7 Velocidade de propagação dos ultra-sons**

A velocidade de propagação dos ultra-sons ( $V_{US}$ ) nas argamassas aplicadas em tijolos foi medida aos 28 dias e aos 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.7 e na figura 7.8 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo, e a diferença percentual entre os valores das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada ( $\Delta$ ).

A velocidade dos ultra-sons num determinado material pode fornecer uma ideia acerca da sua compacidade, podendo ser menor devido à presença de vazios no seu interior. A aplicação do tratamento superficial nas argamassas vai contribuir para uma ligeira diminuição da porosidade na camada superficial das mesmas, esperando-se portanto um aumento também ligeiro na velocidade de propagação dos ultra-sons.

Aos 28 dias, todas as argamassas consolidadas apresentaram velocidades de propagação dos ultra-sons superiores à velocidade na argamassa não tratada. Aos 90 dias, já nem todos os casos de estudo ultrapassam o resultado da argamassa não tratada (um dos valores registados foi ligeiramente menor), e os aumentos verificados são inferiores aos que se registaram nos ensaios aos 28 dias.

O **consolidante não pigmentado** sujeito a uma cura integral de 65% HR apresenta uma velocidade dos ultra-sons ligeiramente superior ao caso em que se realizou uma cura combinada de 95% HR e 65% HR.

No caso dos **produtos pigmentados**, não existe uma tendência específica dos resultados correspondentes a ambos os pigmentos estudados. O consolidante pigmentado com Ocre Alvalade, cuja concentração de pigmento é de 3%, apresenta valores um pouco superiores ao caso em que a concentração é de 5%. O consolidante pigmentado com Vermelho Bayer apresenta, aos 90 dias, velocidades similares em ambas as concentrações estudadas.

Comparando os produtos pigmentados com o produto não pigmentado sujeito ao mesmo tipo de cura combinada, verifica-se que os resultados obtidos demonstram tendências distintas aos 28 dias e aos 90 dias; ambos os produtos pigmentados apresentam velocidades superiores aos 90 dias, e em ambas as concentrações estudadas.

Quando se faz uma comparação dos resultados das argamassas tratadas com a argamassa não tratada, verifica-se que a diferença entre o valor de velocidade mais baixo das argamassas consolidadas e o valor da argamassa não tratada é bastante pequena. Este ensaio pode não ser o mais indicado para avaliar, com precisão, diferenças entre argamassas com perda de coesão e argamassas consolidadas.

Tabela 7.7 - Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

Produto Consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		V <sub>US</sub> (28d) [ms <sup>-1</sup> ]	Δ [%]	V <sub>US</sub> (90d) [ms <sup>-1</sup> ]	Δ [%]
MK25% CC	3	1431,2 ± 39,2	4	1444,8 ± 41,0	0
MK25% CS	2	1467,0 ± 37,5	7	1485,0 ± 61,5	3
MK25% + OA3%	3	1464,3 ± 33,2	7	1493,5 ± 42,0	3
MK25% + OA5%	3	1428,2 ± 15,5	4	1449,2 ± 55,8	0
MK25% + VB3%	3	1408,0 ± 42,4	3	1502,8 ± 34,3	4
MK25% + VB5%	3	1395,3 ± 22,2	2	1506,3 ± 27,6	4
Referência	1	1372,5	-	1446,0	-

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

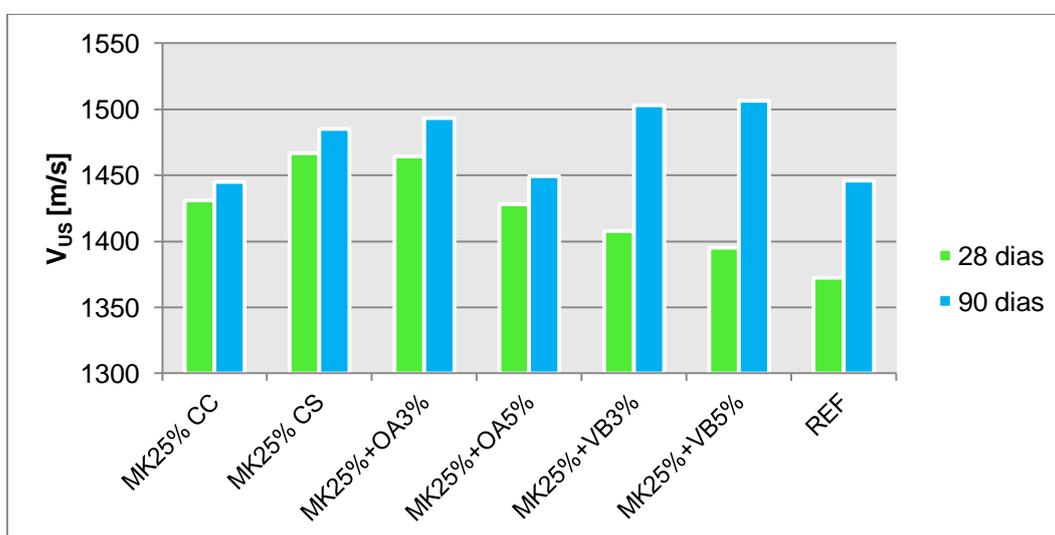


Fig. 7.8 - Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 28 e 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes

### 7.2.8 Ensaio de envelhecimento artificial acelerado

O ensaio de envelhecimento artificial acelerado foi realizado nos provetes de argamassas aplicadas em tijolos, após terem completado os 90 dias de aplicação dos produtos consolidantes. O número de tijolos ensaiados foi de 2 em todos os casos, à excepção da referência com um único tijolo. Neste sub-capítulo, é feita uma descrição inicial das alterações ocorridas durante o ensaio de envelhecimento acelerado e o estado final das argamassas; posteriormente são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios efectuados após o final do envelhecimento acelerado, e que permitem aferir mais concretamente acerca da resistência e durabilidade dos produtos consolidantes às variações térmicas e hídricas impostas.

Verificou-se que, após os ciclos de calor-frio, os tratamentos de consolidação se apresentavam quase inalterados, apenas com uma ligeira variação cromática no caso dos produtos pigmentados. No

entanto, deu-se o destacamento de duas camadas de argamassa dos respectivos tijolos, com a ligação a ser interrompida na interface salpico-argamassa.

- **Efeito da congelação da água no interior dos poros da argamassa (gelo/degelo):**

A passagem da água no seu estado líquido para o estado sólido (gelo), no interior dos poros das argamassas, provoca um aumento do volume que dá origem a pressões no interior dos poros da argamassa que podem provocar inicialmente fissuração a nível interno, e posteriormente a perda de coesão ou desagregação. A exposição a ciclos sucessivos, provoca cada vez mais a degradação dos poros, que vão ficando menos resistentes às pressões internas exercidas (BOTAS, 2009). A estrutura porosa das argamassas vai assim assumir um papel importantíssimo na resistência a ciclos deste tipo.

Os ciclos de chuva-frio eram espetavelmente mais agressivos, o que se veio a verificar e que levou à realização do registo das alterações significativas ocorridas em cada ciclo; descrevem-se de seguida as alterações mais importantes e os respectivos ciclos.

#### **2º ciclo chuva-frio**

- Destacamento das camadas de argamassa dos respectivos tijolos, em quase todos os casos;
- Argamassa não tratada parte-se em duas metades, enquanto que as argamassas tratadas se mantêm sem alterações visíveis;

#### **4º ciclo chuva-frio**

- Argamassa não tratada começa a apresentar fendilhação nas zonas de extremidade da camada, e a perda de coesão superficial agrava-se significativamente;
- As argamassas tratadas continuam sem apresentar alterações;

#### **5º ciclo chuva-frio**

- Devido à fendilhação, a argamassa não tratada perde parte da sua massa nas zonas marginais da camada em virtude da presença da chuva, e noutras zonas nota-se desagregação da argamassa;
- As argamassas tratadas começam a apresentar alguma fissuração nas zonas marginais, mas sem qualquer evidência de perda de coesão superficial;

**A partir do 5º ciclo**, deu-se um agravamento da fendilhação em quase todas as argamassas acompanhada de uma ligeira desagregação e perda de material pontual nestas zonas de extremidade, mas com todos os tratamentos consolidantes a manterem-se estáveis; até ao final do ensaio, o estado de degradação da argamassa não tratada agravou-se, com uma notável desagregação e perda de material. As figuras 7.9, 7.10 e 7.11, demonstram o estado das argamassas e tratamentos no final do ensaio. Do **Anexo 2** constam as fotografias de todos os provetes ensaiados antes do início do ensaio e no final do mesmo.

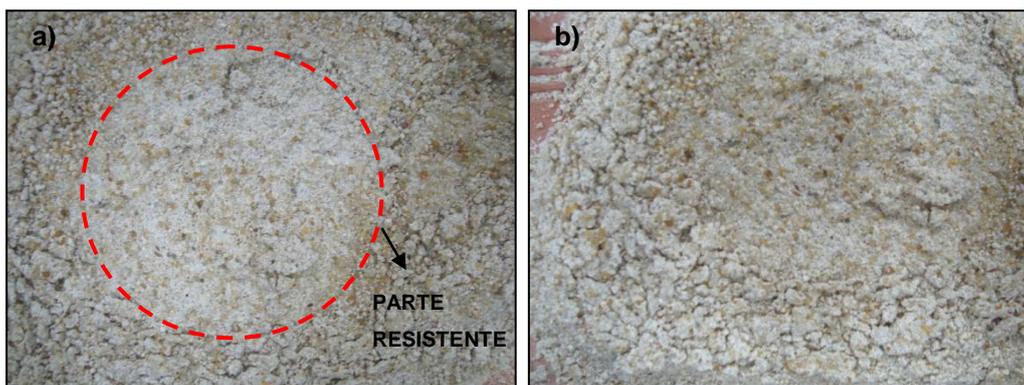


Fig. 7.9 - a) e b) Argamassa de referência (não tratada) após ensaio de envelhecimento artificial acelerado

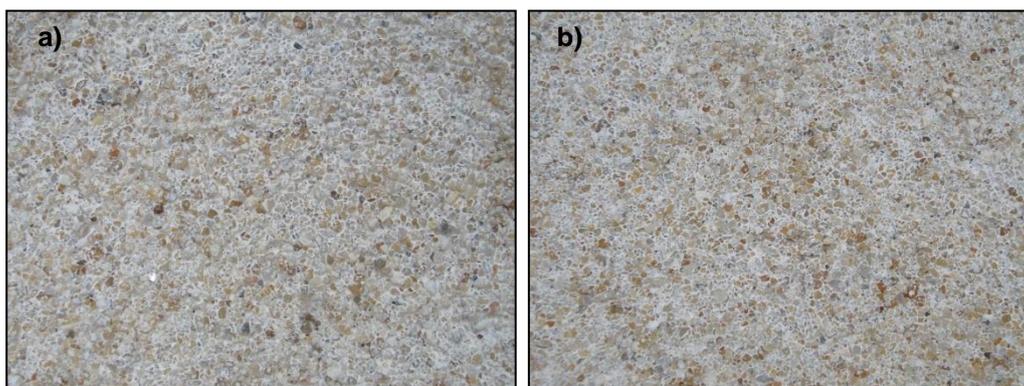


Fig. 7.10 - Argamassas tratadas após ensaio de envelhecimento artificial acelerado:  
a) MK25% CC; b) MK25% CS

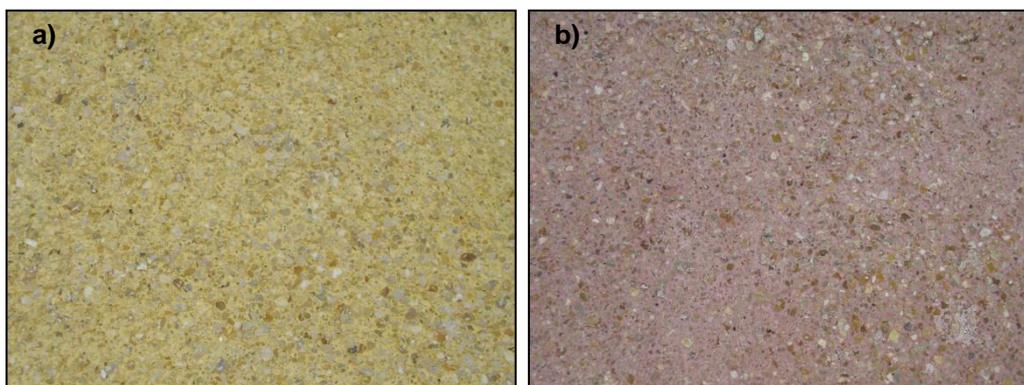


Fig. 7.11 - Argamassas tratadas após ensaio de envelhecimento artificial acelerado:  
a) MK25%+OA5%; b) MK25%+VB5%

As argamassas com menor perda de massa foram as argamassas tratadas com o produto consolidante pigmentado com Vermelho Bayer, especialmente quando a concentração de pigmento utilizada foi de 3%. A perda de massa nas argamassas tratadas foi bastante inferior em relação à argamassa não tratada; apenas a parte central da argamassa não tratada se manteve resistente (aproximadamente 25% da área inicial), enquanto que a restante parte se desagregou totalmente. No caso das argamassas consolidadas, apenas nas zonas de extremidade se verificou alguma desagregação.

As argamassas ensaiadas começaram por apresentar uma ligeira fissuração no final do 5º ciclo de chuva-frio, que mais tarde levou à fendilhação dos bordos laterais e conseqüente desagregação nestas zonas. Este fenómeno deu-se apenas nas zonas marginais, no caso das argamassas tratadas, uma vez que se tratam das zonas mais frágeis da camada de argamassa e que por isso são as primeiras a degradar-se após o desenvolvimento de tensões no interior da mesma (Fig. 7.12).



Fig. 7.12 – Fendilhação dos bordos laterais das camadas de argamassa: a) MK25% CC; b) MK25%+OA5%; c) MK25%+VB5%

Na Tabela 7.8 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados antes e depois do ensaio de envelhecimento acelerado, nomeadamente: dureza superficial com durómetro *Shore A*; absorção de água sob baixa pressão; velocidade de propagação dos ultra-sons.

Tabela 7.8 - Ensaios  $DS_D$ ,  $t_{TK}$  e  $V_{US}$  realizados nas argamassas aplicadas sobre tijolos, antes e depois do envelhecimento artificial

Produto Consolidante	$DS_D$ [graus Shore A]		$t_{TK}$ [min'seg"]		$V_{US}$ [ $ms^{-1}$ ]	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>MK25% CC</b>	82,0±2,5	81,2±2,1	3'38"±1'52"	3'30"±0'12"	1444,8±41,0	1281,8±66,8
<b>MK25% CS</b>	80,9±2,2	81,3±1,8	2'30"±1'33"	2'52"±1'11"	1485,0±61,5	1151,0±168,6
<b>MK25% + OA3%</b>	81,4±2,5	80,8±2,3	4'45"±1'59"	6'57"±4'49"	1493,5±42,0	1243,8±19,0
<b>MK25% + OA5%</b>	81,3±2,2	81,3±1,6	2'35"±1'10"	5'48"±1'31"	1449,2±55,8	1141,0±54,9
<b>MK25% + VB3%</b>	81,5±2,1	81,3±1,8	5'01"±2'16"	4'55"±0'26"	1502,8±34,3	1213,5±16,6
<b>MK25% + VB5%</b>	82,4±2,3	81,4±2,4	3'27"±0'47"	3'58"±2'14"	1506,3±27,6	1050,3±141,3
<b>Referência</b>	74,2±2,1	73,8±2,1	0'33"	0'12"	1446,0	996,5±157,7

$DS_D$  – Dureza superficial;  $t_{TK}$  – Absorção de água sob baixa pressão;  $V_{US}$  – Velocidade dos ultra-sons;  
CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

A figura 7.13 apresenta os resultados de dureza superficial antes e depois da realização do ensaio de envelhecimento artificial.

Em termos de **dureza superficial** das argamassas tratadas, não houveram variações significativas dos valores; aliás, as argamassas tratadas apresentam após o envelhecimento acelerado valores similares entre elas, independentemente do produto aplicado. Em comparação com a argamassa não tratada, o incremento de dureza superficial conferido pela aplicação dos consolidantes é de cerca de 10%, o mesmo que se tinha na idade de estudo dos 90 dias. A medição da dureza superficial na argamassa de referência foi realizada apenas em pontos da argamassa ainda em estado resistente.

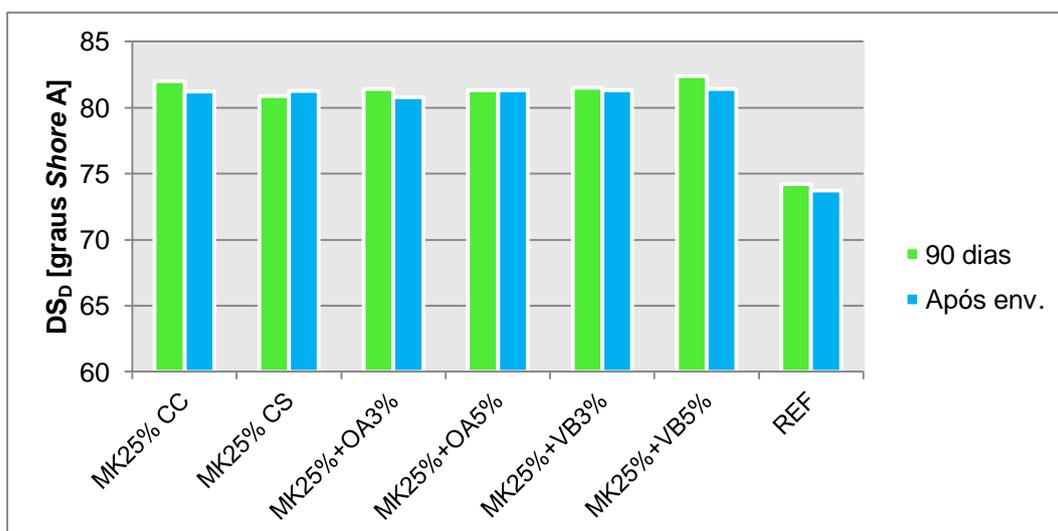


Fig. 7.13 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes e após o ensaio de envelhecimento artificial acelerado

A figura 7.14 apresenta os resultados de absorção de água antes e depois da realização do ensaio de envelhecimento artificial.

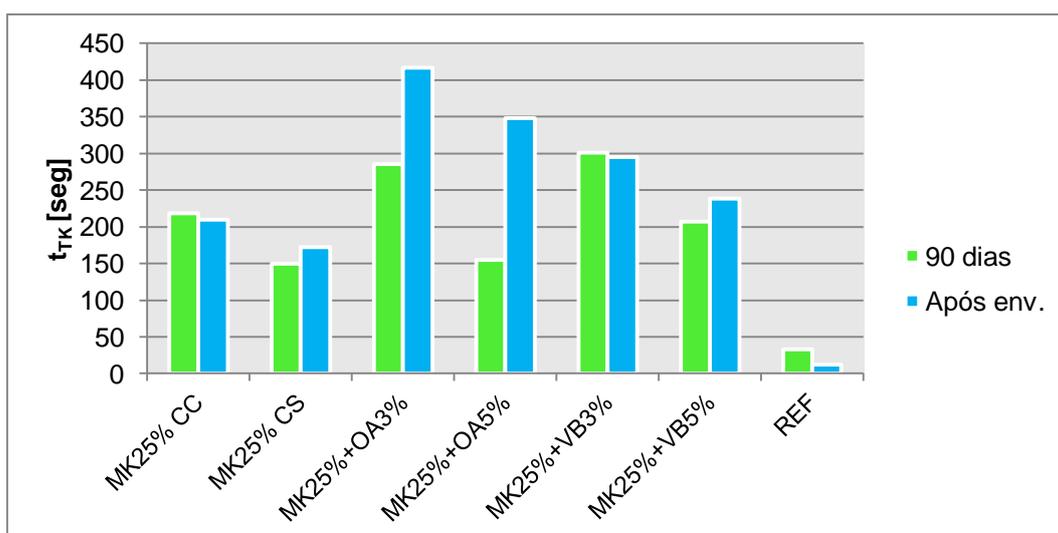


Fig. 7.14 - Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos produtos consolidantes e após o ensaio de envelhecimento artificial acelerado

Devido ao destacamento das camadas de argamassa dos respectivos tijolos, a metodologia do ensaio de **absorção de água sob baixa pressão** foi alterada. Ao invés de serem utilizados os tubos de Karsten para superfícies verticais, foram utilizados os tubos de Karsten para superfícies horizontais (Fig. 7.15), uma vez que todas as camadas de argamassa tiveram de ser mantidas na posição horizontal para se poder realizar o ensaio. Desta forma, não se consideram totalmente comparáveis os resultados dos 90 dias e após envelhecimento; a discussão fez-se apenas por comparação dos vários resultados obtidos após envelhecimento com o resultado da argamassa não tratada.

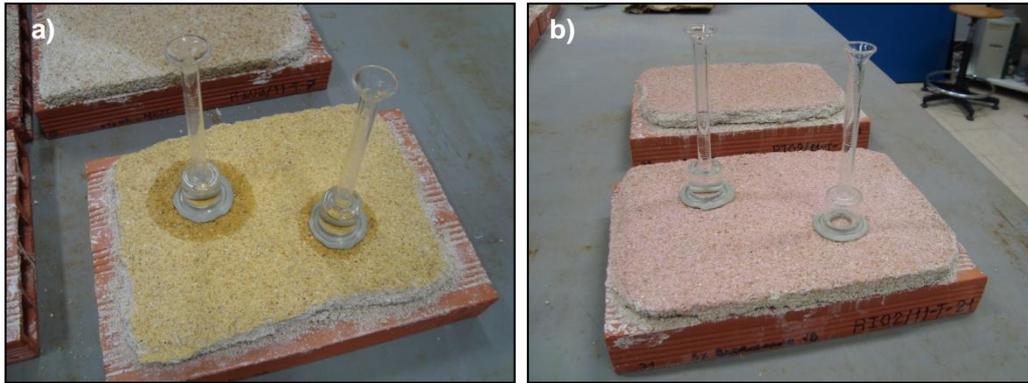


Fig. 7.15 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão, utilizando os tubos de Karsten horizontais: a) MK25%+OA5%; b) MK25%+VB3%

Comparando os valores dos tempos de absorção de água após o ensaio de envelhecimento, verifica-se que todas as argamassas tratadas apresentam valores superiores ao valor da argamassa de referência, que é apenas de 12 segundos. E apesar de em alguns produtos o desvio padrão dos resultados obtidos ser um pouco elevado, a tendência global dos resultados é a mesma tendência observada na idade de estudo dos 90 dias de ensaio (Fig. 7.16):

- Nos **produtos não pigmentados**, a cura combinada confere um pouco menos de permeabilidade à argamassa, em relação ao valor referente à cura apenas com 65% de HR;
- Nos **produtos pigmentados**, tanto para o pigmento Ocre Alvalade como para o pigmento Vermelho Bayer, maiores valores do tempo de absorção de água foram registados para uma menor percentagem de pigmento, ou seja, no caso em que a adição de pigmento é de 3%.

Comparando os produtos pigmentados com o produto não pigmentado sujeito ao mesmo tipo de cura combinada, verifica-se que os resultados obtidos para os produtos pigmentados com concentração de 3% são superiores, conferindo assim uma maior redução da permeabilidade da superfície tratada.

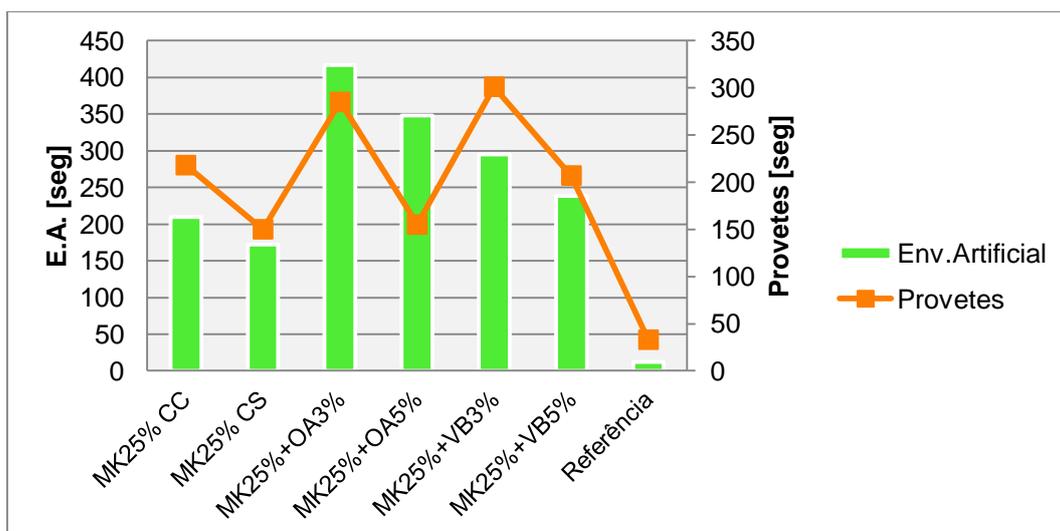


Fig. 7.16 - Relação entre os resultados de absorção de água sob baixa pressão, em provetes mantidos em ambiente controlado (90 dias) e sujeitos a envelhecimento artificial

A figura 7.17 apresenta os resultados da velocidade de propagação dos ultra-sons antes e depois da realização do ensaio de envelhecimento artificial.

No ensaio de determinação da **velocidade de propagação dos ultra-sons** foi também a argamassa não tratada a obter o menor valor médio de velocidade; este parâmetro diminui com o aumento da porosidade ou vazios no interior da argamassa, tal como a presença de fissuras a nível interno tem interferência e resulta numa velocidade mais baixa. Após o ensaio de envelhecimento artificial acelerado, todas as argamassas apresentaram velocidades dos ultra-sons mais baixas e a tendência verificada aos 90 dias de ensaio modificou-se após este ensaio de envelhecimento:

- Nos **produtos não pigmentados**, a cura combinada apresentou uma velocidade superior ao caso em que o produto consolidante não pigmentado foi sujeito apenas à cura de 65% de HR;
- Nos **produtos pigmentados**, maiores valores de velocidade dos ultra-sons foram registados quando a percentagem de pigmento é menor, ou seja, no caso em que a concentração de Ocre Alvalade e de Vermelho Bayer é de 3%.

Comparando os produtos pigmentados com o produto não pigmentado sujeito ao mesmo tipo de cura combinada, verifica-se que os resultados obtidos para os produtos pigmentados são inferiores, e esta diferença é ainda maior quando a percentagem de pigmento é de 5%.

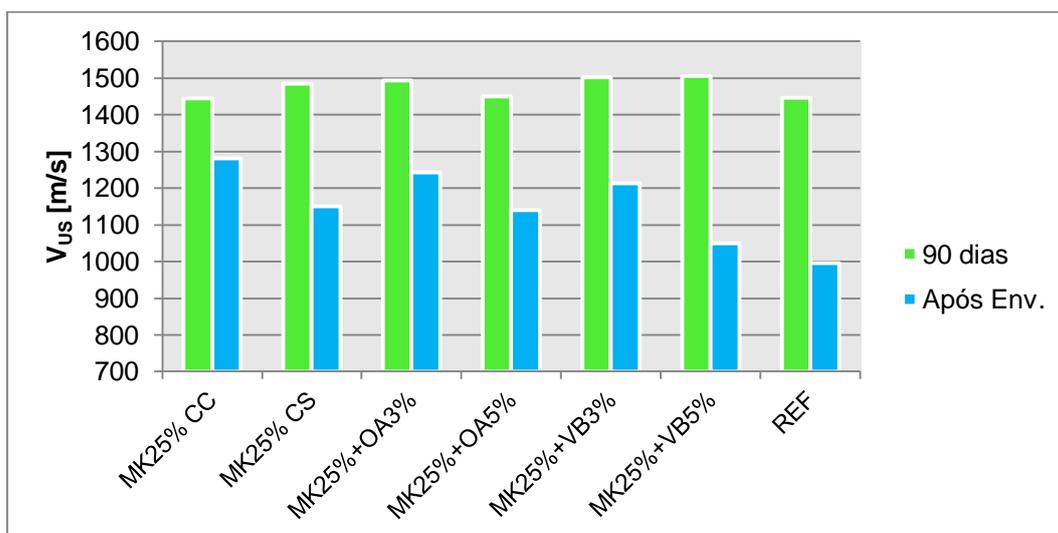


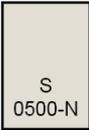
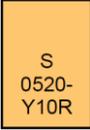
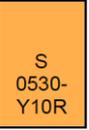
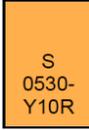
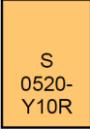
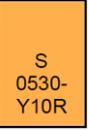
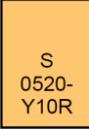
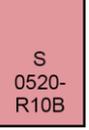
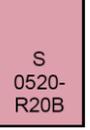
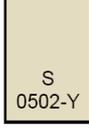
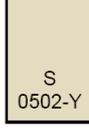
Fig. 7.17 - Velocidade dos ultra-sons nas argamassas aplicadas sobre tijolos, aos 90 dias após aplicação dos consolidantes e após envelhecimento artificial acelerado

A medição do tempo de propagação dos ultra-sons é realizada em dez pontos consecutivos; no caso da argamassa não tratada, devido às dimensões da parte que permaneceu coesa após o envelhecimento acelerado, as medições foram realizadas em cinco pontos consecutivos, tendo a velocidade sido obtida a partir destes cinco pontos em vez dos dez pontos normalmente utilizados.

Deve ter-se também em consideração que o destacamento das camadas de argamassa dos respectivos tijolos pode possivelmente afectar os valores da velocidade de propagação dos ultra-sons.

Na Tabela 7.9 apresentam-se os índices da escala NCS, registados imediatamente antes do início do ensaio, após os ciclos de calor-frio, e no final do ensaio, após os ciclos de chuva-frio.

Tabela 7.9 – Índices da escala NCS das argamassas aplicadas sobre tijolos, antes e depois do envelhecimento artificial

Produto Consolidante	Índices da escala NCS		
	Antes	Após ciclos de calor-frio	Após ciclos de chuva-frio
MK25% CC			
MK25% CS			
MK25% + OA3%	 	 	
MK25% + OA5%	 	 	 
MK25% + VB3%		 	 
MK25% + VB5%	 	 	 
Referência			

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer.

Através da análise dos índices colorimétrico da escala NCS, verifica-se que:

- Os **produtos consolidantes sem adição de pigmento** não apresentam qualquer variação cromática, mantendo sempre o índice S0500-N, antes do ensaio, após os ciclos de calor-frio, e após os ciclos de chuva-frio;
- Os **produtos consolidantes pigmentados com Ocre Alvalade** apresentaram variação cromática ao longo de todo o ensaio; após os ciclos de calor-frio houve um escurecimento

das cores amarelas em ambas as concentrações de pigmento; depois de terminados os ciclos de chuva-frio houve uma uniformização da cor no caso de OA3%, enquanto que no caso de OA5% foram identificados dois tons de amarelo ligeiramente diferentes;

- Os **produtos consolidantes pigmentados com Vermelho Bayer** apresentaram variação cromática apenas devido aos ciclos de calor-frio, tendo-se mantido os índices identificados igualmente após os ciclos de chuva-frio; em ambas as concentrações de pigmento houve um ligeiro clareamento das cores;
- A **argamassa não tratada** não apresentou qualquer variação cromática, mantendo-se sempre o índice S0502-Y.

O pigmento Vermelho Bayer é um pigmento inorgânico sintético, pelo que pode assim justificar-se a sua maior estabilidade em termos de variação cromática, em comparação com o Ocre Alvalade. Mesmo assim, ambos os pigmentos resistiram bem ao ensaio e demonstraram maior variação cromática quando sujeitos aos ciclos de calor-frio (efeito da radiação infra-vermelha). Na exposição aos ciclos de chuva-frio não houve qualquer “lavagem” dos pigmentos, o que indica que estes se encontram bem fixados nos produtos consolidantes.

Globalmente, todos os produtos consolidantes ensaiados demonstraram uma boa resistência às variações térmicas impostas; visualmente os tratamentos não apresentaram alterações notórias.

### 7.2.9 Profundidade de penetração dos consolidantes

A profundidade de penetração dos consolidantes pigmentados foi medida com recurso ao *software* que pertence ao microscópio óptico Olympus SZH10. Apresentam-se na Tabela 7.10 os valores médios, máximos e mínimos registados para os produtos observados; as figuras 7.18a e 7.18b, registadas digitalmente, ilustram alguns dos pontos medidos.

Tabela 7.10 – Valores médios, máximos e mínimos da profundidade de penetração dos produtos consolidantes em amostras de argamassas aplicadas sobre tijolos

<b>Produto Consolidante</b>	<b>Valor médio [mm]</b>	<b>Valor máximo [mm]</b>	<b>Valor mínimo [mm]</b>
<b>MK25% + OA5%</b>	2,1 ± 1,0	5,1	1,2
<b>MK25% + RE5%</b>	3,1 ± 1,3	6,0	1,9
<b>MK25% + VB5%</b>	3,1 ± 1,1	6,5	1,7

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

Verifica-se que os produtos com pigmentos vermelhos são os que obtiveram maior profundidade de penetração, com um valor médio de 3,1 mm em ambos os pigmentos Rosso Ercolano e Vermelho Bayer, e que é superior em cerca de 1 mm em relação ao valor obtido para o pigmento amarelo Ocre Alvalade.

A profundidade de penetração dos consolidantes é uma das mais importantes características a considerar na escolha dos produtos a utilizar; esta propriedade quer-se tanto maior quanto possível,

de modo a que a camada de argamassa consolidada seja também maior. Uma maior penetração dos consolidantes significa igualmente que a porosidade superficial da argamassa não é alterada em demasia, uma vez que o material introduzido se espalha por uma camada maior e não fica depositada apenas superficialmente.

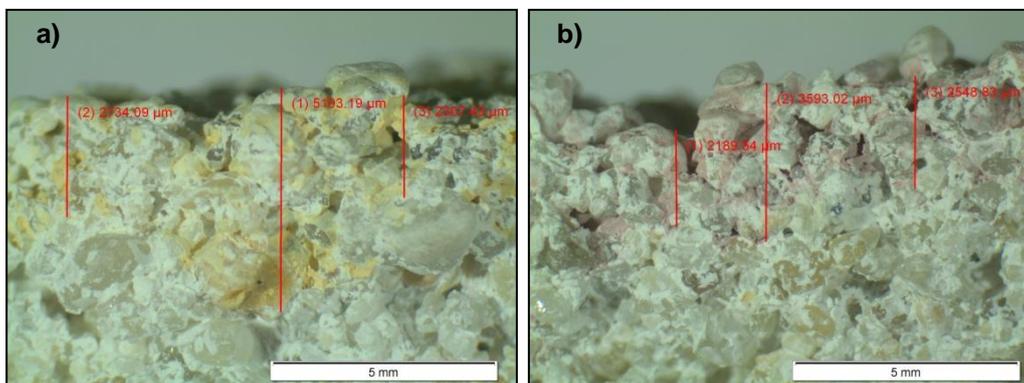


Fig. 7.18 - Profundidade de penetração: a) MK25% + OA5%; b) MK25% + VB5%

### 7.3 Resultados obtidos nos ensaios realizados no painel da Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC

Os ensaios realizados no painel foram essencialmente ensaios físicos e de evolução cromática:

- Determinação da dureza superficial, com utilização do durómetro Shore A e do esclerómetro de pêndulo;
- Determinação da absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten);
- Registo da evolução cromática, através dos índices da escala NCS.

Estes ensaios, por serem realizados em ambiente exterior, estão sujeitos a uma maior variabilidade das condições atmosféricas, o que pode também provocar uma maior variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos, assim como a discussão dos mesmos.

#### 7.3.1 Dureza superficial – durómetro Shore A

A medição da dureza superficial da argamassa tratada do murete da estação de envelhecimento natural, com recurso ao durómetro Shore A ( $DS_D$ ), foi realizada aos 7 dias, 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.11 e na figura 7.19 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo.

A maioria dos tratamentos proporcionou um aumento da dureza superficial, mas nunca chegam a ultrapassar os resultados da referência sã; os casos em que os resultados são inferiores aos da referência degradada são com os consolidantes MK25% e MK25%+OA5%, apenas aos 90 dias. O **incremento** de dureza superficial chega a atingir um **valor médio de 12%** aos 28 dias, que decresce aos 90 dias em virtude de um valor da referência degradada algo elevado em relação aos valores

obtidos nas idades de estudo anteriores; mesmo assim, a tendência dos resultados é idêntica em todas as idades de ensaio, e com os resultados dos 28 dias a serem os mais elevados em quase todos os consolidantes.

Tabela 7.11 - Dureza superficial (durômetro Shore A) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

Produto Consolidante	DS <sub>D</sub> (7d) [graus Shore A]	DS <sub>D</sub> (28d) [graus Shore A]	DS <sub>D</sub> (90d) [graus Shore A]
MK25% (cura húmida inicial de 5d)	82,0 ± 2,7	84,3 ± 2,9	82,0 ± 1,3
MK25%	78,4 ± 2,9	80,6 ± 3,2	79,9 ± 2,0
MK25% + OA3% (cura húmida inicial de 5d)	80,4 ± 2,1	82,6 ± 2,4	82,4 ± 2,0
MK25% + OA5% (cura húmida inicial de 5d)	80,4 ± 2,1	80,2 ± 1,7	80,6 ± 2,3
MK25% + VB3% (cura húmida inicial de 5d)	79,6 ± 2,6	82,4 ± 2,3	81,4 ± 2,7
MK25% + VB5% (cura húmida inicial de 5d)	81,7 ± 2,0	82,6 ± 2,8	82,2 ± 2,0
Referência Degradada	74,8 ± 3,7	73,4 ± 3,9	80,7 ± 3,2
Referência Sã	91,3 ± 5,1	87,6 ± 2,8	87,1 ± 2,5

OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

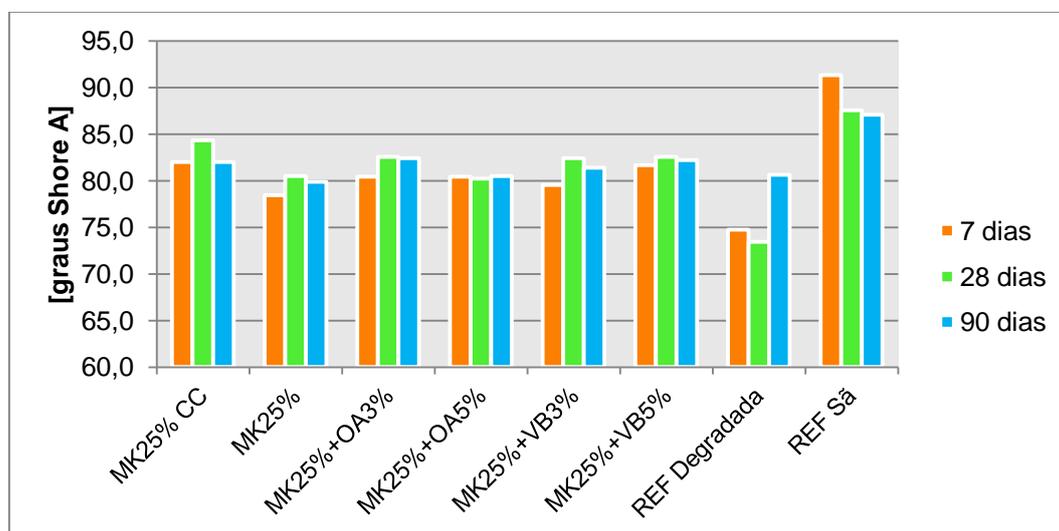


Fig. 7.19 - Dureza superficial (durômetro Shore A) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

Tal como sucedeu nos ensaios realizados nos provetes tratados com **consolidantes não pigmentados**, em todas as idades, o consolidante sujeito a uma cura combinada (MK25% CC) confere uma maior dureza superficial à superfície. Para os **consolidantes pigmentados** verificou-se aos 90 dias que, tal como aconteceu nos provetes de argamassa, a menor concentração do pigmento

Ocre Alvalade (3%) obtém melhores resultados que a concentração maior (5%) em todas as idades de ensaio; também como o sucedido nos provetes de argamassa, o pigmento Vermelho Bayer apresenta melhores resultados com o aumento da concentração, ou seja, para o caso em que a concentração é de 5% e ao contrário do que acontece com o pigmento amarelo.

Esta relação entre os resultados obtidos no murete e os resultados referentes aos provetes mantidos em ambiente controlado, é apresentada na Fig. 7.20.

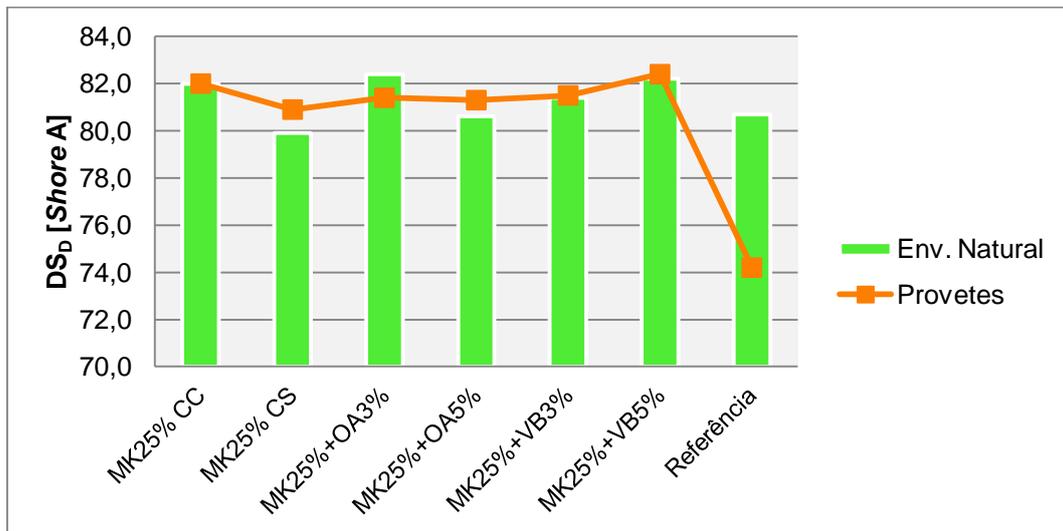


Fig. 7.20 - Relação entre os resultados de dureza superficial (Shore A) em provetes mantidos em ambiente controlado e no murete após o envelhecimento natural (90 dias)

### 7.3.2 Dureza superficial – esclerómetro de pêndulo

A medição da dureza superficial da argamassa tratada do murete da estação de envelhecimento natural, com recurso ao esclerómetro de pêndulo (DS<sub>E</sub>), foi realizada aos 7 dias, 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.12 e na figura 7.21 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo.

A dureza superficial, medida com o esclerómetro de pêndulo, atinge melhores resultados aos ensaios aos 90 dias; tanto nos ensaios dos 7 dias como dos 28 dias, nenhuma das áreas consolidadas obteve resultados superiores aos resultados da referência degradada, e mesmo aos 90 dias alguns dos resultados, apesar de superiores, estão próximos do resultado da referência degradada. Aos 90 dias atingiu-se um **incremento médio de dureza de 6%**, que ainda assim é inferior ao resultado da referência sã.

Analisando agora os resultados dos **consolidantes não pigmentados**, o melhor resultado em todas as idades de ensaio foi atingido com o consolidante sujeito ao processo de cura combinada (MK25% CC). Já para os **consolidantes pigmentados** a tendência dos resultados inverte-se aos 90 dias, com os consolidantes com menor percentagem de pigmento a atingir valores de dureza superficial superiores aos valores correspondentes aos consolidantes com concentração de 5% de pigmento, tanto para o pigmento amarelo como para o vermelho.

Tabela 7.12 - Dureza superficial (esclerômetro de pêndulo) das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

Produto Consolidante	DS <sub>E</sub> (7d) [escala Vickers]	DS <sub>E</sub> (28d) [escala Vickers]	DS <sub>E</sub> (90d) [escala Vickers]
<b>MK25%</b> (cura húmida inicial de 5d)	32,2 ± 1,8	30,3 ± 2,9	31,3 ± 0,3
<b>MK25%</b>	29,3 ± 1,9	29,2 ± 0,3	30,0 ± 2,0
<b>MK25% + OA3%</b> (cura húmida inicial de 5d)	31,3 ± 3,4	29,7 ± 3,5	31,2 ± 0,3
<b>MK25% + OA5%</b> (cura húmida inicial de 5d)	29,3 ± 2,1	26,8 ± 1,0	30,5 ± 2,2
<b>MK25% + VB3%</b> (cura húmida inicial de 5d)	28,3 ± 1,5	26,7 ± 1,0	31,3 ± 0,8
<b>MK25% + VB5%</b> (cura húmida inicial de 5d)	33,3 ± 2,1	31,3 ± 1,5	30,2 ± 1,3
<b>Referência Degradada</b>	31,5 ± 1,8	32,0 ± 1,0	29,0 ± 1,7
<b>Referência Sã</b>	36,0 ± 1,0	36,0 ± 0,9	34,7 ± 1,5

OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

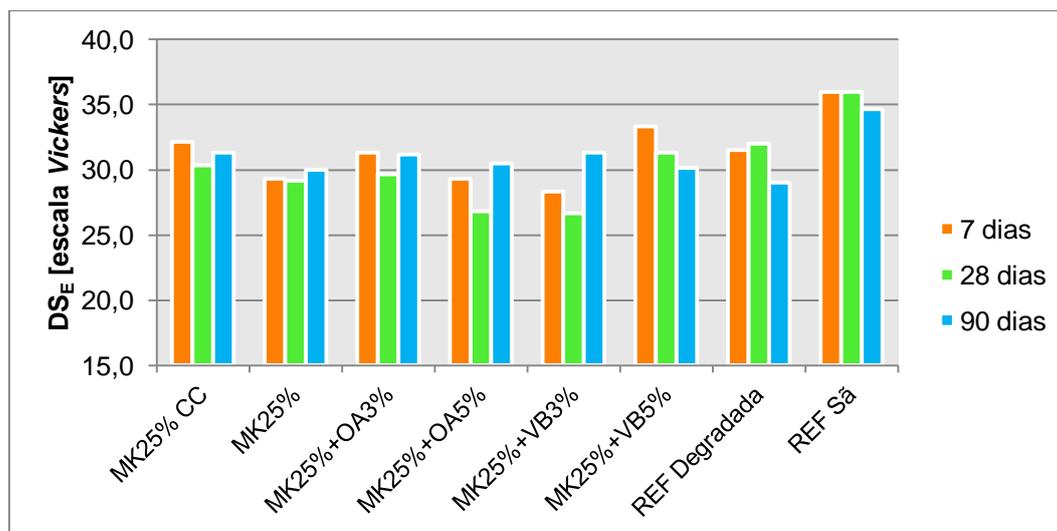


Fig. 7.21 - Dureza superficial (esclerômetro de pêndulo) das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

A adição do pigmento aos consolidantes não actua de forma negativa quando a concentração utilizada é de 3%; o mesmo já não acontece quando as concentrações de ambos os pigmentos são de 5%, o que provoca uma diminuição dos valores e por consequência uma menor dureza superficial.

A Fig. 7.22 apresenta a relação dos resultados de dureza superficial utilizando o durómetro Shore A e com os resultados de dureza superficial utilizando o esclerômetro de pêndulo. Ambos os ensaios são uma medição da dureza superficial das argamassas, mas com o ensaio utilizando o esclerômetro de pêndulo a atingir uma camada um pouco mais espessa da argamassa, em relação ao ensaio

utilizando o durômetro *Shore A*. Observa-se que os resultados são concordantes, à exceção do pigmento Vermelho Bayer.

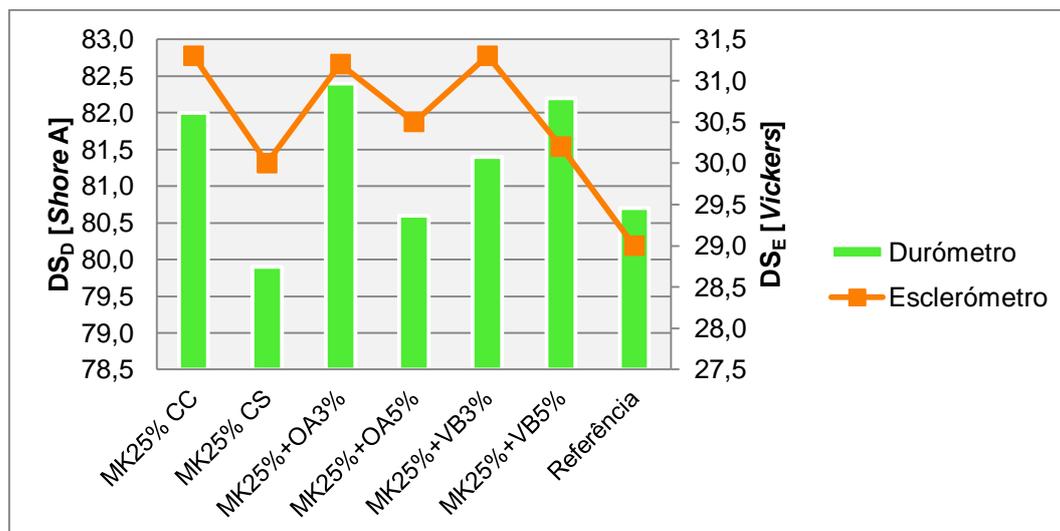


Fig. 7.22 - Relação entre os resultados de dureza superficial com durômetro Shore A e com esclerômetro de pêndulo (90 dias)

### 7.3.3 Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

A determinação do tempo de absorção de água sob baixa pressão ( $t_{TK}$ ) na argamassa tratada do murete da estação de envelhecimento natural foi realizada aos 7 dias, 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.13 e na Figura 7.23 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo.

Qualquer um dos consolidantes aplicados provocou um aumento no tempo de absorção de água, em comparação com a referência degradada, e em alguns casos foram obtidos valores superiores aos da referência sã. O **aumento médio** do tempo de absorção de água sob baixa pressão foi de **114% aos 7 dias**, de **52% aos 28 dias** e de **77% aos 90 dias**.

A diferença de cura dos **consolidantes não pigmentados** não apresentou uma tendência clara: aos 7 dias e aos 28 dias, os resultados obtidos para o MK25% CC foram inferiores, mas aos 90 dias acontece o contrário, com o resultado do MK25% a ser inferior. A tendência demonstrada aos 90 dias coincide com a tendência observada no caso dos provetes experimentais de argamassa.

Em relação aos **consolidantes pigmentados**, a tendência dos valores obtidos é semelhante em todas as idades de ensaio; para o pigmento amarelo, melhores resultados foram obtidos para a concentração mais baixa (3%), ao contrário do que se passou com o pigmento vermelho, onde os melhores resultados são obtidos para a concentração superior (5%).

A adição do pigmento aos consolidantes, em comparação com o MK25% CC, não demonstra uma influência clara nos resultados: tanto aos 7 dias como aos 28 dias, a adição dos pigmentos tornou as superfícies mais impermeáveis, na maioria dos casos; aos 90 dias, acontece exactamente o oposto,

todos os resultados referentes aos consolidantes pigmentados são mais próximos do resultado da referência degradada, e por isso mais permeáveis.

Tabela 7.13 - Absorção de água sob baixa pressão das aplicações dos produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

Produto Consolidante	t <sub>TK</sub> (7d) [min'seg'']	t <sub>TK</sub> (28d) [min'seg'']	t <sub>TK</sub> (90d) [min'seg'']
MK25% (cura húmida inicial de 5d)	17'19"	10'46"	20'57"
MK25%	21'33"	19'52"	10'26"
MK25% + OA3% (cura húmida inicial de 5d)	27'12"	14'47"	12'28"
MK25% + OA5% (cura húmida inicial de 5d)	16'43"	14'56"	10'57"
MK25% + VB3% (cura húmida inicial de 5d)	14'59"	11'42"	11'17"
MK25% + VB5% (cura húmida inicial de 5d)	18'18"	19'28"	12'15"
Referência Degradada	9'03"	10'01"	7'21"
Referência Sã	10'28"	13'15"	22'49"

OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

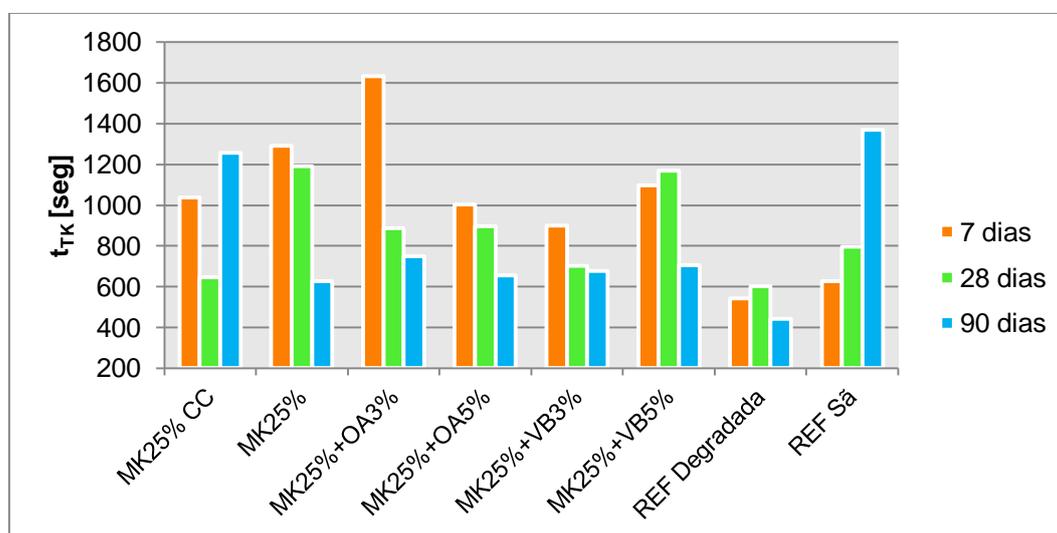


Fig. 7.23 - Absorção de água sob baixa pressão das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

### 7.3.4 Evolução cromática

A evolução cromática na argamassa tratada do murete da estação de envelhecimento natural foi medida aos 7 dias, 28 dias e 90 dias, após a aplicação dos consolidantes. Na Tabela 7.14 apresentam-se os resultados obtidos em cada idade de estudo.

Tabela 7.14 - Índices da escala NCS das aplicações de produtos no murete da estação de envelhecimento natural, aos 7, 28 e 90 dias após as aplicações

Produto Consolidante	Índices da Escala NCS		
	7 dias	28 dias	90 dias
<b>MK25%</b> (cura húmida inicial de 5 dias)			
<b>MK25%</b>			
<b>MK25% + OA3%</b> (cura húmida inicial de 5 dias)			
<b>MK25% + OA5%</b> (cura húmida inicial de 5 dias)			
<b>MK25% + VB3%</b> (cura húmida inicial de 5 dias)			
<b>MK25% + VB5%</b> (cura húmida inicial de 5 dias)			
<b>Referência Degradada e Sã</b>			

OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

Analisando os índices da escala NCS, verifica-se que:

- Os **consolidantes não pigmentados** não demonstraram qualquer evolução cromática após aplicação dos mesmos;
- Os **consolidantes pigmentados com Ocre Alvalade** apresentaram variações ligeiras a nível cromático, e apenas aos 90 dias: na aplicação com MK25%+OA3% deu-se um escurecimento mínimo da cor; a aplicação com MK25%+OA5% apresentou alguma heterogeneidade na sua coloração, e por isso foi identificado um tom mais claro e outro mais escuro, mas que mesmo assim diferem pouco da identificação inicial;

- Os **consolidantes pigmentados com Vermelho Bayer** apresentaram variação a nível cromático tanto aos 28 dias como aos 90 dias: a aplicação com MK25%+VB3% apresentou uma cor mais clara aos 28 dias, mas aos 90 dias a identificação feita coincidiu com a cor inicial; a aplicação MK25%+VB5% também apresentou um tom mais claro aos 28 dias, e aos 90 dias um escurecimento em relação à cor apresentada aos 28 dias.

#### **7.4 Resultados obtidos nas análises microestruturais e de composição mineralógica**

Com recurso aos microscópios óptico e MEV-EDS, foi realizada uma análise das alterações a nível microestrutural das argamassas devidas aos tratamentos consolidantes aplicados. Além das observações em microscópios, foram feitas análises por difracção de raios X aos produtos consolidantes estudados para determinação da composição mineralógica dos mesmos.

Apresentam-se nos próximos sub-capítulos os resultados obtidos.

##### **7.4.1 Observações em microscopia óptica e em MEV-EDS**

Após os ensaios mecânicos aos 90 dias, algumas amostras foram retiradas e analisadas em MEV-EDS, tendo-se também tirado fotografias com um microscópio óptico Olympus SZH e um sistema de aquisição de imagens Olympus DP-20.

As amostras analisadas foram:

- MK25% CC;
- MK25% CS;
- MK25%+OA5%;
- MK25%+RE5%;
- MK25%+VB5%;
- Referência não tratada.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos, primeiro as fotografias tiradas no microscópio óptico, e depois as imagens MEV das amostras assim como os espectros das análises químicas realizadas por microanálise de raios X (EDS).

##### **Microscópio óptico**

Observaram-se em microscópio óptico as amostras de fractura e as amostras polidas, para análise da superfície das argamassas tratadas e da secção transversal. As figuras 7.24 a 7.35 apresentam as imagens das várias amostras (superfícies de fractura e superfícies polidas).

• Superfícies de fractura (Figs. 7.24 a 7.29):

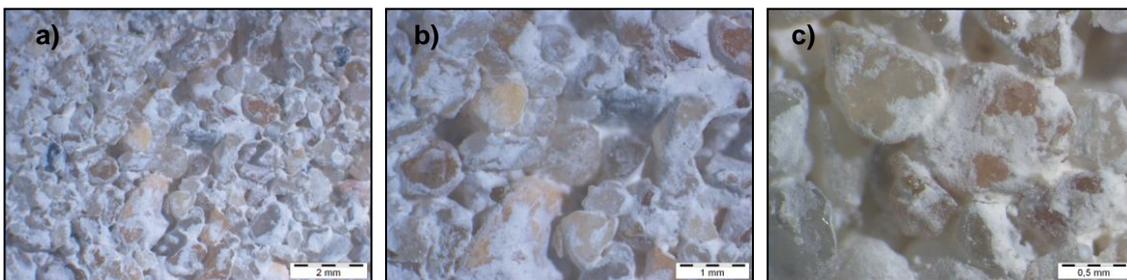


Fig. 7.24 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa não tratada: a) 10x; b) 20x; c) 40x

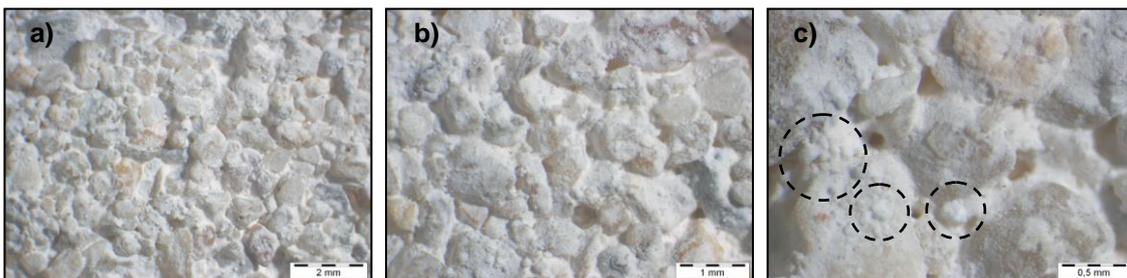


Fig. 7.25 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25% CS: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas

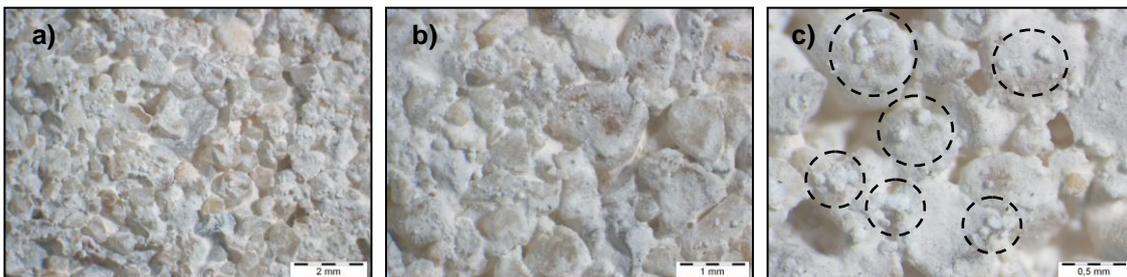


Fig. 7.26 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25% CC: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas

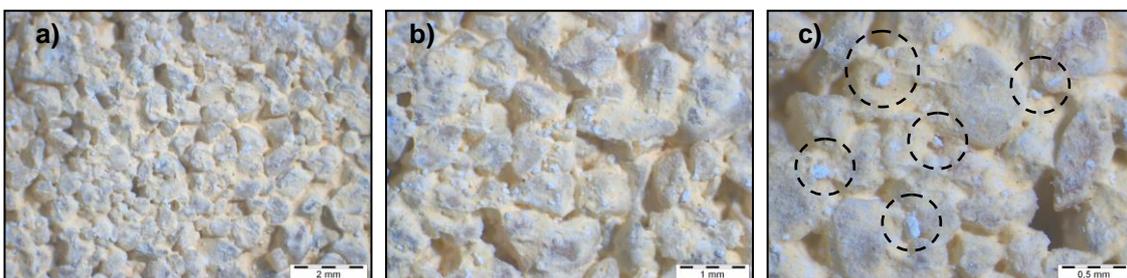


Fig. 7.27 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+OA5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas

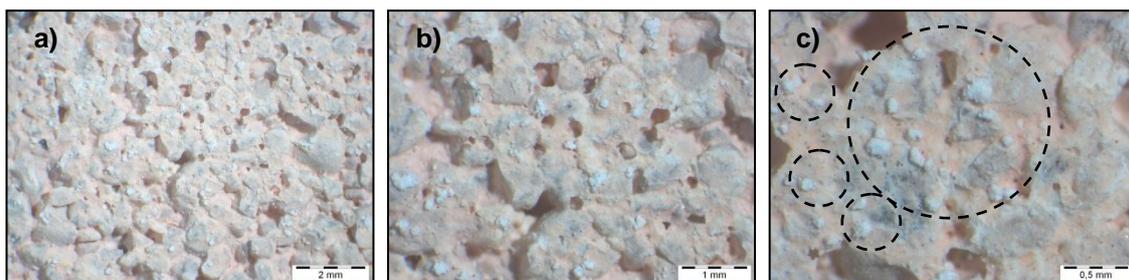


Fig. 7.28 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+RE5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas

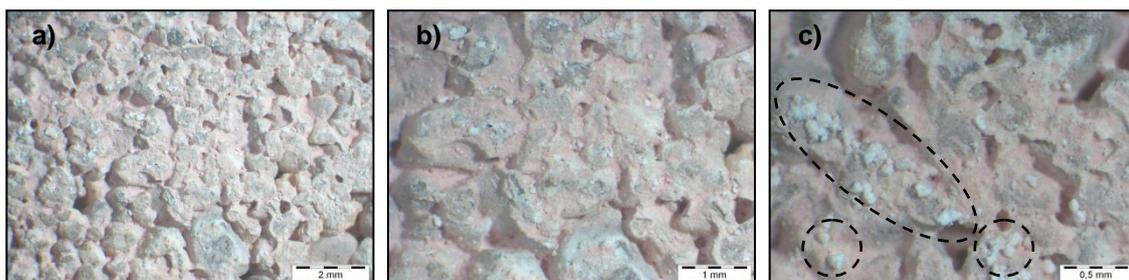


Fig. 7.29 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície de fractura da argamassa tratada com MK25%+VB5%: a) 10x; b) 20x; c) 40x, evidenciando-se formações esféricas

Em qualquer uma das amostras é possível verificar que as superfícies consolidadas se apresentam com uma maior compactidade e uma menor porosidade, comparando com a amostra de referência. Observa-se que a aplicação dos consolidantes não resulta na formação de uma camada de material sobre a argamassa, e que continuam a existir porosidades.

Os poros não são preenchidos, mas sim parcialmente recobertos no seu interior; estas evidências experimentais confirmam o aumento da resistência mecânica e a moderada redução da absorção de água.

As observações das superfícies de fractura permitiram visualizar pequenas formações com uma forma circular e cor branca, localizadas tanto à superfície da massa ligante como à superfície de agregados; são bem visíveis na ampliação de 40x, e apenas nas argamassas tratadas. Estas formações foram identificadas em menor número no caso do MK25% CS, cujas condições de cura corresponderam apenas a 65% HR, o que demonstra que o processo de cura com 7 dias de 95% HR potenciou o aumento destas pequenas formas esféricas brancas.

Os diâmetros destas pequenas formações são bastante variáveis; com base nas medições efectuadas, o diâmetro varia entre um valor mínimo de 20µm e um valor máximo de 230µm. A análise das amostras no MEV-EDS permitiu identificar a composição química, tendo-se chegado a duas composições distintas:

- Apenas calcite ( $\text{CaCO}_3$ );
- Mistura de calcite e compostos hidráulicos ou metacaulino que não reagiu (em muito menor quantidade);

O mecanismo de transformação para carbonato de cálcio pode dar origem a várias fases minerais, como é o caso da calcite. A precipitação das várias fases cristalinas de carbonato de cálcio pode ser afectada por alguns factores, tais como o pH, a temperatura, a saturação em  $\text{Ca(OH)}_2$ , ou a presença de impurezas e aditivos; dependendo das condições, os cristais formados podem tomar formas e tamanhos variados (LÓPEZ-ARCE *et al.*, 2011). A influência da humidade relativa na precipitação destes cristais é ainda pouco conhecida; de acordo com o estudo realizado por López-Arce, as condições com humidade relativa elevada (75% a 90% HR) beneficiam a precipitação de polimorfos cristalinos anidros (calcite, aragonite e vaterite) com elevado tamanho e grau de cristalinidade, quando comparando com condições de humidade relativa mais baixa. As condições de cura utilizadas podem ter potenciado a formação de cristais de calcite.

Outro fenómeno que pode ter ocorrido e que é necessário ter em consideração é a exsudação; este fenómeno caracteriza-se pela migração da água de um certo material até à sua superfície, durante o processo de cura. Após a aplicação dos produtos consolidantes, e durante o processo de cura, a ascensão da água de exsudação pode trazer consigo partículas de cal não carbonatada e de metacaulino; posteriormente, dá-se a cristalização das partículas e o resultado é o observado nas figuras com ampliação de 40x.

Mesmo no caso dos consolidantes pigmentados, os cristais de calcite formam-se sem que haja uma solubilização dos pigmentos, o que pode acontecer devido a um menor peso atómico do carbonato de cálcio em relação aos pigmentos de óxido de ferro.

- **Superfícies polidas (Figs. 7.30 a 7.35):**

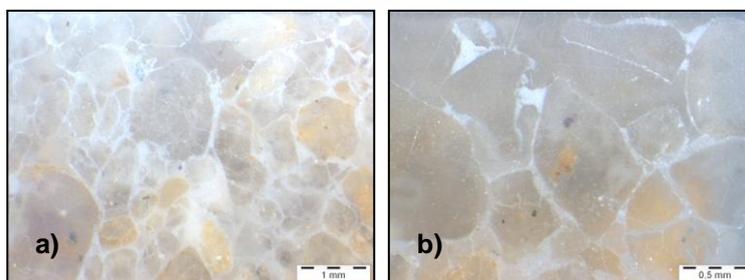


Fig. 7.30 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa não tratada: a) 20x; b) 40x

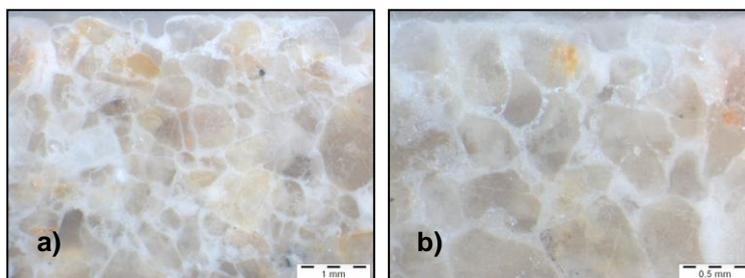


Fig. 7.31 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25% CS: a) 20x; b) 40x

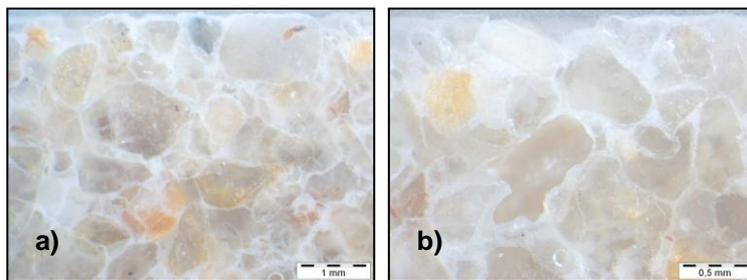


Fig. 7.32 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25% CC: a) 20x; b) 40x

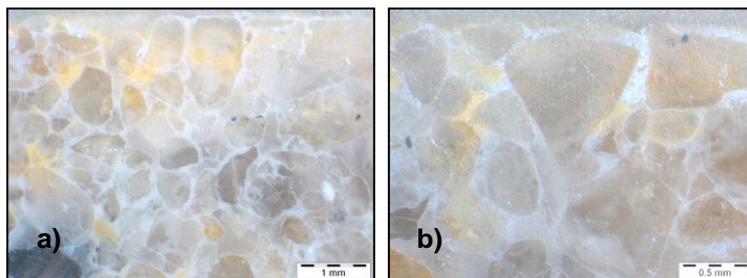


Fig. 7.33 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+OA5%: a) 20x; b) 40x

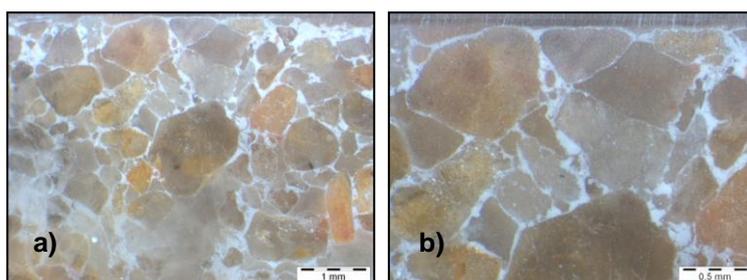


Fig. 7.34 – Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+RE5%: a) 20x; b) 40x

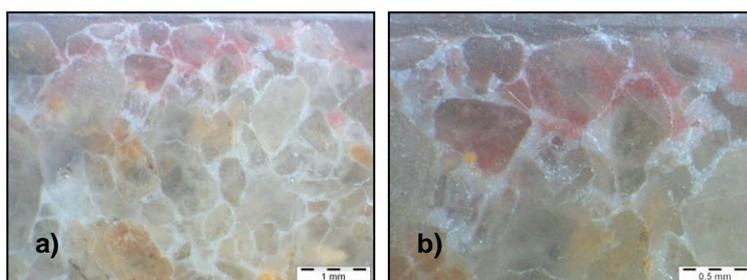


Fig. 7.35 - Microfotografias ao microscópio óptico da superfície polida da argamassa tratada com MK25%+VB5%: a) 20x; b) 40x

Em todos os casos, é evidente uma maior compactação das argamassas tratadas em comparação com a referência, numa espessura que varia entre 1 e 2mm, dependendo da amostra. Esta espessura coincide com a penetração atingida pelo consolidante.

**MEV-EDS**

- Superfícies de fractura (Figs. 7.36 a 7.46):

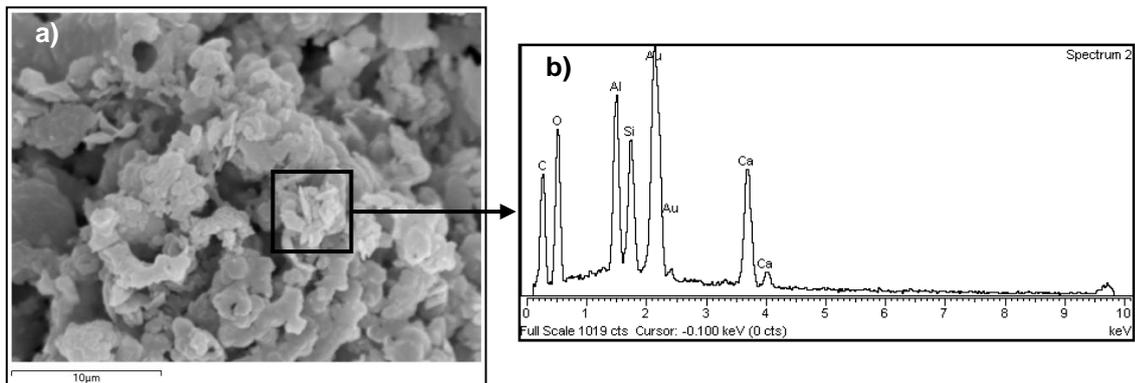


Fig. 7.36 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC, com formação de produtos pozolânicos; b) Respectivo espectro EDS

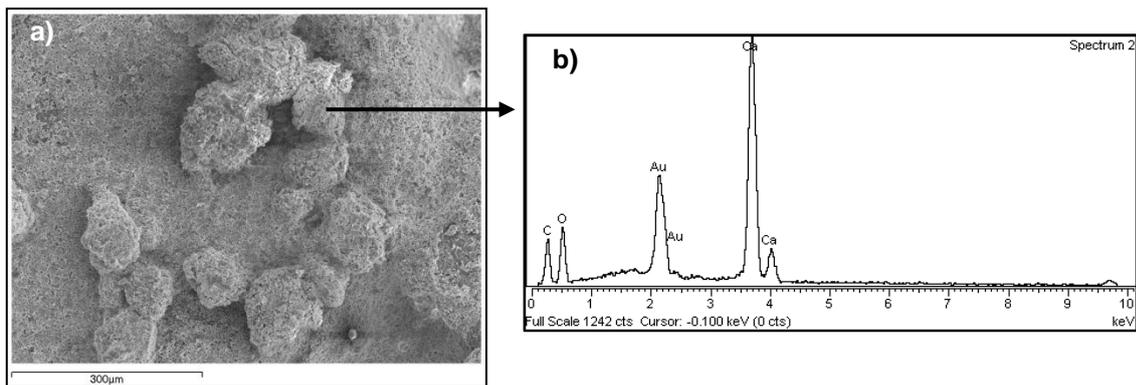


Fig. 7.37 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC, com formações esféricas de carbonato de cálcio (calcite); b) Respectivo espectro EDS

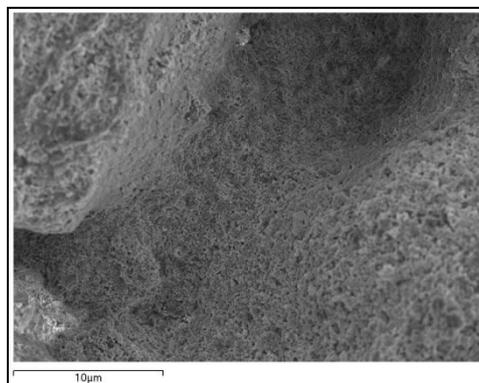


Fig. 7.38 – Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25% CC – cobertura de um poro da argamassa pelo consolidante

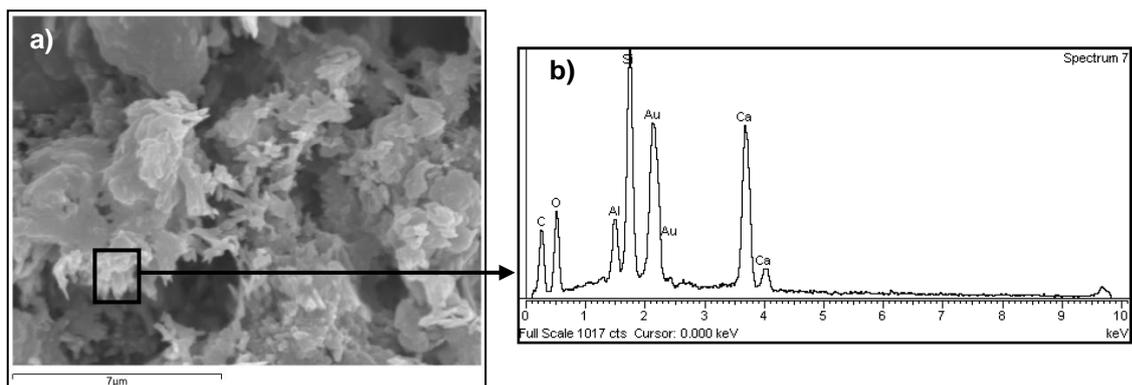


Fig. 7.39 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fratura da amostra MK25% CS, com identificação de produtos pozolânicos do tipo CSH; b) Respeetivo espectro EDS

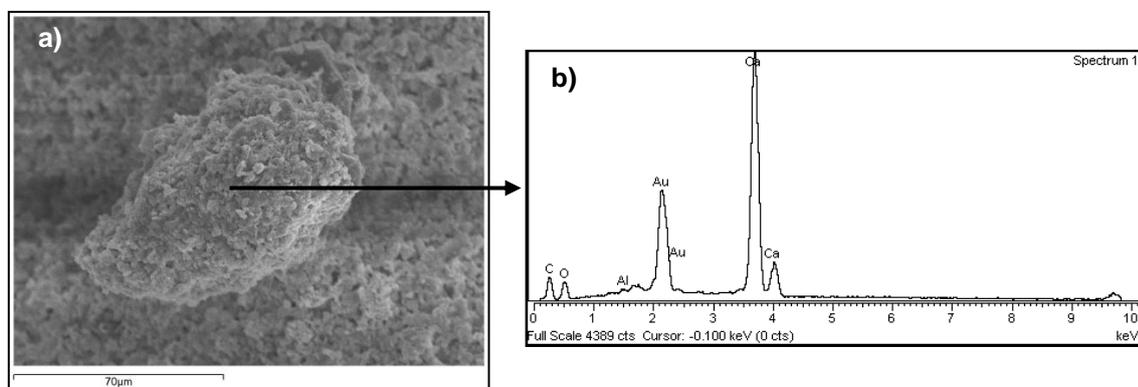


Fig. 7.40 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fratura da amostra MK25% CS, com formação esférica de carbonato de cálcio (calcite); b) Respeetivo espectro EDS

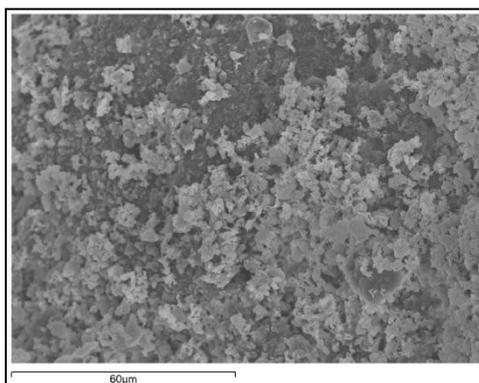


Fig. 7.41 - Microfotografia ao MEV da superfície de fratura da amostra MK25% CS – pormenor da pasta de consolidante

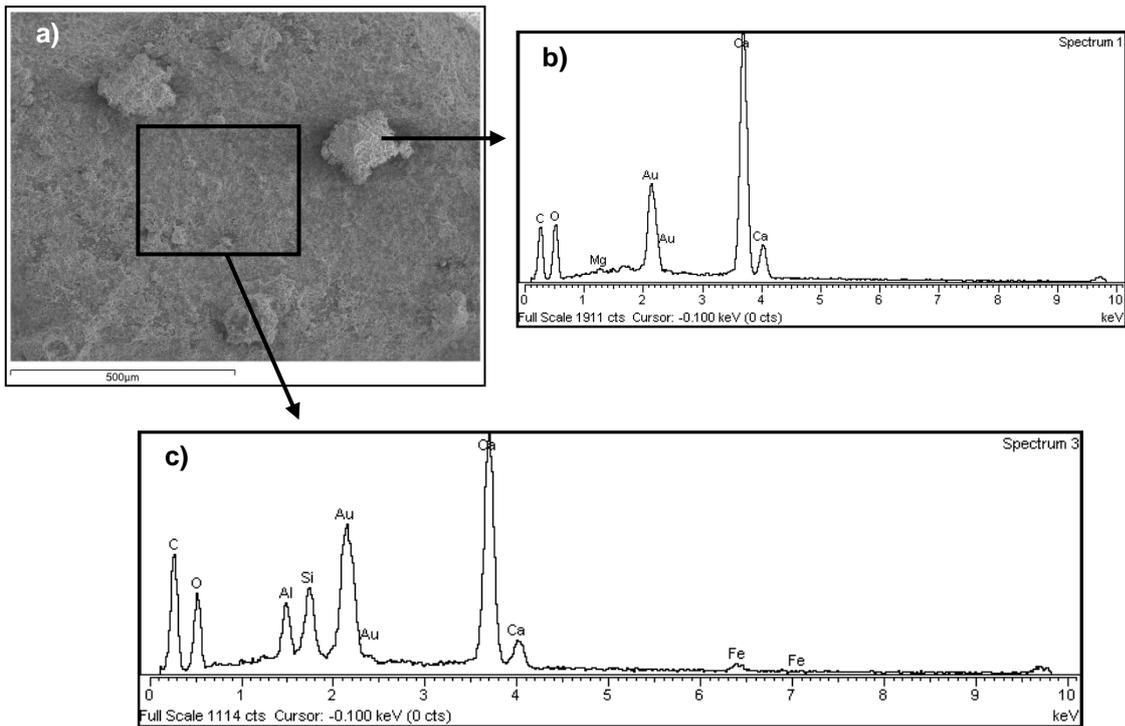


Fig. 7.42 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+OA5%, com pormenor da pasta e formações esféricas de carbonato de cálcio (calcite); b) e c) Respectivos espectros EDS

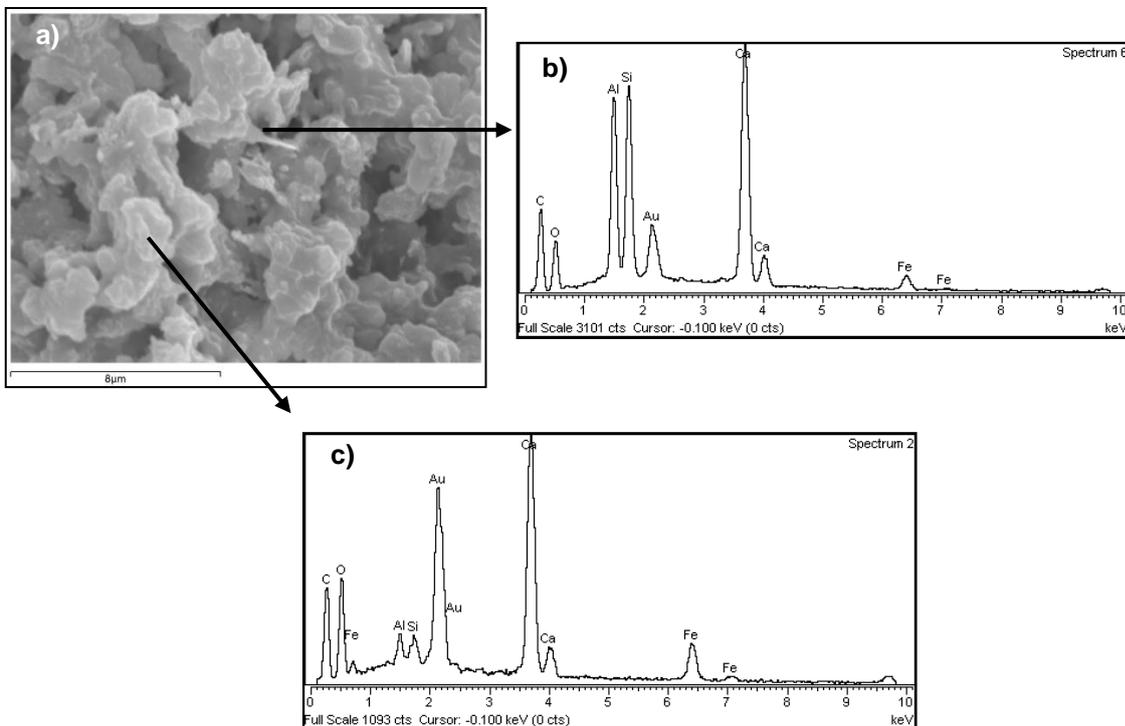


Fig. 7.43 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+OA5%, com identificação de produtos pozzolânicos; b) e c) Respectivos espectros EDS

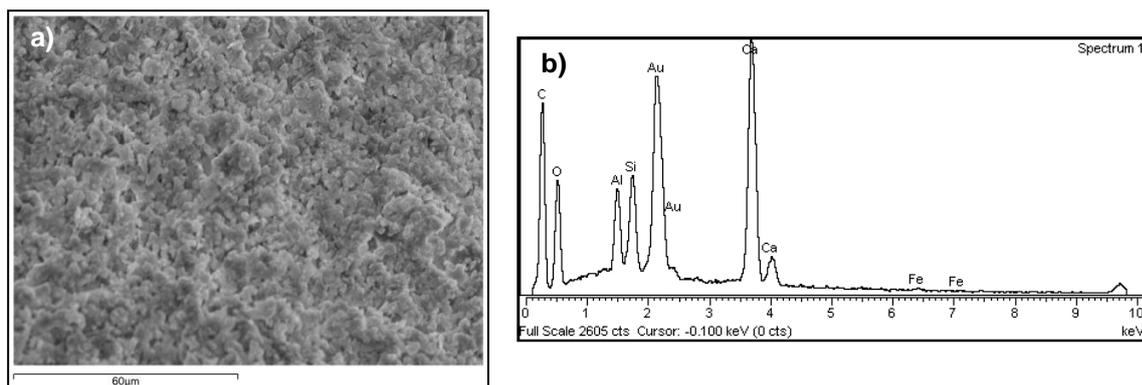


Fig. 7.44 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+RE5%, pormenor da pasta de consolidante; b) Respectivo espectro EDS

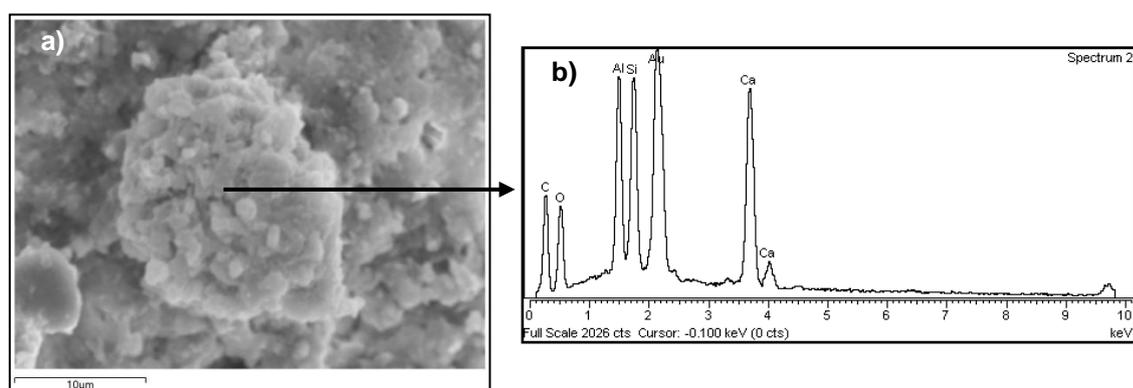


Fig. 7.45 - a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+RE5%, com formação esférica de calcite e produtos pozolânicos; b) Respectivo espectro EDS

Os principais produtos pozolânicos, formados pela reacção da cal com o metacaulino e a água, dividem-se em três grupos: silicatos de cálcio hidratados (CSH); silico-aluminatos de cálcio hidratados (CASH); aluminatos de cálcio hidratados (CAH). A identificação de cada um deles é feita com base nos espectros das análises químicas realizadas no MEV-EDS, uma vez que cada um apresenta picos com intensidades específicas (Al, Si, Ca). Estes produtos pozolânicos apresentam, normalmente, uma morfologia pontiaguda ou em forma de pequenas e finas placas lamelares; esta morfologia foi mais facilmente identificada no caso de MK25% CS (Fig.7.39).

Em todos os casos, a formação de compostos hidráulicos deu-se de forma reduzida, em particular nas amostras de provetes sujeitos a uma cura combinada de 95% HR + 65% HR, ou seja, nos provetes tratados com MK25% CC, e com todos os consolidantes pigmentados. As análises químicas demonstraram ainda que grande parte da consolidação das argamassas se deveu à carbonatação da cal, com a identificação de quantidades elevadas de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).

A figura 7.38 demonstra que o consolidante se distribui de forma homogénea sobre as “paredes” do poro, em vez de o preencher, garantindo assim que a permeabilidade ao vapor de água não é alterada de forma drástica.

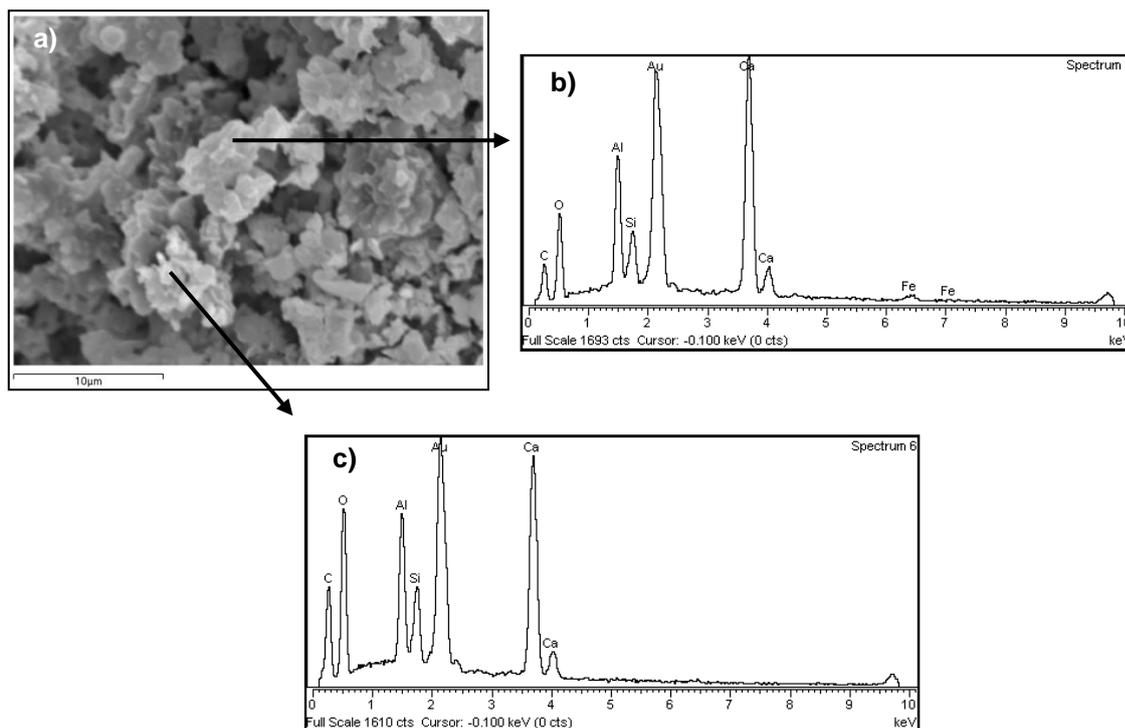


Fig. 7.46 – a) Microfotografia ao MEV da superfície de fractura da amostra MK25%+VB5%, com identificação de produtos pozolânicos do tipo CAH; b) e c) Respectivos espectros EDS

As figuras 7.37, 7.40, 7.42 e 7.45 apresentam os espectros relativos às formações esféricas de carbonato de cálcio. Verificou-se que a maioria se situa em zonas visivelmente compactas e consolidadas, e que também a maioria possui uma constituição apenas à base de carbonato de cálcio, e só em casos muito pontuais possuem também produtos pozolânicos na sua composição (Fig. 7.45), o que se compreende uma vez que já nas zonas consolidadas a formação destes produtos é também reduzida.

Os pigmentos compostos apenas por hematite ou goetite, como é o caso dos pigmentos Ocre Alvalade e Vermelho Bayer, funcionaram como inertes e não reagiram com os outros compostos - tiveram um efeito *filler*. Já no caso do Rosso Ercolano, tal não se pode garantir devido à presença de outros compostos e impurezas além da hematite (gesso, caulinite, micas).

Analisando os espectros das figuras 7.43 e 7.46, pode verificar-se que quanto maior a concentração de pigmento (ferro, Fe), menor é a concentração de produtos pozolânicos, o que pode indicar que a presença dos pigmentos reduz a probabilidade de formação destes produtos. É certo que os pigmentos se comportam como inertes, e que o facto de estarem presentes fisicamente pode provocar uma quebra na formação de produtos pozolânicos. Mas considera-se que a quantidade reduzida de pigmento nos produtos consolidantes, e também a formação pontual de produtos pozolânicos, não permite afirmar com certeza que os pigmentos têm uma influência negativa na formação dos compostos pozolânicos.

Em qualquer um dos consolidantes pigmentados foi possível identificar pequenas concentrações de ferro, mas mais dificilmente no caso do pigmento Rosso Ercolano, já que possui maior percentagem de adições e impurezas, para além do componente principal (hematite).

- **Superfícies polidas:**

As amostras de superfícies polidas permitem a elaboração de mapas elementares que demonstram a presença de determinados elementos químicos, ao longo da superfície transversal da amostra. Com base nestes mapas, pode observar-se onde se situa uma maior concentração de cálcio (Ca) e assim concluir acerca da penetração do consolidante. Além do cálcio, outros elementos que interessa analisar são o silício (Si), o alumínio (Al) e o potássio (K), permitindo a identificação dos agregados e de produtos pozolânicos. Estes mapas são apresentados em anexo, por cada amostra analisada (**Anexo 3**).

Após uma análise qualitativa, foi realizada uma análise quantitativa dos elementos presentes nas amostras. Na Tabela 7.15 são apresentados os valores da razão Ca/Si (calculadas com base nas percentagens de Ca e Si nas amostras), e que permitem verificar que existe um aumento em relação às amostras de argamassa não tratada.

Comparando os vários mapas (Ca, Si e Al), verifica-se que a consolidação se dá principalmente devido à carbonatação da cal, com a formação de grandes quantidades de calcite em detrimento da formação de produtos pozolânicos.

Tabela 7.15 - Razão Ca/Si nas amostras de superfícies polidas analisadas ao MEV-EDS

<b>Produto consolidante</b>	<b>Razão Ca/Si</b>
MK25% CC	0,0902
MK25% CS	0,1340
MK25% + OA5%	0,1234
MK25% + RE5%	0,1165
MK25% + VB5%	0,0907
REF 1	0,0782
REF 2	0,0627

CC – Cura combinada; CS – Cura simples; OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer.

#### **7.4.2 Análise por difracção de raios X (DRX)**

As amostras dos produtos utilizados como consolidantes MK25%, MK25%+OA5% e MK25%+VB%, sujeitos a diferentes condições de cura (50% HR e 95% HR), foram analisadas por difracção de raios X; as amostras foram analisadas com uma idade de estudo de 7 dias. Com esta análise pretendeu-se identificar diferenças na formação de produtos pozolânicos devidas aos dois tipos extremos de cura; também a análise dos produtos pigmentados permitiu verificar a influência dos pigmentos nos produtos consolidantes. Apresentam-se em anexo os diagramas obtidos das análises por DRX

(**Anexo 4**), e onde constam as comparações entre os consolidantes MK25% sujeitos aos dois tipos de cura, entre os vários produtos com cura a 50% HR e entre os vários produtos com cura a 95% HR.

A terminologia adoptada para os produtos identificados nas amostras analisadas foi:

- **CAh** – Aluminatos de cálcio hidratados;
- **CCA** – Carbo-aluminatos de cálcio hidratados;
- **Hy** – Hydrogarnet;
- **P** – Portlandite;
- **Q** – Quartzo;
- **C** – Calcite;
- **G** – Goetite;
- **H** – Hematite.

Comparando os diagramas dos consolidantes MK25% sujeitos a 50% HR e a 95% HR, verifica-se que as principais diferenças estão na formação de produtos pozolânicos e nas quantidades de portlandite e calcite. O consolidante sujeito a uma cura com 95% HR apresenta maior quantidade de compostos pozolânicos do tipo CAh e CCA. Quanto ao processo de carbonatação, o consolidante sujeito a uma cura com 50%HR apresenta uma maior quantidade de cal carbonatada (calcite), ao contrário do que acontece no caso de cura com 95% HR.

Outro composto pozolânico identificado nas amostras foi o hydrogarnet ( $C_3AH_6$ , um tipo específico de produto pozolânico do grupo dos aluminatos de cálcio hidratados), em menor quantidade em relação aos restantes produtos pozolânicos, mas com presença similar em ambos os tipos de cura. Este não é um produto pozolânico estável, e a sua presença pode provocar um aumento na porosidade e um decréscimo na resistência mecânica do material ao longo do tempo (GAMEIRO *et al.*, 2012a).

Nos produtos consolidantes pigmentados, não existe grande diferença entre os vários consolidantes nos picos principais dos diagramas de DRX, em ambos os tipos de cura. Ou seja, não se observaram evidências acerca da influência da adição dos pigmentos aos produtos consolidantes.

A presença do quartzo nas amostras pode dever-se à sua existência na composição do metacaulino utilizado, já que não é composto apenas por sílica e alumina no estado amorfo, e pode conter ainda alguns constituintes no estado cristalino como é o caso do quartzo. No caso dos consolidantes pigmentados, nenhum dos pigmentos adicionados contém quartzo na composição.

#### **7.4.3 Relação entre os resultados da análise microestrutural e mineralógica**

As análises efectuadas a nível da microestrutura das argamassas tratadas e da composição mineralógica dos produtos consolidantes permitiram aprofundar o efeito dos mesmos na consolidação das argamassas.

A formação de compostos pozolânicos dá-se de forma pontual e a consolidação das argamassas deve-se essencialmente à carbonatação da cal presente nos produtos consolidantes.

Foi bastante visível a influência do processo de cura, em que nas amostras de argamassa consolidada com MK25% sujeita às condições de 20°C e 65% HR, analisadas em MEV-EDS aos 90 dias, foram identificados produtos pozolânicos em maior número. Também com estas condições de cura, deu-se uma menor formação de cristais de calcite na superfície dos tratamentos aplicados, e com menores dimensões.

Já na análise da composição mineralógica aos 7 dias, o processo de cura com 95% HR deu origem a uma maior formação de produtos pozolânicos (tipo CAh e CCA), em relação ao processo de cura com 50% HR, ao contrário do que se verificou na análise aos 90 dias no MEV-EDS. Isto pode ser justificado com instabilidade dos compostos pozolânicos ao longo do tempo (produtos meta-estáveis); de facto, estudos no âmbito do projecto FCT *METACAL* indicaram que a decomposição dos produtos pozolânicos do tipo CAh e CCA se dá após os 28 dias e ainda antes de se atingirem os 90 dias de idade de estudo (GAMEIRO et al., 2012a).

As análises em MEV-EDS das amostras consolidadas com produtos pigmentados não permitiram aferir com certeza acerca da influência da adição dos pigmentos. E de facto, as análises em DRX, aos 7 dias de cura, não demonstraram qualquer influência dos pigmentos na formação de produtos pozolânicos, em ambos os tipos de cura estudados. É certo que a diferença entre as idades de estudo de ambos os ensaios pode introduzir diferenças entre os resultados dos mesmos, mas mesmo assim, considera-se que os pigmentos nas concentrações utilizadas não têm uma influência negativa clara na formação de produtos pozolânicos. E até nas resistências mecânicas ensaiadas, não se observa igualmente com clareza uma influência negativa da adição dos pigmentos aos produtos consolidantes, já que existem resultados de consolidantes pigmentados tanto acima como abaixo dos resultados obtidos para o consolidante não pigmentado.

## **7.5 Discussão e apreciação global dos resultados**

### **7.5.1 Quadros de resumo dos resultados**

Nas Tabelas 7.16, 7.17 e 7.18 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo da campanha experimental, com excepção das análises microestruturais e mineralógicas.

Tabela 7.16 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes prismáticos de argamassa

Consolidante	E <sub>d</sub> [MPa]		R <sub>t</sub> [MPa]		R <sub>c</sub> [MPa]		Prof. Carbonatação [%]	Prof. Penetração [mm]
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	90 dias	
<b>MK25% CC</b>	889	912	0,55	0,50	0,91	0,80	25	-
<b>MK25% CS</b>	569	1154	0,53	0,53	0,68	0,84	40	-
<b>MK25%+OA3%</b>	538	698	0,55	0,60	0,73	0,95	-	-
<b>MK25%+OA5%</b>	613	809	0,58	0,53	0,68	0,87	-	2,1
<b>MK25%+RE3%</b>	985	942	0,57	0,52	0,78	0,78	-	-
<b>MK25%+RE5%</b>	966	1017	0,57	0,63	0,68	0,72	-	3,1
<b>MK25%+VB3%</b>	1032	1320	0,58	0,45	0,70	0,73	-	-
<b>MK25%+VB5%</b>	993	964	0,48	0,48	0,73	0,80	-	3,1
<b>Referência</b>	550	740	0,42	0,53	0,62	0,62	-	-

**Ensaio:** E<sub>d</sub> – Módulo de elasticidade dinâmico; R<sub>t</sub> – Resistência à tração; R<sub>c</sub> – Resistência à compressão;

**Condições de cura:** CC – cura combinada; CS – cura simples;

**Pigmentos:** OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

Tabela 7.17 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas camadas de argamassa aplicadas sobre tijolos

Consolidante	DS <sub>D</sub> [Shore A]			t <sub>TK</sub> [min'seg"]			V <sub>US</sub> [ms <sup>-1</sup> ]			Índices NCS	
	28 dias	90 dias	Após env.	28 dias	90 dias	Após env.	28 dias	90 dias	Após env.	Antes env.	Após env.
<b>MK25% CC</b>	80,6	82,0	81,2	3'20"	3'38"	3'30"	1431,2	1444,8	1281,8	S0500-N	S0500-N
<b>MK25% CS</b>	80,3	80,9	81,3	2'09"	2'30"	2'52"	1467,0	1485,0	1151,0	S0500-N	S0500-N
<b>MK25%+OA3%</b>	81,0	81,4	80,8	2'17"	4'45"	6'57"	1464,3	1493,5	1243,8	S0520-Y10R S0530-Y	S0530-Y10R
<b>MK25%+OA5%</b>	80,5	81,3	81,3	1'54"	2'35"	5'48"	1428,2	1449,2	1141,0	S0520-Y10R S0530-Y10R	S0520-Y10R S0530-Y20R
<b>MK25%+VB3%</b>	80,4	81,5	81,3	3'07"	5'01"	4'55"	1408,0	1502,8	1213,5	S1020-R	S0520-R10B S0520-R20B
<b>MK25%+VB5%</b>	80,5	82,4	81,4	3'55"	3'27"	3'58"	1395,3	1506,3	1050,3	S1030-R S1030-R10B	S0530-R10B S0530-R20B
<b>Referência</b>	72,5	74,2	73,8	0'31"	0'33"	0'12"	1372,5	1446,0	996,5	S0502-Y	S0502-Y

**Ensaio:** DS<sub>d</sub> – Dureza superficial (durómetro); t<sub>TK</sub> – Absorção de água (t. Karsten); V<sub>US</sub> – Velocidade dos ultra-sons; NCS – Escala colorimétrica;

**Condições de cura:** CC – cura combinada; CS – cura simples;

**Pigmentos:** OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

Tabela 7.18 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados no murete da estação de envelhecimento natural do LNEC

Consolidante	DS <sub>D</sub> [Shore A]			DS <sub>E</sub> [Vickers]			t <sub>TK</sub> [seg]			Índices NCS		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>MK25% CC</b>	82,0	84,3	82,0	32,2	30,3	31,3	17'19"	10'46"	20'57"	S0500-N	S0500-N	S0500-N
<b>MK25% CS</b>	78,4	80,6	79,9	29,3	29,2	30,0	21'33"	19'52"	10'26"	S1000-N	S1000-N	S1000-N
<b>MK25%+OA3%</b>	80,4	82,6	82,4	31,3	29,7	31,2	27'12"	14'47"	12'28"	S0520-Y10R	S0520-Y10R	S0520-Y20R
<b>MK25%+OA5%</b>	80,4	80,2	80,6	29,3	26,8	30,5	16'43"	14'56"	10'57"	S0530-Y10R	S0520-Y10R	S0520-Y10R S0530-Y20R
<b>MK25%+VB3%</b>	79,6	82,4	81,4	28,3	26,7	31,3	14'59"	11'42"	11'17"	S1020-R	S0520-R10B	S1020-R
<b>MK25%+VB5%</b>	81,7	82,6	82,2	33,3	31,3	30,2	18'18"	19'28"	12'15"	S1030-R	S0530-R10B	S1020-R10B S1020-R20B
<b>Ref. Degradada</b>	74,8	73,4	80,7	31,5	32,0	29,0	9'03"	10'01"	7'21"	S1005-Y20R	S1005-Y20R	S1005-Y20R
<b>Ref. Sã</b>	91,3	87,6	87,1	36,0	36,0	34,7	10'28"	13'15"	22'49"	S1005-Y20R	S1005-Y20R	S1005-Y20R

**Ensaio:** DS<sub>D</sub> – Dureza superficial (durómetro); DS<sub>E</sub> – Dureza superficial (esclerómetro); t<sub>TK</sub> – Absorção de água (t. Karsten); NCS – escala colorimétrica;

**Condições de cura:** CC – cura combinada; CS – cura simples;

**Pigmentos:** OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

Na Tabela 7.19 apresenta-se um resumo das informações recolhidas através da realização dos vários ensaios, em função dos objectivos propostos inicialmente neste trabalho e aos quais se respondem nesta tabela:

- **Consolidantes não pigmentados:**

- O processo de cura tem influência na restituição da coesão superficial das argamassas?
- Quais as condições de cura que conferem maior resistência à superfície consolidada?

- **Consolidantes pigmentados:**

- De que modo a adição de pigmentos aos consolidantes interfere na consolidação das argamassas de cal?
- Dentro dos pigmentos estudados, qual o mais eficaz e que apresenta melhores resultados?

Nas situações em que a condição de cura não demonstrou ter qualquer influência nos resultados, optou-se por não colocar qualquer indicação no tipo de cura mais adequado; também no caso dos pigmentos, quando mais do que uma variável apresentaram resultados semelhantes, foram ambas colocadas.

No caso em que as tendências dos resultados não foram as mesmas em todas as idades de estudo, considerou-se a idade de estudo mais longa (90 dias) como a mais importante. Os produtos formados através da reacção pozolânica, que conferem maior resistência e durabilidade aos tratamentos consolidantes, são produtos cuja estabilidade ao longo do tempo pode ser variável (meta-estáveis), dependendo do composto pozolânico em questão, e cuja presença após os 28 dias não é certa (GAMEIRO *et al.*, 2012a e 2012b).

Tabela 7.19 - Resumo da informação obtida nos ensaios mecânicos, físicos, de envelhecimento, microestruturais e mineralógicos

Ensaio		Consolidantes não pigmentados		Consolidantes pigmentados	
		Processo de cura	Cura mais adequada	Adição do pigmento	Pigmento mais eficaz
Resistências Mecânicas	E <sub>d</sub>	Tem influência	65%HR	Depende do pigmento	VB3%
	R <sub>t</sub>	Tem influência	65%HR	Depende do pigmento	RE5%
	R <sub>c</sub>	Tem influência	65%HR	Depende do pigmento	OA3%
Características Físicas	DS <sub>d</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Ligeiramente prejudicial	VB5%
	t <sub>TK</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Benéfica	OA3% e VB3%
	V <sub>US</sub>	Tem influência	65%HR	Benéfica	VB3%,5%
	P <sub>n</sub>	-	-	-	RE5% e VB5%
Envelhecimento Artificial Acelerado	DS <sub>D</sub>	Não tem influência	-	Não tem influência	-
	t <sub>TK</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Benéfica	OA3%
	V <sub>US</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Ligeiramente prejudicial	OA3%
	NCS	Não tem influência	-	-	VB3%
Envelhecimento Natural	DS <sub>D</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Depende do pigmento	OA3% e VB5%
	DS <sub>E</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Depende da concentração	OA3% e VB3%
	t <sub>TK</sub>	Tem influência	95%HR+65%HR	Benéfico	OA3% e VB5%
	NCS	Não tem influência	-	-	OA3% e VB3%
Microestrutura e Mineralogia	MO	Tem influência	65%HR	-	-
	MEV-EDS	Tem influência	65%HR	Não tem influência	-
	DRX	Tem influência	95%HR+65%HR	Não tem influência	-

**Ensaio:** E<sub>d</sub> – Módulo de elasticidade dinâmico; R<sub>t</sub> – Resistência à tração; R<sub>c</sub> – Resistência à compressão; DS<sub>d</sub> – Dureza superficial (durômetro); t<sub>TK</sub> – Absorção de água (t. Karsten); V<sub>US</sub> – Velocidade dos ultra-sons; NCS – Escala colorimétrica; DS<sub>E</sub> – Dureza superficial (esclerômetro); MO – Observação de amostras em microscópio óptico; MEV-EDS - Análise de amostras em MEV-EDS; DRX – Análise de amostras por difração de raios X;

**Pigmentos:** OA – Ocre Alvalade; RE – Rosso Ercolano; VB – Vermelho Bayer

### **7.5.2 Análise global dos resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental**

Com base nas informações recolhidas com a realização dos vários ensaios ao longo deste estudo, foi feita uma apreciação global de acordo com as condições de cura utilizadas, o efeito da adição dos pigmentos, o tipo e concentração dos pigmentos utilizados, e os incrementos de resistência atingidos.

#### **Consolidantes não pigmentados - condições de cura**

As argamassas consolidadas com MK25% e sujeitas a uma cura integral de 65% HR atingem melhores resultados a nível mecânico, com maior incremento das resistências mecânicas; a nível da diminuição da porosidade superficial é também este consolidante a atingir um melhor resultado, demonstrando maior velocidade de propagação dos ultra-sons. Já em termos de dureza superficial, o consolidante MK25% CC apresentou melhores resultados. Em relação ao tempo de absorção de água, o consolidante MK25% CC obteve valores superiores; na gama de valores obtidos para este parâmetro, é positivo conseguir reduzir um pouco a permeabilidade das argamassas (aumentando o tempo de absorção). A permeabilidade da argamassa não tratada é tão alta (os tempos de absorção são tão baixos) que as reduções conseguidas não apresentam qualquer problema de incompatibilidade, melhorando o comportamento do revestimento.

Visto serem os produtos resultantes da reacção pozolânica responsáveis pelo maior incremento de resistência, tal como verificado através da análise em MEV-EDS, a menor quantidade de produtos pozolânicos aos 90 dias na amostra de argamassa consolidada com MK25% CC justifica o facto de as suas resistências mecânicas serem inferiores. Também a alteração da tendência dos resultados das resistências mecânicas na passagem dos 28 dias para os 90 dias, pode indicar que as condições de cura combinada podem até potenciar a formação inicial de maior quantidade de produtos pozolânicos, mas do tipo meta-estáveis cuja presença é curta em termos de período de tempo, em virtude da sua alteração após pouco tempo da sua formação. A análise mineralógica dos produtos consolidantes aos 7 dias, por difracção de raios X, veio confirmar que, inicialmente, a cura com 95% HR possui uma maior quantidade de produtos pozolânicos do tipo meta-estáveis, explicando-se assim a inversão de tendências verificada.

Mesmo após ensaios de envelhecimento natural e artificial, o MK25% CS continua a conferir uma maior permeabilidade das superfícies tratadas, o que pode justificar o facto que, após os ciclos climáticos do envelhecimento artificial acelerado, as argamassas tratadas com o consolidante MK25% CC terem apresentado uma compacidade maior (por medição da velocidade de propagação dos ultra-sons). No entanto, o destacamento das camadas de argamassa do suporte pode influenciar os resultados obtidos.

Aos 90 dias, o MK25% CS apresenta-se como a melhor solução de tratamento; após exposição dos tratamentos a ciclos climáticos agressivos, a dureza superficial, que se apresentava como o parâmetro que dava “vantagem” ao consolidante MK25% CC, torna-se idêntico em ambos os consolidantes MK25% CC e MK25% CS. Pode então afirmar-se que, em termos de durabilidade a longo prazo, e entre os consolidantes analisados, o consolidante MK25% CS é a melhor solução.

### **Consolidantes não pigmentados vs. consolidantes pigmentados**

A incorporação dos pigmentos nos produtos consolidantes pode ser ligeiramente prejudicial para a eficácia da consolidação. As resistências mecânicas diminuem, dependendo do pigmento e da concentração utilizada:

- OA3% e OA5% provocam a diminuição do  $E_d$ ;
- VB3% e VB5% provocam a diminuição da  $R_t$ ;
- RE3%, RE5% e VB3% provocam a diminuição da  $R_c$ ;

As características físicas das argamassas saem ligeiramente prejudicadas apenas na dureza superficial, mas com resultados próximos ao de MK25% CC; de um modo geral, os produtos consolidantes com a adição de pigmentos tornam as argamassas um pouco menos permeáveis, devido ao aumento da compacidade, mas em gamas de valores compatíveis e que são benéficas para a redução da permeabilidade extremamente alta da argamassa não tratada; a velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas sai beneficiada com a adição dos pigmentos aos consolidantes.

Após envelhecimento acelerado, os consolidantes pigmentados obtiveram resultados menores de velocidade de propagação dos ultra-sons. Em termos de dureza superficial não se nota diferença entre os consolidantes pigmentados e o consolidante não pigmentado sujeito ao mesmo tipo de cura. A redução da permeabilidade à água nos produtos consolidantes pigmentados mantém-se também superior.

A nível mineralógico e microestrutural não foi possível identificar com clareza uma influência negativa da adição dos pigmentos aos produtos consolidantes, o que está em concordância com os resultados obtidos para as resistências mecânicas aos 90 dias: as argamassas tratadas com produtos consolidantes apresentaram resultados de resistências mecânicas tanto superiores como ligeiramente inferiores aos resultados da argamassa tratada com o produto consolidante não pigmentado.

- $E_d$ : MK25%+OA < MK25% CC < MK25%+RE, MK25%+VB;
- $R_t$ : MK25%+VB < MK25% CC < MK25%+OA, MK25%+RE;
- $R_c$ : MK25%+RE, MK25%+VB3% < MK25% CC < MK25%+OA, MK25%+VB5%.

É evidente a importância de uma análise microestrutural das argamassas, que possibilita uma melhor compreensão e justificação dos resultados obtidos com os ensaios experimentais.

### **Consolidantes pigmentados – tipo e concentração de pigmento**

Em relação apenas aos consolidantes pigmentados, vai analisar-se agora quais os pigmentos mais adequados a utilizar na consolidação das argamassas.

Todos os pigmentos estudados afectaram de alguma maneira as resistências mecânicas das argamassas consolidadas, quando se faz a comparação com o consolidante não pigmentado. No entanto, também alguns destes parâmetros são melhorados:

- $E_d$  – pigmentos vermelhos conferem um maior módulo de elasticidade dinâmico, enquanto que o pigmento amarelo tem o efeito contrário;
- $R_t$  – apenas o pigmento sintético Vermelho Bayer tem um efeito negativo na resistência à tracção por flexão das argamassas consolidadas;
- $R_c$  – apenas o pigmento amarelo contribui para o aumento da resistência à compressão das argamassas tratadas;

Os vários efeitos provocados parecem estar relacionados com composição e origem dos pigmentos. Nas características físicas das argamassas ensaiadas, a adição dos pigmentos provoca apenas um ligeiro decréscimo na dureza superficial das argmassas tratadas (com excepção do caso de MK25%+VB5%).

Quanto às concentrações de pigmentos utilizadas, não se verifica uma tendência clara, com a concentração de 3% ou de 5% a ser a mais benéfica ou prejudicial; dependendo do parâmetro ensaiado, a melhor concentração de pigmento varia consoante a cor ou a origem do mesmo. Verificou-se que:

- A dureza superficial (esclerómetro de pêndulo) é maior na menor percentagem de pigmento (3%);
- A absorção de água sob baixa pressão é um pouco mais rápida nos consolidantes com a percentagem de pigmento mais elevada (5%);
- Nos restantes ensaios, existe uma grande variabilidade e torna-se difícil aferir sobre qual a percentagem mais benéfica;

Como seria de esperar, o Vermelho Bayer, por ser um pigmento de origem sintética e assim mais estável quer a nível térmico quer a nível químico, e com uma maior uniformidade de cor, foi o pigmento que exposto ao envelhecimento natural e exposto aos ciclos climáticos do envelhecimento artificial acelerado, se comportou de melhor forma:

- Dureza superficial idêntica a MK25% CC;
- Absorção de água mais próxima de MK25% CC, e inferior a MK25%+OA;
- Velocidade de propagação dos ultra-sons superior a MK25% CC e a MK25%+OA;
- Maior estabilidade cromática, por comparação com MK25%+OA.

No entanto, a nível dos ensaios mecânicos realizados nos provetes prismáticos de argamassa, o Vermelho Bayer apresentou as resistências mais baixas à tracção por flexão.

Pelo que foi descrito, todos os pigmentos apresentam prós e contras na sua utilização. A utilização do Rosso Ercolano não é recomendável para a consolidação de revestimentos exteriores, uma vez que a

presença do gesso na sua composição impede a utilização em ambientes exteriores. Em termos de durabilidade e considerando a totalidade de parâmetros ensaiados, a utilização de um pigmento inorgânico sintético pode ser a opção mais viável na consolidação e reintegração cromática de argamassas.

A ligeira perda de eficácia que pode ocorrer devido à adição de pigmentos é compensada pela vantagem da reintegração cromática conseguida.

#### **Incrementos de resistência atingidos**

Com a consolidação das argamassas, as suas resistências mecânicas são alteradas; com base nos seus estudos, vários autores recomendam um aumento moderado das resistências, que não deve ultrapassar os 50% (TONIOLO, 2010; BORSOI *et al.*, 2011a; BORSOI *et al.*, 2011b). Considerando os resultados obtidos aos 90 dias, esta barreira dos 50% foi ultrapassada em apenas três casos:

- Resistência à compressão – aumento de 53% com MK25%+OA3%;
- Módulo de elasticidade dinâmico – aumento de 56% com MK25% CS, e aumento de 78% com MK25%+VB3%;

Todas as aplicações realizadas resultaram na consolidação da perda de coesão das argamassas, com uma alteração moderada e adequada das características mecânicas e físicas.



# CONCLUSÕES

## ***Conclusões gerais***

Com a realização deste trabalho, foi possível caracterizar o efeito dos produtos consolidantes estudados no tratamento de argamassas de cal aérea com perda de coesão. Foram realizados ensaios de avaliação das características mecânicas, físicas, físico-químicas, microestruturais e colorimétricas, um ensaio de envelhecimento artificial acelerado para aferir acerca da resistência e durabilidade dos produtos consolidantes, e ensaios de carácter físico em aplicações realizadas num murete em envelhecimento natural.

Os produtos consolidantes estudados são constituídos à base de cal, metacaulino, água e pigmentos. A adição dos pigmentos aos produtos pretendeu avaliar a viabilidade da reintegração cromática, e igualmente avaliar a sua influência na eficácia do tratamento de consolidação das argamassas. Os consolidantes sem adição de pigmentos foram sujeitos a processos de cura distintos, de modo a avaliar as diferenças introduzidas nas características das argamassas consolidadas, e na formação de produtos pozolânicos que conferem maior resistência mecânica.

Todos os tratamentos aplicados permitiram a consolidação das argamassas tratadas, que ocorreu principalmente devido à carbonatação da cal existente nos produtos consolidantes. A sua eficácia foi avaliada através dos vários ensaios realizados ao longo da campanha experimental, verificando-se em todos os parâmetros testados uma melhoria das características das argamassas tratadas em relação à argamassa de referência:

- ✓ As resistências mecânicas chegam a atingir incrementos na ordem dos 30%;
- ✓ A dureza superficial das argamassas foi aumentada, em média, cerca de 10%;
- ✓ Deu-se a redução da permeabilidade à água, com tempos de absorção cerca de 7 vezes superiores (em média);
- ✓ A aplicação superficial dos consolidantes permitiu, em média, um aumento da velocidade de propagação dos ultra-sons na ordem de 2%;
- ✓ A profundidade de penetração atingida foi suficiente para um tratamento consolidante adequado;
- ✓ Boa resistência às variações térmicas e hígricas, mantendo-se após o envelhecimento artificial o incremento de 10% na dureza superficial, a redução da permeabilidade à água em cerca de 20 vezes, e o aumento da velocidade de propagação dos ultra-sons na ordem de 18%.

A reintegração cromática foi conseguida igualmente com eficácia; em termos de aspecto estético, os tratamentos aplicados demonstraram uma superfície homogénea a nível cromático, com os pigmentos a ficarem bem fixados em todos os produtos consolidantes pigmentados.

Em relação aos produtos consolidantes sem adição de pigmentos, sujeitos a processos de cura diferentes, pôde concluir-se que:

- ✓ O processo de cura, cujas condições foram de 20°C e 65% HR confere maiores resistências mecânicas e uma maior compacidade superficial às argamassas tratadas;
- ✓ O processo de cura cujas condições foram de 95% HR nos primeiros sete dias e posteriormente de 20°C e 65% HR confere uma maior dureza superficial e uma maior redução da permeabilidade à água às argamassas tratadas;
- ✓ Apesar da formação pontual em todas as amostras analisadas, aos 90 dias foi identificado um maior número de compostos pozolânicos no caso do consolidante MK25% sujeito apenas a condições de cura com 20°C e 65% HR, o que está em concordância com os resultados obtidos para as resistências mecânicas; de facto, inicialmente (7 dias) a cura de 95% HR dá origem a uma maior quantidade de produtos pozolânicos que, no entanto, não são totalmente estáveis ao longo do tempo;
- ✓ As condições de cura em que inicialmente se tem 95% HR dão origem a formações de carbonato de cálcio (calcite) na superfície dos tratamentos em maior número, e com maiores dimensões;
- ✓ Após exposição aos ciclos de envelhecimento artificial, a dureza superficial apresentou-se idêntica em ambos os tipos de cura.

Tendo em conta tudo o que foi descrito, e a globalidade dos parâmetros testados experimentalmente, as condições de cura com 20°C e 65% HR resultaram num tratamento consolidante mais eficaz.

Assumiu-se inicialmente que as condições iniciais de cura com 95% HR iriam resultar numa maior eficácia da consolidação, o que se veio agora a verificar que não acontece; de facto, como era objectivo inicial da introdução destas condições de cura, existe sim uma maior formação de produtos pozolânicos mas do tipo meta-estável, cuja decomposição ao longo do tempo pode prejudicar os incrementos atingidos com a consolidação. Estas condições de cura de 95% HR seriam bastante mais complicadas de reproduzir na realidade de obra, em intervenções reais de conservação de revestimentos com perda de coesão, pelo que só valeria a pena adoptá-las se correspondessem a uma melhoria clara.

No caso dos produtos consolidantes pigmentados, utilizaram-se três pigmentos diferentes cada um com duas concentrações diferentes, 3% e 5%. Através da campanha experimental realizada, pôde verificar-se que:

- ✓ É nas resistências mecânicas que a adição dos pigmentos pode ter alguma influência, com alguns resultados abaixo dos resultados do consolidante sem incorporação de pigmentos, tal como se esperava uma vez que os pigmentos são, em princípio, inertes (fíleres);
- ✓ Tal como nas restantes amostras tratadas com consolidantes não pigmentados, a formação de compostos pozolânicos foi pontual; com base nas análises em DRX e MEV-EDS, não foi possível identificar uma influência negativa da adição dos pigmentos na formação de

produtos pozolânicos, já que se tem uma baixa formação destes compostos e a concentração de pigmentos utilizada é também reduzida;

- ✓ Não se conseguiu estabelecer nenhuma relação entre os parâmetros ensaiados e as concentrações de pigmentos utilizadas.

Em termos de durabilidade, a realização do ensaio de envelhecimento artificial acelerado permitiu observar que todos os tratamentos consolidantes resistiram bem às variações térmicas e hígricas a que foram expostos, e que a adição dos pigmentos não prejudicou os parâmetros testados após este ensaio. Em relação aos provetes tratados com consolidantes pigmentados, os produtos com o pigmento Vermelho Bayer foram os que apresentaram uma menor variação cromática, revelando que a utilização de pigmentos inorgânicos sintéticos possa ser a solução mais indicada no que diz respeito a estabilidade cromática. Já o mesmo não acontece com as resistências mecânicas, em que as argamassas tratadas com os consolidantes incorporando este pigmento sintético atingiram os resultados mais fracos de resistência à tracção por flexão e à compressão.

É certo que a eficácia dos tratamentos de consolidação pode ser ligeiramente afectada devido à incorporação de pigmentos. No entanto, o facto de se conseguir reintegrar cromaticamente as partes do revestimento intervencionadas ao mesmo tempo que se aplica o tratamento de consolidação, representa uma vantagem muito grande que pode compensar a ligeira perda de eficácia na consolidação.

O estudo preliminar dos pigmentos a utilizar em tratamentos consolidantes que englobam igualmente a reintegração cromática é bastante importante, não só a nível do aspecto estético conferido que deve ser idêntico ao conjunto global onde se insere, mas também a nível da origem e composição mineralógica dos pigmentos e, principalmente, a nível da influência no processo de consolidação dos revestimentos. Essa avaliação preliminar pode ser efectuada através da realização de estudos experimentais como este que foi feito no âmbito desta dissertação.

Todos os produtos consolidantes aplicados contribuíram para restituir a coesão entre as partículas das argamassas. As alterações introduzidas nas características mecânicas e físicas das argamassas tratadas foram alterações moderadas e adequadas, comprovando a compatibilidade físico-química dos produtos consolidantes estudados.

Pode assim afirmar-se que os objectivos inicialmente propostos foram cumpridos, tendo-se confirmado a eficácia e compatibilidade dos produtos consolidantes estudados, avaliado o efeito da adição de pigmentos aos consolidantes, e verificado qual a influência das condições de cura na formação de produtos pozolânicos e no comportamento dos tratamentos aplicados.

Parte dos resultados obtidos neste estudo vão ser apresentados no artigo “*Consolidação e reintegração cromática de revestimentos históricos – estudo da influência da adição de pigmentos*” (PASCOAL *et al.*, 2012), que segue em anexo (**Anexo 5**). No momento, está a ser elaborado um artigo em inglês para submeter a publicação numa revista científica internacional, com o resultado de

todo o trabalho realizado e com o título provisório de “*Consolidation and chromatic reintegration of historical renders*”.

### **Trabalhos futuros**

A sugestão de trabalhos futuros tem como objectivo otimizar o trabalho realizado nesta dissertação. Propõem-se então os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Aplicações experimentais *in situ* dos produtos estudados, incluindo a realização de ensaios preliminares;
- Caracterização do efeito dos mesmos produtos consolidantes pigmentados sujeitos agora a uma cura integral de 20°C e 65% HR, avaliando a influência da adição dos pigmentos com estas condições de cura;
- Utilização de um pigmento inorgânico sintético amarelo e de um pigmento inorgânico natural vermelho, ambos constituídos apenas por óxidos de ferro, de forma a tentar identificar qual a origem dos pigmentos mais benéfica para utilização na consolidação e reintegração cromática dos revestimentos antigos;
- Otimização das condições de cura e da percentagem de pozolana utilizada, de modo a potenciar o efeito pozolânico e verificar a ocorrência de formações esféricas de calcite na superfície dos tratamentos;
- Estudo de produtos consolidantes pigmentados com outros tipos de pozolanas (por exemplo, a diatomite);
- Avaliação da eficácia da consolidação e reintegração cromática em argamassas com falta de coesão contaminadas por sais solúveis;
- Estudo de nanoproductos consolidantes pigmentados, com incorporação de pigmentos, otimizando-se assim a profundidade de penetração dos produtos consolidantes.

## BIBLIOGRAFIA

**ABREU, M.; LUCAS, J. C.** – *Terminologia geral sobre patologia de construção*. Lisboa: LNEC, 2002. Relatório 326/02 – SCPN.

**AFNOR** – *Mésure du module d'élasticité dynamique*. France: AFNOR, 1975. NF B10-511.

**AFNOR** – *Metákaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Définitions, spécifications, critères de conformité*. France: AFNOR, 2010. NF P18-513.

**AGS MINERAUX** – *Argical-M 1200S, Product Specification*. França: AGS Mineraux, 2009. Revisão 5.

**ARIZZI A.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J.; CULTRONE G.** – *Ultrasonic wave propagation through lime mortars: an alternative and non-destructive tool for textural characterization*. Submitted to Materials and Structures (2012).

**ASTM STANDARDS** – *Standard test method for rebound hammer of hardened concrete*. United States: 2008. ASTM C805-08.

**ASTM STANDARDS** – *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States: 2000. ASTM D2240-00.

**BORSOI, G.; VEIGA, R.; SANTOS SILVA, A.** – *Consolidação de argamassas históricas de revestimentos com produtos compatíveis: avaliação da eficácia*. 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, APFAC, 29-30 Março 2012, Coimbra.

**BORSOI, G.; TAVARES, M.; VEIGA, R.; SANTOS SILVA, A.** – *Microstructural and physical-mechanical analysis of the performance of nanostructured and other compatible consolidation products for historical renders*. 13<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials, 14-18 June 2011, Ljubljana, Slovenia. (2011a)

**BORSOI, G.; TAVARES, M.; VEIGA, R.; SANTOS SILVA, A.** – *Studies of the performance of nanostructured and other compatible consolidation products for historical renders*. IV International Materials Symposium, April 2011, Guimarães, Portugal. (2011b)

**BOTAS, S.** – *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*. Lisboa: UNL, 2009. Dissertação apresentada para obtenção do grau académico de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação de Edifícios pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

**BRANDI, C.** – *Teoria do restauro*. Tradução e revisão por C. Prats, J. Delgado-Rodrigues, J. Aguiar e N. Proença. Lisboa, Edições Orion, 2006.

**CANDELÁRIA, P.** – *Reintegração pictórica sobre revestimentos exteriores de cal*. Tomar: Instituto Politécnico de Tomar, Escola Superior de Tecnologia, Setembro 2008. Estágio Curricular da Licenciatura Bietápica em Conservação e Restauro.

**CASAL, M. G.** – *Conservação de Pintura Mural – Estudo e consolidação de argamassas de cal aérea e areia com falta de coesão*. Projecto final de Licenciatura em Conservação e Restauro. Lisboa: LNEC, 2001.

**CEN** – *Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels: CEN, 1998. EN 1015-2:1998.

**CEN** – *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels: CEN, 1998. EN 1015-3:1998.

**CEN** – *Methods of test for mortar for masonry. Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Brussels: CEN, 1998. EN 1015-7:1998.

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

**CEN** – *Methods of test for mortar for masonry. Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates*. Brussels: CEN, 2002. EN 1015-21:2002

**CHAROLA, A. E.** – *Salts in the deterioration of porous materials: na overview*. Journal of American Institute of Conservation 39 (2000), 327-343.

**COUTINHO, A. DE SOUSA** – *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC, 2006 (4ªedição). Volume I.

**CRUZ, A.** – *A matéria de que é feita a cor. Os pigmentos utilizados em pintura e sua identificação e caracterização*. 1º Encontro de Conservação e Restauro – Tecnologias. Tomar: Instituto Politécnico de Tomar, 2000.

**CRUZ, A.** – *Os pigmentos naturais utilizados em pintura*. Encontro “Pigmentos e corantes naturais. Entre as artes e as ciências”. Évora: Universidade de Évora, 2005.

**CTS ESPAÑA** – *Pigmentos puros CTS, relación redactada por la Dra. Bevilacqua*. Espanha, Madrid: CTS Espanã, 2010.

**DANIELE, V.; TAGLIERI, G; QUARESIMA, R.** – *The nanolimes in Cultural Heritage conservation: characterisation and analysis of the carbonatation process*. Journal of Cultural Heritage 9 (2008), 294-301.

**DEI, L.; SALVADORI, B.** – *Nanotechnology in Cultural Heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay*. Journal of Cultural Heritage 7 (2006), 110-115.

**EASTAUGH, N.; WALSH, V.; CHAPLIN, T.; SIDDALL, R.** – *The Pigment Compendium: a Dictionary of Historical Pigments*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004 (1<sup>st</sup> edition). ISBN 0 7506 57499.

**ELSEN, J.** – *Microscopy of historic mortars – a review*. Cement and Concrete Research 36 (2006), 1416-1424.

**FARIA, M. P.** – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa: UNL, 2004. Tese apresentada à FCT-UNL para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado.

**FARIA, M. P.; TAVARES, M.; MENEZES, M.; VEIGA, R.; MARGALHA, G.** – *Traditional Portuguese techniques for maintenance of historic renders*. Historical Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic, 609-617.

**FERRAZ, E; ANDREJKOVICOVÁ, S; SANTOS SILVA, A; ROCHA, F; VELOSA, A.** – *Utilização do ensaio de Chapelle modificado para avaliação da reactividade pozolânica de metacaulinos*. 4<sup>o</sup> Congresso Português de Argamassas e Etics, APFAC, 29-30 Março 2012, Coimbra.

**GAMEIRO, A.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A.** – *Lime-metakaolin hydration products: a microscopy analysis*. Materials and Technology 46 (2012) 2, 145-148. (2012a)

**GAMEIRO, A; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A.; FARIA, P** – *Lime-metakaolin mortars for historical buildings repair: study of the hardening reaction*. International Conference Durable Structures: From Construction to Rehabilitation, ICDS 2012, 31 Maio e 01 Junho 2012, LNEC, Lisboa. (2012b)

**GIL, M.; CARVALHO, M. L.; SERUYA, A.; CANDEIAS, A. E.; MIRÃO, J.; QUERALT, I.** – *Yellow and red ochre pigments from southern Portugal: elemental composition and characterization by WDXRF and XRD*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A 580 (2007), 728-731.

**HANSEN, E.; DOEHNE, E.; FIDLER, J.; LARSON, J.; MARTIN, B.; MATTEINI, M.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; PARDO, E. S.; PRICE, C.; DE TAGLE, A.; TEUTONICO, J. M.; WEISS, N.** – *A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials*. Reviews in Conservation 4 (2003), 13-25.

**HENRIQUES, F. M. A.** – *A conservação do património histórico edificado*. Lisboa: LNEC, 1991. Memória 775.

**HENRIQUES, F. M. A.** – *Humidade em Paredes*. Lisboa: LNEC, 2001 (3<sup>a</sup> Edição). Volume 1 da Colecção de Edifícios.

**HENRIQUES, F. M. A.** – *A conservação do património histórico em Portugal. Perspectivas e bases de actuação*. Revista Engenharia e Vida, n.º2. Monte de Caparica: FCT-UNL, 2004.

**HRADIL, D.; GRYGAR, T.; HRADILOVÁ, J.; BEZDICKA, P.** – *Clay and iron oxide pigments in the history of painting*. Applied Clay Science 22 (2003), 223-236.

**IM, I.P.** – *Acompanhamento do clima*. s.d. <http://www.meteo.pt/oclima/acompanhamento/> (acedido em Abril, Maio e Junho de 2012).

**IPQ** – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Lisboa: LNEC, 1973. NP 955:1973.

**IPQ** – *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*. Monte de Caparica: IPQ, 2007. NP EN 12504-4: 2007.

**LNEC/NCC** – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa: LNEC/NCC, 2002. FE Pa 39.

**LNEC/NRI** – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa: LNEC/NRI, 2010. FE Pa 43.

**LNEC/LERevPa** – *Procedimentos de Ensaio para Rebocos – Determinação da consistência por espalhamento da argamassa em pasta*. Lisboa: LNEC/LERevPa, 2006. PE/R 02 v.09.

**LNEC/LERevPa** – *Procedimentos de Ensaio para Rebocos – Determinação do teor de ar da argamassa em pasta pelo método da pressão*. Lisboa: LNEC/LERevPa, 2007. PE/R 04 v.10.

**LNEC/LERevPa** – *Procedimentos de Ensaio para Rebocos – Determinação da resistência à flexão e à compressão da argamassa endurecida*. Lisboa: LNEC/LERevPa, 2006. PE/R 06 v.08.

**LÓPEZ-ARCE, P.; GÓMEZ-VILLALBA, L. S.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M.; FORT, R.** – *Influence of the relative humidity on the carbonation of calcium hydroxide nanoparticles and the formation of calcium carbonate polymorphs*. Powder Technology 205 (2011), 263-269.

**MACDONALD, B.; HANCOCK, R.; CANNON, A.; PIDRUCZNY, A.** – *Geochemical characterization of ochre from central coastal British Columbia, Canada*. Journal of Archaeological Science 38 (2011), 3620-3630.

**MAGALHÃES, A. C.** – *Patologia de rebocos antigos*. Lisboa: LNEC, 2002. Cadernos Edifícios n.º 2 – Revestimentos de paredes de edifícios antigos.

**MALANHO, S; VEIGA, R.** – *Análise do comportamento mecânico em laboratório e in situ de revestimentos pré-doseados de cimento*. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, 18-19 Março 2010, LNEC - Lisboa.

**MARGALHA, M. G.** – *Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*. Lisboa: UTL, 2010. Dissertação apresentada ao IST-UTL para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

**MARQUES, M.** – *Tintas: características dos constituintes e da película seca*. ITMC 3. Lisboa: LNEC, 1996.

**MORTIMORE, J.; MARSHALL, L.; ALMOND, M.; HOLLINS, P.; MATTHEWS, W.** – *Analysis of red and yellow ochre samples from Clearwell Caves and Çatalhöyük by vibrational spectroscopy and other techniques*. Spectrochimica Acta Part A 60 (2004), 1179-1188.

**PACHECO-TORGAL, F.; FARIA, J.; JALALI, S.** – *Some considerations about the use of lime-cements mortars for building conservation purposes in Portugal: a reprehensible option or a lesser evil?* Guimarães: Universidade do Minho, 2011. Construction and Building Materials 30 (2012), 488-494.

**PAIVA, J. P.; AGUIAR, J.; PINHO, A.** – *Guia Técnico de Reabilitação Habitacional*. Lisboa: INH e LNEC, 2006. Volume I e II.

**PASCOAL, P.; BORSOI, G.; VEIGA, R.; FARIA, P.** – *Consolidação e reintegração cromática de revestimentos históricos – Estudo da influência da adição de pigmentos*. Artigo com resumo aceite e submetido a X-09-2012 ao congresso Construção 2012. Coimbra: Universidade de Coimbra, 18-20 Dez. 2012.

**PIGINO, B.; LEEMAN, A.; FRANZONI, E.; LURA, P.** – *Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance*. Cement & Concrete Composites 34 (2012), 313-321.

**PINHO, F.** – *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. Lisboa: LNEC, 2008 (2ª edição). Volume 8 da Colecção de Edifícios.

**RAMOS, P.; RUISÁNCHEZ, I.; ANDRIKOPOULOS, K.** – *Micro-Raman and X-Ray fluorescence spectroscopy data fusion for the classification of ochre pigments*. Talanta 75 (2008), 926-936.

**RATO, V.** – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Lisboa: UNL, 2006. Tese apresentada à FCT-UNL para obtenção do grau académico de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado.

**RIBEIRO, A.; EUSÉBIO, M.** – *Tintas inorgânicas: tintas de cal e de silicatos*. Lisboa: LNEC, 2002. Cadernos Edifícios n.º 2 – Revestimentos de paredes de edifícios antigos.

**RILEM** – *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommendations provisoires*. Paris: 1980.

**ROCHA-GOMES, L.; ALVAREZ, C.** – *Análise crítica dos aspectos ambientais no uso de pigmentos nas argamassas de rejuntamento do Espírito Santo (Brasil): diagnóstico e recomendações*. 2º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, 22-23 Novembro 2007, FIL - Lisboa.

**SANTOS, M.** – *Pigmentos. Materiais, sistemas e técnicas de construção tradicional: contributo para o estudo da arquitectura vernácula da região oriental da serra do Caldeirão.* Edições Afrontamento, 2008.

**SIDDIQUE, R.; KLAUS, J.** – *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review.* Applied Clay Science, n. 43, 2009, 392-400.

**TAVARES, M.** – *A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Uma metodologia de estudo e reparação.* Lisboa: UTL, 2009. Tese elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Arquitectura pela Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa.

**TAVARES, M.** – *Relatório de actividades desenvolvidas no período de 15 de Março a 30 de Abril de 2010.* Lisboa: LNEC, 2010. I&D Edifícios, Relatórios de Actividades.

**TAVARES, M.; VEIGA, R.** – *A conservação de rebocos antigos – restituir a coesão perdida através da consolidação com materiais tradicionais e sustentáveis.* Lisboa: LNEC, 2004.

**TAVARES, M.; AGUIAR, J.; VEIGA, R.** – *Uma metodologia de estudo para a conservação de rebocos antigos – o restauro através da técnica da consolidação.* VI SBTÁ, Seminário Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Maio de 2005, Florianópolis – Brasil.

**TONIOLO, L.; PARADISI, A.; GOIDANICH, S.; PENNATI, G.** – *Mechanical behavior of lime based mortars after surface consolidation.* Construction and Building Materials 25 (2011), 1553-1559.

**VEIGA, R.** – *As argamassas na conservação.* In Actas das 1<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e reabilitação das construções existentes. Aveiro, 26 de Novembro de 2003. Coleção Comunicações, COM 103. Lisboa: LNEC, 2003.

**VEIGA, R.** – *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos.* Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”. Lisboa: LNEC, 14-15 de Fevereiro de 2005.

**VEIGA, R.** – *Revestimentos de paredes em edifícios antigos.* Seminário “Univer(s)cidades – desafios e propostas da candidatura”. Coimbra: Universidade de Coimbra, 29 e 30 de Novembro de 2007.

**VEIGA, R.** – *Estratégias de intervenção em revestimentos históricos.* Lisboa: LNEC, 2010.

**VEIGA, R.** – *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais.* Lisboa: LNEC, 2011 (2<sup>a</sup> edição). Teses e programas de investigação.

**VEIGA, R.** – *Conservação de revestimentos de alvenarias históricas. Tratamento e consolidação versus renovação.* 4<sup>o</sup> Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios, PATORREB, 12-14 Abril 2012, Santiago de Compostela.

**VEIGA, R.; AGUIAR, J.** – *Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos*. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, 18-19 de Março de 2003, Porto.

**VEIGA, R.; AGUIAR, J.; SANTOS SILVA, A.; CARVALHO, F.** – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Lisboa: LNEC, 2004. Volume 9 da Coleção de Edifícios.

**VEIGA, R.; TAVARES, M.; MAGALHÃES, A. C.** – *Restauro da fachada em marmorite de cal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa. Materiais, métodos e resultados*. VII SBTA, Seminário Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Maio de 2007, Recife – Brasil.

**VELOSA, A.** – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Aveiro: UA, 2006. Tese apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

**ZENDRI, E.; BISCONTIN, G.; NARDINI, I.; RIATO, S.** – *Characterization and reactivity of silicatic consolidants*. *Construction and Building Materials* 21 (2007), 1098-1106.

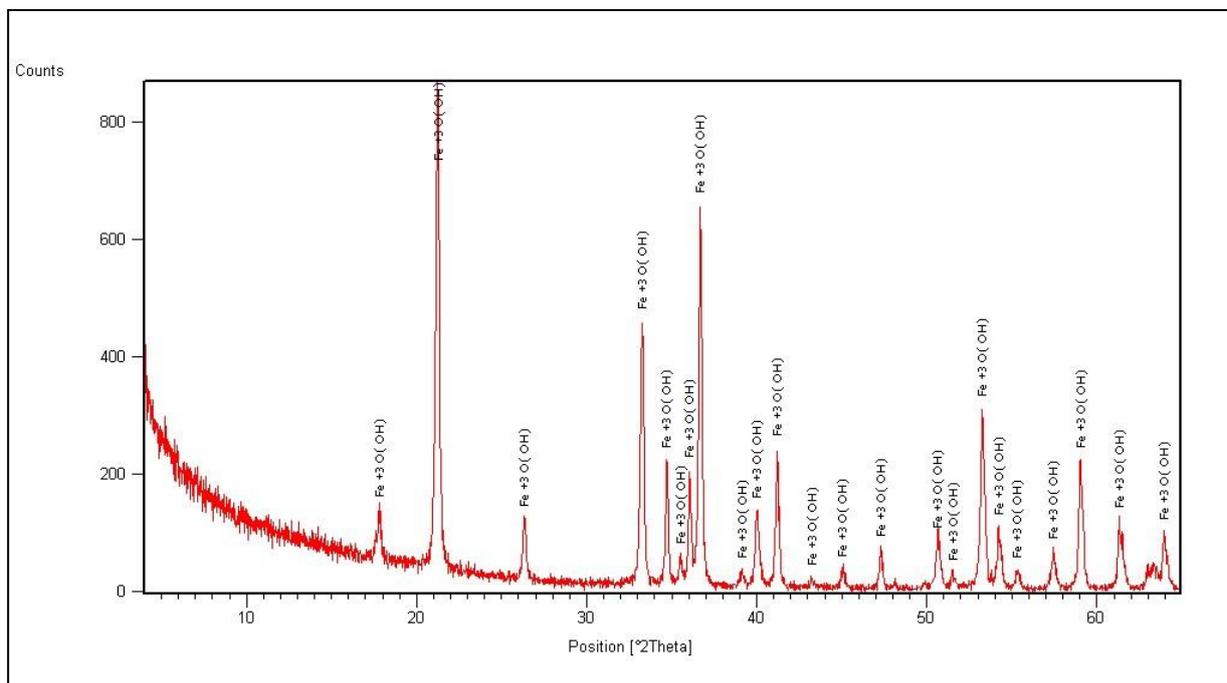
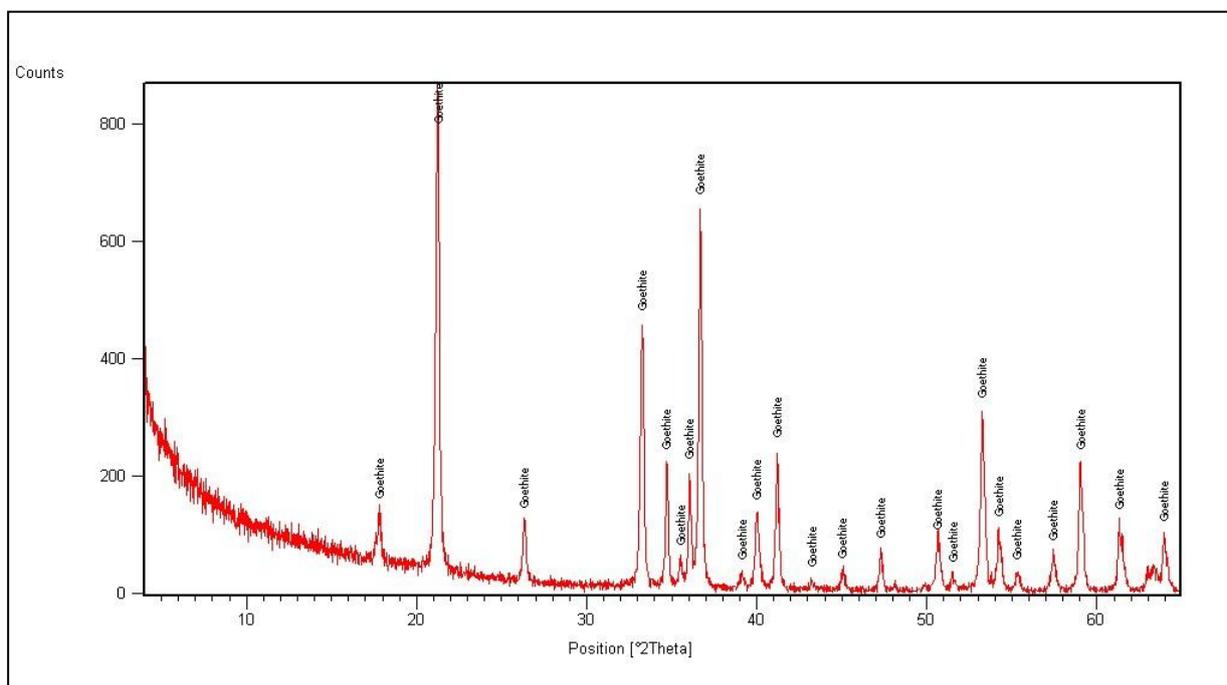


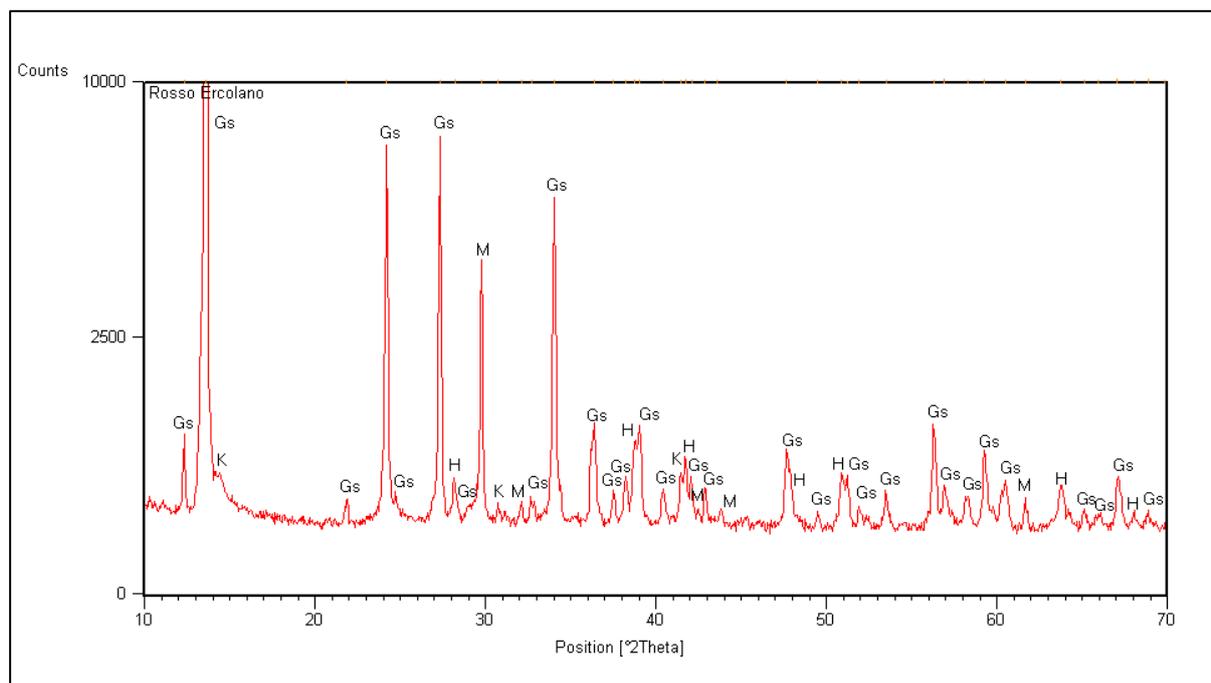
## **ANEXOS**



## ANEXO 1 – GRÁFICOS DRX DOS PIGMENTOS

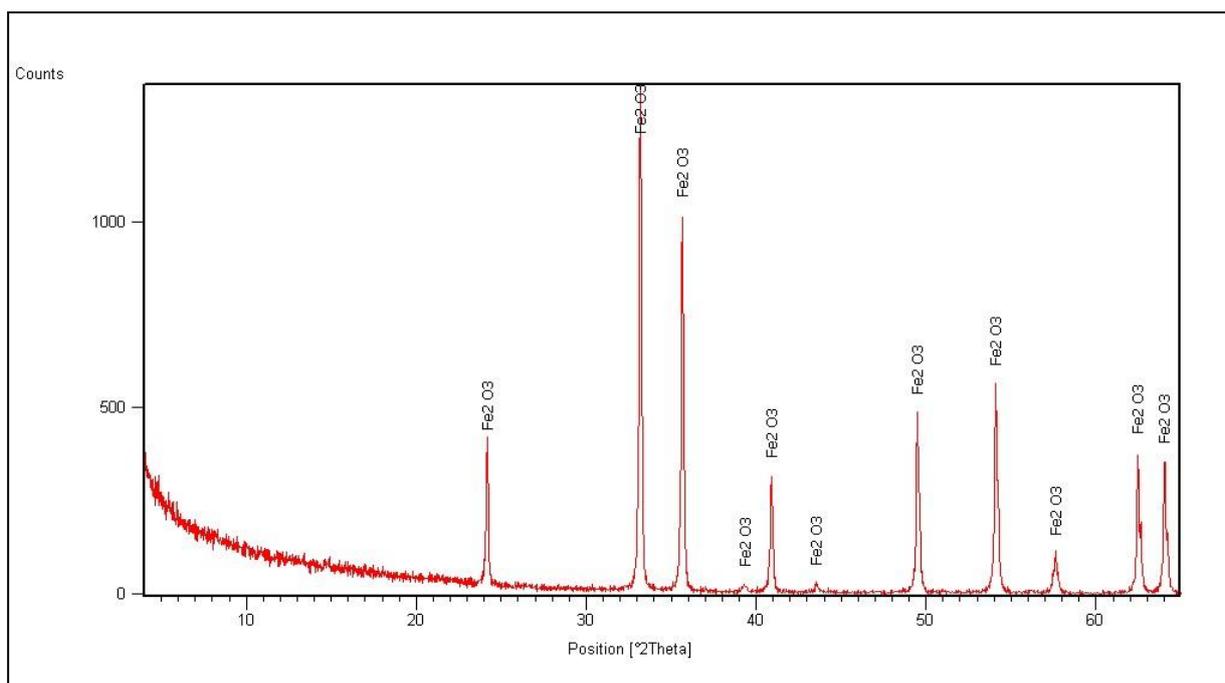
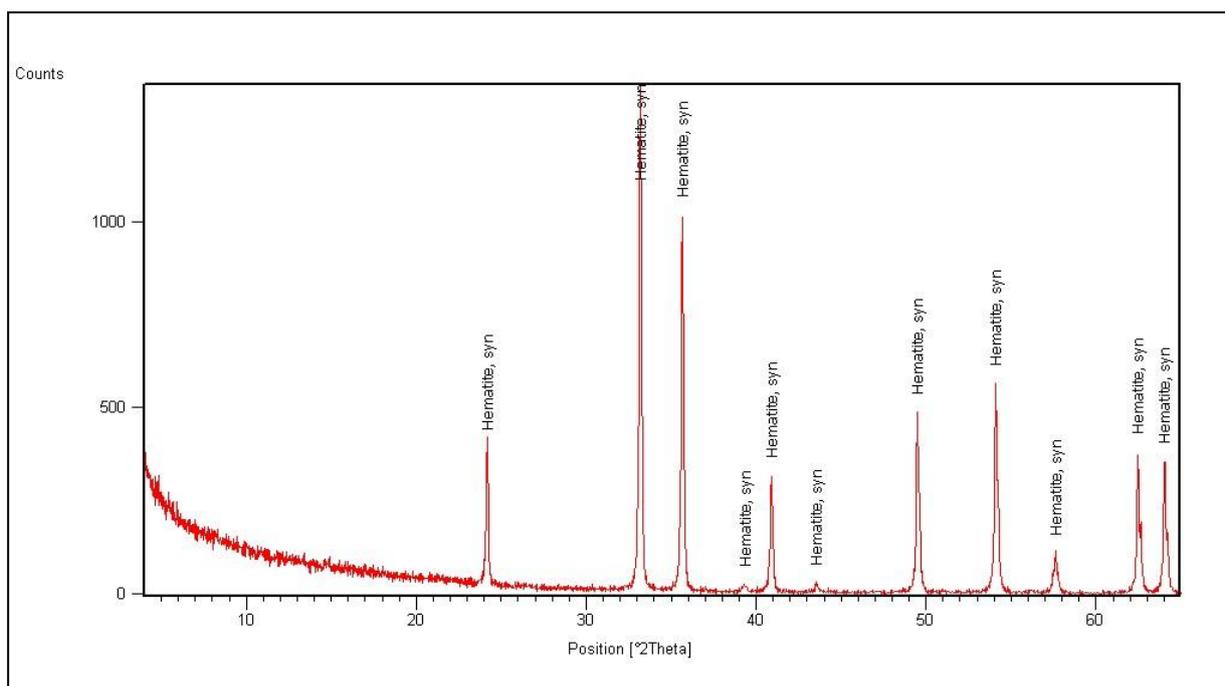
## Pigmento Ocre Alvalade (CANDELÁRIA, 2008)



**Pigmento Rosso Ercolano**

- Gs – Gesso;
- K – Caulinite;
- H – Hematite;
- M – Micas.

## Pigmento Vermelho Bayer (CANDELÁRIA, 2008)





## ANEXO 2 – IMAGENS ANTES E APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

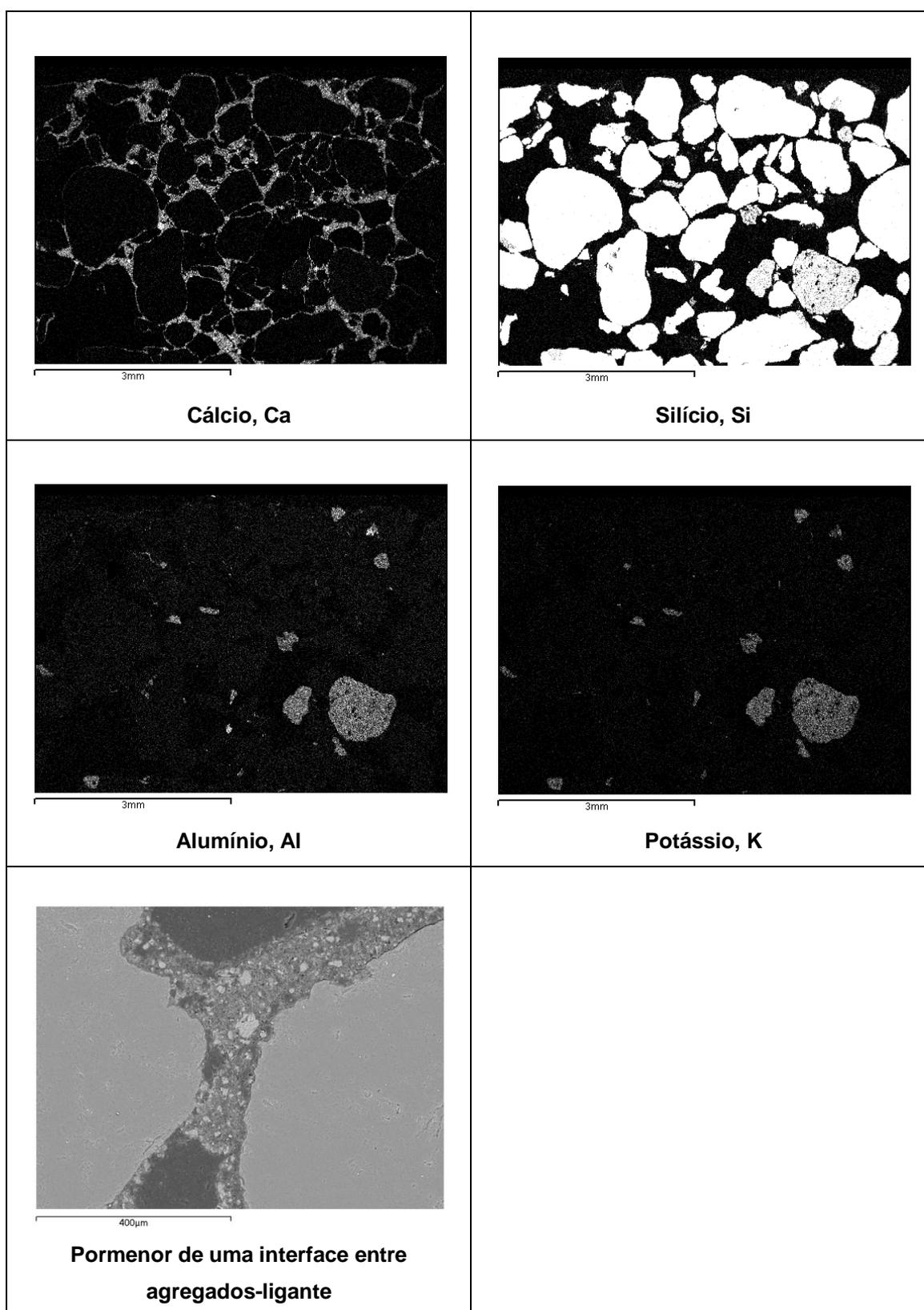
Tratamento	Antes do envelhecimento	Após o envelhecimento	
MK25% (95%HR+65%HR)			
MK25% (65%HR)			
MK25%+OA3% (95%HR+65%HR)			
MK25%+OA5% (95%HR+65%HR)			
MK25%+VB3% (95%HR+65%HR)			
MK25%+VB5% (95%HR+65%HR)			
Referência Não tratado			

OA – Ocre Alvalade; VB – Vermelho Bayer

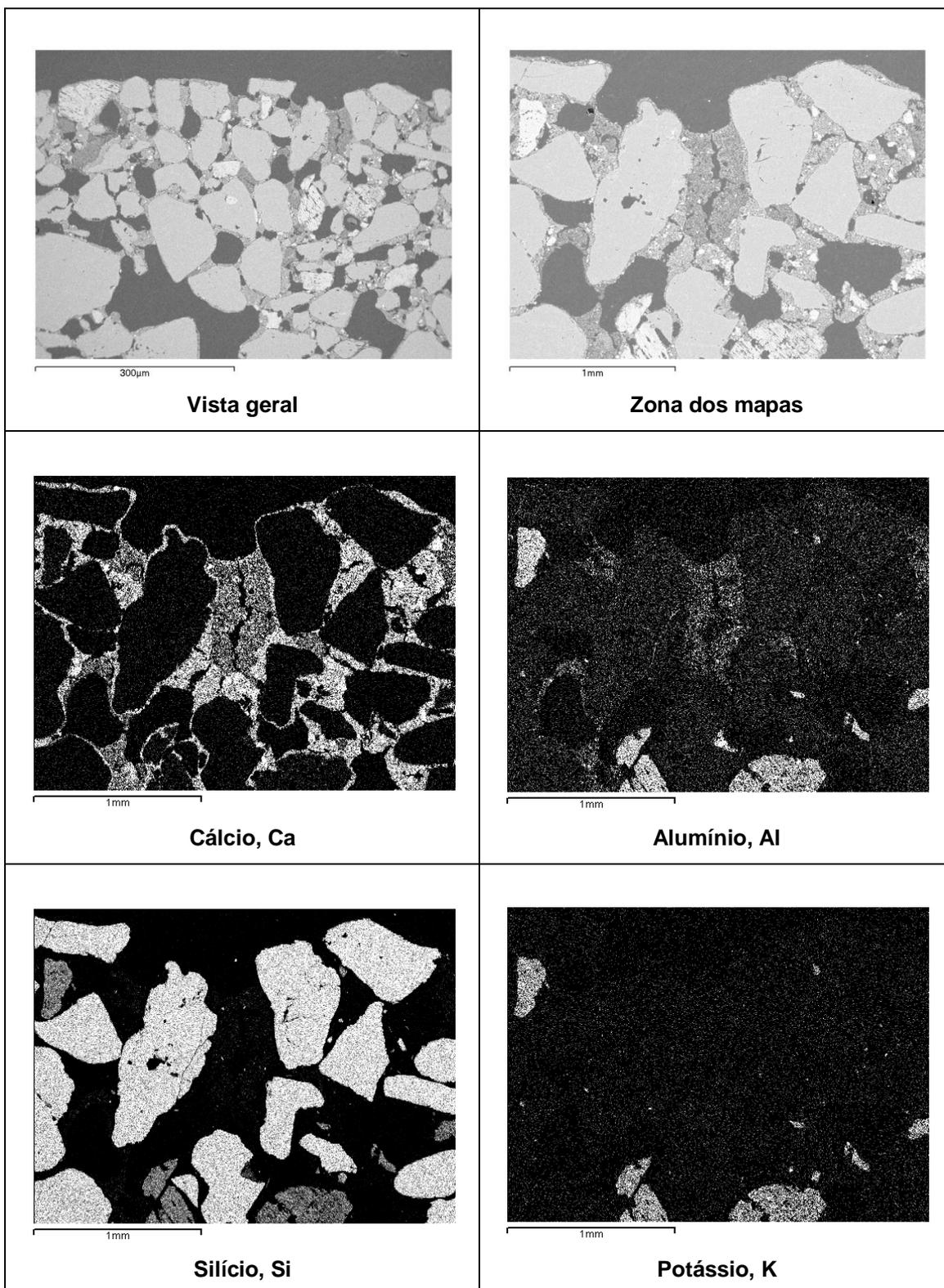


**ANEXO 3 – MAPAS MEV-EDS DAS SUPERFÍCIES POLIDAS**

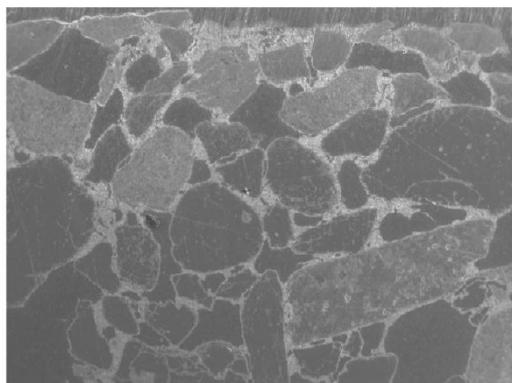
MK25% CC (95% HR + 65% HR)



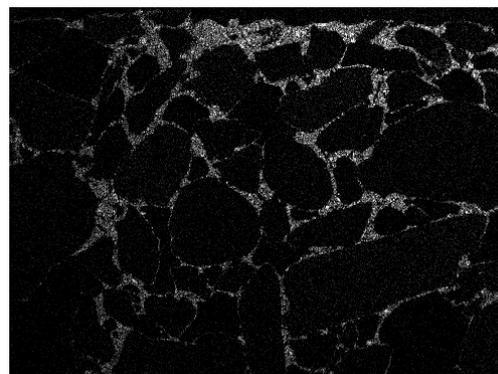
**MK25% CS (65% HR)**



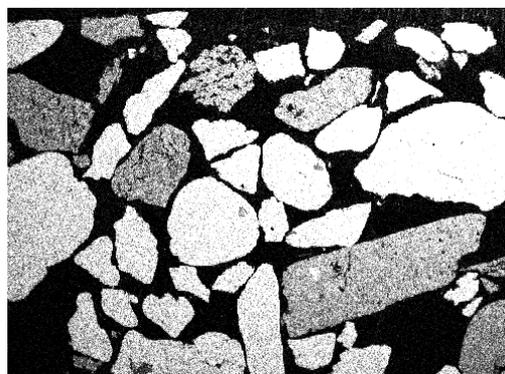
## MK25%+RE5%



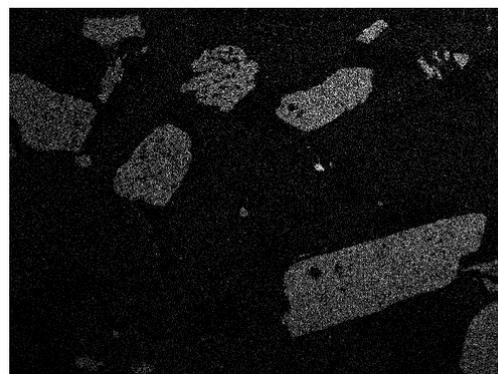
Zona dos mapas



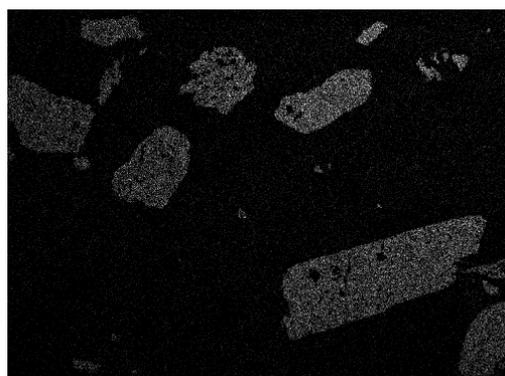
Cálcio, Ca



Silício, Si

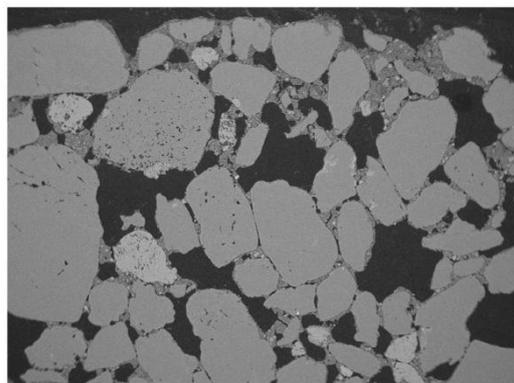


Alumínio, Al

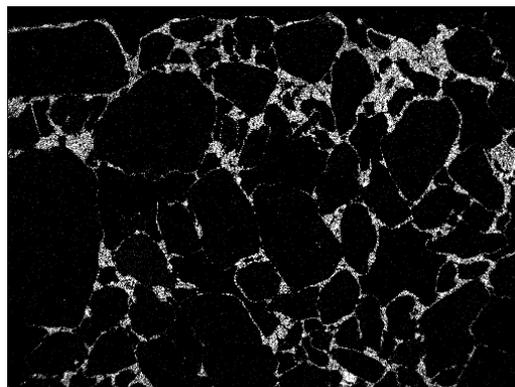


Potássio, K

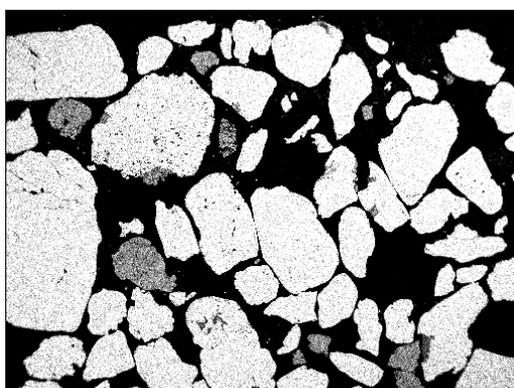
**MK25%+VB5%**



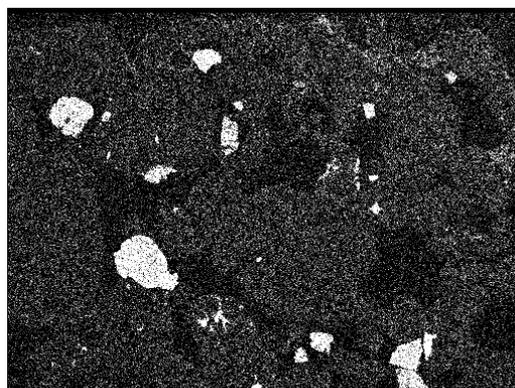
**Zonas dos mapas**



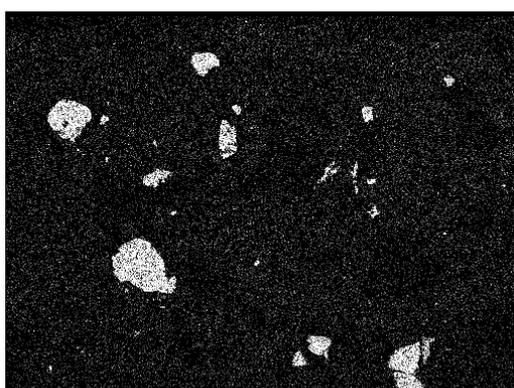
**Cálcio, Ca**



**Silício, Si**



**Alumínio, Al**



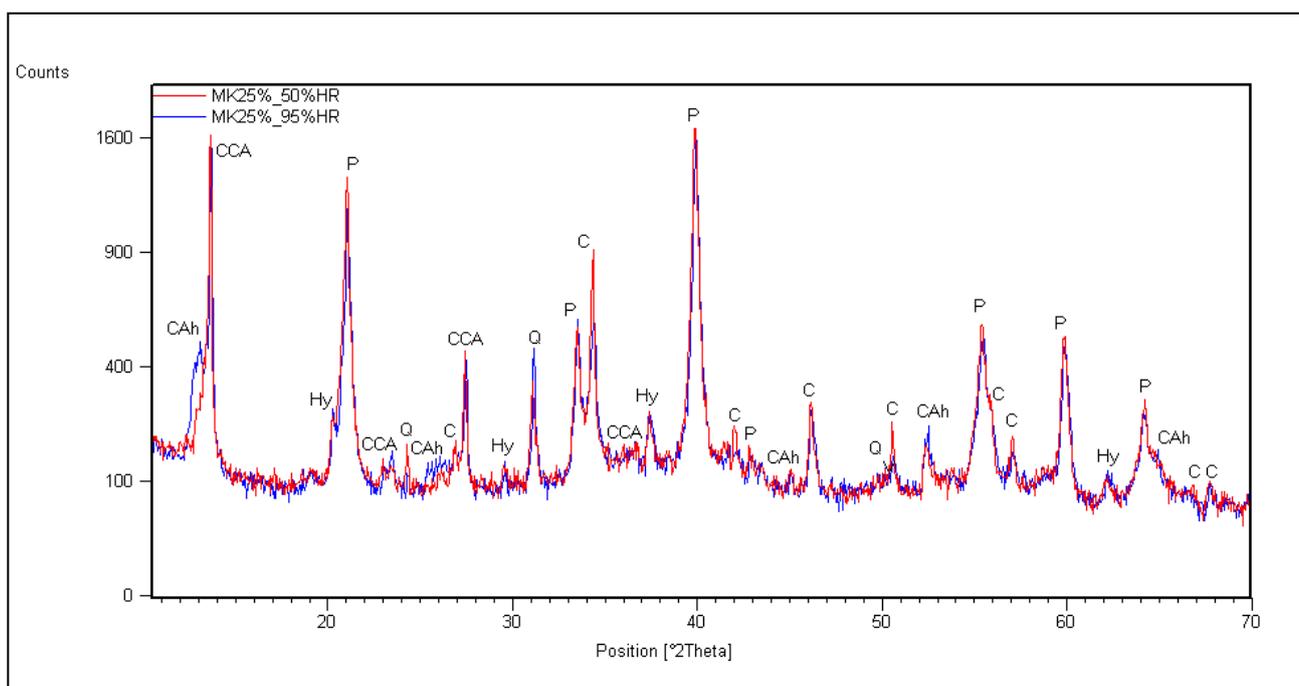
**Potássio, K**

## ANEXO 4 – GRÁFICOS DRX DOS CONSOLIDANTES SUJEITOS A CURAS DIFERENTES

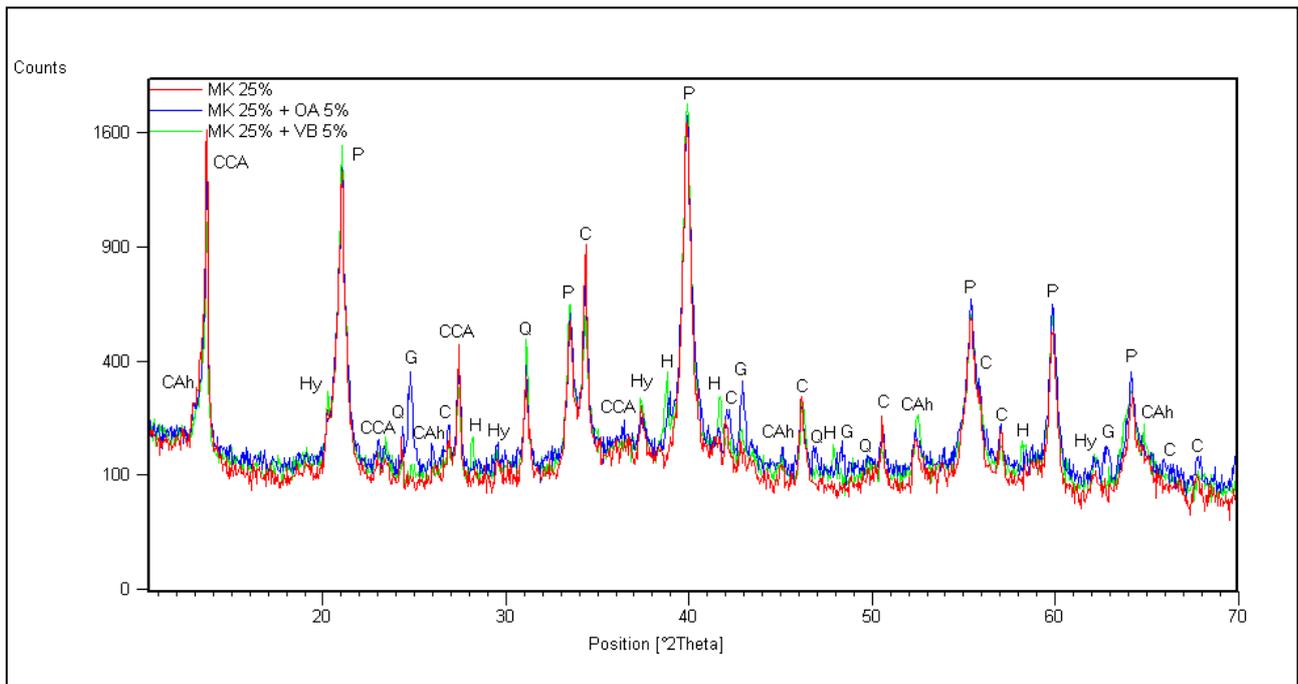
### COMPOSTOS IDENTIFICADOS

- **CAh** – Aluminatos de cálcio hidratados;
- **CCA** – Carbo-aluminatos de cálcio hidratados;
- **Hy** – Hydrogarnet;
- **P** – Portlandite;
- **Q** – Quartzo;
- **C** – Calcite;
- **G** – Goetite;
- **H** – Hematite.

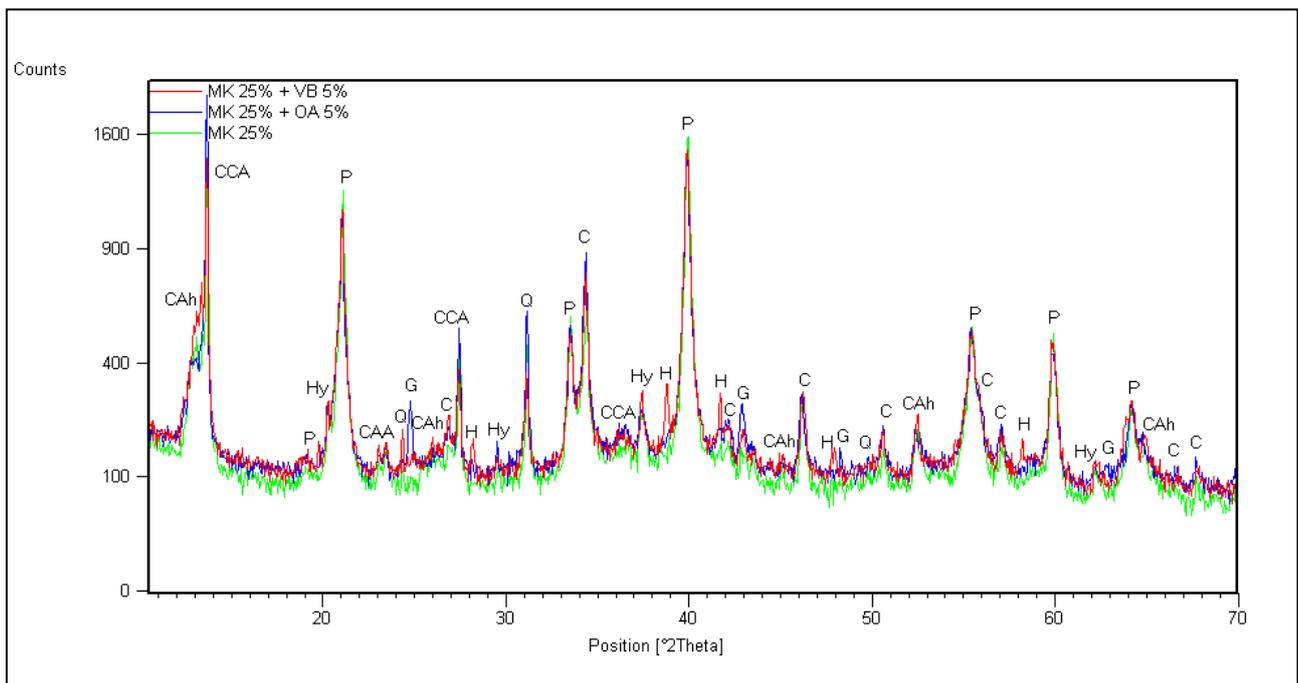
### MK25% (50% HR) vs. MK25% (95% HR)



**MK25%, MK25%+OA5% e MK25%+VB5% (50% HR)**



**MK25%, MK25%+OA5% e MK25%+VB5% (95% HR)**



**ANEXO 5 – ARTIGO SUBMETIDO AO CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2012****Consolidação e reintegração cromática de revestimentos históricos –  
Estudo da influência da adição de pigmentos****Patrícia Pascoal<sup>1</sup>, Giovanni Borsoi<sup>2</sup>, Rosário Veiga<sup>2</sup> e Paulina Faria<sup>1</sup>**

1: Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova de Lisboa  
Quinta da Torre, 2829-516 Caparica  
e-mail: p.pascoal@campus.fct.unl.pt; paulina.faria@fct.unl.pt web: <http://www.dec.fct.unl.pt>

2: Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, Departamento de Edifícios  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, n.º106, 1700-066 Lisboa  
e-mail: gborsoi@Inec.pt; rveiga@Inec.pt web: <http://www.Inec.pt>

**Palavras-chave:** produtos consolidantes, revestimentos históricos, pozolanas, reintegração cromática, pigmentos.

**Resumo.** *A consolidação de revestimentos antigos com perda de coesão acontece, geralmente, quando os mesmos apresentam um valor artístico elevado. Esta importante fase de intervenção conservativa deve ser levada a cabo através da utilização de produtos compatíveis com o revestimento; os produtos consolidantes comumente aplicados são de natureza orgânica ou inorgânica. Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, são incompatíveis com os suportes antigos; os consolidantes mais compatíveis encontram-se no grupo dos inorgânicos, onde se inserem a água de cal e o silicato de etilo, que também se caracterizam pela maior durabilidade e reversibilidade.*

*Neste estudo, foram utilizados produtos consolidantes à base de hidróxido de cálcio, metacaulino (uma pozolana artificial), água e pigmentos inorgânicos. De facto, a água de cal, composta essencialmente por hidróxido de cálcio, é um dos consolidantes mais antigos de que se tem conhecimento; a adição do metacaulino prende-se com o facto de conferir ao produto propriedades hidráulicas, aumentando a sua resistência mecânica e durabilidade; a adição dos pigmentos inorgânicos pretende avaliar a viabilidade da reintegração cromática e também verificar a sua influência na consolidação das argamassas. A água de cal é um meio fortemente alcalino, sendo os pigmentos inorgânicos os que apresentam melhor resistência e durabilidade quando incorporados nesta solução.*

*Os produtos estudados foram aplicados em provetes de revestimento de argamassa de cal aérea; estes provetes foram feitos com uma quantidade reduzida de ligante, para simular um revestimento antigo com perda de coesão superficial. Realizaram-se ensaios de carácter mecânico, físico e cromático, que possibilitaram aferir a eficácia dos produtos consolidantes aplicados. Executou-se também um ensaio de envelhecimento artificial acelerado, para avaliar a variação das características das superfícies tratadas quando expostas a ciclos climáticos. Concluiu-se que os produtos consolidantes testados são compatíveis, eficazes e apresentam boa durabilidade, e ainda que a adição dos pigmentos pode prejudicar ligeiramente o incremento das resistências mecânicas conferido pela consolidação das argamassas.*

*Este trabalho insere-se no projecto LIMECONTECH desenvolvido no LNEC, Universidade de Aveiro e Universidade Nova de Lisboa e financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.*

## 1. INTRODUÇÃO

As argamassas têm sido utilizadas desde a antiguidade no revestimento de paredes. A composição das argamassas antigas pode ser variada, mas a maioria tem como ligante a cal aérea [1, 2]. Aplicadas em várias camadas em sistemas de reboco, as argamassas antigas de cal aérea eram caracterizadas por uma baixa resistência mecânica, elevada deformabilidade, boa aderência ao suporte e boa trabalhabilidade; além disso a elevada porosidade promovia uma boa permeabilidade ao vapor de água, [3].

Os revestimentos de acabamento exterior desempenham uma função protectora das alvenarias contra as acções externas, e definem o seu aspecto estético. Devido à sua exposição, são dos elementos construtivos mais sujeitos à degradação.

A perda de coesão dos revestimentos antigos é uma das anomalias mais frequentemente observada, e que se caracteriza pelo enfraquecimento das ligações entre as várias partículas da argamassa, levando à diminuição da resistência mecânica [4, 5]. A argamassa torna-se um material friável e susceptível à perda de material (desagregação, farinação e pulverização). As causas mais comuns associadas a este tipo de degradação são: a presença prolongada de humidade; a cristalização de sais solúveis no interior dos poros da argamassa; a acção de microorganismos; ou a ocorrência de fenómenos químicos e formação de produtos secundários entre o revestimento e a envolvente [5].

A consolidação é a opção a tomar no tratamento de revestimentos antigos com perda de coesão, quando se pretende a conservação do revestimento original, o que acontece geralmente quando o mesmo apresenta um valor patrimonial elevado [6]. Os materiais a adoptar neste tipo de intervenções devem ser materiais compatíveis química e fisicamente com o revestimento original; a utilização de materiais não adequados pode acelerar o processo de degradação [6, 7].

A restituição da coesão dos revestimentos é conseguida através da aplicação na sua superfície degradada de produtos consolidantes líquidos; estes produtos penetram no interior do revestimento e reconstituem a ligação entre as partículas pelo processo de solidificação [8]. Os produtos consolidantes geralmente utilizados são produtos orgânicos ou produtos inorgânicos.

Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, apresentam, em regra, maior facilidade de aplicação, maior flexibilidade e maior capacidade adesiva, mas são geralmente incompatíveis. Os consolidantes inorgânicos, onde se inserem o hidróxido de cálcio, o hidróxido de bário ou o silicato de etilo, são os produtos mais utilizados, principalmente devido à sua maior compatibilidade e durabilidade [6, 7]. Quando se usam consolidantes de base orgânica, a consolidação das partículas é feita por colagem; no caso do hidróxido de cálcio, hidróxido de bário ou silicato de etilo, a consolidação é conseguida através da regeneração do ligante degradado ou perdido [9].

A escolha dos produtos a utilizar deve ter em consideração alguns parâmetros importantes para que uma consolidação eficaz seja atingida: boa capacidade de penetração; aumento da resistência

mecânica; capacidade consolidante; compatibilidade com o substrato; efeito na absorção de água e permeabilidade ao vapor de água; durabilidade; alteração cromática [7, 8, 10, 11].

O produto consolidante não deve modificar a estrutura porosa, nem reduzir excessivamente a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor de água; desta forma, evita-se a acumulação de água nas zonas tratadas, que pode dar origem a várias formas de degradação [9].

Neste trabalho utilizaram-se produtos consolidantes à base de hidróxido de cálcio, metacaulino, água e pigmentos inorgânicos. No caso das argamassas de cal aérea, o consolidante à base de hidróxido de cálcio e água (solução aquosa de cal) é claramente o produto mais compatível. A adição de um produto pozolânico, como o metacaulino, tem em vista o incremento da resistência mecânica e da durabilidade dos revestimentos tratados. A adição dos pigmentos tem como objectivo avaliar a viabilidade da reintegração cromática das zonas tratadas, assim como avaliar a influência na consolidação dos revestimentos.

Os pigmentos de origem mineral são os que apresentam melhor resistência e durabilidade quando introduzidos em ambientes fortemente alcalinos, como é o caso das soluções aquosas de cal. Foram utilizados pigmentos que se incluem no grupo dos ocre, com a cor amarela e vermelha, compostos à base de minerais de ferro (óxidos de ferro); os ocre são pigmentos utilizados desde a antiguidade e dos mais facilmente encontrados em arqueologia [12]. A coloração amarela é conferida principalmente devido à presença da goetite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), e no caso da coloração vermelha pela presença da hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [12, 13]. Portugal é um país geologicamente rico em pigmentos ocre amarelos e vermelhos, mas cuja tradição de extracção destes pigmentos naturais está praticamente abandonada [13, 14].

Os produtos consolidantes foram aplicados em provetes de argamassa de cal aérea e areia (com um teor reduzido de ligante) simulando uma argamassa com perda de coesão.

## **2. MATERIAIS E METODOLOGIA**

### **2.1 Preparação dos provetes de argamassa**

As argamassas preparadas têm um traço volumétrico ligante:agregado de 1:4, que permite assim obter uma argamassa com fraco teor de ligante e uma baixa coesão superficial. O ligante utilizado foi uma cal aérea comercial nacional; nos agregados foram utilizadas três granulometrias diferentes de areias siliciosas calibradas, com dimensões das partículas inferiores a 2 mm.

Prepararam-se provetes prismáticos de argamassa (40 x 40 x 160 mm) [21], e aplicaram-se camadas únicas de argamassa com cerca de 15 mm de espessura em tijolos. Até atingirem os 90 dias de carbonatação, todos os provetes foram mantidos em ambiente controlado com temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de humidade relativa (HR).

Após a aplicação dos produtos estudados, os provetes prismáticos destinaram-se à realização de ensaios mecânicos; as camadas de argamassa aplicadas em tijolos tiveram como objectivo a

realização de ensaios de carácter físico (dureza superficial e absorção de água) e a realização de um ensaio de envelhecimento artificial.

## 2.2 Produtos consolidantes

- **Materiais utilizados:**

Os produtos consolidantes estudados foram obtidos de uma mistura de cal, metacaulino (MK), água, e em alguns casos com a adição de pigmentos inorgânicos.

O MK ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) é um material pozolânico artificial obtido por tratamento térmico (calcinação) do caulino ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), entre os 600°C e os 800°C [16]; a calcinação do caulino provoca o colapso total ou parcial da sua estrutura cristalina e dá-se a formação de uma fase amorfa e reactiva, constituída maioritariamente por sílica e alumina, que conferem a reactividade pozolânica ao MK [7]. Após o tratamento térmico, o MK obtido é moído para obtenção de uma superfície específica elevada e, por consequência, um aumento do grau de pozolanicidade.

À temperatura ambiente e na presença de água, os constituintes amorfos do MK combinam-se com o hidróxido de cálcio dando origem a compostos hidráulicos com propriedades aglomerantes [15].

A introdução de MK em argamassas e betões tem como vantagens o aumento das resistências mecânicas, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência a ataques químicos, a redução dos efeitos da reactividade álcali-sílica, o aumento da compacidade do betão, e o aumento da trabalhabilidade, o que se traduz numa maior durabilidade [17].

Utilizou-se um metacaulino comercial (Argical M-1200S, Imerys) com as seguintes características: percentagens de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) de 55% e de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 39%; índice de pozolanicidade de 1400 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ ; distribuição granulométrica inferior a 2  $\mu\text{m}$  em cerca de 55% do material; massa volúmica de 400  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Em relação aos pigmentos inorgânicos, utilizou-se um ocre amarelo (Ocre Alvalade) de origem natural, e um ocre vermelho (Vermelho Bayer) de origem sintética. O Ocre Alvalade (OA) é um pigmento mineral natural composto apenas por goetite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ); o Vermelho Bayer (VB) é um pigmento mineral sintético que tem a hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como único constituinte. Os ocres de origem natural possuem elevada capacidade de coloração, mas podem ser pouco homogêneos, dependendo da zona de extracção. Os ocres de origem sintética possuem um elevado grau de pureza, uma maior estabilidade química e térmica, e uma maior uniformidade de cor [18].

- **Composição dos produtos:**

A percentagem de MK adoptada de 25% representa a percentagem da cal que é substituída pelo produto pozolânico; a adopção desta percentagem vem no seguimento de experimentações posteriores (17%) [7] e o seu aumento pretende potenciar uma maior formação de compostos pozolânicos, importantes no incremento das resistências mecânicas. As adições de pigmentos inorgânicos, nas concentrações de 3% e 5%, são obtidas em função da massa da cal e do MK. Nas

caiações pigmentadas, a concentração de pigmento faz-se em relação ao peso da cal, e com valores que normalmente não excedem 5% [19].

A razão sólido:líquido utilizada foi de 1:4, e foi obtida depois de experimentações prévias com diferentes razões sólido:líquido (de 1:1 até 1:6); o produto consolidante quer-se diluído e com um resíduo seco aceitável, de maneira a permitir uma adequada profundidade de penetração [7]. A razão sólido:líquido foi otimizada tendo em conta resíduos secos, alterações cromáticas e reactividade pozolânica, que pode diminuir com o seu aumento.

A terminologia adoptada para os produtos estudados foi:

- *MK25%* - Cal + MK25% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25%+OA3% ou OA5%* - Cal + MK 25% + Ocre Alvalade 3% ou 5% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25%+VB3% ou VB5%* - Cal + MK 25% + Vermelho Bayer 3% ou 5% + H<sub>2</sub>O.

- **Preparação e aplicação dos produtos:**

A preparação dos produtos consolidantes compreende o seguinte procedimento: pesagem e mistura manual dos componentes secos; adição da água destilada; colocação em agitação magnética para homogeneização. A aplicação dos produtos foi feita por nebulização (Fig. 1a) e 1b)), de modo a obter uma distribuição mais homogénea. Realizaram-se dez aplicações consecutivas por provete de argamassa; no caso dos provetes prismáticos os consolidantes são aplicados numa das faces, e no caso das camadas de argamassa aplicadas em tijolos, os consolidantes são aplicados na sua superfície.

Após aplicação dos produtos consolidantes, os vários provetes foram sujeitos a 7 dias de cura com 95% de HR, nomeadamente em sacos de plástico, de modo a tentar favorecer a formação dos compostos pozolânicos; no restante período de cura, os provetes tratados foram mantidos em ambiente controlado com temperatura ambiente média de 20°C e 65% de HR.

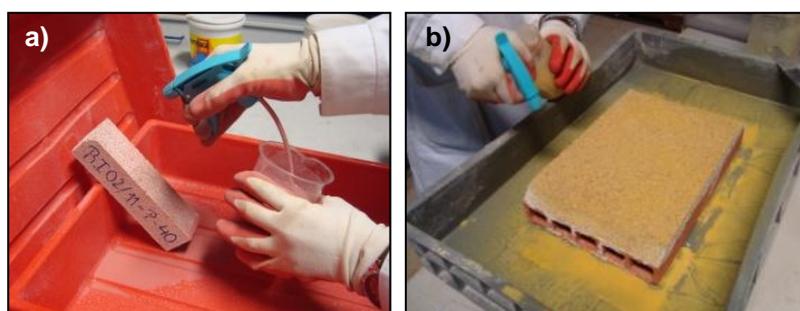


Fig. 1 - Aplicação dos produtos consolidantes por nebulização nos a) provetes prismáticos de argamassa e nos b) provetes de argamassa aplicada nos tijolos

### 2.3 Ensaios realizados

A caracterização dos tratamentos consolidantes foi feita através de uma metodologia de análise que inclui vários ensaios, realizados aos 90 dias após a aplicação dos produtos nos provetes de argamassa.

A nível mecânico, foram realizados ensaios para determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), da resistência à tracção por flexão ( $R_t$ ) e da resistência à compressão ( $R_c$ ). O  $E_d$  foi determinado com recurso a um aparelho de medição da frequência de ressonância longitudinal; o ensaio foi realizado de acordo com a norma NF B10-511 [20]. A  $R_t$  e a  $R_c$  (Fig. 2a)) foram determinadas utilizando uma máquina de ensaios mecânicos Hoytom HM-S, e com base na norma EN 1015-11:1999 [21].

A profundidade de penetração das soluções consolidantes foi observada com recurso a um estereomicroscópio Olympus SZH10.

As alterações de absorção de água após o tratamento consolidante foram verificadas através do ensaio de absorção de água sob baixa pressão, utilizando os tubos de Karsten (Fig. 2b)) [22].

Os incrementos de dureza superficial das argamassas foram avaliados com um durómetro *Shore A*, de acordo com a norma ASTM D2240 (Fig. 2c)) [23].

A durabilidade dos consolidantes é um factor importante na escolha dos produtos a utilizar; este parâmetro foi avaliado com um ensaio de envelhecimento artificial acelerado, onde os provetes foram sujeitos a ciclos de calor-frio e de chuva-frio (Fig. 2d)) [24]. Por fim, as possíveis alterações cromáticas foram avaliadas utilizando a escala cromática NCS (Fig. 2e)).

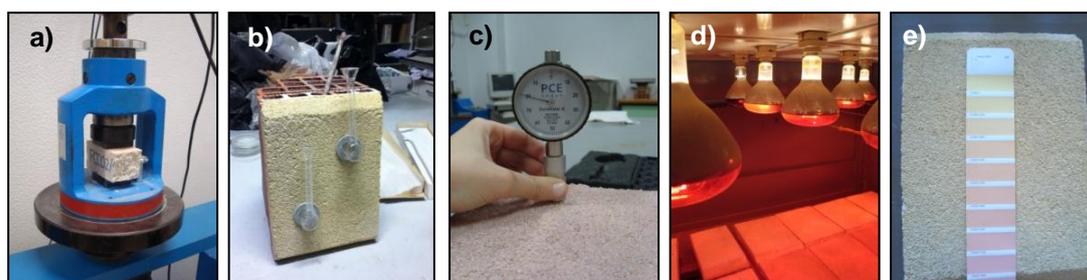


Fig. 2 - Caracterização dos tratamentos consolidantes: a) Resistência à compressão; b) Tubos de Karsten; c) Durómetro; d) Envelhecimento artificial; e) Medição dos índices de cor NCS

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Ensaios mecânicos: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão

A realização dos ensaios mecânicos teve como objectivo avaliar os incrementos das resistências mecânicas, devido à aplicação dos consolidantes. A Tabela 1 reúne os resultados médios obtidos e respectivos desvios padrão e os incrementos percentuais ( $\Delta$ ) das resistências em relação ao caso

não tratado; para determinação de  $E_d$  foram realizadas 6 séries de medidas por cada tratamento; para a  $R_t$  e  $R_c$  foram realizadas respectivamente 3 e 6 medidas por cada tratamento.

De um modo geral as características mecânicas sofreram um incremento com a aplicação dos consolidantes. Em relação ao  $E_d$ , o consolidante MK25%+VB, em ambas as concentrações, confere o maior incremento. O consolidante MK25%+OA apresenta um resultado ligeiramente abaixo da argamassa não tratada na concentração de 3%.

Os tratamentos consolidantes não conferiram uma melhoria da  $R_t$ . Os consolidantes MK25%+VB3% e MK25%+VB5% apresentaram resultados médios abaixo do não tratado, mas com desvios padrão elevados. O consolidante que apresentou melhor  $R_t$  foi o consolidante com pigmento OA, atingindo resultados superiores à argamassa não tratada e ao produto MK25%. A  $R_c$  é superior à referência na totalidade dos tratamentos aplicados. O consolidante com pigmento OA confere o maior incremento de  $R_c$  da argamassa.

De facto, as resistências mecânicas não devem ser alteradas em demasia, de modo a não introduzir tensões no revestimento. O aumento conseguido com os tratamentos consolidantes deve ser moderado e não ultrapassar os 50% [8]; identifica-se apenas um caso -  $E_d = 1320$  MPa com MK25%+VB3% -, que se traduz num aumento de 78%. Em todos os outros casos considera-se que foram obtidos incrementos moderados e adequados, com excepção da  $R_t$ , em que não se verificou aumento.

Tabela 1 - Resultados do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão (valores médios e desvios padrão)

Consolidante	Mód. Elast. Dinâmico		Resist. à tracção por flexão		Resist. à compressão	
	Ed [MPa]	$\Delta$ [%]	Rt [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta$ [%]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta$ [%]
Não tratado	740 ± 152	-	0,53 ± 0,03	-	0,62 ± 0,09	-
MK25%	912 ± 31	+23%	0,50 ± 0,05	-6%	0,80 ± 0,17	+29%
MK25%+OA3%	698 ± 83	-6%	0,60 ± 0,10	+13%	0,95 ± 0,05	+53%
MK25%+OA5%	809 ± 191	+9%	0,53 ± 0,06	0%	0,87 ± 0,11	+40%
MK25%+VB3%	1320 ± 138	+78%	0,45 ± 0,10	-15%	0,73 ± 0,08	+18%
MK25%+VB5%	964 ± 120	+30%	0,48 ± 0,08	-9%	0,80 ± 0,05	+29%

### 3.2 Profundidade de penetração

A profundidade de penetração dos consolidantes pigmentados foi medida com um microscópio óptico Olympus SZH10 e usando o software LabSens. A profundidade de penetração é um dos requisitos mais importantes dos produtos consolidantes, e essencial para o sucesso do tratamento. O consolidante deve atingir a profundidade suficiente para consolidar a espessura degradada do

material [11]. Foi medido um número mínimo de 12 pontos por amostra, e os valores são reportados na Tabela 2. Na Fig. 4a) e 4b) estão exemplos de alguns pontos medidos.

Tabela 2 - Valores médios, mínimos e máximos da profundidade de penetração

Produto Consolidante	Valor médio [mm]	Valor máximo [mm]	Valor mínimo [mm]
MK25% + OA5%	2,1±1,0	5,1	1,2
MK25% + VB5%	3,1±1,1	6,5	1,7

Verificou-se que o consolidante MK25%+VB5% atinge em média uma maior profundidade de penetração que o consolidante MK25%+OA5%, com uma diferença de 1 mm.

A profundidade de penetração atingida pelos produtos consolidantes pode ser influenciada por vários factores: composição e viscosidade do produto consolidante; técnica de aplicação do produto; grau de degradação e composição do material a ser tratado [19].

Com um resíduo seco inferior, os produtos consolidantes MK25%, MK25%+OA3% e MK25%+VB3%, podem atingir uma profundidade de penetração ligeiramente superior; especialmente o consolidante MK25% sem incorporação de pigmento.

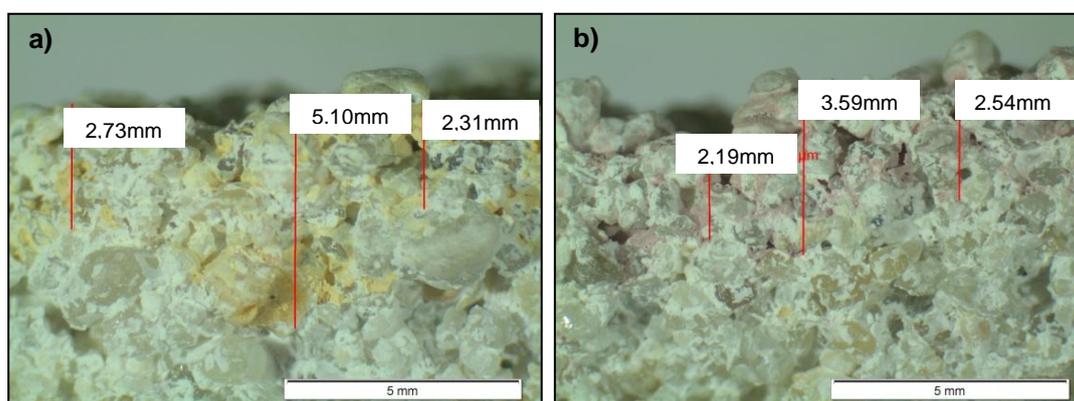


Fig. 3 - Exemplos de pontos medidos da profundidade de penetração: a) MK25%+OA5%; b) MK25%+VB5%

### 3.3 Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten)

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão tem como objectivo verificar a alteração da permeabilidade à água nas argamassas tratadas, por comparação com a argamassa não tratada. Para realização do ensaio são utilizados tubos de Karsten que simulam uma pressão dinâmica de vento equivalente a cerca de 140 km/h [7]. As argamassas ensaiadas foram as argamassas aplicadas sobre tijolos; colocaram-se 2 tubos de Karsten por provete, fixados com mastique. Mediu-se o tempo necessário para a absorção da totalidade de água (4 ml) introduzida nos tubos de Karsten. Foram ensaiados 3 provetes de cada consolidante estudado.

É importante que os tratamentos consolidantes não tornem a argamassa demasiado impermeável, mas reduzam a sua permeabilidade dentro de intervalos razoáveis.

Na Fig. 5 apresentam-se os resultados obtidos. Todos os produtos aplicados provocaram uma diminuição na absorção de água das argamassas, atingindo um valor médio de 7 vezes o tempo de absorção de água da argamassa não tratada. Mesmo assim, considera-se toda a gama de valores obtida adequada, com uma redução razoável da permeabilidade da argamassa. Comparando os produtos pigmentados com o produto não pigmentado, observa-se que ambos os consolidantes pigmentados a 3% atingem um tempo de absorção superior, o que já não acontece com a concentração de 5%.

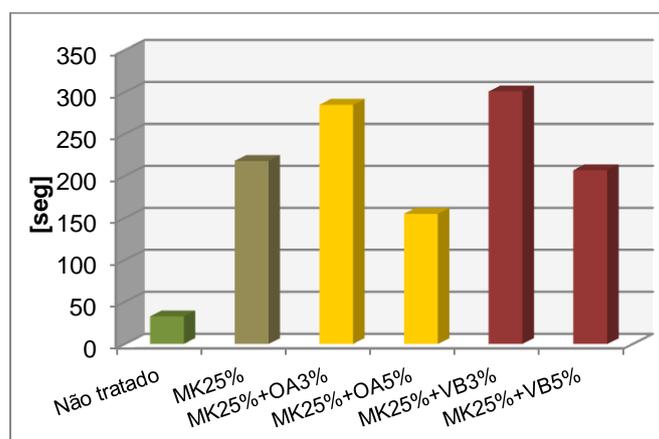


Fig. 4 – Tempo de absorção de água sob baixa pressão das argamassas ensaiadas

### 3.4 Dureza superficial (durómetro Shore A)

A dureza superficial das argamassas pode ser avaliada com um durómetro; este equipamento mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra o material em estudo. Possui escalas Shore A a D consoante o tipo de material (macio a duro), e cujos valores de resistência à penetração variam entre 0 e 100. Neste caso utilizou-se o durómetro Shore A, apropriado para materiais macios, e regularmente utilizado em ensaios em argamassas.

Com este ensaio, pretende-se avaliar o incremento de dureza superficial das argamassas conseguido com a aplicação das várias soluções de consolidação em estudo, por comparação com a referência não tratada. Foram feitas medições em 12 pontos de cada camada de argamassa aplicada sobre tijolos, analisando 3 provetes por cada tratamento. Na Fig. 6 apresentam-se os resultados obtidos e os respectivos incrementos de dureza superficial obtidos com as aplicações de cada produto consolidante.

Nota-se um aumento da dureza superficial das argamassas no caso de todos os tratamentos consolidantes, com um incremento médio de 10%. Comparando com o consolidante MK25%, os resultados médios obtidos são todos bastante próximos e apenas o consolidante pigmentado MK25%+VB5% conseguiu atingir uma maior dureza superficial.

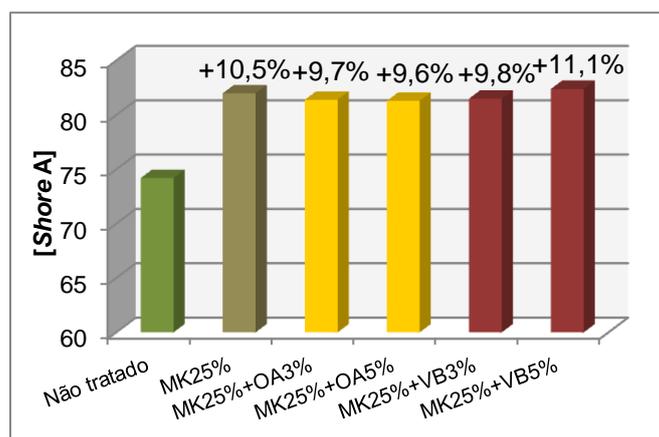


Fig. 5 - Dureza superficial das argamassas ensaiadas

### 3.5 Envelhecimento artificial acelerado

As argamassas aplicadas em tijolos foram sujeitas a ciclos de calor-frio e ciclos de chuva-frio, com o objectivo de avaliar a durabilidade dos tratamentos aplicados, e a variação cromática dos produtos consolidantes quando sujeitos a condições térmicas e higrícas extremas. Os ciclos foram realizados com as seguintes condições:

- *8 Ciclos calor-frio:*
  - Calor a 60°C, simulado com lâmpadas de radiação infra-vermelha (IV), durante 8 horas;
  - Frio a -15°C, simulado numa arca frigorífica, durante 15 horas;
  - Estabilização em ambiente controlado com 20°C e 65% HR, durante 1 hora;
- *8 Ciclos chuva-frio:*
  - Chuva simulada por sistema de aspersão, à temperatura ambiente e durante 8 horas;
  - Frio a -8°C, simulada numa arca frigorífica, durante 15 horas;
  - Estabilização em ambiente controlado com 20°C e 65% HR durante 1 hora.

Todas as argamassas resistiram bem aos ciclos de calor-frio. Os ciclos de chuva-frio foram os que provocaram uma maior degradação, especialmente na argamassa sem qualquer tratamento. Estes ciclos eram espectavelmente agressivos para as argamassas de cal, uma vez que a congelação da água no interior dos poros provoca um aumento do volume e dá origem a tensões no interior da argamassa.

No final dos ciclos de chuva-frio, as argamassa tratadas apresentaram alguma fissuração nas zonas de extremidade e uma reduzida perda de material nessas mesmas áreas. Já a argamassa não tratada apresentou um nível de degradação bastante severo, com uma área de argamassa resistente apenas de 25% da área inicial; a degradação começou com uma ligeira fissuração nas zonas extremas da argamassa, tendo-se posteriormente agravado a perda de coesão e iniciado a desagregação de várias partes da camada de argamassa, que foram escoadas pela chuva simulada.

As figuras seguintes ilustram o estado das argamassas no final do ensaio de envelhecimento (Fig.6 e Fig.7).

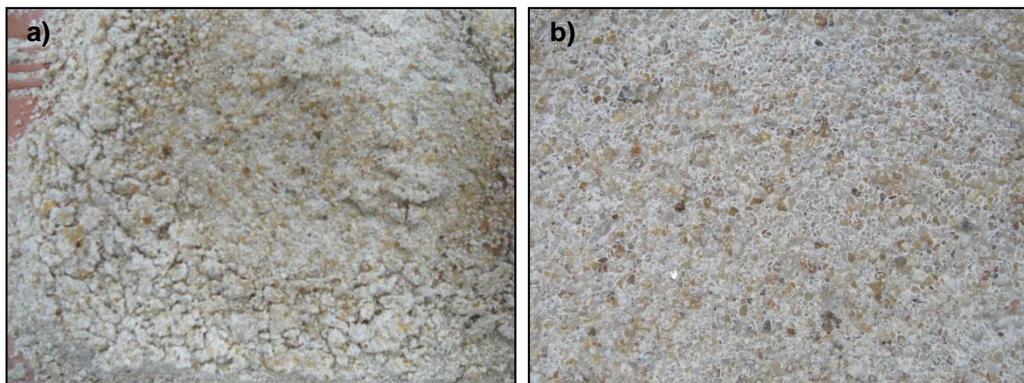


Fig. 6 - Argamassas no final do ensaio de envelhecimento: a) Argamassa não tratada; b) Argamassa com MK25%

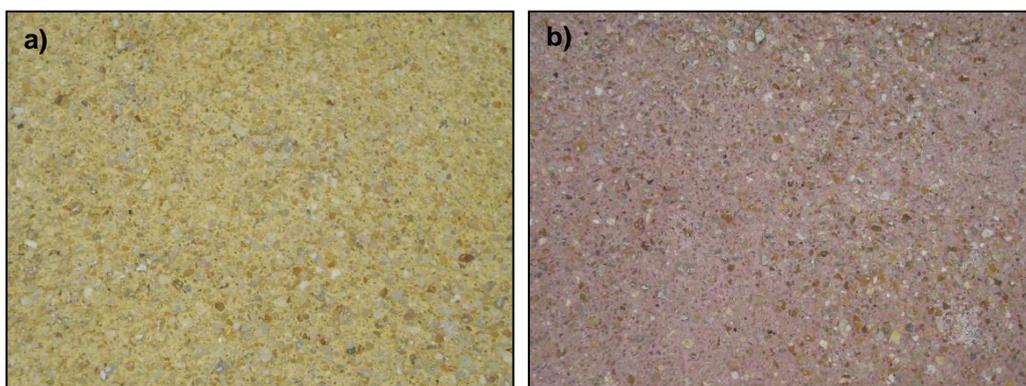


Fig. 7 - Argamassas no final do ensaio de envelhecimento: a) Argamassa com MK25%+OA5%; b) Argamassa com MK25%+VB5%

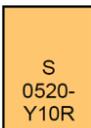
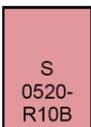
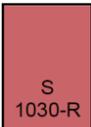
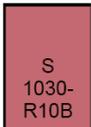
Em relação às variações cromáticas, apresenta-se na Tabela 3 a evolução dos índices da escala NCS, identificados antes, durante e no final do ensaio de envelhecimento artificial acelerado.

Comparando com os índices de cor identificados antes do início do ensaio, os consolidantes pigmentados com uma concentração de pigmento de 5% apresentaram a maior variação cromática. O consolidante MK25%, sem adição de pigmentos, não apresentou qualquer alteração a nível cromático ao longo de todo o ensaio.

Os consolidantes com pigmento VB, tiveram alteração cromática apenas durante os ciclos de calor-frio; já os consolidantes com pigmento OA, tiveram alterações cromáticas ao longo de todo o ensaio de envelhecimento. O pigmento VB é um pigmento inorgânico sintético pelo que, comparativamente com os pigmentos inorgânicos naturais, apresenta uma maior estabilidade a nível cromático quando sujeito a gradientes térmicos.

Na exposição aos ciclos de chuva-frio, não houve qualquer “lavagem” dos pigmentos, o que é indicativo de que se encontram bem fixados nos produtos consolidantes.

Tabela 3 - Evolução cromática ao longo do ensaio de envelhecimento artificial acelerado (valores NCS)

Consolidante	Antes	Após ciclos de calor-frio	Após ciclos de chuva-frio
Referência			
MK25%			
MK25% + OA3%	 	 	
MK25% + OA5%	 	 	 
MK25% + VB3%		 	 
MK25% + VB5%	 	 	 

#### 4. CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu caracterizar o efeito da adição de pigmentos em produtos consolidantes pozolânicos, aplicados em argamassas de cal aérea com perda de coesão, e a viabilidade da reintegração cromática. Os produtos consolidantes estudados são constituídos à base de cal, metacaulino, água e pigmentos.

Os vários ensaios realizados permitiram aferir acerca do incremento das resistências mecânicas, da profundidade de penetração, do incremento da dureza superficial, da alteração da permeabilidade à água, e da durabilidade e variação cromática das argamassas tratadas. Com base na campanha experimental, foi possível verificar que:

A adição dos pigmentos pode influenciar as resistências mecânicas, com alguns resultados abaixo dos resultados do consolidante sem incorporação de pigmentos mas outros superiores; no caso da absorção de água verifica-se uma redução da permeabilidade dentro de uma gama de valores adequados, com ou sem pigmentos; na dureza superficial observa-se um aumento após consolidação, existindo pequenas diferenças, dos resultados dos produtos pigmentados em relação ao consolidante sem incorporação de pigmentos;

Em termos cromáticos, todos os tratamentos resistiram bem às variações higro-térmicas a que foram expostos; a menor variação cromática foi observada nos produtos consolidantes pigmentados com VB;

Os tratamentos consolidantes, com e sem pigmentos, mostraram melhorar a resistência à degradação mecânica por variações termo-higrométricas, reduzindo a tendência para a fissuração e para a desagregação;

Em relação ao pigmento natural (OA), o pigmento sintético (VB) apresentou uma maior estabilidade cromática, consistente com módulo de elasticidade e dureza superficial superiores, e uma redução da permeabilidade também superior; no entanto, a nível das resistências à tracção por flexão e à compressão foi o que levou aos menores incrementos, ao contrário dos casos com pigmento natural;

É certo que a eficácia dos tratamentos de consolidação pode ser ligeiramente afectada devido à incorporação de pigmentos. No entanto, as variações não foram consistentemente negativas, observando-se também efeitos positivos nalgumas características. O facto de se conseguir reintegrar cromaticamente as partes do revestimento intervencionadas ao mesmo tempo que se aplica o tratamento de consolidação, representa uma notável vantagem que pode compensar a eventual ligeira perda de eficácia na consolidação.

Todos os produtos consolidantes aplicados contribuíram para restituir a coesão entre as partículas das argamassas. As alterações introduzidas nas características mecânicas e físicas das argamassas tratadas foram alterações moderadas e adequadas, comprovando a compatibilidade físico-química dos produtos consolidantes estudados.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Veiga, J. Aguiar, A. Santos Silva e F. Carvalho, “Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos”, Lisboa: LNEC, 2004, Vol. 9 Coleção Edifícios.
- [2] J. Elsen, “Microscopy of historic mortars – a review”, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp.1416-1424, (2006).
- [3] F. Pinho, “Paredes de edifícios antigos em Portugal”, Lisboa: LNEC, 2008 (2ª edição), Vol. 8 Coleção Edifícios.
- [4] M. Tavares, R. Veiga e A. Fragata, “Conservation of old renderings – the consolidation of rendering with loss of cohesion”, In 1<sup>st</sup> Historical Mortars Conference, HMC08, Lisbon, 2008.

- [5] A. C. Magalhães, “Patologia de rebocos antigos”, Lisboa: LNEC, 2002, Cadernos de Edifícios n.º2.
- [6] R. Veiga, “Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais”, Lisboa: LNEC, 2011 (2ª edição).
- [7] G. Borsoi, R. Veiga e A. Santos Silva, “Consolidação de argamassas históricas de revestimentos com produtos compatíveis: avaliação da eficácia”, In 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, APFAC, Coimbra, 2012.
- [8] L. Toniolo, A. Paradisi, S. Goidanich e G. Pennati, “Mechanical behavior of lime based mortars after surface consolidation”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 1553-1559, (2011).
- [9] R. Veiga, “Conservação de revestimentos de alvenarias históricas. Tratamento e consolidação *versus* renovação”, 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios, PATORREB, Santiago de Compostela, 2012.
- [10] E. Hansen, E. Doehne, J. Fidler, J. Larson, B. Martin, M. Matteini, C. Rodriguez-Navarro, E. S. Pardo, C. Price, A. De Tagle, J. M. Teutonico e N. Weiss, “A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials”, *Reviews in Conservation*, Vol. 4, pp.13-25, (2003).
- [11] M. G. Casal, “Conservação de pintura mural – estudo e consolidação de argamassas de cal aérea e areia com falta de coesão”, Lisboa: LNEC, 2001.
- [12] D. Hradil, T. Grygar, J. Hradilová e P. Bezdicka, “Clay and iron oxide pigments in the history of painting”, *Applied Clay Science*, Vol. 22, pp. 223-236, (2003).
- [13] M. Gil, M. L. Carvalho, A. Seruya, A. Candeias, A. E. Mirão e I. Queralt, “Yellow and red ochre pigments from southern Portugal: elemental composition and characterization by WDXRF and XRD”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 580, pp. 728-731, (2007).
- [14] P. Faria, M. Tavares, M. Menezes, R. Veiga e G. Margalha, “Traditional Portuguese techniques for maintenance of historic renders”, In 2<sup>nd</sup> Historical Mortars Conference, HMC10, Prague, 2010.
- [15] A. de Sousa Coutinho, “Fabrico e propriedades do betão”, Lisboa: LNEC, 2006 (4ª edição), Volume I.
- [16] A. Velosa, “Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas”, Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Aveiro: UA, 2006.
- [17] R. Siddique e J. Klaus, “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review”, *Applied Clay Science*, Vol. 43, pp. 392-400, (2009).
- [18] L. Rocha-Gomes e C. Alvarez, “Análise crítica dos aspectos ambientais no uso de pigmentos nas argamassas de rejuntamento do Espírito Santo (Brasil): diagnóstico e recomendações”, In 2º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, FIL, Lisboa, 2007.
- [19] M. Tavares, “A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Uma metodologia de estudo e reparação”, Tese de doutoramento apresentada à Universidade Técnica de Lisboa em 2009. Lisboa: LNEC, 2011.

- [20] NF B10-511, "Mésure du module d'élasticité dynamique", France: AFNOR, 1975.
- [21] EN 1015-11:1999, "Methods of test for mortar for masonry, Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar", Brussels: CEN, 1999.
- [22] FE Pa 39, "Ensaio de absorção de água sob baixa pressão", Lisboa: LNEC/NCC, 2002.
- [23] ASTM D2240-00, "Standard test method for rubber property – durometer hardness", United States: ASTM Standards, 2000.
- [24] EN 1015-21:2002, "Methods of test for mortar for masonry, Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrate", Brussels: CEN, 2002.