



**Gonçalo de Abreu Lucas Lino**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Caracterização *in situ* de rebocos com base  
em cal e metacaulino aplicados em muretes  
experimentais**

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

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Arguente: Prof. Doutora Ana Luísa Velosa

Vogais: Doutora Maria do Rosário Veiga

Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013





**Gonçalo de Abreu Lucas Lino**  
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Caracterização *in situ* de rebocos com base  
em cal e metacaulino aplicados em muretes  
experimentais**

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

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Arguente: Prof. Doutora Ana Luísa Velosa

Vogais: Doutora Maria do Rosário Veiga

Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



## **Caracterização in situ de rebocos com base em cal e metacaulino aplicados em muretes experimentais**

'Copyright" Gonçalo Abreu Lucas Lino, 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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Livre não sou, que nem a própria vida  
Mo consente.  
Mas a minha aguerrida  
Teimosia  
É quebrar dia a dia  
Um grilhão da corrente.*

Miguel Torga

*Aos meus pais*



# AGRADECIMENTOS

Este trabalho corresponde ao final de um longo percurso, que contou com o apoio de várias pessoas, a quem não posso deixar de prestar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, à Doutora Maria do Rosário Veiga, orientadora científica desta dissertação, pela total disponibilidade e partilha de conhecimentos, que certamente facilitaram o trabalho. Igualmente à minha co-orientadora, a Doutora Paulina Faria, pela sugestão e incentivo em aceitar este tema de dissertação, e pela disponibilidade que sempre demonstrou.

Ao Bento Sabala e ao Sandro Botas, pelo apoio e conselhos prestados durante a minha permanência no LNEC.

À Secil, à Lusical e à Imerys, pela disponibilização da cal hidráulica, cal aérea e metacaulino, respetivamente.

Aos meus pais, pelo carinho e pelo apoio incondicional, sem o qual este percurso não teria sido possível.

À minha avó, tios, primos e sobrinhos, mas em especial à minha irmã Sofia, que sempre me apoiou.

À Cátia, que foi sempre um exemplo para mim, e cujos conselhos, motivação, carinho e boa disposição foram determinantes, não só neste trabalho, mas também fora do âmbito académico.

Aos meus amigos e colegas, Tiago Maurício, Márcio Alves, João Valério, João Nabais, Diogo Resende, Tiago Madeira e Lara Neves, que me acompanharam ao longo de todo o percurso académico, e cuja amizade irá perdurar.

Finalmente, ao Zé, ao Hugo, ao Diogo, ao Miguel, à Patrícia e à Joana, amigos de longa data, com quem sempre pude contar.



## RESUMO

É do conhecimento geral que a construção nova tem sofrido uma quebra acentuada, algo que se deverá prolongar nos próximos anos. Este fator torna premente uma mudança de foco, para a conservação do património edificado, que se assume de grande importância. Os edifícios antigos, particularmente os construídos antes da massificação do uso do betão armado, possuem características distintas dos construídos genericamente a partir dos anos 60. A utilização nesses edifícios de paredes de alvenaria de pedra e argamassas de cal, obriga a que se abordem atualmente as operações de conservação considerando a importância de utilizar materiais compatíveis com os usados nessa altura. Neste sentido, as argamassas de cal constituem uma solução viável para a conservação ou substituição de rebocos de edifícios antigos, sendo fundamental estudar as suas características, de modo a aplicar a solução que melhor se adequa a cada caso de estudo.

Tendo em conta estes fatores, foram realizados estudos de caracterização de rebocos constituídos por argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural, utilizando metacaulino em substituição parcial da massa de ligante. Foram aplicadas estas argamassas em muretes experimentais, em ambiente exterior, para caracterização *in situ* do comportamento destes rebocos. Este estudo pretende contribuir para avaliar a influência do metacaulino nas argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural, e ainda para tentar estabelecer correlações entre as tendências demonstradas nos ensaios *in situ* efetuados sobre os rebocos, aplicados num suporte em condições de exposição natural, e em ensaios laboratoriais sobre provetes prismáticos produzidos com argamassas de formulação semelhante.

Face aos resultados registados, pode concluir-se que a substituição parcial da massa de cal por metacaulino contribui para a melhoria das características mecânicas e de comportamento à água das argamassas de cal, tornando-as adequadas para a utilização como rebocos de edifícios antigos. Foi igualmente possível demonstrar que as tendências de resistência superficial registadas neste trabalho, com a evolução do traço e a introdução de MK, são semelhantes às tendências observadas por outros autores em ensaios de resistência à tração e à compressão realizados sobre provetes prismáticos, o que permite dizer que os ensaios laboratoriais sobre este tipo de provetes indicam características mecânicas bastante aproximadas das características reais das argamassas aplicadas em contexto real de obra.

**Termos chave:** Cal aérea hidratada, cal hidráulica natural, metacaulino, argamassa, conservação, caracterização *in situ*, murete experimental



## ABSTRACT

It is common knowledge that new construction has been suffering a great breach, a situation that should continue in the following years. This situation causes an urgent need to change the focus to the conservation of old buildings, which is of great importance. Old buildings, particularly those built before the dissemination of the use of concrete, have different characteristics from those built generically after the 60's. The use of stone masonry walls and lime mortars, in these buildings, requires that the approach regarding its conservation consider the importance of using materials compatible with the ones used in that period. Therefore, lime mortars are a viable solution for the conservation or substitution of renders from old buildings, being important to study its characteristics, in order to apply the solution that suits better in each case study.

Taking these needs in concern, studies were made to evaluate renders consisting of aerial and natural hydraulic lime mortars, using metakaolin as a partial replacement of the binder mass. These mortars were applied on experimental wallettes, on outdoor environment, for *in situ* characterization of the behavior of these renders. This study is aimed at helping to evaluate the influence of metakaolin in lime mortars, and also to try to establish correlations between the tendencies demonstrated in *in situ* tests carried out on the renders, applied in a support in natural exposure conditions, and laboratory tests carried out on prismatic specimens, produced with mortars with similar formulations.

Analyzing the results, it can be concluded that the metakaolin, in substitution of the lime mass, contributes to the improvement of the mechanical properties of lime mortars, as well as its behavior to water, making them suitable for use as renders for ancient buildings. It was also possible to demonstrate that the surface resistance tendencies observed in this work, with the evolution of the binder ratio and the introduction of MK, are similar to the tendencies observed by other authors in tensile and compressive strength tests carried out on prismatic specimens, which leads to the conclusion that laboratory tests carried out on this kind of specimen indicate mechanical characteristics quite approximate to the actual characteristics of mortars applied in real work conditions.

**Keywords:** Air hydrated lime, natural hydraulic lime, metakaolin, mortar, conservation, *in situ* characterization, experimental wallet



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contexto .....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
<b>2. Estado do Conhecimento</b> .....	<b>5</b>
2.1. Revestimentos de paredes em edifícios antigos .....	5
2.2. Requisitos das argamassas de substituição .....	6
2.3. Matérias-Primas das argamassas.....	7
2.3.1. Cal Aérea .....	7
2.3.2. Cal Hidráulica Natural .....	8
2.3.3. A norma NP EN 459-1:2011 .....	9
2.3.4. Componentes pozolânicos.....	10
2.3.4.1 Metacaulino .....	11
2.3.5. Agregados .....	11
2.4. Características das argamassas.....	12
2.4.1. Argamassas de cal aérea e metacaulino.....	12
2.4.2. Argamassas de cal hidráulica e metacaulino.....	15
2.4.3. Argamassas expostas a envelhecimento natural - Aplicações e ensaios <i>in situ</i> .....	18
<b>3. Campanha experimental</b> .....	<b>31</b>
3.1. Planeamento da campanha experimental.....	31
3.2. Materiais utilizados .....	32
3.2.1. Cal aérea .....	32
3.2.2. Cal hidráulica natural .....	33
3.2.3. Metacaulino .....	33
3.2.4. Agregados .....	34
3.3. Caracterização efetuada das matérias-primas – Baridade.....	34
3.4. Produção das argamassas .....	36
3.5. Caracterização das argamassas no estado fresco .....	38
3.5.1. Consistência por espalhamento.....	38
3.6. Aplicações nos muretes experimentais.....	39
3.7. Ensaio de caracterização dos rebocos de argamassas endurecidas .....	42
3.7.1. Organização dos ensaios.....	42
3.7.2. Análise visual dos muretes após aplicação .....	43
3.7.3. Ensaio de determinação da resistência superficial com esclerómetro pendular .....	44
3.7.4. Ensaio de determinação da dureza superficial com durómetro.....	46

3.7.5. Ensaio de determinação da resistência superficial com choque de esfera.....	48
3.7.6. Ensaio de penetração controlada .....	50
3.7.7. Ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons .....	52
3.7.8. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão com Tubos de Karsten .....	56
3.7.9. Porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	61
3.7.10. Identificação de sais solúveis com fitas colorimétricas .....	64
<b>4. Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>67</b>
4.1. Quadros Síntese .....	67
4.2. Avaliação de tendências .....	69
4.2.1. Características mecânicas .....	69
4.2.1.1 Entre composições .....	70
4.2.1.2 Entre idades .....	73
4.2.2. Comportamento à ação da água .....	74
4.2.2.1 Entre composições .....	75
4.2.2.2 Entre idades .....	76
4.3. Comparação com resultados de outros autores .....	77
4.3.1. Argamassas com exposição natural .....	77
4.3.1.1 Características mecânicas .....	77
4.3.1.2 Comportamento à água.....	78
4.3.2. Ensaio realizado sobre rebocos aplicados em tijolos, em condições laboratoriais.....	78
4.3.2.1 Características mecânicas .....	79
4.3.2.2 Comportamento à água.....	80
4.3.3. Ensaio realizado sobre provetes prismáticos, em condições laboratoriais.....	81
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>85</b>
5.1. Conclusões finais .....	85
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	86
<b>Bibliografia .....</b>	<b>87</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>95</b>
Anexo I – Ficha técnica da cal aérea CL-90S Lusical H100 da Lusical .....	97
Anexo II – Ficha técnica da cal hidráulica natural NHL 3,5, da Secil .....	99
Anexo III – Ficha técnica do metacaulino Argical M-1200S da Imerys .....	101

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Ciclo da Cal .....	8
Fig. 2.2 – Resistência à tração das argamassas, aos 28 e 90 dias.....	13
Fig. 2.3 – Resistência à compressão das argamassas, aos 28 e 90 dias .....	14
Fig. 2.4 – Módulo de elasticidade das argamassas, aos 28 e 90 dias .....	14
Fig. 2.5 – Coeficiente de capilaridade das argamassas, aos 28 e 90 dias .....	14
Fig. 2.6 – Resistências mecânicas das argamassas a diferentes tempos de cura .....	15
Fig. 2.7 – Resistências mecânicas das argamassas .....	16
Fig. 2.8 – Resultados de ensaios mecânicos aos 28 dias .....	17
Fig. 2.9 – Resultados de porosidade aberta aos 28 dias .....	17
Fig. 2.10 – Fachada do forte (a) Painéis experimentais (b) .....	20
Fig. 2.11 – Vista do forte antes da intervenção (a) painel experimental (b) .....	22
Fig. 2.12 – Ensaio de permeabilidade sob baixa pressão (a) ensaio com esclerómetro pendular (b) .....	24
Fig. 2.13 – Painéis experimentais da Rua Contra Almirante Jaime Afreixo (a) e Largo do Mercado (b), 90 dias após a aplicação .....	25
Fig. 2.14 – Aspeto dos muretes da EENRevPa .....	28
Fig. 2.15 – Ensaio de ultra-sons (a) e de esclerómetro Schmidt tipo L (b) nos muretes da EENRevPa .....	29
Fig. 2.16 – Argamassas de cal aérea aplicadas em murete de taipa na FCT-UNL.....	29
Fig. 3.1 – Cal hidráulica natural utilizada nos trabalhos.....	33
Fig. 3.2 – Curva granulométrica de cada uma das areias e da mistura .....	34
Fig. 3.3 – Aparelho utilizado no ensaio de baridade (a) queda do material no recipiente cilíndrico (b) .....	35
Fig. 3.4 – Misturadora (a) final do processo de amassadura (b) .....	36
Fig. 3.5 – Betoneira de eixo vertical .....	37
Fig. 3.6 – Mesa de espalhamento com molde troncocónico (a) argamassa espalhada (b) medição do diâmetro de espalhamento (c) .....	38
Fig. 3.7 – Execução dos salpiscos .....	39
Fig. 3.8 – Registos de temperatura, até 15 dias após a aplicação de cada reboco .....	40
Fig. 3.9 – Registos de humidade relativa, até 15 dias após a aplicação de cada reboco .....	41
Fig. 3.10 – Detalhe das aplicações dos rebocos nos muretes experimentais .....	42
Fig. 3.11 – Pormenor da textura da superfície (a) pormenor da cor de um painel de cal aérea (b) manchas de humidade nos painéis (c e d) .....	43
Fig. 3.12 – Esquema da escolha dos pontos de ensaio (a) ensaio com esclerómetro tipo PM (b) .....	44
Fig. 3.13 – Dureza superficial (esclerómetro de pêndulo) das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias, e gamas de dureza de argamassas .....	45

Fig. 3.14 – Esquema da escolha dos pontos de ensaio (a) ensaio com durómetro Shore A (b) .....	47
Fig. 3.15 – Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias .....	48
Fig. 3.16 – Esquema do aparelho de <i>Martinet-Baronnie</i> e do ensaio do choque da esfera.....	49
Fig. 3.17 – Início do ensaio (a) marcação do diâmetro da massa (b) medição do diâmetro da massa (c).....	49
Fig. 3.18 – Diâmetro da massa obtido no ensaio do choque de esfera.....	50
Fig. 3.19 – Acessórios do ensaio (a) embate do corpo no prego (b) final do ensaio (c) .....	51
Fig. 3.20 – Profundidades de penetração obtidas no ensaio de penetração controlada.....	52
Fig. 3.21 – Fixação das escalas graduadas (a) aparelho de ensaio (b) realização do ensaio (c).....	53
Fig. 3.22 – Velocidade dos ultrassons das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias .....	55
Fig. 3.23 – Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons .....	56
Fig. 3.24 – Fixação do tubo ao revestimento (a) preenchimento do tubo com água (b) ensaio em curso (c) final do ensaio (d) .....	57
Fig. 3.25 – Tempo necessário para absorver 4 ml de água sob baixa pressão, aos 90 e 180 dias .....	60
Fig. 3.26 – Coeficiente de absorção de 4 ml de água, aos 28, 90 e 180 dias .....	61
Fig. 3.27 – Murete com amostra retirada (a) amostras dos painéis de cal aérea (b) .....	62
Fig. 3.28 – Aspeto geral do equipamento (a) provetes imersos em água à pressão ambiente (b) pesagem hidrostática (c) .....	63
Fig. 3.29 – Valores de porosidade aberta aos 180 dias.....	64
Fig. 3.30 – Humedecimento da superfície com água destilada (a) fita colorimétrica em contacto com a superfície (b) comparação do resultado com a escala da embalagem (c) e (d).....	65
Fig. 4.1 – Resistência superficial com esclerómetro e durómetro, aos 180 dias.....	70
Fig. 4.2 – Resistência superficial com choque de esfera, penetração controlada e esclerómetro, aos 180 dias.....	71
Fig. 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistência superficial com choque de esfera, aos 180 dias .....	71
Fig. 4.4 – Coeficiente de absorção do tempo para absorver 4 ml e porosidade aberta .....	74

# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características físicas e mecânicas de argamassas antigas .....	6
Quadro 2.2 – Requisitos dos rebocos a usar em edifícios antigos .....	7
Quadro 2.3 – Tipos de cal hidráulica natural.....	9
Quadro 2.4 – Tipo de cais de construção, conforme a norma NP EN 459-1:2011.....	9
Quadro 2.5 – Exemplos de ensaios <i>in situ</i> .....	19
Quadro 2.6 – Relação entre ensaios <i>in situ</i> e algumas propriedades das argamassas.....	19
Quadro 2.7 – Composição dos painéis experimentais do Forte dos Oitavos .....	21
Quadro 2.8 – Resultados dos ensaios de permeabilidade sob baixa pressão .....	21
Quadro 2.9 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas, aos 42 dias .....	21
Quadro 2.10 – Resultados dos ensaios de choque da esfera e de penetração controlada, aos 42 e aos 98 dias.....	22
Quadro 2.11 – Composição dos painéis experimentais do forte de Sta. Marta.....	23
Quadro 2.12 – Composição dos painéis experimentais do forte de Sta. Marta (continuação).....	23
Quadro 2.13 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão (valores médios) .....	24
Quadro 2.14 – Resultados dos ensaios com durómetro e esclerómetro pendular (valores médios) ...	24
Quadro 2.15 – Resultados dos ensaios de choque da esfera e de penetração controlada (valores médios) .....	25
Quadro 2.16 – Composição dos painéis experimentais do centro histórico de Palmela .....	26
Quadro 2.17 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias (valores médios).....	26
Quadro 2.18 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias (valores médios) .....	26
Quadro 2.19 – Resultados do ensaio de choque de esfera e penetração controlada dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias .....	27
Quadro 2.20 – Resultados do ensaio de choque de esfera e penetração controlada dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias .....	27
Quadro 2.21 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias .....	27
Quadro 2.22 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias .....	27
Quadro 2.23 – Composição dos muretes do EENRevPa .....	28
Quadro 2.24 – Resumo dos resultados de ensaios mecânicos realizados nos muretes .....	29
Quadro 2.25 – Resumo dos resultados de ensaios realizados no murete, aos 90 dias (valores médios).....	30
Quadro 3.1 – Representação esquemática das composições utilizadas nos muretes experimentais ..	32

Quadro 3.2 – Composição química da cal aérea, em % de massa.....	33
Quadro 3.3 – Composição química da cal hidráulica natural, em % de massa.....	33
Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino, em % de massa .....	34
Quadro 3.5 – Baridade dos constituintes das argamassas.....	36
Quadro 3.6 – Quantidades de amassadura na cuba da misturadora .....	37
Quadro 3.7 – Quantidades de amassadura na betoneira de eixo vertical .....	37
Quadro 3.8 – Traços volumétricos e ponderais, razões água/ligante e os valores de espalhamento médio das argamassas .....	39
Quadro 3.9 – Registos de temperatura e humidade relativa, até 15 dias após a aplicação de cada reboco .....	40
Quadro 3.10 – Valores médios e desvios-padrão da dureza superficial obtida com esclerómetro, em escala de Vickers, aos 28, 90 e 180 dias.....	45
Quadro 3.11 – Indicador de qualidade em função do índice esclerométrico .....	46
Quadro 3.12 – Valores médios e desvios-padrão da dureza superficial obtida com durómetro, em graus Shore A, aos 28, 90 e 180 dias .....	47
Quadro 3.13 – Valores médios dos resultados do ensaio com choque de esfera aos 180 dias .....	50
Quadro 3.14 – Valores médios dos resultados do ensaio de penetração controlada aos 180 dias .....	52
Quadro 3.15 – Valores médios e desvios-padrão da velocidade de propagação de ultrassons, aos 28, 90 e 180 dias .....	54
Quadro 3.16 – Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons .....	55
Quadro 3.17 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal aérea, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios) .....	58
Quadro 3.18 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal aérea, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios) (continuação) .....	58
Quadro 3.19 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal hidráulica, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios) .....	59
Quadro 3.20 – Tempo médio de absorção de 4 ml de água sob baixa pressão, aos 28, 90 e 180 dias.....	59
Quadro 3.21 – Coeficiente de absorção sob baixa pressão de 4 ml de água, aos 28, 90 e 180 dias.....	60
Quadro 3.22 – Valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente das amostras retiradas dos muretes.....	63
Quadro 3.23 – Resultados do ensaio de identificação de sais com fitas colorimétricas .....	65
Quadro 4.1 – Valores de resistência superficial por esclerómetro e durómetro, aos 28, 90 e 180 dias.....	67
Quadro 4.2 – Valores de choque de esfera e penetração controlada, aos 180 dias.....	67
Quadro 4.3 – Valores de velocidade de propagação de ultrassons, aos 28, 90 e 180 dias e estimativa do módulo de elasticidade dinâmico, aos 180 dias .....	68

Quadro 4.4 – Valores de porosidade aberta, massa volúmica aparente e identificação de sais com fitas colorimétricas .....	68
Quadro 4.5 – Resultados do ensaio dos tubos de Karsten, aos 28, 90 e 180 dias .....	69
Quadro 4.6 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerómetro, durómetro e ultrassons, aos 28 dias .....	72
Quadro 4.7 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerómetro, durómetro e ultrassons, aos 90 dias .....	72
Quadro 4.8 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerómetro, durómetro e ultrassons, aos 180 dias .....	72
Quadro 4.9 – Análise comparativa das propriedades da cal hidráulica natural em relação à cal aérea, por esclerómetro, durómetro, choque de esfera, penetração controlada, ultrassons, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade aberta, aos 180 dias .....	73
Quadro 4.10 – Evolução com a idade do comportamento mecânico das argamassas, por esclerómetro, durómetro e ultrassons .....	73
Quadro 4.11 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 28 dias .....	75
Quadro 4.12 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 90 dias .....	75
Quadro 4.13 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 180 dias .....	76
Quadro 4.14 – Evolução com a idade do comportamento das argamassas à ação da água .....	76
Quadro 4.15 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores .....	77
Quadro 4.16 – Comparação entre o comportamento à água das argamassas estudadas neste trabalho, aos 90 dias, e as argamassas estudadas por outros autores .....	78
Quadro 4.17 – Valores médios dos resultados obtidos por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias .....	79
Quadro 4.18 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias .....	79
Quadro 4.19 – Comparação entre o comportamento à água das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias .....	80
Quadro 4.20 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos .....	81
Quadro 4.21 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos .....	81
Quadro 4.22 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos .....	81
Quadro 4.23 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos .....	81
Quadro 4.24 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos .....	82



# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

## Simbologia de Entidades:

**ASTM** – American Society for Testing and Materials  
**CEN** – Comité Européen de Normalisation  
**EENRevPa** – Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Parede  
**EN** – European Norm  
**FCT-UNL** – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
**INE** – Instituto Nacional de Estatística  
**IPQ** – Instituto Português da Qualidade  
**LERevPa** - Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes  
**LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
**NP** – Norma Portuguesa  
**NRI** – Núcleo de Revestimentos e Isolamentos  
**RILEM** – Réunion Internationale de Laboratoires d'Essais et Materiaux

## Simbologia de Materiais:

**CL** – Cal aérea cálcica  
**NHL** – Cal hidráulica natural  
**MK** – Metacaulino

## Simbologia de Ensaios:

**DP** – Desvio padrão  
**DS** – Dureza superficial  
**E<sub>d</sub>** – Módulo de elasticidade dinâmico  
**HR** – Humidade Relativa  
**MV<sub>ap</sub>** – Massa volúmica aparente  
**P<sub>ab</sub>** – Porosidade aberta  
**R<sub>c</sub>** – Resistência à compressão  
**R<sub>t</sub>** – Resistência à tração por flexão  
**V<sub>us</sub>** – Velocidade de propagação de ultrassons

## Simbologia das argamassas utilizadas:

**CL\_1.2** – Argamassa de cal aérea, com traço volumétrico 1:2 e 0% de metacaulino  
**CL\_1.2\_30MK** – Argamassa de cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:2 e com 30% de massa de cal substituída por metacaulino  
**CL\_1.2,5\_30MK** – Argamassa de cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:2,5 e 30% de massa de cal substituída por metacaulino  
**CL\_1.3** – Argamassa de cal aérea, com traço volumétrico 1:3 e 0% de metacaulino  
**CL\_1.3\_30MK** – Argamassa de cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 30% de massa de cal substituída por metacaulino  
**NHL3,5\_1.3** – Argamassa de cal hidráulica natural NHL3,5, com traço volumétrico 1:3 e 0% de metacaulino  
**NHL3,5\_1.3\_5MK** – Argamassa de cal hidráulica natural NHL3,5, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 5% de massa de cal substituída por metacaulino  
**NHL3,5\_1.3\_10MK** – Argamassa de cal hidráulica natural NHL3,5, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 10% de massa de cal substituída por metacaulino



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contexto

*“As argamassas fazem parte integrante da parede e têm que ter composição e características compatíveis com o tipo de alvenaria e com as argamassas pré-existentes, o grau de exposição às ações climáticas e ambientais e as funções que desempenham no elemento construtivo. É necessário analisar a parede como um todo e considerar as argamassas nesse contexto. Em qualquer intervenção na alvenaria é essencial ter presente o funcionamento global da parede e usar materiais e técnicas que preservem esse funcionamento.”* (Veiga, 2012).

O atual contexto económico na Europa, e mais concretamente em Portugal, forçou o abrandamento da construção nova, sendo esta cada vez mais esporádica. Esta casualidade torna ainda mais premente um olhar atento e prioritário sobre os edifícios antigos, que no caso português representam uma percentagem significativa do património edificado. Estima-se aliás que existirão no território nacional cerca de 900 000 edifícios anteriores a 1960, sendo que destes, cerca de 730 000 serão anteriores à adoção de estrutura de betão armado (INE, 2012). Estes edifícios apresentam características distintivas no que diz respeito aos revestimentos exteriores de parede, uma vez que os rebocos eram constituídos maioritariamente por argamassas de cal aérea.

Importa salientar a importância destes rebocos no comportamento dos edifícios, uma vez que desempenham funções de proteção contra os agentes ambientais e climáticos, principalmente a resistência à penetração da água, para além de contribuírem para o reforço da resistência mecânica das alvenarias (Veiga, 2003), aspeto importante quando se fala em paredes de edifícios antigos, as quais apresentavam, em geral, funções estruturais. Pelo facto de estarem expostos às ações ambientais, estes revestimentos são naturalmente mais suscetíveis à degradação e ao desenvolvimento de anomalias estéticas e funcionais. Desta forma, é de capital importância proceder à conservação destes rebocos, e eventualmente, nalguns casos mais urgentes, optar pela sua substituição, total ou parcial.

A necessidade imediata de substituição destes rebocos, por imperativos funcionais ou estéticos, causados pela manifestação de anomalias, pode conduzir à tentação de optar por soluções construtivas correntes, nomeadamente a utilização de argamassas de reboco com cimento Portland. Esta tentação é acentuada pelo facto de se ter vindo a perder, gradualmente, o domínio das técnicas de uso da cal na construção e, em sentido inverso, se ter generalizado e instalado o uso do cimento, quase por completo. São conhecidos vários casos em que a utilização de materiais correntes em edifícios antigos não só foi incapaz de tratar as anomalias existentes, como ainda conduziu ao aparecimento de novos problemas, que anteriormente não se verificavam. Importa difundir este conhecimento, alicerçado nos estudos realizados e na experiência adquirida, de que os materiais de uso corrente e recente apresentam características amplamente distintas dos materiais utilizados nos edifícios antigos, características essas maioritariamente incompatíveis, em termos físicos, químicos e mecânicos. De facto, as argamassas à base de cimento Portland apresentam módulo de elasticidade bastante superior às argamassas de cal, menor permeabilidade ao vapor de água, maior retração e conseqüentemente menor capacidade de acompanhar variações dimensionais (Henriques, 1991). A questão da permeabilidade ao vapor de água é particularmente importante, uma vez que a transferência de vapor de água através das paredes é requisito essencial para uma argamassa a utilizar na conservação (Maravelaki-Kalaitzaki, 2005). Acresce ainda o facto de as argamassas à base de cimento conterem uma elevada concentração de sais solúveis, situação que maximiza o risco de degradação dos revestimentos antigos (Lanas e Alvarez, 2003). Torna-se assim importante planear as operações de conservação, tendo em mente as características de compatibilidade dos materiais a aplicar com os materiais pré-existentes, evitando a incoerência da intervenção e, nalguns casos, o agravamento do problema.

A cal aérea constitui assim uma solução adequada como ligante nas argamassas a serem utilizadas nas operações de conservação. No entanto, nos anos mais recentes, tem sido crescente o interesse e o estudo da cal hidráulica natural como ligante para a construção. O facto de Portugal ser dos poucos países mundiais a produzir cal hidráulica natural (Faria *et al.*, 2012) e a sensibilização para o tema das argamassas compatíveis para conservação, já referido, terá sido a janela de oportunidade para esse crescente interesse. Para além disso, a nova norma europeia das cais de construção, EN 459-1:2010 e mais concretamente a sua versão portuguesa, NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011) trouxe alterações à classificação das cais com propriedades hidráulicas, nomeadamente em relação ao que pode ser considerado cal hidráulica natural, o que obrigou os fabricantes a reclassificar as cais produzidas e, por vezes, a alterar a formulação e o processo de fabrico destas argamassas, gerando assim a necessidade de estudar estas novas composições. Nalgumas situações específicas, torna-se importante garantir a hidraulicidade das argamassas. Essa característica pode ser obtida, nas argamassas de cal aérea, introduzindo elementos pozolânicos (Faria, 2004), como por exemplo o metacaulino, uma pozolana artificial obtida através da calcinação das argilas caulínicas. As argamassas de cal hidráulica natural, por sua vez, possuem essa característica intrínseca, sendo capazes de realizar presa em contacto com a água, passíveis por isso de ser utilizadas, mesmo sem adições, em ambientes húmidos e/ou próximos de ambientes marítimos (Tavares, *et al.*, 2008). É conhecido ainda o facto de as cais hidráulicas apresentarem uma gama de valores de resistências mecânicas superior em relação às argamassas de cal aérea, apresentando também uma menor permeabilidade ao vapor de água e uma maior resistência ao ataque de sais (Pavía, *et al.*, 2005), o que reforça a utilidade deste ligante na eventualidade de ser necessário intervir em rebocos de edifícios antigos localizados em ambientes amplamente húmidos.

Para a caracterização de rebocos e avaliação da sua forma e processo de degradação, devem ser utilizados vários métodos de caracterização. A avaliação do desempenho de fachadas rebocadas é essencial nessa caracterização, como complemento aos ensaios laboratoriais. No entanto, a recolha de amostras de argamassas de reboco nem sempre é viável. A solução passa por complementar a informação que pode ser obtida através da caracterização de amostras recolhidas no local, com a realização de ensaios *in situ*, para avaliação das propriedades dos rebocos.

No presente estudo analisar-se-á o comportamento *in situ* de argamassas de rebocos com base em cal aérea e cal hidráulica natural, com incorporação de metacaulino. O estudo enquadra-se no âmbito dos projetos financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia METACAL- Estudo de argamassas de cal aérea e metacaulino para conservação de edifícios antigos e LIMECONTECH- Conservação e durabilidade de revestimentos históricos: técnicas e materiais compatíveis.

## 1.2. Objetivos e metodologia

O principal objetivo desta dissertação passa por avaliar o comportamento de rebocos de argamassas com base em cal aérea e cal hidráulica natural, aplicadas em muretes experimentais localizados em ambiente exterior, sujeitos por isso a condições de envelhecimento natural, e ainda estudar a influência da adição de metacaulino, ou mais precisamente, da substituição de parte de cada um dos ligantes por metacaulino.

Relativamente aos rebocos de argamassas de cal aérea foram avaliadas as características de três traços volumétricos distintos- 1:2, 1:2,5 e 1:3 -, enquanto no que respeita aos rebocos de argamassas de cal hidráulica natural optou-se por estudar o traço volumétrico 1:3. Outro dos parâmetros avaliados foi a influência da substituição parcial da massa de ligante por metacaulino, em ambos os tipos de argamassas. Assim, nas argamassas à base de cal aérea, considerou-se um teor de substituição em massa de 30%, em comparação com a argamassa padrão, com 0% de metacaulino; nas argamassas de cal hidráulica natural, consideraram-se teores de substituição em massa de 5% e 10%, tendo-se optado igualmente por comparar com a argamassa padrão.

Sobre estas argamassas foram realizados ensaios *in situ*, de modo a avaliar características de natureza física, química e mecânica, aos 28, 90 e 180 dias após a sua aplicação nos muretes experimentais.

Adicionalmente, pretendeu-se efetuar a comparação entre os resultados dos ensaios *in situ* realizados sobre os rebocos aplicados num suporte, em condições de exposição natural, e os resultados dos ensaios laboratoriais sobre provetes prismáticos, efetuados por outros autores, tentando encontrar tendências semelhantes, de modo a aferir se os ensaios laboratoriais transmitem resultados fiáveis para estimar o comportamento real das argamassas, a aplicar em contexto real de obra.

Em suma, o presente estudo pretende contribuir para o conhecimento do comportamento destas argamassas em condições de exposição natural, e aplicadas sobre um suporte, de modo a avaliar a sua adequabilidade enquanto argamassas de rebocos para a conservação de edifícios antigos, para além de continuar a aprofundar o conhecimento relativamente à influência do metacaulino nas suas propriedades.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, introdutório, é abordado o estado atual da construção e da conservação em Portugal, os principais problemas existentes e a forma como o presente trabalho procura contribuir para os atenuar. Neste capítulo são também apresentados os objetivos da dissertação, o que se irá estudar e a forma como esse estudo será realizado.

No segundo capítulo da dissertação apresenta-se uma compilação do estado atual do conhecimento, onde se começa por caracterizar os revestimentos antigos, para depois se abordar as matérias primas utilizadas no trabalho, finalizando com uma análise ao comportamento e características das argamassas à base de cal aérea e hidráulica, com e sem substituição da massa de ligante por uma pozolana artificial, primeiro em condições laboratoriais e depois em condições de exposição natural.

O terceiro capítulo é referente à campanha experimental desenvolvida no decorrer do presente trabalho, onde se abordam os procedimentos experimentais que foram seguidos, assim como algum enquadramento teórico dos ensaios, apresentando-se ainda os materiais e equipamentos utilizados na realização desses ensaios. Adicionalmente, após a descrição dos procedimentos de ensaio, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos.

No quarto capítulo discutem-se os resultados obtidos na campanha experimental, fazendo-se uma análise comparativa desses resultados, entre as diferentes formulações estudadas, efetuando igualmente um cruzamento entre os resultados obtidos neste trabalho e os resultados obtidos por outros autores.

No quinto capítulo da presente dissertação, apresenta-se uma síntese das conclusões retiradas através da análise dos resultados obtidos, fazendo-se ainda uma referência a futuros desenvolvimentos que poderão ser realizados no seguimento da presente dissertação.

Por último, apresentam-se as referências bibliográficas consultadas e, adicionalmente, os anexos da dissertação.



## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1. Revestimentos de paredes em edifícios antigos

Antes de se avançar para uma intervenção de conservação num edifício antigo, reveste-se de capital importância conhecer o seu modelo de funcionamento, as suas características e constituição, que naturalmente diferem amplamente dos edifícios construídos após a massificação da construção em betão armado, em meados dos anos 60. Mais concretamente, para pensar uma operação de conservação sobre um reboco de uma parede de um edifício antigo, é necessário conhecer as características das alvenarias, as técnicas construtivas e materiais utilizados na sua execução, fazendo um exercício semelhante para as argamassas de reboco que se utilizavam nestas construções.

As alvenarias dos edifícios antigos possuem características bastante distintas das que se podem observar na construção atual. A própria função dessas alvenarias era mais ampla, uma vez que à função de resistência à penetração da água, acrescia geralmente a função estrutural. Estas paredes resistentes eram constituídas, na maior parte dos casos, por dois paramentos de pedra, com cerca de 20 cm cada, e um enchimento na parte central à base de pedra miúda e cal, o que resultava normalmente em paredes com espessura total bastante elevada (Rodrigues, 2010). Um olhar atento às características dos materiais utilizados permite concluir que apresentam uma porosidade elevada e uma reduzida coesão (Veiga, 2000), sendo possível a partir daí caracterizar as paredes relativamente a essas propriedades físicas e químicas. Outra diferença fundamental entre as paredes antigas e as recentes diz respeito à forma como estas se comportam na presença de água. Com efeito, o objetivo principal das paredes recentes é constituir um obstáculo à entrada de água, razão pela qual estas são executadas de forma a cumprir estes requisitos, através de cortes entre a alvenaria e a fundação ou de sistemas de drenagem, que permitem minimizar o risco de penetração de água do exterior e de ascensão de água por capilaridade, aumento de espessura de parede, e também através da utilização de revestimentos de impermeabilização e da instalação de caixilharias estanques que, em conjunto com o tipo de parede, possam impedir o acesso da água ao interior (Veiga e Tavares, 2002). Pelo contrário, as paredes antigas eram executadas admitindo a entrada de água, mas impedindo a sua permanência de forma prolongada, favorecendo uma rápida evaporação, e evitando que fosse atingido o paramento interior, através das características já mencionadas, de porosidade elevada dos materiais e da elevada espessura total da parede.

Os rebocos aplicados nas paredes mencionadas tinham naturalmente em conta a natureza e modelo de funcionamento do suporte. Eram rebocos que utilizavam na maior parte das vezes cal aérea como ligante principal, constituídos por várias camadas, o que lhes conferia uma elevada espessura, contribuindo para o bom funcionamento global das paredes. Eram também frequentes adições minerais, como pó de tijolo e outras pozolanas artificiais (Aguilar e Veiga, 2003). Os traços volumétricos variavam entre 1:1 e 1:4 (cal aérea:areia) (Veiga, 2007), consoante o grau de importância ou tipo de utilização do edifício. De facto, edifícios de uso militar e de defesa apresentavam rebocos com maior traço em ligante, por isso mais resistentes a longo prazo, enquanto alguns edifícios destinados à habitação eram revestidos com rebocos com menor quantidade de ligante (Veiga, 2010). A espessura total do reboco variava entre os 15 e os 30 mm (Veiga, 2006).

Moropoulou *et al.* (2009), citado por Velosa (2006), sintetiza algumas características físicas e mecânicas de argamassas antigas, em termos de traços mais frequentes, volume, massa volúmica, superfície específica, raio dos poros, porosidade total e resistência à tração (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Características físicas e mecânicas de argamassas antigas  
(Moropoulou *et al.*, 2009)

Ligante	Traço em massa	Volume [mm <sup>3</sup> /g]	Massa volúmica [g/cm <sup>3</sup> ]	Superfície Específica [m <sup>2</sup> /g]	Raio dos Poros [μm]	Porosidade total [%]	Resistência à Tração [MPa]
Cal	1:4 - 1:1	170 - 230	1,5 - 1,8	1,3 - 3,3	0,8 - 3,3	30 - 45	< 0,35
Cal e cimento Portland	1:2 - 1:1	105 - 241	1,8 - 1,9	1,7 - 10,6	0,03 - 6,5	20 - 43	0,6 - 0,7
Cal hidráulica	1:4 - 1:1	90 - 230	1,7 - 2,1	2,5 - 13,5	0,1 - 3,5	18 - 40	0,35 - 0,55
Cal e pozolanas naturais	1:5 - 1:1	160 - 265	1,6 - 1,9	3 - 14	0,1 - 1,5	30 - 42	> 0,60
Cal e pozolanas artificiais	1:3	170 - 280	1,5 - 1,9	3,5 - 9	0,1 - 0,8	30 - 40	> 0,55

O conhecimento destes dados é importante para planear a formulação de uma argamassa compatível, nomeadamente em termos de resistências mecânicas, e permitem também estimar o estado de conservação da argamassa, enquanto o conhecimento em relação à porosidade e à absorção de água permitem caracterizar a argamassa em termos de comportamento em relação à água (Velosa, 2006).

## 2.2. Requisitos das argamassas de substituição

As características que se pretendem obter de uma argamassa a utilizar numa intervenção de conservação ou reabilitação devem ser cuidadosamente pensadas e estudadas antes dessa intervenção, idealmente apoiando esse estudo em trabalho laboratorial, formulando argamassas com os parâmetros pretendidos, e submetendo-as a ensaios que permitam aferir o seu comportamento do ponto de vista físico, químico e mecânico. Devem igualmente analisar-se os resultados desses ensaios, tendo em conta o conhecimento acerca dos suportes e dos revestimentos usados nos edifícios antigos. Não menos importante do que esses requisitos físicos, químicos e mecânicos são as condições de preparação, o método de aplicação e a cura dessa argamassa em obra, tal como a qualidade dos materiais utilizados na sua formulação, nomeadamente o tipo de cal, a granulometria dos agregados e a proporção de água utilizada na amassadura.

Henriques (1991) e Kanan (2008) resumiram os requisitos mais importantes a cumprir por um reboco de modo a ser compatível com o suporte de edifícios antigos:

- O módulo de elasticidade deve ser inferior ou igual ao do suporte, decrescendo do interior para o exterior nas várias camadas que constituem o reboco, para reduzir a propensão para o desenvolvimento de fissuras;
- A porosidade e a microestrutura devem ser semelhantes às do suporte, de modo a permitir que a cristalização dos sais transportados pela água, a ocorrer, não implique a geração de tensões que causem a degradação do suporte;
- A permeabilidade ao vapor de água não deve ser inferior à do suporte, aumentando do interior para o exterior;
- O teor em sais solúveis das argamassas deve ser o menor possível;
- A trabalhabilidade deve ser aceitável, sem ser necessário adicionar água em excesso;
- Os rebocos de substituição aplicados devem ser reversíveis, sempre que se destinem a património cultural ou histórico;

- A durabilidade deve ser tão elevada quanto possível, com custos de manutenção adequados, e sem colocar em causa as restantes condições;
- O impacto visual deve ser semelhante (cor, textura e acabamento superficial), de maneira a conservar a aparência e integridade do edifício.

Em linha com estes fatores, Veiga e Tavares (2002) quantificam alguns requisitos físicos e mecânicos a respeitar pelas argamassas de reboco de substituição em edifícios antigos (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Requisitos dos rebocos a usar em edifícios antigos  
(Veiga e Tavares, 2002)

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias [MPa]			Aderência ao suporte [MPa]	Comportamento à água	
	R <sub>t</sub>	R <sub>c</sub>	E		Permeância ao vapor de água [m]	CC [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]
Reboco exterior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	< 0,08	< 12 ; > 8
Reboco interior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000		< 0,10	-
Juntas	0,4 - 0,8	0,6 - 3,0	3000 - 6000	0,1 - 0,5 ou rotura coesiva pela junta	< 0,10	< 12 ; > 8

R<sub>t</sub>- Resistência à tração; R<sub>c</sub>- Resistência à compressão; E- Módulo de elasticidade dinâmico;  
CC- Coeficiente de capilaridade

## 2.3. Matérias-Primas das argamassas

O presente subcapítulo pretende abordar a constituição, características e processo de fabrico das matérias-primas utilizadas na campanha experimental desenvolvida neste estudo.

### 2.3.1. Cal Aérea

Os vestígios de utilização de cal na construção remontam às civilizações antigas, como os chineses, os egípcios, os etruscos, os fenícios, os gregos, os incas ou os romanos. A disponibilidade e o fácil uso fizeram com que estes povos produzissem este componente em forma de cal em pasta, para ser utilizado como ligante em argamassas de reboco ou para o assentamento de alvenarias.

A cal aérea hidratada é produzida através da decomposição térmica de uma fonte de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) com elevado grau de pureza. Ao longo dos tempos há registo de utilização de várias fontes de carbonato de cálcio, nomeadamente pedra calcária, mármore, margas, conchas ou corais. A decomposição térmica dessa fonte, designada por calcinação, é feita a uma temperatura entre os 800 e os 1000°C, que resulta na libertação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e na formação de óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal viva. O óxido de cálcio é finalmente “apagado” com água, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), também designado por cal hidratada. A água contida no hidróxido de cálcio é posteriormente evaporada, originando uma dilatação do volume da massa, dando-se depois uma reação, relativamente lenta, do dióxido de carbono presente na atmosfera, com a cal hidratada, resultando novamente na formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). A este conjunto de reações físicas e químicas sofridas pelo carbonato de cálcio chama-se geralmente ciclo da cal (Fig. 2.1).



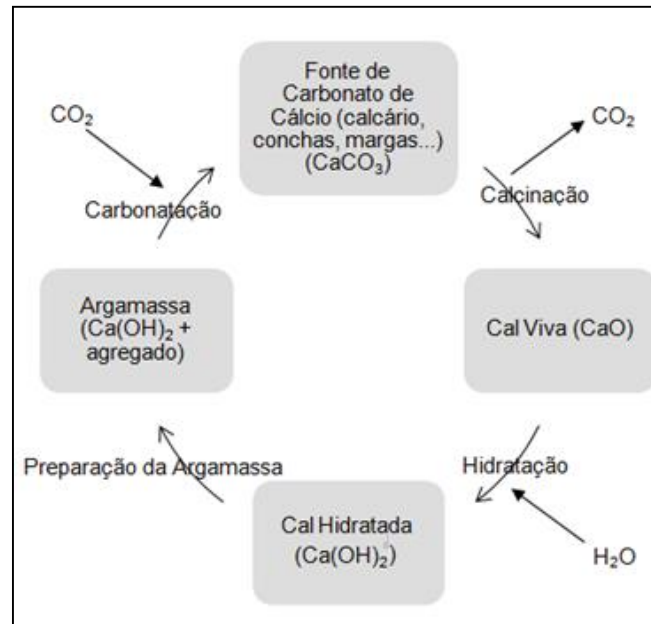
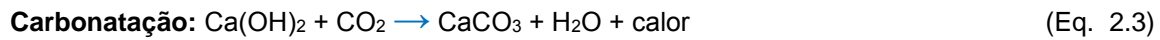


Fig. 2.1 – Ciclo da Cal, adaptado de Ngoma, 2009

### 2.3.2. Cal Hidráulica Natural

As argamassas com propriedades hidráulicas começaram a ser utilizadas há vários séculos. Existem registos de utilização deste tipo de argamassas pela civilização fenícia em Jerusalém, sabendo-se também que os gregos e os romanos utilizavam cal com adições pozolânicas para obtenção dessas propriedades hidráulicas (Lanas *et al.*, 2004). No entanto, apenas no séc. XVIII, através do inglês John Smeaton, se tomou conhecimento acerca de um novo tipo de ligante, com propriedades hidráulicas intrínsecas – a cal hidráulica –, num estudo que seria aprofundado já no séc. XIX por Louis Vicat. Devido a estas descobertas, a cal hidráulica foi amplamente utilizada em vários edifícios históricos do séc. XIX e do princípio do séc. XX, podendo ser considerado o ligante precursor do cimento Portland (Callebaut *et al.*, 2000).

Quando as rochas calcárias utilizadas na produção da cal apresentam impurezas de natureza argilosa (sílica, alumina e ferro), o produto calcinado designa-se cal hidráulica natural. As reações de natureza química que ocorrem no processo de preparação da cal hidráulica dão-se a temperaturas diferentes. Entre os 400 e os 600°C dá-se a desidratação da argila. Depois, com temperaturas de calcinação na ordem dos 900-1200°C, obtêm-se silicatos e aluminatos, resultantes da reação da sílica e da alumina com o óxido de cálcio (Sequeira *et al.*, 2007) (Faria *et al.*, 2012). A presa da cal hidráulica dá-se através de duas reações distintas. Inicialmente, dá-se uma reação de natureza predominantemente hidráulica, na qual os silicatos e os aluminatos são hidratados em presença da humidade. Posteriormente, dá-se uma reação semelhante à que ocorre na cal aérea, com a transformação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) em carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), em presença do dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>). A ocorrência da referida fase hidratada, em que o óxido de cálcio reage com a sílica e a alumina, justifica a principal diferença entre a cal hidráulica e a cal aérea, que é o facto de a primeira endurecer também em contacto com a água, tanto à superfície como imersa, para além da reação análoga à da cal aérea, em contacto com o dióxido de carbono atmosférico (Lanas *et al.*, 2004). A grande diferença entre a cal hidráulica natural e o cimento Portland está relacionada com o processo de fabrico, nomeadamente na temperatura de calcinação e nas adições. Essa temperatura, no caso do cimento Portland, é significativamente superior à

temperatura de calcinação da cal hidráulica natural, que, segundo fabricantes, ronda atualmente os 900-1200°C. Estas temperaturas mais baixas resultam em compostos hidráulicos diferentes dos do cimento. Nomeadamente, não há formação de silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S). Para além disso, na produção do cimento Portland, são adicionadas argilas à rocha calcária, sendo a finura obtida por moagem do clínquer, ao contrário da cal hidráulica natural, cuja finura se obtém apenas por extinção da cal viva, o que permite uma poupança ao nível do consumo energético, tornando a cal hidráulica natural num ligante mais sustentável do ponto de vista ambiental e económico face ao cimento Portland. Esta vantagem é amplificada pelo facto de Portugal ser dos poucos países mundiais produtores deste ligante. Por outro lado, do ponto de vista da conservação, são também conhecidas vantagens da cal hidráulica natural relativamente ao cimento Portland, nomeadamente um menor módulo de elasticidade, maior permeabilidade ao vapor de água e menor teor em sais solúveis, que a tornam numa solução bastante mais viável para utilização em suportes de edifícios antigos, do ponto de vista da compatibilidade (Callebaut *et al.*, 2000).

De acordo com a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011), a cal hidráulica natural (NHL) pode ser classificada em três classes diferentes (Quadro 2.3), sendo essa classificação feita tendo em conta a resistência à compressão da argamassa padrão, medida em laboratório aos 28 dias.

Quadro 2.3 – Tipos de cal hidráulica natural (IPQ, 2011)

Classificação	Notação	Resistência à compressão [N/mm <sup>2</sup> ]
Cal hidráulica natural 2	NHL 2	2
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5	3,5
Cal hidráulica natural 5	NHL 5	5

### 2.3.3. A norma NP EN 459-1:2011

A versão de 2002 da norma EN 459-1 relativa às cais de construção foi revista, o que resultou na publicação de uma nova versão em 2010, datando a versão portuguesa de 2011, com entrada em vigor em Julho de 2012. Esta revisão tem em conta os desenvolvimentos ao nível dos produtos e das necessidades do mercado da construção. A norma foi separada em dois capítulos, um relativo às cais aéreas e outro relativo às cais com propriedades hidráulicas. Estas duas categorias de produtos são depois divididas em subcategorias (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Tipo de cais de construção, conforme a norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011)

Categoria	Subcategoria	Classes
Cal aérea	Cal cálcica (CL)	CL 70
		CL 80
		CL 90
	Cal dolomítica (DL)	DL 80
		DL 85
		DL 90
Cal com propriedades hidráulicas	Cal hidráulica natural (NHL)	NHL 2
		NHL 3,5
		NHL 5
	Cal formulada (FL)	FL 2
		FL 3,5
		FL 5
	Cal hidráulica (HL)	HL 2
		HL 3,5
		HL 5

A norma europeia anterior à vigente distinguia entre cais hidráulicas naturais NHL, que eram definidas como sendo cais produzidas por calcinação de rochas mais ou menos argilosas ou siliciosas com redução a pó por extinção, com ou sem moagem; cais hidráulicas naturais NHL-Z, que eram cais hidráulicas naturais com aditivos pozolânicos ou hidráulicos adicionados até 20% em massa, para aumentar a sua hidraulicidade, e ainda cais hidráulicas HL, que correspondiam a cais hidráulicas “artificiais”, constituídas na sua maioria por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio, produzidos por mistura de constituintes adequados.

A nova norma introduz um aumento das exigências ao nível da cal hidráulica natural NHL, já que o conteúdo exigido em cal livre era considerado muito baixo e o conteúdo em sulfatos demasiado alto. Também se definiu um novo limite de resíduos para uma dimensão de 0,2 mm (partículas resultantes de má cozedura e outros). Em consequência, as cais NHL, conformes com a norma atualmente em vigor, melhoraram em relação às anteriores, e as adições permitidas de gesso, cimento e outros agentes, como regulador de presa, foram reduzidos a 0,1%, facto que obrigou alguns fabricantes a alterar a designação de algumas cais, que anteriormente eram classificadas como NHL, para HL, para estar em conformidade com a norma vigente. O novo documento elimina também a designação NHL-Z, anteriormente existente, sendo esta designação substituída pela designação de cal formulada (FL), definida como cal de propriedades hidráulicas, constituída por CL ou NHL, a que se junta material hidráulico, e que tem a capacidade de endurecer por hidratação ou carbonatação

#### 2.3.4. Componentes pozolânicos

*“Existe um tipo de pó que, devido a causas naturais, produz resultados surpreendentes (...) Esta substância, quando misturada com cal e cascalho, não só dá resistência a edifícios de outros tipos, como ainda permite o endurecimento debaixo de água no caso de obras marítimas (...) Assim, quando as três substâncias, através da força do fogo, são misturadas em conjunto, a humidade faz com que endureçam rapidamente de forma a que se transformem numa massa que nem as ondas nem a força da água pode dissolver.”* (Vitruvius, 15 A.C.)

Pozolanas podem ser definidas como materiais que, apesar de não terem propriedades hidráulicas por si só, possuem constituintes – sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) - que, combinados com a cal à temperatura ambiente, e em presença da água, formam componentes insolúveis estáveis que possuem propriedades hidráulicas – silicatos de cálcio hidratados (Bakolas *et al.*, 2008). A reatividade dos materiais pozolânicos não é exclusivamente função do seu conteúdo químico. É particularmente sensível ao tamanho das partículas, com as pozolanas de granulometria fina a serem consideravelmente mais reativas do que pozolanas de granulometria grosseira (Moropoulou *et al.*, 2004), dependendo igualmente da quantidade de sílica reativa, da reatividade e pureza da cal e da superfície específica das partículas. De forma simplificada, pode dizer-se que a pozolanicidade de um material é definida pela sua capacidade para reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) na presença de água (Shvarzman *et al.*, 2003b).

O uso de pozolanas, tal como o uso da cal, é uma prática ancestral, que remonta à antiga Mesopotâmia, estendendo-se às civilizações grega e romana. Sabe-se inclusive que os romanos utilizavam materiais de natureza vulcânica (cinzas vulcânicas, fragmentos de rocha vulcânica, etc.) e também pó de tijolo, quando era necessário formular argamassas insolúveis em água (Vejmelková *et al.*, 2012).

As pozolanas podem ser divididas em dois grupos: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais são provenientes de magmas geralmente ácidos, isto é, ricos em sílica, que solidificaram rapidamente durante uma erupção e que ficaram no estado amorfo, ou criptocristalino. A reatividade pozolânica é ainda aumentada depois de esta lava se ter meteorizado (Coutinho, 1988). Pozolanas artificiais, por sua vez, resultam da mistura de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) com produtos

obtidos da calcinação de materiais naturais, como argila, xistos, rochas siliciosas ou cinzas volantes. Por exemplo, a calcinação de argila a temperaturas entre os 600 e os 900°C resulta na destruição da estrutura cristalográfica destes minerais, originando uma mistura amorfa de sílica e alumina, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos semelhantes aos que resultam do endurecimento de materiais hidráulicos naturais (Holmes e Wingate, 1997).

São exemplos de pozolanas artificiais as argilas cozidas, o pó de tijolo, as cinzas de casca de arroz, as cinzas de cana de açúcar, as cinzas volantes, a sílica de fumo ou o metacaulino, objeto de estudo no presente trabalho (Velosa, 2006).

#### 2.3.4.1 Metacaulino

O metacaulino ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) é obtido através de um processo controlado de ativação térmica (desidroxilação) das argilas caulínicas ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). A fase de tratamento térmico - temperatura de calcinação e tempo de exposição - é fulcral para a eficácia da ativação alcalina. Davidovits (1991) aponta para um tempo de exposição na ordem das 6 horas, enquanto que Cerny *et al.* (2006) defendem um tempo de exposição de 1-4 horas, mas mesmo ao fim de 30 minutos é possível obter metacaulinos reativos (Faria-Rodrigues, 2004). Em relação à temperatura, é recorrentemente apontado um intervalo entre os 600 e os 900°C, dependendo da natureza e da composição mineral e química das matérias-primas e da estrutura cristaloquímica do mineral argiloso principal – a caulinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). A calcinação promove a remoção da água estrutural (desidroxilação) presente na caulinite, transformando este mineral num material amorfo e quimicamente muito reativo – a metacaulinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) (Tironi *et al.*, 2012). Este processo provoca uma desorganização da sua estrutura cristalina e um aumento significativo da atividade pozolânica.



O metacaulino fornece a sílica e a alumina reativa que reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), enquanto a atividade pozolânica depende do grau de desidroxilação e da superfície disponível para a reação (Shvarzman *et al.*, 2003a). Por isso, antes ou após o tratamento térmico, o metacaulino obtido é moído para obtenção de uma superfície específica elevada e, por consequência, um aumento do grau de pozolanicidade. O resultado final é um material artificial com propriedades ligantes semelhantes às pozolanas naturais, capaz de promover o aumento da capacidade ligante e das propriedades hidráulicas.

Comparativamente a outras pozolanas, Frias e Sanchez de Rojas (1997) apontam a menor atividade pozolânica do metacaulino em relação à sílica de fumo, mas uma maior atividade pozolânica do que as cinzas volantes, algo que está relacionado com a composição mineralógica e a finura das partículas.

Ao contrário da maior parte das matérias-primas classificadas como pozolanas naturais, Portugal possui depósitos de caulino, concentrados principalmente nas zonas Norte e Centro do país, com especial destaque para Viana do Castelo, Porto e Aveiro (Velosa, 2006). Este facto torna ainda mais importante o aprofundar do conhecimento sobre as características e virtudes do metacaulino, de modo a tirar partido do óbvio fator económico que resulta do facto de não ser necessário importar a matéria prima.

#### 2.3.5. Agregados

As argamassas são materiais constituídos no mínimo, e essencialmente, por dois componentes: ligante e agregado. Na maior parte dos casos, os agregados são o componente presente em maior quantidade, tendo por isso um papel significativo no comportamento das argamassas. Os agregados

são geralmente areias, que podem ser naturais de rio, de jazigo, ou mesmo de conchas, tijolos, rochas (mármore, calcários) e outras fontes.

A caracterização dos agregados é fundamental antes de partir para a formulação de uma argamassa a utilizar na conservação, uma vez que é sabido que o tipo de areia utilizado influencia propriedades como a resistência mecânica, a porosidade ou a textura das argamassas. As areias contribuem para fornecer a coesão às argamassas de cal através do contacto dos seus grãos com o ligante, separando as partículas de cal, o que favorece a carbonatação e permite um arranjo das retrações na argamassa (Margalha *et al.*, 2007).

Lanas e Alvarez (2003) defendem que a distribuição granulométrica é o fator mais condicionante para a definição das características dos agregados. Os autores concluem, através dos resultados de resistências mecânicas de provetes ensaiados após um ano de cura, que uma adequada distribuição do tamanho das partículas permite o desenvolvimento de resistências mecânicas mais elevadas nas argamassas de cal. Outro fator apontado como sendo importante é o tipo de agregado. Uma fonte de sílica reativa, como por exemplo agregados vulcânicos ou provenientes de resíduos cerâmicos pode reagir com a cal, produzindo componentes que contribuem para o aumento das resistências mecânicas das argamassas. Rato (2006), por seu lado, defende que a forma das partículas de areia influencia a quantidade de água de amassadura.

Stefanidou e Papayianni (2005) sublinham que, para além do tipo de agregado, o volume do agregado na mistura, a dimensão máxima das partículas e a sua distribuição influenciam a estrutura da ligação ligante-agregado. A inclusão de areias mais grossas contribui positivamente para a estabilidade volumétrica das argamassas de cal, restringindo as variações de volume, algo que contribui para um aumento das resistências mecânicas a longo prazo. Por sua vez, Margalha *et al.* (2007) defendem que os finos transmitem maior coesão e trabalhabilidade às argamassas de cal aérea.

Von Konow (2003) destaca a importância de uma distribuição granulométrica adequada, com inclusão de fíler calcário, para permitir a obtenção de uma argamassa com elevada resistência aos ciclos gelo/degelo, capaz ainda de garantir melhores condições de secagem relativamente às argamassas habitualmente formuladas.

Em suma, os estudos analisados convergem na importância que os agregados têm nas argamassas de cal. Sendo a proporção de agregado quase sempre superior à de ligante, fazendo assim com que a influência do agregado seja significativa nas propriedades da mistura, é possível formular argamassas de cal com diferentes características, de acordo com as funções específicas que se pretendem obter, controlando a distribuição granulométrica, a natureza da matéria fina e o tipo e forma do agregado.

## **2.4. Características das argamassas**

Segundo a norma EN 998-1:2010, uma argamassa de reboco é uma mistura de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados, água e, por vezes, adjuvantes ou adições, com objetivo de ser aplicado como reboco exterior ou revestimento interior. No presente subcapítulo faz-se um levantamento das características e comportamento das argamassas de cal com metacaulino, para além de se recolher informação bibliográfica acerca de argamassas deste tipo expostas a envelhecimento natural.

### **2.4.1. Argamassas de cal aérea e metacaulino**

A consciencialização relativamente à necessidade de aplicar revestimentos compatíveis na conservação de edifícios, aliado ao conhecimento obtido relativamente às características do metacaulino enquanto pozolana artificial com grande reatividade, motivou que múltiplos autores

levassem a cabo estudos com vista a aferir o potencial do metacaulino, integrado nas argamassas de cal aérea, em adição ou em substituição parcial da massa de ligante.

Assim, as propriedades das argamassas de cal aérea e metacaulino têm sido estudadas por vários autores nos últimos anos, nomeadamente a influência da temperatura de cura na formação das reações pozolânicas, estudadas por Cabrera e Rojas (2001), Rojas e Cabrera (2002) e por Rojas (2006); as propriedades mecânicas, estudadas por Sepulcre-Aguilar e Hernández-Olivares (2010), Bakolas *et al.* (2006), Fortes-Revilla *et al.* (2006), Billong *et al.* (2009), Veiga *et al.* (2009) e Billong *et al.* (2011); comportamento face à água, analisado por Billong *et al.* (2009), Veiga *et al.* (2009) e Cerny *et al.* (2006); as propriedades térmicas, estudadas por Cerny *et al.* (2006); propriedades químicas, estudadas por Gameiro *et al.* (2012).

Um estudo recente levado a cabo na República Checa (Vejmelková *et al.*, 2012), na qual se caracterizou um conjunto de argamassas de cal aérea e metacaulino com traço volumétrico 1:3, com teor de substituição em massa de 20% de metacaulino, fazendo variar o grau de pureza da cal aérea, permitiu tirar conclusões acerca de um largo espetro de propriedades destas argamassas. Foi possível constatar uma melhoria significativa dos parâmetros mecânicos em comparação com a argamassa de referência, sem metacaulino. A resistência à compressão ascendeu a valores superiores a cinco vezes o da referência, enquanto a resistência à flexão ascendeu a valores três vezes superiores, o que pode ser interpretado como um bom pré-requisito para obter uma maior durabilidade deste tipo de rebocos em comparação com os rebocos exclusivamente de cal aérea. Relativamente ao comportamento face à água, os mesmos autores observaram uma redução de cerca de 25% do coeficiente de difusão do vapor de água e de 20% do coeficiente de absorção de água nas argamassas de cal e metacaulino, relativamente à argamassa de referência. Finalmente, concluíram ainda que o nível de pureza da cal influencia os parâmetros mecânicos e de durabilidade das argamassas, na medida em que a cal com maior teor de impurezas contribui efetivamente para o decréscimo da quantidade de ligante da mistura e, conseqüentemente, para piores resultados em termos de resistências mecânicas e durabilidade.

Velosa e Veiga (2007), por sua vez, analisaram argamassas de cal aérea e metacaulino com traço volumétrico 1:1:4 (cal aérea : metacaulino : areia de rio), analisando dois tipos de metacaulino diferentes e comparando com uma argamassa padrão de traço volumétrico 1:3, sem metacaulino na sua composição. As autoras concluíram que o metacaulino contribui para a melhoria do comportamento mecânico das argamassas, medido através das resistências à tração e à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados dos ensaios realizados para aferir as referidas características são apresentados nas Figuras 2.2 a 2.4.

**L-** Argamassa de cal aérea e areia de rio 1:3 (referência) ; **MK1-** Argamassa de cal aérea e metacaulino de elevada pureza 1:1:4; **MK2A-** Argamassa de cal aérea e metacaulino português 1:1:4; **MK2B-** Argamassa de cal aérea e metacaulino português 1:0,5:2,5

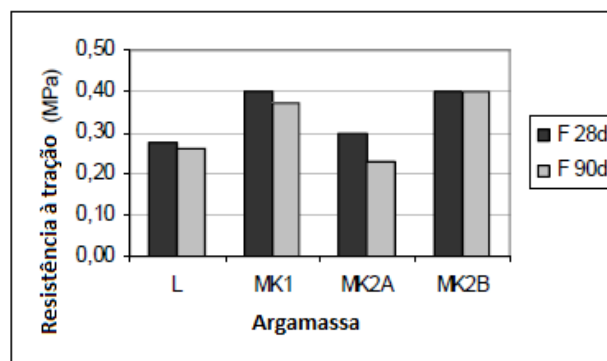


Fig. 2.2 – Resistência à tração das argamassas, aos 28 e 90 dias (Velosa e Veiga, 2007)

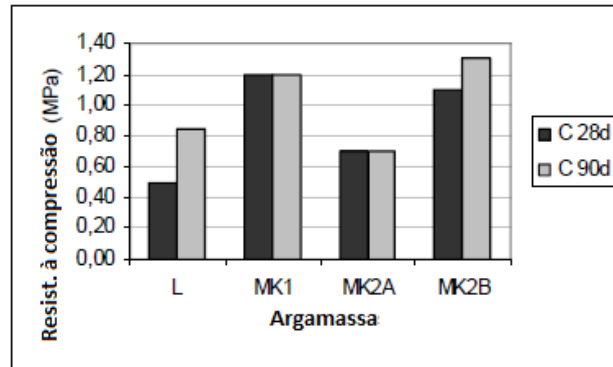


Fig. 2.3 – Resistência à compressão das argamassas, aos 28 e 90 dias (Velosa e Veiga, 2007)

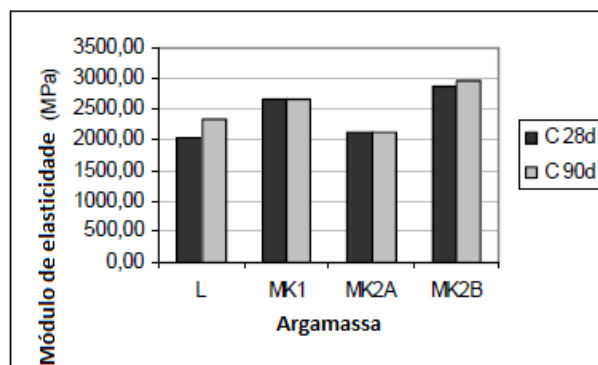


Fig. 2.4 – Módulo de elasticidade das argamassas, aos 28 e 90 dias (Velosa e Veiga, 2007)

Adicionalmente, concluíram existir igualmente uma melhoria no comportamento face à água, observado através da determinação do coeficiente de absorção capilar (Fig. 2.5).

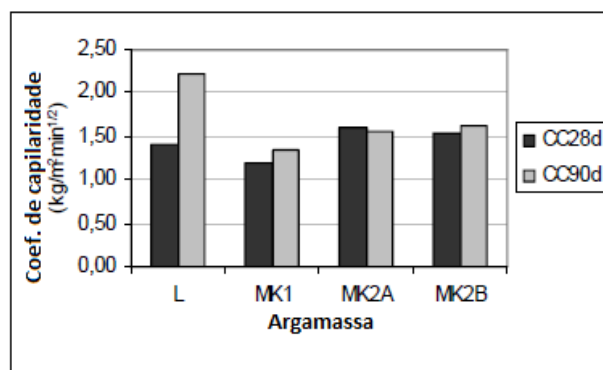


Fig. 2.5 – Coeficiente de capilaridade das argamassas, aos 28 e 90 dias (Velosa e Veiga, 2007)

Outro estudo, desta feita realizado na Grécia, por Aggelakopoulou *et al.* (2011), analisou quatro formulações diferentes de argamassas de cal aérea e metacaulino, fazendo variar a proporção metacaulino: cal aérea, expressa em massa - 1:1, 1:2, 1:5 e 1:11- e sujeitando as argamassas a um período de cura de 12 meses. Os autores assinalam que o aumento da proporção metacaulino: cal aérea provocou o aumento da perda de massa, devido à água originada pelos compostos formados

na reação pozolânica. Notaram também que as argamassas mostraram alterações na distribuição do tamanho dos poros, com a redução destes.

**MK 1-** 15% de cal aérea; 15% de metacaulino; 70% de areia; **MK 05-** 20% de cal aérea; 10% de metacaulino; 70% de areia; **MK 5-** 25% de cal aérea; 5 % de metacaulino; 70% de areia; **MK 2.5-** 27,5% de cal aérea; 2,5% de metacaulino; 70% de areia [% em massa]

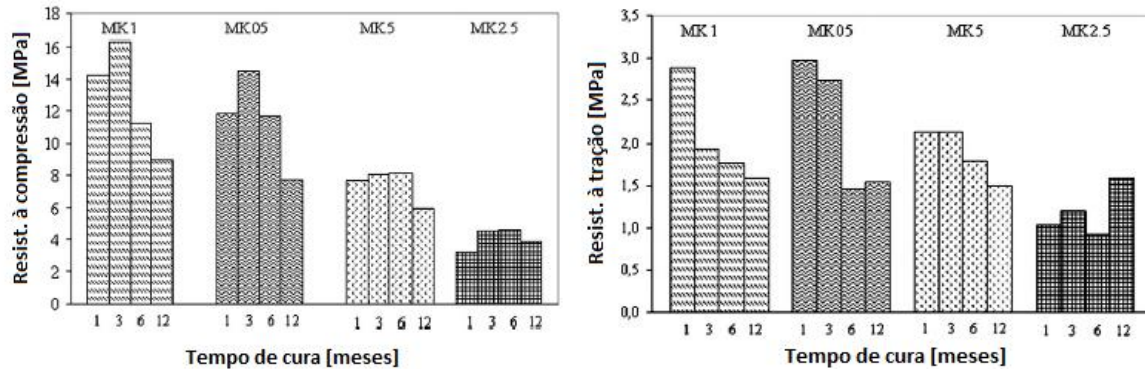


Fig. 2.6 – Resistências mecânicas das argamassas a diferentes tempos de cura (Aggelakopoulou et al., 2011)

Em suma, os estudos analisados convergem relativamente ao efeito positivo do metacaulino na microestrutura, resistências mecânicas, durabilidade e permeabilidade das argamassas. Para além disso, o metacaulino deve ser encarado como um material com vantagens do ponto de vista do impacto ambiental, uma vez que a temperatura de produção é mais baixa face ao clínquer e à cal hidráulica.

Baseado nestas descobertas, pode concluir-se que as argamassas de cal aérea e metacaulino constituem uma boa solução para aplicação na conservação de edifícios antigos, sendo no entanto fundamental continuar a estudar alguns aspetos importantes, de modo a otimizar a eficácia desta mistura. Em particular, o controlo da fissuração deve ser analisado, uma vez que pode ser um problema neste tipo de argamassas. A relação cal aérea: metacaulino deve continuar a ser estudada de modo a encontrar uma proporção ótima a utilizar em alguns casos específicos de conservação de edifícios. Esta relação é importante no sentido de otimizar a reação pozolânica e evitar que parte do metacaulino funcione como fíler (Veiga, 2011). Torna-se também importante avançar nos estudos relativamente às propriedades e potencialidades do metacaulino de fabrico nacional, de modo a tirar partido das vantagens já citadas em termos de abundância da matéria-prima existente no território português.

#### 2.4.2. Argamassas de cal hidráulica e metacaulino

Ao contrário do que ocorre com as argamassas de cal aérea com incorporação de metacaulino, a diversidade de estudos que abordem as vantagens do metacaulino quando incorporados em argamassas com cal hidráulica como ligante é significativamente menor. O conhecimento neste assunto é ainda mais reduzido no que diz respeito ao efeito desta pozolana nas argamassas de cal hidráulica natural conformes com a nova versão da norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011).

Cachim *et al.* (2010) foi dos primeiros autores a estudar a reação entre o metacaulino e a cal hidráulica natural, ainda classificada segundo a versão antiga da norma EN 459-1. No referido estudo é caracterizado o comportamento de um betão formulado com cal hidráulica natural NHL 5 como ligante, introduzindo metacaulino de origem portuguesa em substituição parcial de massa de ligante, em percentagens de 20% e 30%. Foram também estudadas três condições de cura distintas – 65% de HR, 95% de HR e imersão em água. O estudo permitiu concluir que o metacaulino tem efeitos positivos na resistência mecânica dos betões de cal hidráulica natural, com aumento da sua resistência à compressão, tanto na substituição de 20% de metacaulino como na substituição de

30%. Verificou-se mesmo que, aos 28 dias da cura com 95% de HR, uma substituição de 20% de metacaulino permitiu atingir mais do dobro da resistência mecânica em comparação com a referência sem metacaulino. Numa análise de todos os dados, a substituição de 20% da massa de cal hidráulica por metacaulino provou ser a mais eficaz do ponto de vista da resistência mecânica. O benefício da adição de metacaulino ao betão sofre uma redução com o aumento da quantidade de metacaulino de 20% para 30%. As condições de cura provaram ter influência na resistência mecânica deste tipo de argamassas, algo que está em consonância com o que acontece com as argamassas de cal aérea e metacaulino.

Noutra publicação, de Faria *et al.* (2012), foram analisadas várias argamassas de cal hidráulica natural, todas partilhando o traço volumétrico 1:3. As variáveis introduzidas foram o tipo de cal hidráulica natural (NHL3,5 e NHL5), as condições de cura (cura *standard*, com 65% de HR; cura húmida, com 95% de HR; cura marítima, com exposição natural próximo do mar) e a percentagem de metacaulino – 0, 10 e 20% para as NHL 3,5; 0, 5 e 10% para as NHL5. De salientar que a NHL5 se encontrava numa fase de reformulação entre a versão antiga e a versão recente da norma, enquanto a NHL3.5 já se encontrava numa fase de cumprimento da versão nova da norma. O estudo permitiu concluir que o metacaulino contribui para o aumento da resistência mecânica em todas as argamassas de cal hidráulica natural, para todas as condições de cura (Fig. 2.7). No caso das argamassas com NHL3,5 com 20% de MK, a influência do metacaulino levou inclusivamente a que se verificassem valores de resistência mecânica superiores aos recomendados pela norma EN 998-1:2010 para aplicação como argamassas de conservação de rebocos, sendo o valor de resistência à compressão quase sete vezes superior em comparação com a argamassa de referência. É ainda possível verificar valores superiores de resistências mecânica das argamassas de cal hidráulica comparativamente às de cal aérea, também analisadas neste estudo.

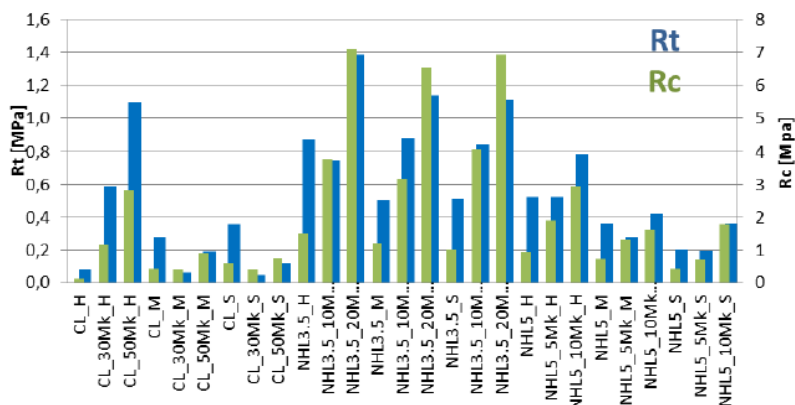
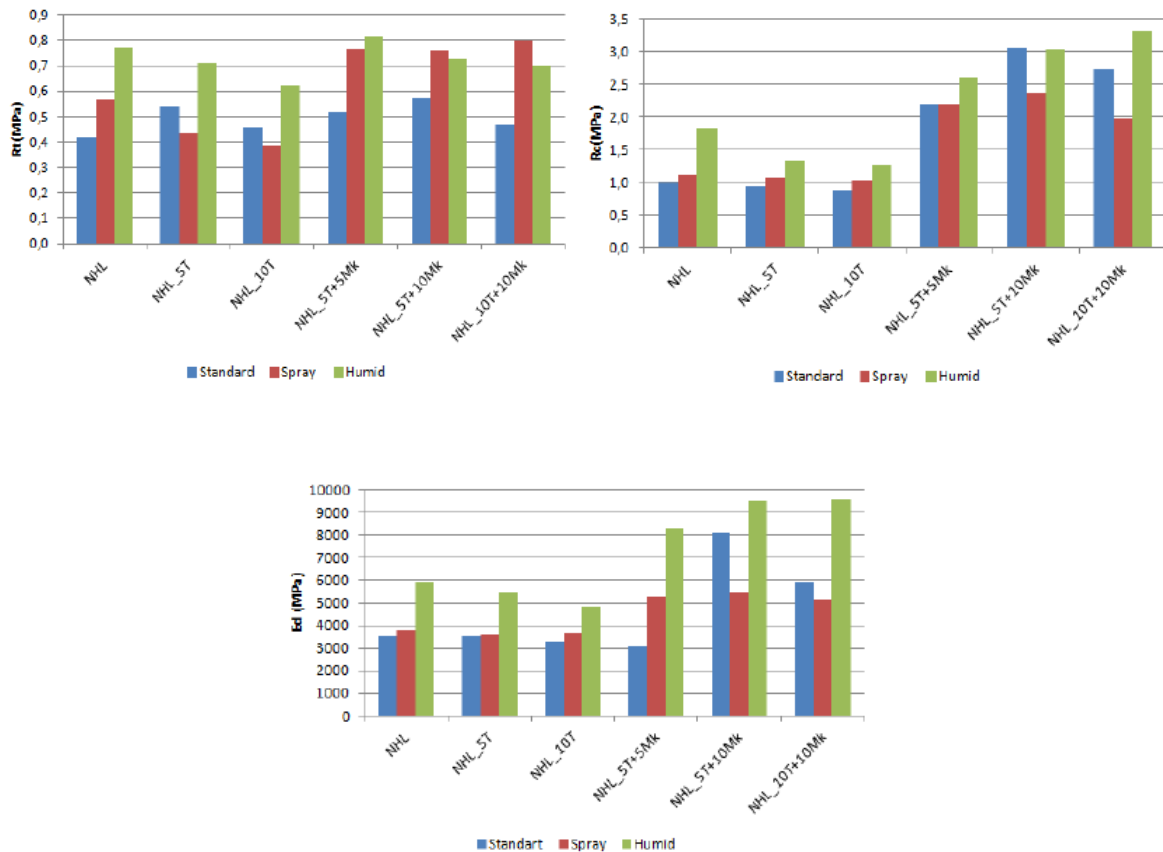
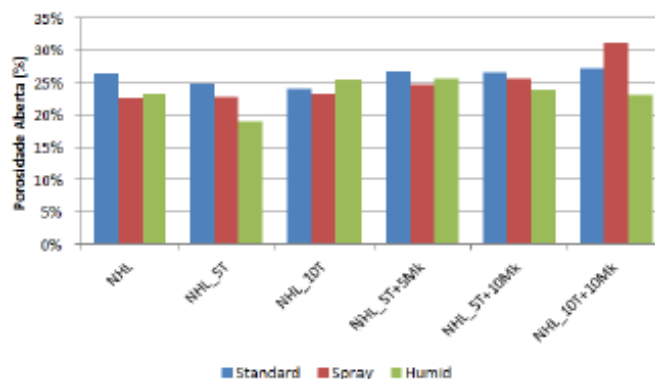


Fig. 2.7 – Resistências mecânicas das argamassas (Faria *et al.*, 2012)

No que diz respeito ao comportamento face à água, os autores concluem que a introdução de metacaulino contribui para um comportamento ligeiramente menos positivo em termos de condições de secagem, mas, em sentido oposto, leva a uma melhoria do coeficiente de capilaridade. A consistência ao espalhamento diminui com o aumento da percentagem de metacaulino, tal como acontece nas argamassas de cal aérea.

Noutro estudo, de Fontes *et al.* (2012), foram estudadas argamassas de cal hidráulica NHL 3,5, com traço 1:3, utilizando metacaulino em substituição parcial de massa de ligante, em percentagens de 5% e 10%, utilizando em simultâneo diferentes percentagens de resíduo cerâmico. Os provetes foram sujeitos a 3 condições de cura distintas - cura *standard*, cura húmida e cura com aspersão de água, sendo a última considerada a mais aproximada das condições reais de obra – e foram ensaiados aos 28 dias de idade.

Fig. 2.8 – Resultados de ensaios mecânicos aos 28 dias (Fontes *et al.*, 2012)Fig. 2.9 – Resultados de porosidade aberta aos 28 dias (Fontes *et al.*, 2012)

A introdução de 5% de MK resultou num aumento ligeiro de resistência à tração e num aumento significativo de resistência à compressão, para todas as curas, enquanto com uma percentagem de 10% verifica-se um aumento significativo de resistência à compressão e um ligeiro aumento de resistência à tração, exceto na cura com aspersão, em que houve um decréscimo deste parâmetro. Em termos de módulo de elasticidade dinâmico, verifica-se que as argamassas com 10% de MK apresentam valores de  $E_d$  superiores aos da referência, enquanto as com 5% de MK apresentam valores ligeiramente inferiores (Fig. 2.8). Em termos de comportamento face à água, conclui-se que a substituição por 10% de MK conduz a uma melhoria do comportamento em termos de coeficiente de capilaridade, enquanto uma substituição por 5% de MK permite melhorar o comportamento em termos de secagem. Por fim, verifica-se um aumento de porosidade aberta com a introdução de MK, relativamente à argamassa padrão (Fig. 2.9). Os autores concluem que a substituição parcial de cal por MK conduz a melhorias técnicas e que a percentagem de substituição deve variar consoante as características pretendidas.

Os estudos analisados indiciam vantagens na utilização do metacaulino nas argamassas, em substituição parcial de massa de cal hidráulica, sugerindo elevado potencial desta solução, nomeadamente ao nível da resistência mecânica e do comportamento face à água. A escassez de estudos existentes sobre este tipo de argamassas aumenta o interesse de uma análise mais aprofundada, ainda para mais quando se sabe que tanto a cal hidráulica natural como o metacaulino podem ser produzidos em Portugal, o que faz com que esta seja uma solução com vantagens do ponto de vista económico, sem a necessidade de importação de matérias-primas. Importa continuar a estudar a influência de diferentes percentagens de metacaulino e a aplicação destas argamassas em condições de exposição natural, próximas das condições reais de obra.

#### **2.4.3. Argamassas expostas a envelhecimento natural - Aplicações e ensaios *in situ***

A importância da caracterização experimental em laboratório já foi ressaltada anteriormente, constituindo de facto uma metodologia bastante abrangente no estudo e caracterização de argamassas, permitindo obter dados concretos em relação à adequabilidade dessas mesmas argamassas em operações de conservação ou substituição. Não obstante, este estudo deve ser complementado com uma caracterização do comportamento *in situ* dos rebocos, que permita obter dados que são impossíveis de obter em condições laboratoriais, devido à impossibilidade de reproduzir as condições higrotérmicas ambientais, com as suas constantes variações.

Os estudos *in situ* de rebocos de argamassas são de fulcral importância, uma vez que as condições climáticas e de cura influenciam amplamente o comportamento das argamassas de cal e metacaulino. De facto, as condições de temperatura e humidade relativa influenciam a reação de carbonatação da cal aérea e a reação pozolânica do metacaulino (Veiga, 2011). Kanan (2008) refere que o processo de carbonatação da cal é muito dificultado em condições de temperatura inferior a 5°C, enquanto no que diz respeito à humidade relativa, valores muito altos ou muito baixos dificultam a reação de carbonatação. Veiga (2011) fundamenta teoricamente este fenómeno, realçando que a hidraulicidade da reação pozolânica entre a cal e o metacaulino, sendo uma reação lenta, necessita de água durante um período de tempo prolongado. Para além disso, sendo as condições ambientais mais favoráveis à carbonatação da cal, grande parte desta transforma-se em carbonato de cálcio antes de reagir com o metacaulino, que deixa assim de funcionar como ligante, sem a presença de hidróxido de cálcio, sendo particularmente importante a presença de humidade por um período inicial prolongado, para que a reação pozolânica ocorra. Outros fatores importantes na eficácia das soluções de rebocos são o método de aplicação, a espessura das camadas e a orientação dos paramentos, sendo igualmente fundamental estudar a sua influência através de aplicações em condições de exposição natural.

A caracterização experimental em laboratório de argamassas de reboco de edifícios antigos nem sempre é possível, uma vez que nem sempre é exequível retirar amostras e, ainda que o seja, o número de amostras que é possível retirar é limitado, e os provetes apresentam geralmente uma forma e dimensão que dificulta a sua utilização em ensaios laboratoriais. A solução para este problema passa por complementar a informação que se pode obter através da caracterização das amostras retiradas (caso seja possível) com a utilização de técnicas de ensaio *in situ*, que permitem obter informações acerca das propriedades dos rebocos no local. Este tipo de ensaios é geralmente simples de executar, económico e não provoca degradação significativa da superfície a ensaiar, permitindo obter uma boa estimativa de algumas propriedades físicas e mecânicas das argamassas (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 – Exemplos de ensaios *in situ*

Ensaio Pouco Destrutivo	Esclerómetro Pendular
	Penetração controlada
	Choque de Esfera
Ensaio Não Destrutivo	Tubos de Karsten
	Ultrassons
	Durómetro
	Identificação de Sais através de fitas colorimétricas

Os resultados obtidos através dos ensaios *in situ* devem ser analisados de forma comparativa, uma vez que não existem estudos suficientes que permitam estabelecer relações diretas entre estes e os ensaios laboratoriais (Veiga, 2010). No Quadro 2.6 é possível observar as relações qualitativas entre ensaios *in situ* e algumas propriedades das argamassas:

Quadro 2.6 – Relação entre ensaios *in situ* e algumas propriedades das argamassas (adaptado de Veiga, 2010)

	Esclerómetro pendular	Durómetro	Choque de esfera	Penetração controlada	Ultrassons	Tubos de Karsten	Fitas colorimétricas de sais
Resistência Mecânica	☑	☑	☑	☑	☑	-	-
Módulo de Elasticidade	☑	-	-	-	☑	-	-
Permeabilidade à água	-	-	-	-	-	☑	-
Presença de sais solúveis	-	-	-	-	-	-	☑

Através de pesquisa bibliográfica foi possível encontrar estudos de casos ou relatórios técnicos, cujo objetivo era avaliar a eficácia de soluções de argamassas compatíveis para a conservação de edifícios, que incluíram caracterização *in situ*, com aplicação em painéis ou muretes experimentais, para posteriormente serem sujeitos a ensaios de natureza física, química e mecânica. Neste subcapítulo apresentam-se alguns exemplos de aplicações de argamassas em ambiente exterior, sujeitas a envelhecimento natural, abordando-se igualmente alguns ensaios *in situ* realizados em rebocos aplicados nestas condições.

- **Forte de S. Jorge de Oitavos** (Veiga *et al.*, 2009)

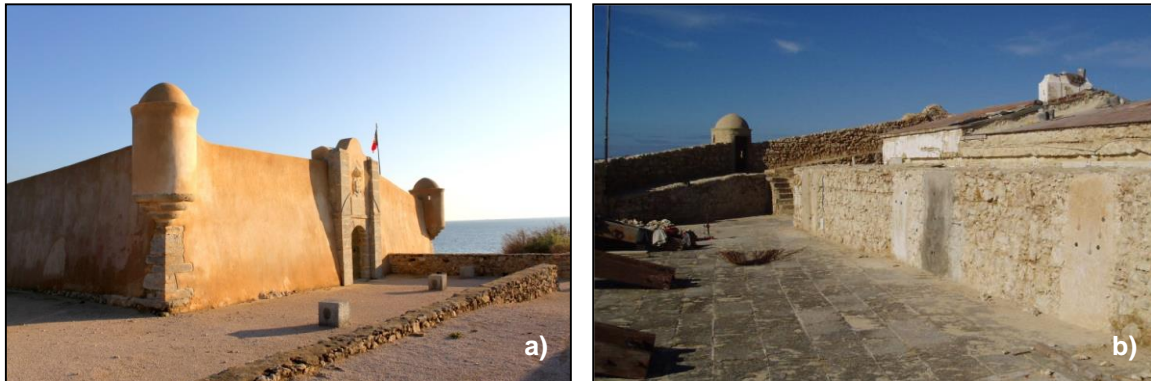


Fig. 2.10 – Fachada do forte (a) Painéis experimentais (b)

Construída em meados do séc. XVII, esta fortificação localizada entre Cascais e o Guincho foi alvo de intervenção no ano de 2005, por, entre outras razões, apresentar anomalias severas nos rebocos exteriores. A localização junto ao Atlântico, e por isso sujeita à ação da água do mar, mas também ao vento e ao atrito da areia e às elevadas amplitudes térmicas que se fazem sentir na região, assim como a idade, aceleraram o processo de degradação dos revestimentos exteriores do forte, que nessa altura já não eram os originais, agravando assim a urgência na intervenção. Antes de se decidir pela escolha de uma argamassa de substituição, foi realizada uma campanha *in situ*, que consistiu na realização de painéis experimentais sobre a alvenaria antiga do forte (Fig. 2.10), com várias argamassas, que variavam no tipo de ligante, no tipo de agregado e no traço volumétrico. Sobre estes painéis, executados em Outubro de 2005, foram depois realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica, em duas idades de estudo. Foram executados cinco painéis experimentais, fazendo variar em cada um deles o tipo de ligante e/ou o componente pozolânico utilizados. Os painéis apresentavam dimensões de 1 m x 2 m, tendo sido aplicados por operários da empresa a cargo das obras de requalificação do forte, de acordo com a seguinte sequência de procedimentos:

- 1- Limpeza e humedecimento do suporte;
- 2- Execução de camada de salpisco com argamassa semelhante à utilizada nas camadas subsequentes, em termos de constituintes e traço volumétrico, mas utilizando maior quantidade de água na amassadura;
- 3- Secagem do salpisco durante quatro dias;
- 4- Aplicação da 1ª camada;
- 5- Secagem da 1ª camada durante sete dias;
- 6- Aplicação da 2ª camada;
- 7- Execução do acabamento

No Quadro 2.7 apresenta-se um esquema dos painéis experimentais aplicados no forte dos Oitavos.

Quadro 2.7 – Composição dos painéis experimentais do Forte dos Oitavos  
(Veiga *et al.*, 2009)

Painel	Ligante	Agregado	Traço Volumétrico			Acabamento
			Salpisco	1ª camada	2ª camada	
1	Cal aérea e cal hidráulica NHL 3,5	Areia do rio Tejo e areia amarela de Corroios em partes iguais	1:1:6 (Cal aérea : cal hidráulica : agregado)	1:1:6	1:2:9	Reboco à vista
2	Cal aérea e cimento branco	Areia do rio Tejo e areia amarela de Corroios em partes iguais	1:1:6 (Cal aérea : cimento branco : agregado)	1:1:6	1:2:9	Reboco à vista
3	Cal aérea e pozolana de Cabo Verde	Areia do rio Tejo e areia amarela de Corroios em partes iguais	1:0,5:2,5 (Cal aérea : pozolana de Cabo Verde : agregado)	1:0,5:2,5	1:0,5:3	Reboco à vista
4	Cal aérea e micro-sílica	Areia do rio Tejo e areia amarela de Corroios em partes iguais	1:0,25:2,5 (Cal aérea : micro-sílica : agregado)	1:0,25:2,5	1:0,25:3	Reboco à vista
5	Cal aérea e metacaulino	Areia do rio Tejo e areia amarela de Corroios em partes iguais	1:0,5:2,5 (Cal aérea : metacaulino : agregado)	1:0,5:2,5	1:0,5:3	Reboco à vista

Sobre estes painéis foram realizados ensaios de natureza mecânica (ensaio de penetração controlada e ensaio de choque de esfera), química (identificação de sais através de fitas colorimétricas) e física (teor de água e absorção de água sob baixa pressão), às 6 e às 14 semanas. Os resultados dos ensaios realizados nesses muretes são expostos no Quadro 2.8. A metodologia e os princípios teóricos que estão por trás destes ensaios serão enunciados no capítulo seguinte.

Quadro 2.8 – Resultados dos ensaios de permeabilidade sob baixa pressão  
(Veiga *et al.*, 2009)

Painel	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]									
	5 minutos		10 minutos		15 minutos		30 minutos		60 minutos	
	42 d	98 d	42 d	98 d	42 d	98 d	42 d	98 d	42 d	98 d
1	0,23	0,07	0,23	0,10	0,23	0,13	0,27	0,17	0,30	0,23
2	0,33	0,07	0,50	0,17	0,63	0,23	1,07	0,47	1,63	0,97
3	0,80	0,73	1,13	1,13	1,37	1,30	2,07	1,80	2,93	3,17
4	1,40	> 4,00	> 3,90	> 4,00	> 4,00	> 4,00	> 4,00	> 4,00	> 4,00	> 4,00
5	0,50	1,13	0,87	1,77	1,13	2,33	1,93	> 3,17	2,60	> 3,53

Quadro 2.9 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas, aos 42 dias  
(Veiga *et al.*, 2009)

Painel	Concentração de sais	
	Sulfatos [mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	Cloretos [mg/l Cl <sup>-</sup> ]
1	> 400 ; < 800	> 500 ; < 1000
2	> 400 ; < 800	> 500 ; < 1000
3	< 200	< 500
4	> 200 ; < 400	1000
5	> 400 ; < 800	< 500

Quadro 2.10 – Resultados dos ensaios de choque da esfera e de penetração controlada, aos 42 e aos 98 dias  
(Veiga *et al.*, 2009)

Painel	Choque de esfera [Ø,mm]		Penetração controlada [mm]					
	6 semanas	14 semanas	6 semanas			14 semanas		
			1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração	1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração
1	16	15	8,3	3,3	3,3	6,7	2,3	2,7
2	11	12	5,0	2,0	1,3	4,0	1,7	1,3
3	10	11	4,3	1,7	2,0	4,3	1,3	1,0
4	15	15	6,3	3,0	3,3	6,0	2,0	2,0
5	13	11	6,7	2,7	2,7	5,7	2,0	2,0

- **Forte de Sta. Marta** (Tavares *et al.*, 2008)

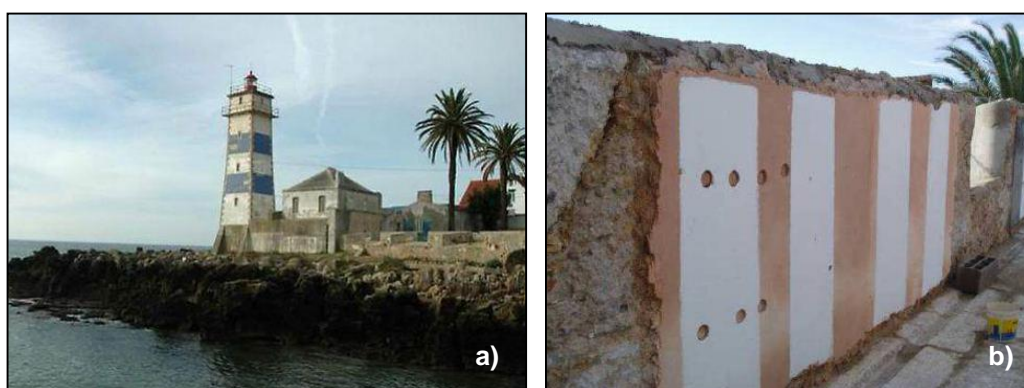


Fig. 2.11 – Vista do forte antes da intervenção (a) painel experimental (b)

Este edifício de tipologia militar foi erguido em meados do séc. XVII sobre um maciço rochoso junto ao mar, como se pode observar na Figura 2.11. A primeira intervenção conhecida data de meados do século XVIII. Face à necessidade de substituir as argamassas de reboco do forte, naturalmente degradadas pela idade e pelas condições ambientais severas a que está exposto, iniciou-se em 2004 um estudo para caracterizar os rebocos e os suportes existentes, para de seguida aplicar e avaliar algumas argamassas, seleccionadas a partir de estudos anteriormente realizados. Foi possível constatar o bom estado de conservação do forte, em termos estruturais, tendo-se verificado também que a alvenaria das muralhas era irregular, constituída por pedra e tijolo, com grande espessura. A cor da alvenaria - vermelho tijolo - permitiu concluir que a argamassa utilizada era de cal, com incorporação de terra retirada da zona, a qual apresenta essa cor avermelhada. Foi no entanto possível encontrar vestígios de argamassa de cimento aplicados no forte, numa intervenção realizada anos antes deste estudo, o que originou diversos casos de destacamentos e perda de coesão nos paramentos das paredes exteriores.

Foram realizados quatro painéis experimentais, cada um dividido em três sub-painéis, de modo a testar três condições de acabamento diferentes – sem pintura, com pintura de silicatos e com pintura de siloxanos. A representação esquemática desses painéis é apresentada nos Quadros 2.11 e 2.12.

Quadro 2.11 – Composição dos painéis experimentais do forte de Sta. Marta (Tavares *et al.*, 2008)

Painel	Sub-Painel	Ligante	Traço Volumétrico				Tipo de Acabamento
			Salpisco	1ª camada	2ª camada	Camada de acabamento	
1	A	Cal aérea e cimento	1:1:6 (Cal aérea : cimento : agregado)	1:1:6	1:2:9	1:2:(4+5) [cal aérea : cimento : (pó de pedra+areia de esboço)]	Rugoso, sem pintura
	B	Cal aérea e cimento	1:1:6 (Cal aérea : cimento : agregado)	1:1:6	1:2:9	1:2:(4+5) [cal aérea : cimento : (pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de silicatos
	C	Cal aérea e cimento	1:1:6 (Cal aérea : cimento : agregado)	1:1:6	1:2:9	1:2:(4+5) [cal aérea : cimento : (pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de siloxanos
2	A	Cal aérea e metacaulino	1:1:4 (cal aérea : metacaulino : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:metacaulino:(pó de pedra+areia de esboço)]	Rugoso, sem pintura
	B	Cal aérea e metacaulino	1:1:4 (cal aérea : metacaulino : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:metacaulino:(pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de silicatos
	C	Cal aérea e metacaulino	1:1:4 (cal aérea : metacaulino : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:metacaulino:(pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de siloxanos
3	A	Argamassa de cal hidráulica pré-doseada	Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Rugoso, sem pintura
	B	Argamassa de cal hidráulica pré-doseada	Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Rugoso, com pintura de silicatos
	C	Argamassa de cal hidráulica pré-doseada	Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Aplicado em duas camadas, segundo instruções do fabricante		Rugoso, com pintura de siloxanos

Quadro 2.12 – Composição dos painéis experimentais do forte de Sta. Marta (continuação) (Tavares *et al.*, 2008)

Painel	Sub-Painel	Ligante	Traço Volumétrico				Tipo de Acabamento
			Salpisco	1ª camada	2ª camada	Camada de acabamento	
4	A	Cal aérea e argila expandida	1:1:4 (cal aérea : argila expandida : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:argila expandida:(pó de pedra+areia de esboço)]	Rugoso, sem pintura
	B	Cal aérea e argila expandida	1:1:4 (cal aérea : argila expandida : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:argila expandida:(pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de silicatos
	C	Cal aérea e argila expandida	1:1:4 (cal aérea : argila expandida : agregado)	1:1:4	1:1:4,5	1:1:(2+2,5) [cal aérea:argila expandida:(pó de pedra+areia de esboço)]	Liso, com pintura de siloxanos

Sobre estes painéis foram realizados ensaios *in situ*, para posterior análise e comparação com ensaios já efetuados em laboratório destas formulações, com exceção da argamassa de cal hidráulica pré-doseada, que não havia sido caracterizada em laboratório. Foram realizados ensaios aos 55 dias, no caso do painel 3; 85 dias, no caso do painel 2 e 100 dias, no caso dos painéis 1 e 4, de natureza mecânica (resistência ao choque da esfera, penetração controlada, arrancamento, durómetro e esclerómetro) e física (teor de água e permeabilidade à água sob baixa pressão). Nos Quadros seguintes apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência com durómetro Shore A e com esclerómetro pendular, assim como o ensaio de permeabilidade sob baixa pressão com tubos de Karsten.



Fig. 2.12 – Ensaio de permeabilidade sob baixa pressão (a) ensaio com esclerómetro pendular (b)

Quadro 2.13 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão (valores médios) (Tavares *et al.*, 2008)

Painel	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]				
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
<b>1 A</b> (cal aérea e cimento) 100 dias	2,03	> 3,13	> 3,30	> 3,70	> 4,00
<b>2 A</b> (cal aérea e metacaulino) 100 dias	1,88	> 2,42	> 2,74	> 3,24	> 3,34
<b>3 A</b> (pré-doseada de cimento e cal hidráulica) 85 dias	0,10	0,25	0,43	1,15	> 3,13
<b>4 A</b> (cal aérea e argila expandida) 55 dias	1,97	-	-	> 4,00	> 4,00

Quadro 2.14 – Resultados dos ensaios com durómetro e esclerómetro pendular (valores médios) (Tavares *et al.*, 2008)

Painel	Sub-Painel	Durómetro [graus Shore]	Esclerómetro [escala de Vickers]
<b>1</b> 100 d	A	93	39
	B	93	34
	C	95	40
<b>2</b> 100 d	A	93	23
	B	93	23
	C	94	31
<b>3</b> 85 d	A	84	31
	B	79	31
	C	86	29
<b>4</b> 55 d	A	92	30
	B	92	30
	C	97	33

Quadro 2.15 – Resultados dos ensaios de choque da esfera e de penetração controlada (valores médios)  
(Tavares *et al.*, 2008)

Painel	Choque da esfera [Ø,mm]	Penetração controlada [mm]		
		1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração
<b>1A</b> (cal aérea e cimento) (100 d)	10	2,3	1,3	1,0
<b>2A</b> (cal aérea e metacaulino) (100 d)	14	3,7	2,7	2,3
<b>3A</b> (pré-doseada de cimento e cal hidráulica) (85 d)	14	4,7	1,7	1,7
<b>4A</b> (cal aérea e argila expandida) (55 d)	13	3,7	2,0	1,3

- **Centro histórico de Palmela** (Veiga, 2011a)

Inserido no programa de requalificação do centro histórico de Palmela, realizaram-se aplicações em painéis experimentais, executados em dois locais diferentes do referido centro histórico – Largo do Mercado e Rua Contra Almirante Jaime Afreixo. Estes painéis estão expostos a ambiente urbano, com os edifícios envolventes a conferirem proteção face ao vento e à radiação solar. Em ambas as ruas foram executados quatro painéis, com dimensões de 1 m x 2,5 m, tendo-se procedido sempre à limpeza e humedecimento do suporte antes da aplicação da 1ª camada. As aplicações dos painéis experimentais estão esquematizadas no Quadro 2.15.

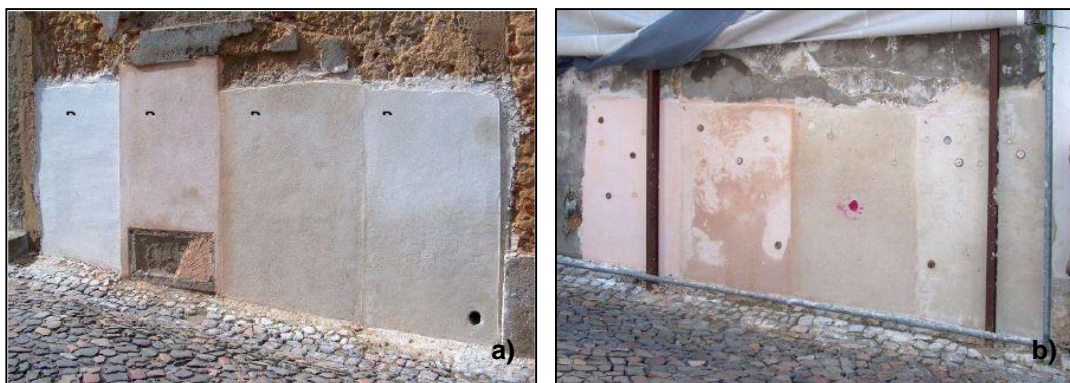


Fig. 2.13 – Painéis experimentais da Rua Contra Almirante Jaime Afreixo (a) e Largo do Mercado (b), 90 dias após a aplicação

Quadro 2.16 – Composição dos painéis experimentais do centro histórico de Palmela (Veiga, 2011)

Painel	Ligante	Agregado	Traço Volumétrico			Tipo de Acabamento
			Emboço	Reboco	Camada de acabamento	
1	Cal aérea e cimento branco	Mistura de areia grossa e areia siliciosa fina	1:1:6	1:2:9	1:3:12	Reboco à vista
2	Cal aérea	Mistura de areia grossa e areia siliciosa fina	1:3	1:3	1:3	Reboco à vista
3	Cal aérea e metacaulino	Mistura de areia grossa e areia siliciosa fina	1:0,5:2,5	1:0,5:3,5	1:0,5:3,5	Reboco à vista
4	Argamassa pré-doseada com base em cal aérea e cimento branco					*

\* Reboco à vista na Rua Contra Alm. Jaime Afreixo e revestimento mineral fino à base de cal no largo do Mercado

Foram realizados ensaios aos 90 dias para caracterização mecânica (choque da esfera e penetração controlada), física (teor de água e permeabilidade à água sob baixa pressão) e química (identificação de sais através de fitas colorimétricas) dos rebocos, apresentando-se em seguida os resultados dos referidos ensaios.

Quadro 2.17 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias (valores médios) (Veiga, 2011)

Painel	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]				
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
1	0,1	0,3	0,5	1,0	1,7
2	1,1	1,7	2,2	> 3,3	> 4,0
3	0,4	1,0	1,6	> 2,9	> 3,6
4	0	0	0	0,1	0,2

Quadro 2.18 – Resultados do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias (valores médios) (Veiga, 2011)

Painel	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]				
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
1	0	0	0	0,1	-
2	1,2	> 2,5	> 2,8	> 3,5	-
3	1,1	2,3	> 2,9	> 4	-
4	0,3	0,5	0,6	1,0	-

Quadro 2.19 – Resultados dos ensaio de choque de esfera e penetração controlada dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias (Veiga, 2011)

Painel	Choque de esfera [Ø,mm]	Penetração controlada [mm]		
		1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração
1	10	2,0	2,0	1,3
2	25	12,3	7,7	6,3
3	12	4,0	2,0	1,0
4	13	4,0	1,7	1,7

Quadro 2.20 – Resultados dos ensaio de choque de esfera e penetração controlada dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias (Veiga, 2011)

Painel	Choque de esfera [Ø,mm]	Penetração controlada [mm]		
		1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração
1	10	1,3	1,3	0,7
2	23	11,3	9,0	7,0
3	11	4,3	1,0	1,0
4	13	1,3	1,3	0

Quadro 2.21 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas dos painéis da Rua Contra Alm. Jaime Freixo aos 90 dias (Veiga, 2011)

Painel	Concentração de sais	
	Sulfatos [mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	Cloretos [mg/l Cl <sup>-</sup> ]
1	<b>Zona com fissuras: 800-1200</b> <b>Zona sem fissuras: &lt; 200</b>	0-500
2	< 200	0-500
3	< 200	0-500
4	< 200	0-500

Quadro 2.22 – Resultados do ensaio de identificação de sais através de fitas colorimétricas dos painéis do Largo do Mercado aos 90 dias (Veiga, 2011)

Painel	Concentração de sais	
	Sulfatos [mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	Cloretos [mg/l Cl <sup>-</sup> ]
1	> 1600	0-500
2	< 200	0-500
3	< 200	0-500
4	< 200	0

- **Estação de envelhecimento natural de revestimentos de paredes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (EENRevPa)** (Magalhães et al., 2003)



Fig. 2.14 – Aspeto dos muretes da EENRevPa

A estação de envelhecimento natural (EENRevPa) foi construída no LNEC, no final dos anos 70, e desde aí tem servido para diversos estudos sobre argamassas de revestimentos, permitindo estudar o seu comportamento em serviço. Atualmente, são estudados tanto os novos materiais de revestimento, com novas características, como os materiais tradicionais e a sua viabilidade atual (MILLER, 2008). Os muretes foram construídos de modo a terem uma das faces orientada a Norte e a face oposta orientada a Sul, permitindo assim introduzir a variável da orientação solar nos estudos a realizar. Estes foram construídos na sua maioria em alvenaria de tijolo, com uma espessura de 20 cm, sendo protegidos no topo por telhas cerâmicas. Os revestimentos são aplicados sobre este suporte, sendo os rebocos tradicionais aplicados geralmente em 2 camadas, com espessura total de cerca de 2,5 cm.

No âmbito de um estudo sobre a utilização de ensaios *in situ* para diagnóstico de anomalias e avaliação da resistência mecânica de revestimentos de paredes (MAGALHÃES *et al.*, 2003), foram ensaiados quatro revestimentos de parede aplicados em quatro muretes da estação. No Quadro 2.23 apresenta-se um esquema de dois dos muretes ensaiados:

Quadro 2.23 – Composição dos muretes do EENRevPa (Magalhães *et al.*, 2003)

Identificação do Murete	Orientação	Idade de Aplicação	Ligante	Traço Volumétrico
M 47	Norte	3 anos	Cal aérea	1:1,5:1,5 (cal aérea : areia de rio : areia amarela de Corroios)
M 48	Norte	3 anos	Cal aérea	1:1,5:1,5 (cal aérea : areia de rio : areia amarela de Corroios)
M 54	Sul	3 anos	Cal aérea e pozolana	1:1:4 (cal aérea : pozolana : areia de rio)

Para avaliar as características mecânicas foram efetuados cinco ensaios: micro-perfuração, penetração controlada, esclerómetro (Schmidt tipo L), choque da esfera e ultra-sons.

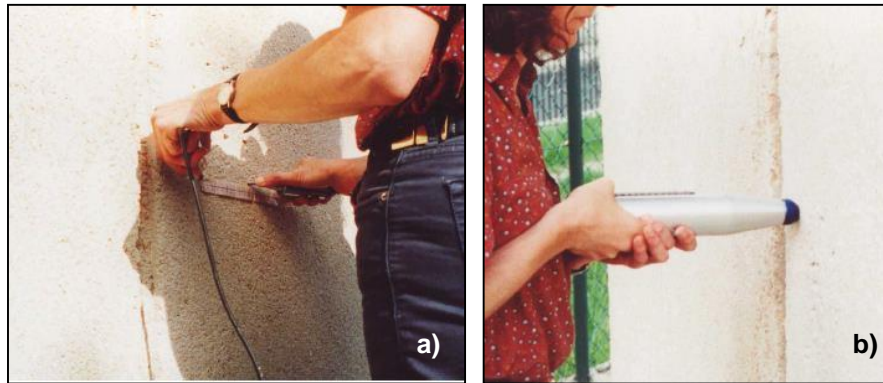


Fig. 2.15 – Ensaio de ultra-sons (a) e de esclerómetro Schmidt tipo L (b) nos muretes da EENRevPa

No Quadro 2.24 apresenta-se a síntese dos resultados obtidos nos ensaios de ultrassons, esclerómetro Schmidt tipo L, choque de esfera e penetração controlada.

Quadro 2.24 – Resumo dos resultados de ensaios mecânicos realizados nos muretes (Magalhães *et al.*, 2003)

Murete	Ultra-Sons [m/s]	Esclerómetro [escala Vickers]	Choque de esfera (Ø) [mm]	Penetração controlada (total das 3 penetrações) [mm]
M 47	2010 - 2200	nd	13,6	5,0
M 48	1070 - 1180	33	15,8	7,9
M 54	900 - 980	28	15,6	9,2

nd- não determinado

- **Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa** (Dias, 2013 e Jamú, 2013)



Fig. 2.16 – Argamassas de cal aérea aplicadas em murete de taipa na FCT-UNL

No âmbito das respetivas dissertações de mestrado, Dias (2013) e Jamú (2013) aplicaram argamassas de cal aérea, aos traços 1:2 e 1:3, num murete de taipa, construído na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos do campus da FCT-UNL, em Junho de 2012. Esta argamassa foi aplicada no alçado do murete, que se encontra orientado para Este. O murete foi dividido em 4 painéis, para utilizar 4 formulações diferentes de argamassas, sendo que em 2 desses painéis se aplicaram argamassas de cal aérea com terra na composição, sobrando os restantes painéis para as argamassas de referência, sem terra na composição, com traços volumétricos 1:2 e

1:3 de cal aérea e areia. A areia utilizada resultou de uma mistura proporcionada de três areias siliciosas lavadas e graduadas, que foram utilizadas no âmbito dos estudos realizados nos projetos METACAL e LIMECONTECH, e como tal estes rebocos têm particular interesse para o presente estudo.

Sobre este reboco foram realizados ensaios aos 90 dias, para avaliar parâmetros mecânicos (ultrassons, durómetro e esclerómetro) e físicos (tubos de Karsten). Os resultados destes ensaios podem ser consultados no Quadro 2.25. Os ensaios com esclerómetro pendular não são expostos, por ter sido utilizado um método diferente do seguido nesta dissertação.

Quadro 2.25 – Resumo dos resultados de ensaios realizados no murete, aos 90 dias (valores médios) (Dias, 2013 e Jamú, 2013)

Argamassa	Ultra-Sons [m/s]	Durómetro [graus Shore]	Tubos de Karsten ( $C_{abs.4ml}$ ) [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	Tubos de Karsten ( $C_{abs.5min}$ ) [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	Tubos de Karsten (tempo para absorver 4ml) [min]
CL 3	740	64,8	3,70	7,7	5,08
CL 2	551	62,8	-	10,7	-

$C_{abs.4ml}$  – Coeficiente de absorção do tempo necessário para absorver 4ml

Fazendo uma análise global dos estudos analisados, com aplicações de argamassas em condições de exposição natural, é possível verificar a existência de resultados bastante diversificados, mesmo usando métodos de aplicação e ensaio semelhantes. Ainda assim, conseguem-se observar algumas tendências gerais. As argamassas de cal com pozolanas registam, em geral, melhor comportamento face à água do que as argamassas sem pozolanas, o que se reflete numa menor absorção de água. Em termos de características mecânicas, medidas através de resistência superficial, também se encontra uma tendência para melhor comportamento das argamassas de cal com pozolanas relativamente às constituídas apenas por cal.

### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Planeamento da campanha experimental

A campanha experimental realizada na presente dissertação divide-se em duas fases distintas. A primeira fase consistiu na aplicação das argamassas de reboco nos muretes experimentais da estação de envelhecimento natural de revestimentos de paredes do LNEC (EENRevPa). Para isso foram utilizados dois muretes experimentais sem qualquer revestimento anteriormente aplicado e ainda uma metade de um terceiro murete, também sem qualquer revestimento. Os rebocos foram executados nas duas faces dos muretes, em que uma das faces está virada a Norte, estando a face oposta virada a Sul.

Os rebocos aplicados são constituídos por argamassas de cal aérea e cal hidráulica, sem metacaulino ou com metacaulino em substituição parcial da massa de ligante. No total foram formuladas 8 composições diferentes de argamassas, fazendo variar o tipo de ligante, a proporção ligante:agregado e a percentagem de metacaulino.

A segunda fase da campanha experimental consistiu na realização de vários ensaios *in situ* sobre os rebocos aplicados, a três idades de estudo distintas – 28, 90 e 180 dias – para avaliar o comportamento desses rebocos, e a sua evolução. Toda a campanha experimental foi desenvolvida nos laboratórios do NRI e na EENRevPa do LNEC.

Como referido, foram formuladas argamassas com dois tipos de ligante diferentes – cal aérea (CL) e cal hidráulica natural (NHL). As argamassas à base de cal aérea utilizadas na campanha experimental obedeceram a três traços volumétricos e a 2 percentagens de metacaulino (MK) distintas:

- 1:2, com 0% e 30% de MK
- 1:2,5, com 30% de MK
- 1:3, com 0% e 30% de MK

No que diz respeito às argamassas de cal hidráulica natural, o estudo incidiu no traço volumétrico 1:3, sem metacaulino (0%), ou com duas percentagens de metacaulino: 5% e 10%. Escolheram-se formulações semelhantes às estudadas por outros autores, sobre provetes prismáticos ou aplicados em ambiente exterior, para permitir a comparação.

A simbologia adotada para distinguir as misturas é descrita em baixo:

- **CL\_1.2** → Cal aérea, com traço volumétrico 1:2 e 0% de metacaulino
- **CL\_1.2\_30MK** → Cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:2 e com 30% de massa de cal substituída por metacaulino
- **CL\_1.2,5\_30MK** → Cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:2,5 e 30% de massa de cal substituída por metacaulino
- **CL\_1.3** → Cal aérea, com traço volumétrico 1:3 e 0% de metacaulino
- **CL\_1.3\_30MK** → Cal aérea, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 30% de massa de cal substituída por metacaulino
- **NHL3,5\_1.3** → Cal hidráulica natural NHL3,5, com traço volumétrico 1:3 e 0% de metacaulino
- **NHL3,5\_1.3\_5MK** → Cal hidráulica natural NHL3,5, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 5% de massa de cal substituída por metacaulino
- **NHL3,5\_1.3\_10MK** → Cal hidráulica natural NHL3,5, partindo do traço volumétrico 1:3 e com 10% de massa de cal substituída por metacaulino

Os muretes experimentais da EENREvPa apresentam, como referido no capítulo anterior, dimensões aproximadas de 2x2 m, e são constituídos por uma base em betão sobre a qual está erigida uma alvenaria de tijolo furado de 20 cm. Estes muretes encontram-se numerados, para facilitar a sua identificação, tendo-se utilizado neste trabalho os muretes 56, 61 e 64. Tendo em conta a escassez de muretes disponíveis sem qualquer revestimento aplicado, optou-se por dividi-los em três painéis, permitindo assim ter três composições por cada face de painel. No caso do murete 56, metade de cada uma das faces já se encontrava revestida com um reboco, tendo-se optado por utilizar apenas uma composição, abrangendo a outra metade sem revestimento. Por sua vez, os muretes 61 e 64 foram divididos em 3 painéis, tanto na face Norte como na face Sul, com as faixas laterais a medir 0,75m, ficando a faixa central com 0,50 m disponíveis.

Quadro 3.1 – Representação esquemática das composições utilizadas nos muretes experimentais

Murete	Orientação	Faixa	Composição
56	N	-	CL_1.2,5_30MK
	S	-	CL_1.2,5_30MK
61	N	Direita	CL_1.2_30MK
		Centro	CL_1.3
		Esquerda	CL_1.3_30MK
	S	Direita	CL_1.3_30MK
		Centro	CL_1.2
		Esquerda	CL_1.2_30MK
64	N	Direita	NHL3,5_1.3_10MK
		Centro	NHL3,5_1.3
		Esquerda	NHL3,5_1.3_5MK
	S	Direita	NHL3,5_1.3_5MK
		Centro	NHL3,5_1.3
		Esquerda	NHL3,5_1.3_10MK

## 3.2. Materiais utilizados

Neste subcapítulo apresentam-se os materiais utilizados na formulação das argamassas aplicadas ao longo da campanha experimental, expondo as características desses materiais e a sua origem de produção.

### 3.2.1. Cal aérea

A cal aérea utilizada nas amassaduras realizadas no âmbito da campanha experimental foi uma cal aérea hidratada em pó produzida pela Lusical, designada como H100. Esta cal está classificada, de acordo com a norma NP EN 459-1:2011, na classe CL90-S, tratando-se por isso de uma cal cálcica. O lote desta cal foi disponibilizado pelo fabricante e entregue no LNEC em Novembro de 2012. Importa referir que, durante o período temporal anterior e em que foram realizadas amassaduras com esta cal, houve o cuidado de manter os sacos dentro do laboratório, evitando contacto com humidade, havendo também sempre a preocupação de manter os sacos fechados quando não estavam a ser utilizados, de modo a evitar o contacto prolongado com o dióxido de carbono atmosférico que seria passível de causar fenómeno de carbonatação. A composição química da cal aérea utilizada no presente estudo foi analisada por Gameiro *et al.* (2012), e pode ser consultada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Composição química da cal aérea, em % de massa  
(Gameiro *et al.*, 2012b)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I. *
Cal Aérea	-	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	-	0,02	0,04	0,01	20,45

\* Loss on ignition (Perda ao fogo)

### 3.2.2. Cal hidráulica natural

O outro ligante utilizado nas misturas efetuadas foi uma cal hidráulica natural produzida pela SECIL, classificada segundo a norma NP EN 459-1:2011 como sendo da classe NHL3,5. Como referido no subcapítulo 2.2.2.1, trata-se de uma cal hidráulica sem aditivos, com uma classe de resistência à compressão determinada aos 28 dias de 3,5 N/mm<sup>2</sup>. O lote foi cedido ao LNEC pela SECIL, e a sua receção foi feita em Novembro de 2012 (Fig. 3.1). Foram seguidas as mesmas precauções em termos de armazenamento dos sacos que se teve com os sacos de cal aérea, conforme referido no subcapítulo anterior.



Fig. 3.1 – Cal hidráulica natural utilizada nos trabalhos

A composição química da cal hidráulica natural utilizada no presente estudo foi analisada por Grilo *et al.* (2013), e pode ser consultada no Quadro 3.3. De referir que esta análise foi feita a uma cal hidráulica natural pertencente a outro lote, diferente do utilizado neste trabalho.

Quadro 3.3 – Composição química da cal hidráulica natural, em % de massa  
(Grilo *et al.*, 2013)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	L.O.I. *
Cal hidráulica natural	5,70	1,84	1,22	0,02	1,00	62,00	0,08	0,49	0,14	0,03	1,00	26,00

\* Loss on ignition (Perda ao fogo)

### 3.2.3. Metacaulino

O metacaulino usado é produzido em França pela IMERYS. Esta pozolana artificial é designada por Argical-M 1200S e foi cedida pelo fabricante ao LNEC em Setembro de 2012. Em linha com os procedimentos seguidos no caso dos ligantes acima referidos, os sacos de metacaulino permaneceram sempre fechados e em locais não expostos a teores de humidade elevados. A

composição química do metacaulino utilizado no presente estudo foi analisada por Gameiro *et al.* (2012b), e pode ser consultada no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino, em % de massa (Gameiro *et al.*, 2012b)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I. *
Metacaulino	54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	0,10	-	1,03	1,55	0,06	1,90

\* Loss on ignition (Perda ao fogo)

### 3.2.4. Agregados

Relativamente aos agregados, estabeleceu-se que se utilizaria uma mistura de areias previamente definida e utilizada nos estudos enquadrados no âmbito do projeto FCTMETACAL e LIMECONTECH. Trata-se de uma mistura de três areias siliciosas diferentes, doseadas de forma a não apresentarem uma dimensão de partículas superior a 2 mm (Borsoi *et al.*, 2012). Estas três areias são comercializadas pela AREIPOR e têm a designação de APAS 12, APAS 20 e APAS 30, respetivamente, sendo a primeira a que apresenta partículas de maior dimensão, tendo as outras uma dimensão de partículas decrescente. A mistura de areias seguiu o traço volumétrico 1:1,5:1,5 (APAS 12:APAS 20:APAS 30). Na Figura 3.2 pode consultar-se a análise granulométrica de cada um dos tipos de areia, assim como da mistura, realizada por Massena (2011).

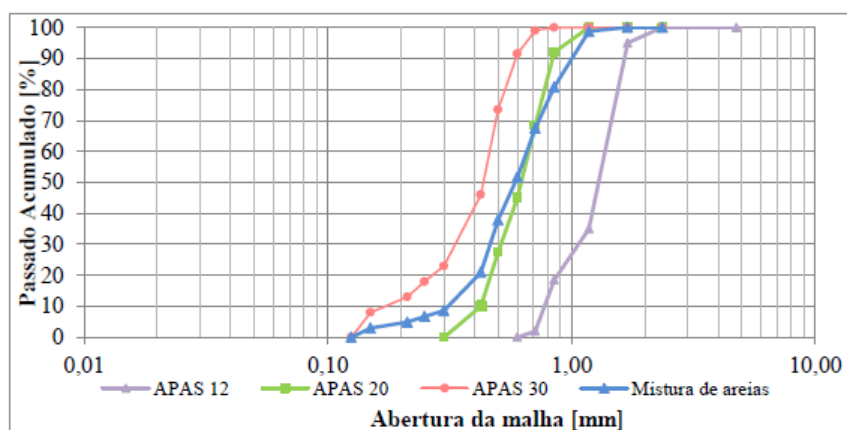


Fig. 3.2 – Curva granulométrica de cada uma das areias e da mistura (Massena, 2011)

De referir que o lote destas areias foi adquirido e transportado para o LNEC em Novembro de 2012.

### 3.3. Caracterização efetuada das matérias-primas – Baridade

Este ensaio de caracterização das matérias-primas a utilizar na campanha experimental tem como finalidade determinar a massa de material seco que preenche um recipiente de volume conhecido. O conhecimento desta grandeza é importante, uma vez que permite converter o traço volumétrico da mistura em traço em massa, o que resulta numa maior precisão nas dosagens dos materiais em laboratório, aquando da preparação das misturas. A baridade dos materiais foi determinada segundo o procedimento da NP 955 (IGPAI, 1973).

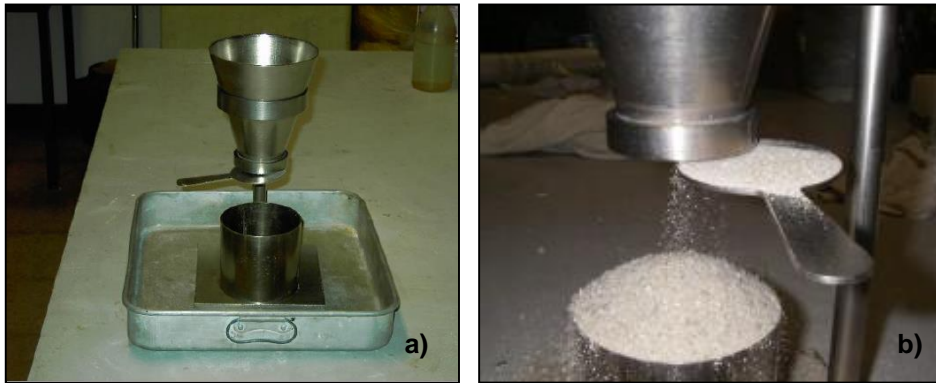


Fig. 3.3 – Aparelho utilizado no ensaio de baridade (a) queda do material no recipiente cilíndrico (b)

- **Equipamento e material**

- Aparelho que consiste num molde troncocónico, recipiente cilíndrico e haste amovível;
- Colher;
- Espátula;
- Balança digital de precisão 0,1 g;

- **Procedimento experimental**

- Pesou-se o recipiente cilíndrico, vazio e limpo, numa balança de precisão 0,1 g;
- Colocou-se o material no molde cónico através de uma colher, deixando-o cair de uma altura inferior a 5 cm da boca do molde, até completar a sua capacidade;
- Rodou-se a haste, permitindo a queda do material no recipiente cilíndrico;
- Nivelou-se a superfície do recipiente com uma espátula;
- Pesou-se o recipiente cheio.

- **Resultados**

A baridade do material seco foi obtida através da expressão:

$$\rho = \frac{\text{Massa total} - \text{Massa do recipiente vazio}}{\text{Volume do recipiente}}$$

Sendo,

$\rho$  - massa volúmica aparente do material seco [g/dm<sup>3</sup>]

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3.5. Como seria expectável, as areias apresentam os valores mais elevados de baridade, isto é, 1 cm<sup>3</sup> de areia apresenta uma massa bastante superior ao mesmo volume de qualquer um dos ligantes utilizados. Verifica-se também que a baridade das areias aumenta proporcionalmente à sua granulometria. A mistura de areias apresenta um valor superior ao de qualquer uma das areias separadamente, algo que está relacionado com o arranjo das partículas de diferentes dimensões, que formam uma mistura compacta, originando menor índice de vazios. O metacaulino apresenta o valor de baridade mais baixo, sendo ligeiramente inferior ao da cal aérea, e bastante inferior em comparação com a cal hidráulica natural.

Quadro 3.5 – Baridade dos constituintes das argamassas

Material	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	DP [g/cm <sup>3</sup> ]
APAS 12	1,439	0,007
APAS 20	1,432	0,025
APAS 30	1,400	0,011
Mistura de areias	1,498	0,018
Cal aérea	0,365	0,011
Cal hidráulica natural NHL3,5	0,740	0,012
Metacaulino	0,303	0,003

### 3.4. Produção das argamassas

A produção das argamassas decorreu em duas fases distintas. Numa primeira fase, procedeu-se à execução das misturas predefinidas na cuba misturadora, num processo análogo aos outros trabalhos inseridos no projeto FCTMETACAL, e cujo objetivo era avaliar a consistência por espalhamento, de forma a encontrar a relação água/ligante adequada. Esse processo de amassadura baseou-se nas especificações da norma EN 1015-2 (CEN, 1999), tendo sido feita uma adaptação a essa norma, no que diz respeito aos tempos de amassadura e à sequência dos materiais. Sequencialmente, pesaram-se os constituintes secos em balança de precisão 0,1 g, colocando-os posteriormente na cuba misturadora; realizou-se uma mistura manual no interior da cuba, com colher de pedreiro, para garantir uma melhor homogeneização; colocou-se a cuba na misturadora e ligou-se o aparelho, juntando a quantidade de água predefinida, durante os primeiros 30 segundos de amassadura; decorridos 150 segundos do início de funcionamento da misturadora, esta foi desligada, e procedeu-se a nova mistura manual, para retirar o material aderente às paredes da cuba, e assim garantir uma mais completa homogeneização de toda a mistura; finalmente, ligou-se novamente o aparelho durante 30 segundos, terminando o processo no final desse período, perfazendo um total de 3 minutos.



Fig. 3.4 – Misturadora (a) final do processo de amassadura (b)

A segunda fase de produção das argamassas decorreu após a determinação da relação água/ligante que garantia uma adequada trabalhabilidade da mistura. Esta fase corresponde à fase final de preparação das argamassas para aplicação nos muretes. Assim, para este fim, e porque foi necessário produzir quantidades elevadas de argamassa, optou-se por realizar as amassaduras numa betoneira de eixo vertical disponível no laboratório do NRI do LNEC. Não existindo nenhuma norma que especifique o tempo de amassadura num aparelho deste tipo, e tendo em conta que um dos objetivos do trabalho passa por simular as condições reais de obra, não se padronizou um tempo de amassadura, terminando o processo quando se considerava que a argamassa já se apresentava homogênea e com trabalhabilidade adequada. Mantiveram-se todas as condições nas repetições de

amassaduras, exceto o tempo, que variou entre os 4 e os 5 minutos, consoante a trabalhabilidade e homogeneização da mistura. Em termos de pesagem dos constituintes, também nesta fase se optou por transformar o traço volumétrico em traço em massa, pesando-se os materiais numa balança de precisão 0,1 g, antes de os colocar no depósito da betoneira.



Fig. 3.5 – Betoneira de eixo vertical

No Quadro 3.6 apresentam-se as quantidades dos materiais utilizados nas amassaduras efetuadas na misturadora, para avaliação da consistência por espalhamento, e no Quadro 3.7 expõem-se as quantidades dos componentes usados nas amassaduras efetuadas na betoneira de eixo vertical, para aplicação nos muretes.

Quadro 3.6 – Quantidades de amassadura na cuba da misturadora

Argamassa	Massa cuba [g]									
	CL	NHL 3,5	MK	CL+MK	NHL3,5+MK	Ar 12	Ar 20	Ar 30	Ar total	Vol. água [mL]
CL_1.2	213,9	-	-	213,9	-	625	937,5	937,5	2500	380
CL_1.2_30MK	149,7	-	64,2	213,9	-	625	937,5	937,5	2500	390
CL_1.3	160,5	-	-	160,5	-	625	937,5	937,5	2500	400
CL_1.3_30MK	112,3	-	48,2	160,5	-	625	937,5	937,5	2500	420
CL_1:2,5_30MK	128,4	-	55,0	183,4	-	625	937,5	937,5	2500	420
NHL3,5_1.3_5MK	-	308,8	16,3	-	325,1	625	937,5	937,5	2500	350
NHL3,5_1.3_10MK	-	292,6	32,5	-	325,1	625	937,5	937,5	2500	350
NHL3,5_1.3	-	325,1	-	-	325,1	625	937,5	937,5	2500	350

Quadro 3.7 – Quantidades de amassadura na betoneira de eixo vertical

Argamassa	Massa betoneira [kg]									
	CL	NHL 3,5	MK	CL+MK	NHL3,5+MK	Ar 12	Ar 20	Ar 30	Ar total	Vol. água [mL]
CL_1.2	4,26	-	-	4,26	-	8,75	13,13	13,13	35,00	7838
CL_1.2_30MK	2,98	-	1,28	4,26	-	8,75	13,13	13,13	35,00	7966
CL_1.3	2,84	-	-	2,84	-	8,75	13,13	13,13	35,00	7185
CL_1.3_30MK	1,99	-	0,85	2,84	-	8,75	13,13	13,13	35,00	7583
CL_1:2,5_30MK	2,39	-	1,02	3,41	-	8,75	13,13	13,13	35,00	7979
NHL3,5_1.3_5MK	-	5,48	0,29	-	5,76	8,75	13,13	13,13	35,00	6451
NHL3,5_1.3_10MK	-	5,19	0,58	-	5,76	8,75	13,13	13,13	35,00	6451
NHL3,5_1.3	-	5,76	-	-	5,76	8,75	13,13	13,13	35,00	6451

### 3.5. Caracterização das argamassas no estado fresco

#### 3.5.1. Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento tem como objetivo avaliar a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco, contribuindo assim para definir a razão água/ligante utilizada para a obtenção de uma argamassa com consistência e trabalhabilidade adequadas. Este ensaio, realizado instantes após o final do processo de amassadura na cuba misturadora, foi efetuado na mesa de espalhamento, de acordo com as especificações da norma EN 1015-3 (CEN, 1999).

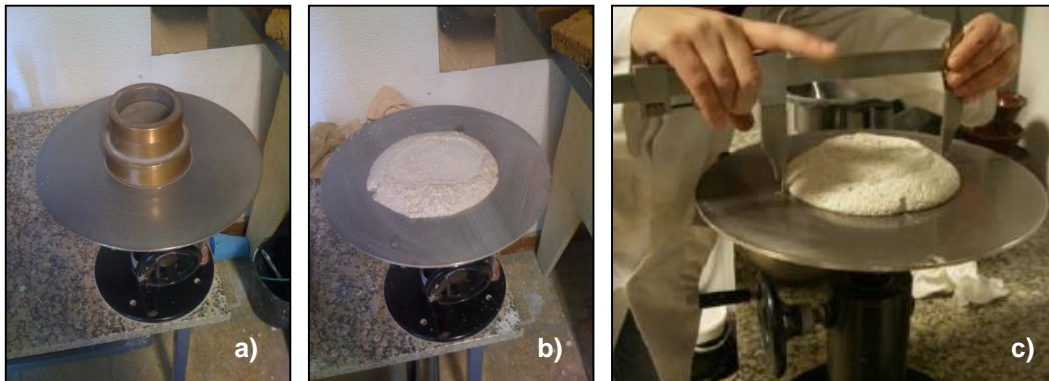


Fig. 3.6 – Mesa de espalhamento com molde troncocónico (a) argamassa espalhada (b) medição do diâmetro de espalhamento (c)

- **Equipamento e material**
  - Mesa de espalhamento;
  - Molde troncocónico;
  - Colher de pedreiro;
  - Pilão;
  - Craveira
  
- **Procedimento experimental**
  - Colocou-se a argamassa fresca no molde troncocónico, em 2 camadas, compactando cada uma dessas camadas através de 10 pancadas com o pilão;
  - Retirou-se o excesso de argamassa, rasando o topo do molde com o auxílio de uma colher de pedreiro;
  - Retirou-se cuidadosamente o molde, na vertical, e rodou-se a manivela 15 vezes, de modo a aplicar 15 pancadas, ao ritmo de uma pancada por segundo;
  - Mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada, em 2 direções perpendiculares, com o auxílio de uma craveira.
  
- **Resultados**

Partiu-se para este ensaio tendo como referência os valores de espalhamento obtidos em argamassas semelhantes, nos trabalhos inseridos no projeto FCTMETACAL. Com o desenvolvimento desses trabalhos, chegou-se a um valor de referência de consistência por espalhamento na ordem dos  $150 \pm 20$  mm, sendo de referir que todos os valores de consistência por espalhamento obtidos na presente dissertação se encontram no intervalo referido. Os traços volumétricos e ponderais, razões água/ligante e os valores de espalhamento médio das argamassas, são apresentados no Quadro 3.8. De referir que, de modo a obter trabalhabilidade e espalhamento dentro dos valores aceitáveis, não se adicionou sempre a mesma quantidade de água, introduzindo-se pequenas variações, algo que justifica a existência de razões A/L variáveis. A introdução de metacaulino nas argamassas provocou

uma diminuição da trabalhabilidade, que obrigou a ajustar a quantidade de água de amassadura, de modo a obter valores de espalhamento dentro dos valores recomendados para este tipo de argamassas.

Quadro 3.8 – Traços volumétricos e ponderais, razões água/ligante e os valores de espalhamento médio das argamassas

Argamassa	Traço Volumétrico [L+MK:Areia]	Traço Ponderal [L+MK:Areia]	Traço Ponderal [L:MK:Areia]	A/L	A/(L+MK)	Esp. [mm]
CL_1.2	1:2	1:11,7	1:0:11,7	1,78	1,78	141
CL_1.2_30MK	1:2	1:11,7	1:0,4:16,7	2,61	1,82	149
CL_1.3	1:3	1:15,6	1:0:15,6	2,49	2,49	160
CL_1.3_30MK	1:3	1:15,6	1:0,4:22,3	3,74	2,62	151
CL_1.2,5_30MK	1:2,5	1:13,6	1:0,4:19,5	3,27	2,29	157
NHL_1.3_5MK	1:3	1:7,7	1:0,1:8,1	1,13	1,08	152
NHL_1.3_10MK	1:3	1:7,7	1:0,1:8,5	1,20	1,08	145
NHL_1.3	1:3	1:7,7	1:0:7,7	1,08	1,08	169

### 3.6. Aplicações nos muretes experimentais

Como já foi referido, as argamassas para aplicação nos muretes experimentais foram executadas numa betoneira de eixo vertical. Obtidas as relações água/ligante, através do ensaio de consistência por espalhamento, foi possível transpor as quantidades dos materiais para adaptar à capacidade da betoneira, cujo depósito tinha uma capacidade de aproximadamente 40 kg.

Os rebocos foram assim aplicados nos muretes da estação de ensaio natural de revestimento de parede, em suporte de alvenaria de tijolo, de modo a avaliar o comportamento das argamassas num contexto próximo das condições reais de obra, em ambiente exterior. Todas as aplicações foram executadas da mesma forma, primeiro com aplicação de salpisco, tendo sido posteriormente aplicada uma camada única de base, constituindo o reboco. O salpisco foi executado com uma argamassa análoga à argamassa definida para aplicação como camada de base do reboco, mas com maior quantidade de água, tendo sido adicionada sempre a mesma quantidade de água relativamente à definida na relação água/ligante. Antes da aplicação do salpisco procedeu-se ao humedecimento da superfície da parede. A aplicação desta camada consiste na projeção da argamassa com a colher de pedreiro, e o seu principal objetivo é criar pontos de aderência para a camada subsequente do reboco, facilitando a sua aplicação. O tempo de secagem definido para a camada de salpisco foi de uma semana.



Fig. 3.7- Execução dos salpicos

A camada de base de reboco foi efetuada com uma espessura de 2 cm, sendo essa espessura garantida com a fixação de réguas metálicas aos muretes. O acabamento do reboco foi obtido apenas com a passagem de talocha metálica, passando-se por vezes também uma placa de XPS, de modo a apresentar maior quantidade de finos à superfície. No estado endurecido o acabamento apresentava um aspeto rugoso.

Todas as aplicações foram feitas no Inverno, entre Dezembro de 2012 e Fevereiro de 2013. Os dados de temperatura e humidade relativa registados no período de aplicação e cura dos rebocos podem ser consultados no Quadro 3.9 e nas Figuras 3.8 e 3.9. Como complemento à cura decorrente das condições ambientais, foi efetuada aspersão com água, em toda a superfície, nos primeiros 7 dias após a aplicação, sempre que não se registava precipitação.

Quadro 3.9 – Registos de temperatura e humidade relativa, até 15 dias após a aplicação de cada reboco (IDL-UL, 2013)

Argamassa	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Temperatura média [°C]	Humidade relativa máxima [%]	Humidade relativa mínima [%]	Humidade relativa média [%]
CL_1.2	17,2	7,8	12,5	99	61	84
CL_1.2_30MK	19,6	5,1	12,5	100	50	83
CL_1.3	17,4	7,1	11,8	100	39	83
CL_1.3_30MK	14,4	6,8	13,2	100	59	91
CL_1.2,5_30MK	19,6	6,8	13,5	99	50	90
NHL_1.3_5MK	17,1	7,3	11,7	100	49	80
NHL_1.3_10MK	17,4	7,1	11,6	100	39	79
NHL_1.3	18,7	7,3	11,7	100	41	82

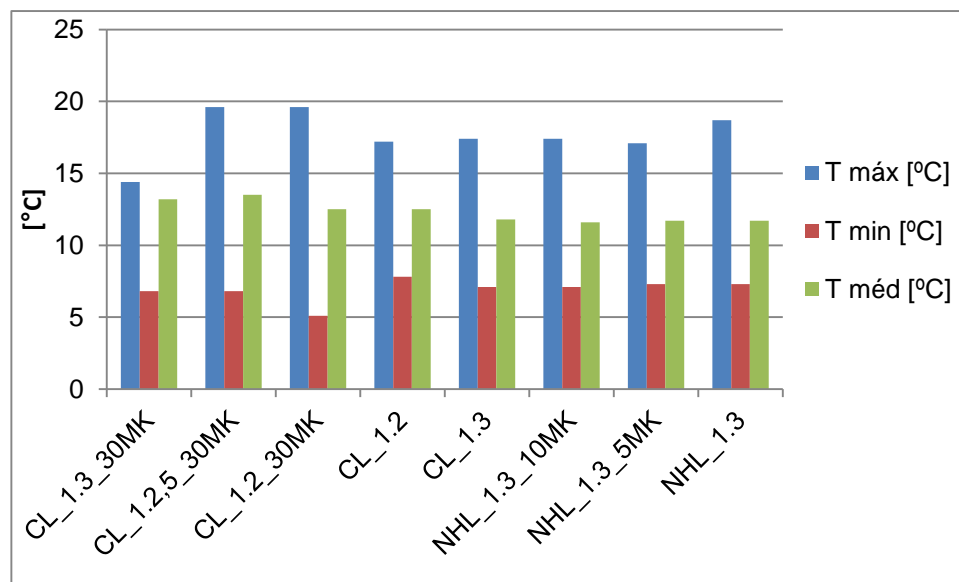


Fig. 3.8 – Registos de temperatura, até 15 dias após a aplicação de cada reboco

Como é possível observar, os rebocos aplicados com a formulação CL\_1.3\_30MK foram os rebocos sujeitos a menores temperaturas máximas, nos 15 dias após a aplicação, enquanto os rebocos aplicados com as formulações CL\_1.2\_30MK e CL\_1.2,5\_30MK foram sujeitos às temperaturas máximas mais elevadas. Relativamente às temperaturas mínimas, a formulação CL\_1.2\_30MK foi sujeito às temperaturas mais baixas, e a formulação CL\_1.2 às temperaturas mínimas mais elevadas. Os rebocos aplicados com as formulações CL\_1.3\_30MK e CL\_1.2,5\_30MK estiveram expostos às

temperaturas médias mais elevadas. No entanto verifica-se que não ocorreu um grande variação de temperaturas. É possível concluir que as condições de temperatura observadas 15 dias após a aplicação de todos os rebocos não aparentam ser desfavoráveis às reações de carbonatação da cal.

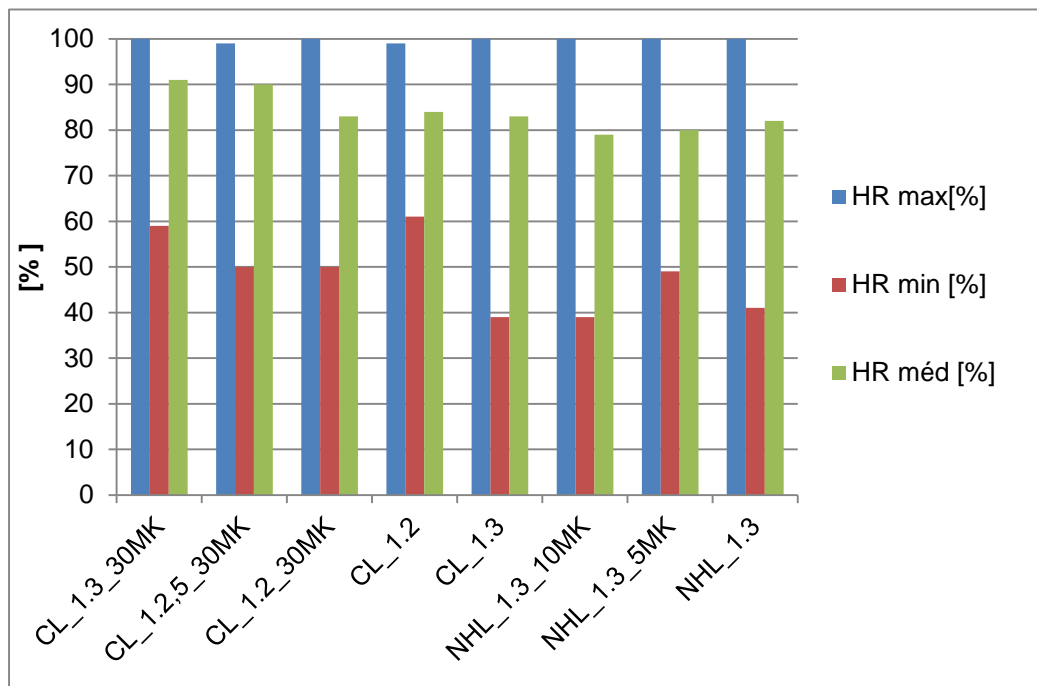


Fig. 3.9 - Registos de humidade relativa, até 15 dias após a aplicação de cada reboco

Em termos de humidade relativa, todas as rebocos estiveram sujeitos a humidade relativa máxima muito próxima ou igual a 100%, algo expectável, uma vez que estes foram aplicados no Inverno. Os rebocos das formulações CL\_1.3 e NHL\_1.3\_10MK estiveram expostos às percentagens mais baixas de humidade relativa mínima, enquanto as argamassas CL\_1.2 e CL\_1.3\_30MK foram sujeitos a humidades relativas mínimas mais elevadas. Os rebocos constituídos por formulações CL\_1.3\_30MK e CL\_1.2,5\_30MK estiveram expostos a humidades relativas médias acima dos 90%, valores elevados, mas que, como prova o estudo de Faria e Martins (2011), pelo menos até 95%, não serão impeditivas da ocorrência do processo de carbonatação.

A experiência de aplicação destas argamassas permitiu concluir que as argamassas com traços mais fracos em ligante (1:3) apresentam maiores dificuldades de aderência ao suporte, especialmente as argamassas de referência, sem substituição parcial da massa de ligante por metacaulino, o que dificulta a aplicação em obra. Este facto estará relacionado com a granulometria dos agregados, constituída por poucos finos, algo que uma argamassa com um traço mais forte em ligante consegue complementar, ao contrário das argamassas com traços menos fortes em ligante. Quando existia substituição de massa de cal por metacaulino, como a baridade deste era menor que a da cal, e muito menor que a da NHL, a mesma massa consistia num volume maior, logo essa maior quantidade de finos estava disponível para colmatar os vazios deixados entre os grãos de agregado, facilitando a trabalhabilidade. Esta dificuldade verificou-se para todas as argamassas com traço 1:3, tanto as de cal aérea como as de cal hidráulica natural. Por outro lado, as argamassas com traço 1:2 e 1:2,5 apresentaram trabalhabilidade e aderência ao suporte satisfatórias.

Importa mencionar que as aplicações foram realizadas sempre pelo mesmo aplicador, o signatário do presente trabalho. É também importante referir que, apesar de o principal objetivo do presente trabalho ser estudar argamassas a aplicar em suportes antigos, o suporte usado – tijolo corrente atual – não é representativo dos suportes antigos, por ser menos absorvente e mais liso, o que se traduz

numa redução da aderência. No entanto, tratou-se do suporte possível, de modo a apresentar constância de características.



Fig. 3.10 – Detalhe das aplicações dos rebocos nos muretes experimentais

### 3.7. Ensaios de caracterização dos rebocos de argamassas endurecidas

#### 3.7.1. Organização dos ensaios

Tal como se mencionou anteriormente, para além da análise visual, foram realizados ensaios de natureza física, mecânica e química, a três idades de estudo distintas, permitindo avaliar a evolução das características das argamassas estudadas ao longo do tempo. Essas idades de estudo foram os 28, 90 e 180 dias, a contar do dia de aplicação de cada um dos rebocos. Todos os ensaios foram efetuados *in situ*, na EENRevPa do LNEC, exceção feita ao ensaio de porosidade aberta, realizado nos laboratórios do NRI do LNEC. Seguidamente apresenta-se a lista dos ensaios mencionados:

- **Análise visual**
- **Ensaio físicos**
  - Permeabilidade à água sob baixa pressão com tubos de Karsten;
  - Ultrassons;
  - Porosidade aberta
- **Ensaio mecânicos**
  - Dureza superficial com esclerómetro pendular;
  - Dureza superficial com durómetro;
  - Choque de esfera;
  - Penetração controlada
- **Ensaio químicos**
  - Identificação de sais solúveis através de fitas colorimétricas.

Os ensaios de permeabilidade à água sob baixa pressão, ultrassons, esclerómetro pendular e durómetro foram repetidos nas 3 idades referidas. O ensaio de identificação de sais solúveis através de fitas colorimétricas realizou-se aos 90 e aos 180 dias, enquanto os ensaios de avaliação de resistência superficial com o aparelho de Martinet-Baronnie (choque de esfera e penetração controlada) foram realizados unicamente aos 180 dias, por serem ensaios relativamente destrutivos, e por isso suscetíveis de comprometer a realização de outros ensaios.

No início de cada campanha experimental, a cada uma das idades, houve o cuidado de deixar para último lugar o ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão, por envolver a molhagem da superfície, sabendo-se que a água pode influenciar os resultados dos ensaios com esclerómetro pendular e ultrassons.

### 3.7.2. Análise visual dos muretes após aplicação

Algumas semanas após a aplicação dos rebocos em todos os painéis, fez-se uma análise visual de cada um deles, com registo fotográfico. O objetivo era avaliar o aspeto, a cor, a friabilidade e a eventual existência de fissuração.

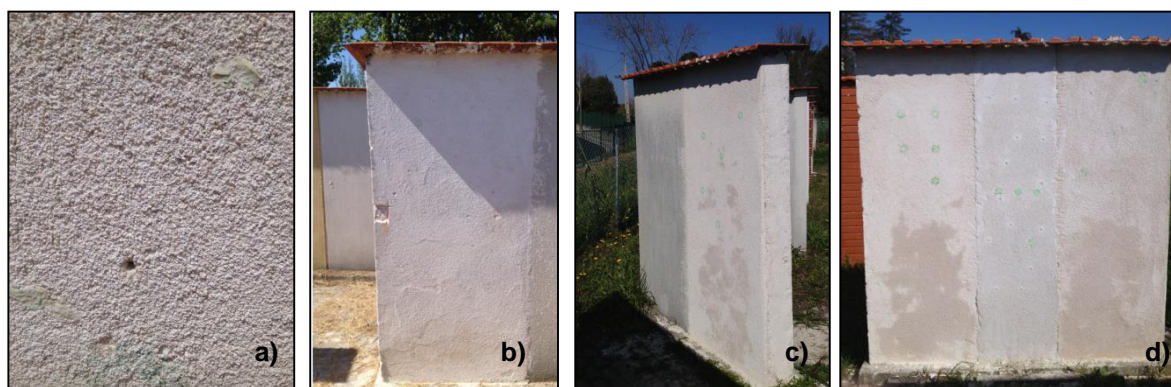


Fig. 3.11 – Pormenor da textura da superfície (a) pormenor da cor de um painel de cal aérea (b) manchas de humidade nos painéis (c e d)

Em termos de cor, os painéis de cal aérea apresentam, em geral, a esperada cor branca. A tonalidade típica dos rebocos constituídos por este ligante é mais acentuada nos painéis das formulações CL\_1.2\_30MK e CL\_1.2,5\_30MK, como é visível na Figura 3.11. b). Por seu lado, os painéis de cal aérea com traço 1:3 apresentam uma cor acastanhada, algo que pode ser explicado pelo facto de serem mais fracos em ligante, e consequentemente terem maior teor em areias, que conferem essa cor ao reboco. Todos os painéis de cal hidráulica natural apresentam um tom cinza, algo que seria expectável, tendo em conta que é o tom característico deste ligante em pó. Todos os painéis apresentam um acabamento irregular, com a presença de agregados à superfície, como se pode observar na Figura 3.11 a). Os rebocos de cal aérea aplicados com as formulações CL\_1:2,5\_30MK e CL\_1:2\_30MK são os que apresentam um aspeto menos irregular, ao contrário dos com traço 1:3, que apresentam grande quantidade de agregados grosseiros à superfície, e uma friabilidade considerável. Este facto pode ser explicado pela distribuição granulométrica dos agregados, que não é suficientemente variada, apresentando pouca quantidade de finos, o que dificulta a homogeneização com a pasta de ligante. Outro fator que é importante referir é o registo da presença de manchas de humidade em todos os painéis de cal aérea com metacaulino na sua constituição, como se pode ver nas Figuras 3.11 c) e d). Estas manchas eram visíveis nos painéis até ao início de Junho, aproximadamente, e estarão relacionadas com a elevada precipitação registada este ano, e adicionalmente, com a probabilidade de o metacaulino contribuir para uma maior retenção de água, quando integrado numa argamassa de cal aérea. À data da última inspeção visual - mais de 6 meses após a aplicação de todos os rebocos - não havia fissuração visível em nenhum dos painéis,

excetuando uma pequena fissura no painel de cal hidráulica 1:3 com 5% de MK, na face orientada a Norte, que se acredita ser uma fissura causada por uma aplicação menos correta do reboco.

Importa mencionar as semelhanças com os rebocos de cal aérea aplicados no murete de taipa por Dias (2013) e Jamú (2013), referidos no capítulo anterior. A mistura de areias utilizada na formulação dessas argamassas foi igual à utilizada no presente trabalho, algo que se refletiu num aspeto semelhante, em termos de rugosidade da superfície.

### 3.7.3. Ensaio de determinação da resistência superficial com esclerómetro pendular

O ensaio com esclerómetro pendular tem como objetivo avaliar qualitativamente a resistência mecânica das camadas superficiais de reboco, através da medição da dureza superficial. O ensaio é baseado no método do ressalto, cujo princípio teórico consiste na produção de uma reação elástica, produzida pelo impulso de uma esfera de massa conhecida, que choca contra a superfície analisada. O resultado, que corresponde à quantidade de energia recuperada no ressalto da massa, é expresso através do índice esclerométrico, que pode ser lido na escala graduada incluída no aparelho.

O aparelho utilizado no ensaio foi um esclerómetro *Schmidt Hammer* do tipo PM, da PROCEQ, que produz uma energia de impacto de 0,88 J, sendo indicado para ensaio de revestimentos e alvenarias. O ensaio, realizado aos 28, 90 e 180 dias, teve como base a norma EN 12504-2 (CEN, 2001), que define um mínimo de 9 leituras por superfície, sendo que cada um dos pontos definidos para leitura deve distar pelo menos 25 mm de cada um dos outros. No caso definiram-se 10 pontos por cada superfície ensaiada.

- **Equipamento e material**

- Esclerómetro pendular *Schmidt Hammer* PM;

- **Procedimento experimental**

- Identificaram-se os pontos a ensaiar;
- Encostou-se o aparelho ao murete, fazendo coincidir a zona de impacto da massa com cada ponto a ensaiar;
- Armou-se o aparelho e libertou-se o pêndulo, carregando no botão de disparo;
- Registou-se o índice esclerométrico em cada um dos pontos definidos;



Fig. 3.12 – Esquema da escolha dos pontos de ensaio (a) ensaio com esclerómetro tipo PM (b)

- **Resultados**

No Quadro 3.10 apresentam-se os valores médios e respetivos desvios-padrão do índice esclerométrico, resultantes do ensaio de avaliação da dureza superficial com esclerómetro pendular *Schmidt Hammer* tipo PM. Estes valores resultam da média aritmética das leituras efetuadas nos 10

pontos definidos para cada “terço” de murete, ou seja, para cada composição. Seguindo a especificação da norma EN 12504-2, descartaram-se todos os valores que diferissem mais de seis unidades do valor médio.

Quadro 3.10 – Valores médios e desvios-padrão da dureza superficial obtida com esclerômetro, em escala de Vickers, aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	28 dias [escala Vickers]		90 dias [escala Vickers]		180 dias [escala Vickers]	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
CL_1.2	8,5	2,3	11,6	2,1	22,2	2,3
CL_1.2_30MK_N	30,3	1,3	32,4	3,1	33,7	2,5
CL_1.2_30MK_S	25,3	2,6	31,0	2,1	31,5	1,5
CL_1.3	10,2	3,3	22,2	4,0	23,7	2,2
CL_1.3_30MK_N	19,0	2,7	21,8	1,9	24,6	2,2
CL_1.3_30MK_S	19,6	2,8	23,8	1,2	24,8	1,6
CL_1:2,5_30MK_N	24,1	1,5	27,4	1,8	27,8	0,9
CL_1:2,5_30MK_S	25,3	2,8	30,0	2,9	29,9	2,3
NHL3,5_1.3_N	36,0	1,4	37,0	1,9	38,9	1,2
NHL3,5_1.3_S	36,6	2,2	40,3	3,1	40,9	2,6
NHL3,5_1.3_5MK_N	30,2	1,8	34,9	1,7	37,3	1,8
NHL3,5_1.3_5MK_S	38,1	1,6	39,4	2,4	39,2	1,7
NHL3,5_1.3_10MK_N	30,0	1,5	34,9	1,6	37,8	1,5
NHL3,5_1.3_10MK_S	32,2	1,7	33,6	1,5	34,3	2,3

N- Face Norte; S- Face Sul

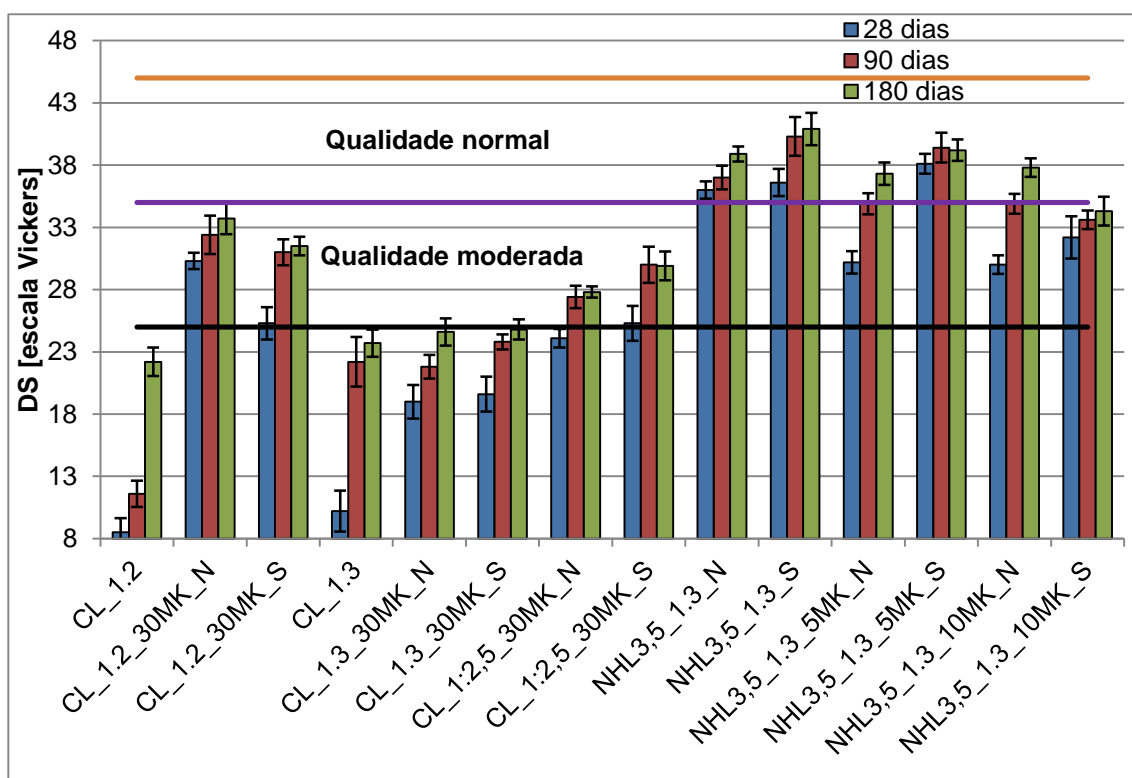


Fig. 3.13 - Dureza superficial (esclerômetro de pêndulo) das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias, e gamas de dureza de argamassas

Analisando o Quadro 3.10 e a Figura 3.13, é possível constatar que, entre as argamassas de cal aérea, a argamassa CL\_1.2\_30MK é a que registra valores mais elevados de dureza superficial, enquanto a argamassa de referência CL1.2 registra os valores mais baixos deste parâmetro. Relativamente às argamassas de cal hidráulica, a argamassa de referência (NHL3,5\_1.3) é a que

apresenta os valores mais elevados. Como seria de esperar, as argamassas de cal hidráulica natural apresentam valores de dureza superficial superiores aos das argamassas de cal aérea. Outro aspeto que importa sublinhar é o facto de os valores de dureza superficial terem aumentado com a idade de estudo, com destaque para as argamassas de referência de cal aérea (CL\_1.2 e CL\_1.3), nas quais se registaram aumentos substanciais. O metacaulino contribuiu para um aumento substancial de dureza superficial nas argamassas de cal aérea com traço 1:2, e um aumento ligeiro no traço 1:3. Nas argamassas de cal hidráulica natural, a presença de metacaulino conduziu a uma ligeira diminuição dos valores de dureza superficial. Não foi possível verificar nenhuma tendência relativamente à diferença de orientação dos rebocos. Convém, no entanto, ressaltar o facto de as aplicações terem sido feitas no período de Inverno.

A norma RILEM MS-D.7 (RILEM, 1997) estabelece uma análise da qualidade das argamassas, através da análise do índice esclerométrico obtido, em que a qualidade aumenta proporcionalmente à dureza superficial (Quadro 3.11). As gamas normal e melhorada encontram-se registadas na Figura 3.13. De acordo com esta classificação, aos 180 dias, é possível classificar todas as argamassas de NHL como tendo uma qualidade normal. Nas formulações de cal aérea, à exceção das argamassas de referência (CL\_1.2 e CL\_1.3), todas apresentam qualidade moderada.

Quadro 3.11 – Indicador de qualidade em função do índice esclerométrico (RILEM, 1997)

Classe	Índice esclerométrico	Indicador de qualidade
0	0-15	Muito fraco
A	15-25	Fraco
B	25-35	Moderado
C	35-45	Normal
D	45-55	Bom
E	> 55	Muito Bom

### 3.7.4. Ensaio de determinação da dureza superficial com durómetro

À semelhança do ensaio com o esclerómetro pendular, este é um ensaio que permite avaliar qualitativamente a resistência mecânica das superfícies, e quantitativamente a sua dureza superficial, embora o durómetro avalie as camadas mais superficiais, e o esclerómetro camadas mais internas (Tavares e Veiga, 2007). Neste ensaio - adaptado de ensaios realizados sobre outros materiais, como borrachas sintéticas ou naturais - o aparelho mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra a superfície, pela ação de uma mola sob carga padronizada. A leitura da referida resistência à penetração é feita através da escala presente no aparelho, que varia entre 0 e 100, valores que correspondem a graus de dureza de Vickers. Existem vários aparelhos deste tipo, que avaliam a dureza superficial, para diferentes escalas de dureza. Nesta campanha experimental o aparelho utilizado foi um durómetro do tipo Shore A, da PCE Instruments. O ensaio, efetuado aos 28, 90 e 180 dias, baseia-se na norma ASTM D2240 (ASTM, 2005), que recomenda a realização de leituras em pelo menos cinco pontos diferentes para cada superfície a ensaiar, distando um mínimo de 6 mm entre si. No caso foram determinadas as durezas em 12 pontos diferentes de cada “terço” de murete, ou seja, de cada composição.

- **Equipamento e material**
  - Durómetro Shore A;
- **Procedimento experimental**
  - Identificaram-se os pontos a ensaiar;
  - Encostou-se o aparelho ao murete, fazendo coincidir o pino com cada ponto a ensaiar. De referir que houve o cuidado de procurar pontos que aparentassem ter maior concentração de ligante;

- Registrou-se a dureza superficial em cada um dos pontos definidos;



Fig. 3.14 - Esquema da escolha dos pontos de ensaio (a) ensaio com durómetro Shore A (b)

### • Resultados

No Quadro 3.12 apresentam-se os valores médios e respetivos desvios-padrão, em graus Shore A, resultantes do ensaio de avaliação da dureza superficial com durómetro. Estes valores resultam da média aritmética das leituras efetuadas nos 12 pontos definidos para cada superfície a ensaiar. A norma ASTM D2240 não fornece recomendações em termos de desvio-padrão máximo, recomendando apenas a não consideração dos valores abaixo dos 20 e acima dos 90, por não serem valores confiáveis.

Analisando o Quadro 3.12 e a Figura 3.15, verifica-se a dificuldade em observar tendências claras neste ensaio, devido aos valores médios semelhantes em todas as composições analisadas, e a desvios-padrão relativamente elevados. As argamassas CL\_1.3 e CL\_1.3\_30MK apresentam os valores mais baixos de dureza superficial, algo expectável, por se tratarem das argamassas com traço mais fraco em ligante. No entanto, a diferença para as restantes argamassas não é significativa. As argamassas de NHL apresentam valores ligeiramente superiores aos da cal aérea. Em geral, a dureza superficial aumenta ligeiramente com a idade de estudo.

Quadro 3.12 – Valores médios e desvios-padrão da dureza superficial obtida com durómetro, em graus Shore A, aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	28 dias [graus Shore]		90 dias [graus Shore]		180 dias [graus Shore]	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
CL_1.2	71,7	2,6	75,2	4,0	78,3	2,6
CL_1.2_30MK_N	73,0	3,0	77,4	3,1	78,5	3,1
CL_1.2_30MK_S	73,0	4,5	74,3	3,9	79,3	2,8
CL_1.3	69,8	4,0	70,9	4,4	73,9	2,3
CL_1.3_30MK_N	65,4	9,2	74,3	5,8	74,5	2,4
CL_1.3_30MK_S	63,3	11,2	73,9	4,2	74,8	2,0
CL_1:2,5_30MK_N	74,2	6,0	76,4	4,6	79,8	3,4
CL_1:2,5_30MK_S	70,9	3,7	74,7	2,3	79,3	3,2
NHL3,5_1.3_N	75,0	6,0	79,7	3,9	79,9	2,6
NHL3,5_1.3_S	74,3	3,9	79,1	3,0	80,0	2,3
NHL3,5_1.3_5MK_N	79,0	3,9	79,9	3,1	80,4	2,1
NHL3,5_1.3_5MK_S	79,6	5,1	81,5	2,9	80,3	1,7
NHL3,5_1.3_10MK_N	79,5	3,2	81,3	4,1	82,0	2,0
NHL3,5_1.3_10MK_S	78,8	2,8	78,3	4,3	81,4	2,2

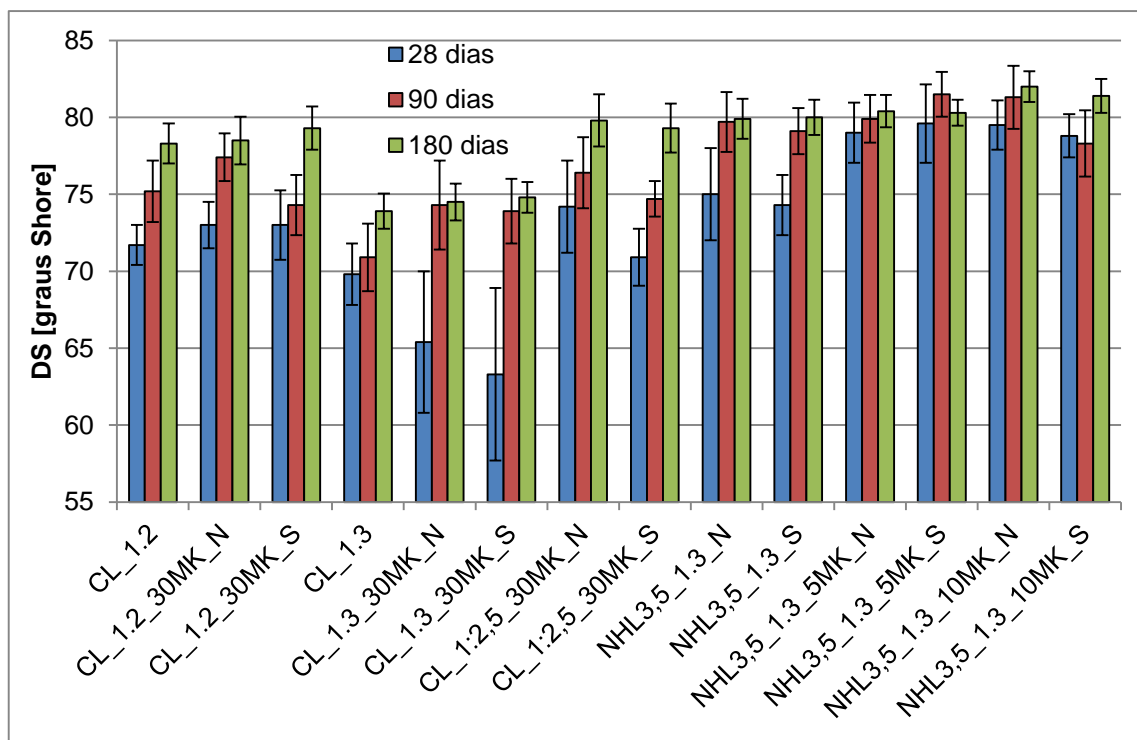


Fig. 3.15 - Dureza superficial (durómetro Shore A) das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias

### 3.7.5. Ensaio de determinação da resistência superficial com choque de esfera

O ensaio com o choque da esfera, realizado com o aparelho de *Martinet-Baronnie*, permite avaliar a deformabilidade de rebocos, através da avaliação da resistência ao impacto de uma esfera de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 0,5 kg de massa. A esfera, deixada cair a partir da posição horizontal do aparelho, produz uma energia de impacto de 3 J, calculada através da equação:

$$E_{\text{imp}} = g \times h \times m$$

$E_{\text{imp}}$  – Energia de impacto [3 J]

$g$  – aceleração da gravidade [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$h$  – altura de queda do corpo [0,6 m]

$m$  – massa do corpo [500 g]

Os resultados do ensaio são expressos através da medição do diâmetro da massa provocada pela esfera no reboco. Fazendo uma análise simplista, pode dizer-se que quanto menor o diâmetro da massa, maior a resistência do reboco. No entanto, deve ter-se em consideração que um diâmetro relativamente elevado pode significar um bom resultado, desde que não seja acompanhado de fissuração, uma vez que indica uma elevada deformabilidade, característica muito vantajosa numa argamassa de substituição (Veiga e Carvalho, 2000).

O ensaio foi efetuado aos 180 dias, e baseou-se na ficha de ensaio FE Pa 25 (LNEC, 1980), que recomenda a execução do ensaio em pelo menos 5 pontos distintos de cada superfície a ensaiar.

- **Equipamento e material**
  - Aparelho de *Martinet-Baronnie*;
  - Régua de precisão 0,1 mm

• **Procedimento experimental**

- Identificaram-se os pontos a ensaiar;
- Colocou-se o “braço” do aparelho junto ao “corpo”, encostando a esfera ao rolo existente no “pé” do aparelho;
- Garantida a horizontalidade do aparelho, deixa-se cair livremente a esfera contra a superfície a ensaiar;
- No final de cada ensaio, mede-se o diâmetro da massa provocada pela esfera na superfície, com o auxílio da régua;
- Repetiu-se o procedimento para todos os pontos definidos.

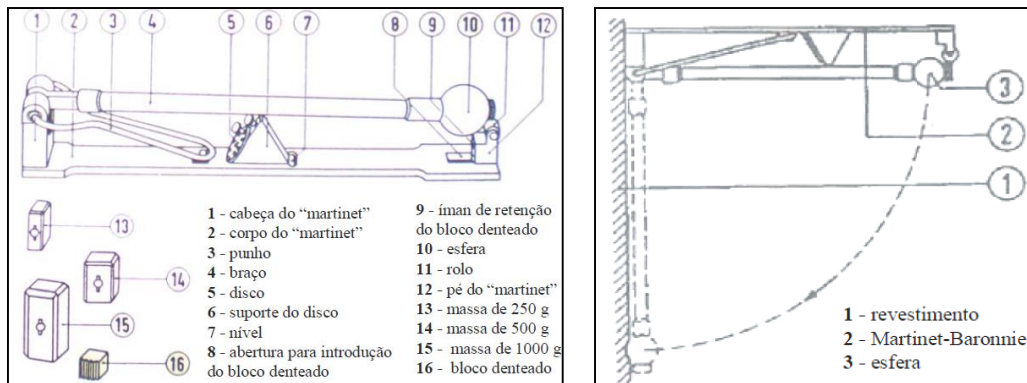


Fig. 3.16 – Esquema do aparelho de *Martinet-Baronnie* e do ensaio do choque da esfera



Fig. 3.17 – Início do ensaio (a) marcação do diâmetro da massa (b) medição do diâmetro da massa (c)

• **Resultados**

Os resultados obtidos no ensaio do choque de esfera apresentam-se no Quadro 3.13 e na Figura 3.18. As argamassas de cal hidráulica natural registaram valores de diâmetro de massa inferiores aos das argamassas de cal aérea, algo que reflete a maior resistência superficial deste tipo de argamassas, refletindo no entanto menor deformabilidade. As argamassas de referência de cal aérea (CL\_1.2 e CL\_1.3) apresentam os valores mais elevados de diâmetro da massa, o que se traduz em valores mais baixos de resistência superficial. O metacaulino parece por isso aumentar a resistência superficial nas argamassas de cal aérea, e reduzir essa resistência nas argamassas de cal hidráulica natural. Relativamente à orientação do paramento, não foi possível observar tendências claras. De referir que em nenhuma das formulações se registou fissuração a acompanhar as massas provocadas pelo impacto, algo que indica boa deformabilidade.

Quadro 3.13 – Valores médios dos resultados do ensaio com choque de esfera aos 180 dias

Argamassa	Diâmetro da massa [mm]	
	Média	DP
CL_1.2	19,0	1,6
CL_1.2_30MK_N	14,2	1,5
CL_1.2_30MK_S	15,0	1,6
CL_1.3	18,6	1,1
CL_1.3_30MK_N	16,2	1,9
CL_1.3_30MK_S	14,2	0,8
CL_1:2,5_30MK_N	16,2	1,8
CL_1:2,5_30MK_S	14,0	1,0
NHL3,5_1.3_N	8,2	0,4
NHL3,5_1.3_S	8,4	1,1
NHL3,5_1.3_5MK_N	10,4	0,5
NHL3,5_1.3_5MK_S	10,6	1,3
NHL3,5_1.3_10MK_N	9,6	1,5
NHL3,5_1.3_10MK_S	10,0	0,7

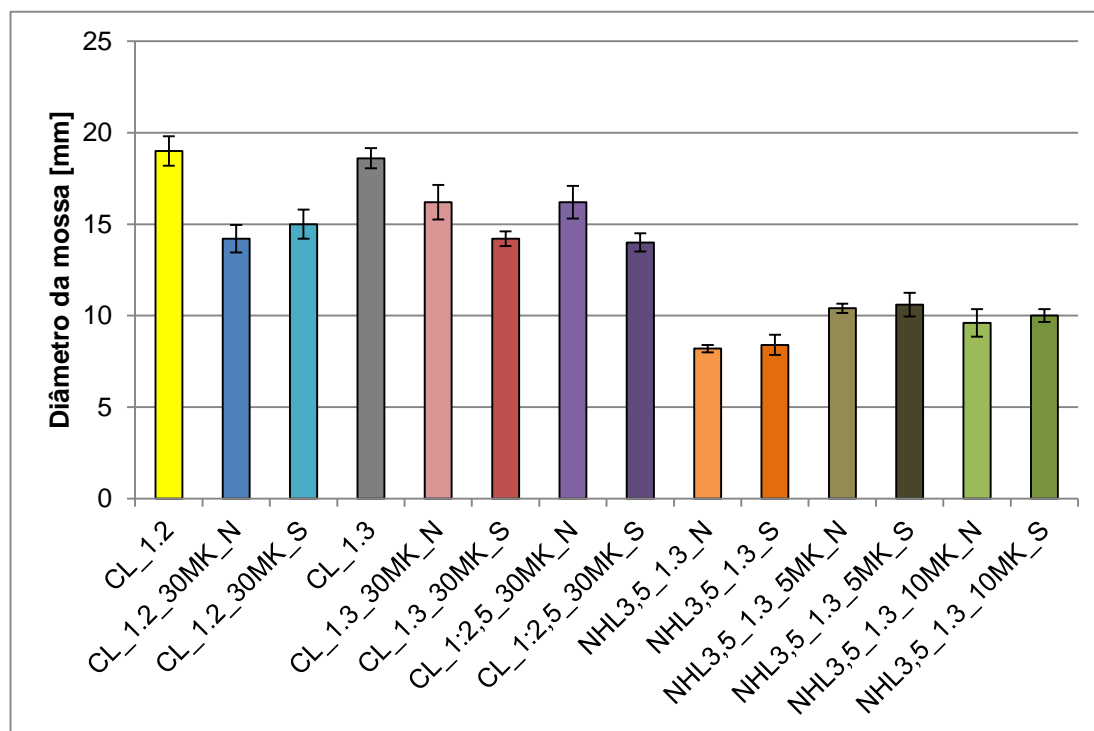


Fig. 3.18 – Diâmetro da massa obtido no ensaio do choque de esfera

### 3.7.6. Ensaio de penetração controlada

O ensaio de penetração controlada, desenvolvido no âmbito de um projeto anterior financiado pela FCT - OLDRENDERS - permite avaliar a resistência das camadas mais internas dos rebocos (Tavares *et al.*, 2005). Tal como no ensaio de choque de esfera, é utilizado o aparelho de *Martinet-Baronnie*, embora com acessórios diferentes. Na abertura existente no “pé do aparelho”, é fixado um acessório com um pequeno orifício, que permite a colocação de um prego de aço em contacto com a superfície. Outra alteração é a substituição da esfera por um corpo de massa conhecida (250 g). O funcionamento do ensaio consiste em deixar cair o corpo de uma posição inicial, perpendicular ao

prego de aço, e registrar a profundidade a que o prego penetra no revestimento em cada choque, num total de 3 choques por cada ponto de ensaio. Não existem normas nem fichas de ensaio que regulamentem este teste, uma vez que, como já foi referido, se trata um ensaio desenvolvido pelos membros de um projeto de investigação. Definiu-se um total de 3 pontos diferentes a ensaiar, por cada superfície.

- **Equipamento e material**

- Aparelho de *Martinet-Baronnie*;
- Prego de aço;
- Régua de precisão 0,1 mm.

- **Procedimento experimental**

- Identificaram-se os pontos a ensaiar;
- Encostou-se o “corpo” do aparelho junto à superfície a ensaiar, garantindo que o acessório e o prego de aço estavam em contacto com essa superfície;
- Garantida a horizontalidade do prego de aço, marcou-se a posição inicial com um lápis;
- Colocou-se o braço do aparelho perpendicular ao prego de aço, e deixou-se cair livremente o corpo, até embater no prego de aço, garantindo que não embatia mais que uma vez;
- Após o primeiro choque, marcou-se novamente o prego, o que corresponde à profundidade da primeira penetração;
- Repetiu-se o procedimento anterior por mais 2 vezes para cada ponto a ensaiar;
- Com uma régua de precisão 0,1 mm, mediram-se as profundidades das 3 penetrações;
- Repetiram-se os procedimentos para os restantes pontos a ensaiar.

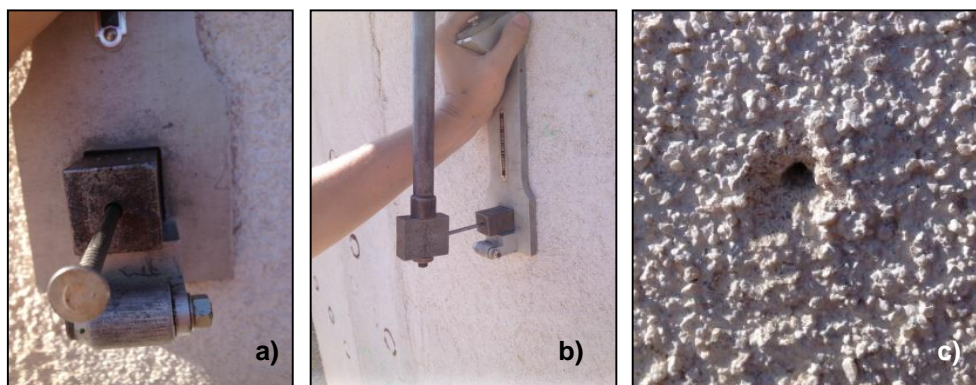


Fig. 3.19 – Acessórios do ensaio (a) embate do corpo no prego (b) final do ensaio (c)

- **Resultados**

Apresentam-se os resultados no Quadro 3.14 e na Figura 3.20. Verifica-se que a argamassa de referência CL\_1.3 é a que apresenta uma profundidade de penetração total mais elevada, e por isso menor resistência, algo que vai de encontro ao esperado, por ser a que apresenta traço mais fraco em ligante. A outra argamassa de referência, CL\_1.2, apresenta igualmente uma profundidade de penetração elevada, especialmente em comparação com a argamassa CL\_1.2\_30MK, o que permite concluir que o metacaulino contribui para o aumento da resistência superficial e das camadas mais internas dos rebocos de cal aérea. As argamassas de cal hidráulica natural apresentam, como esperado, uma resistência à penetração superior à das argamassas de cal aérea. Nas argamassas de NHL, ao contrário do que acontece com as argamassas CL, o metacaulino parece contribuir para uma diminuição da resistência à penetração.

Quadro 3.14 – Valores médios dos resultados do ensaio de penetração controlada aos 180 dias

Argamassa	Penetração [mm]			
	1ª penetração	2ª penetração	3ª penetração	Total
CL_1.2	6,4	4,2	4,8	15,4
CL_1.2_30MK_N	5,6	2,2	2,0	9,8
CL_1.2_30MK_S	6,0	3,4	2,4	11,8
CL_1.3	9,2	4,4	3,2	16,8
CL_1.3_30MK_N	8,0	3,0	2,0	13,0
CL_1.3_30MK_S	8,4	3,4	2,6	14,4
CL_1:2,5_30MK_N	6,8	2,6	2,4	11,8
CL_1:2,5_30MK_S	6,4	3,2	2,6	12,2
NHL3,5_1.3_N	3,2	1,2	0,6	5,0
NHL3,5_1.3_S	2,4	1,2	0,6	4,2
NHL3,5_1.3_5MK_N	3,6	1,2	1,2	6,0
NHL3,5_1.3_5MK_S	3,6	0,6	2,0	6,2
NHL3,5_1.3_10MK_N	4,8	1,2	1,0	7,0
NHL3,5_1.3_10MK_S	4,4	1,4	1,0	6,8

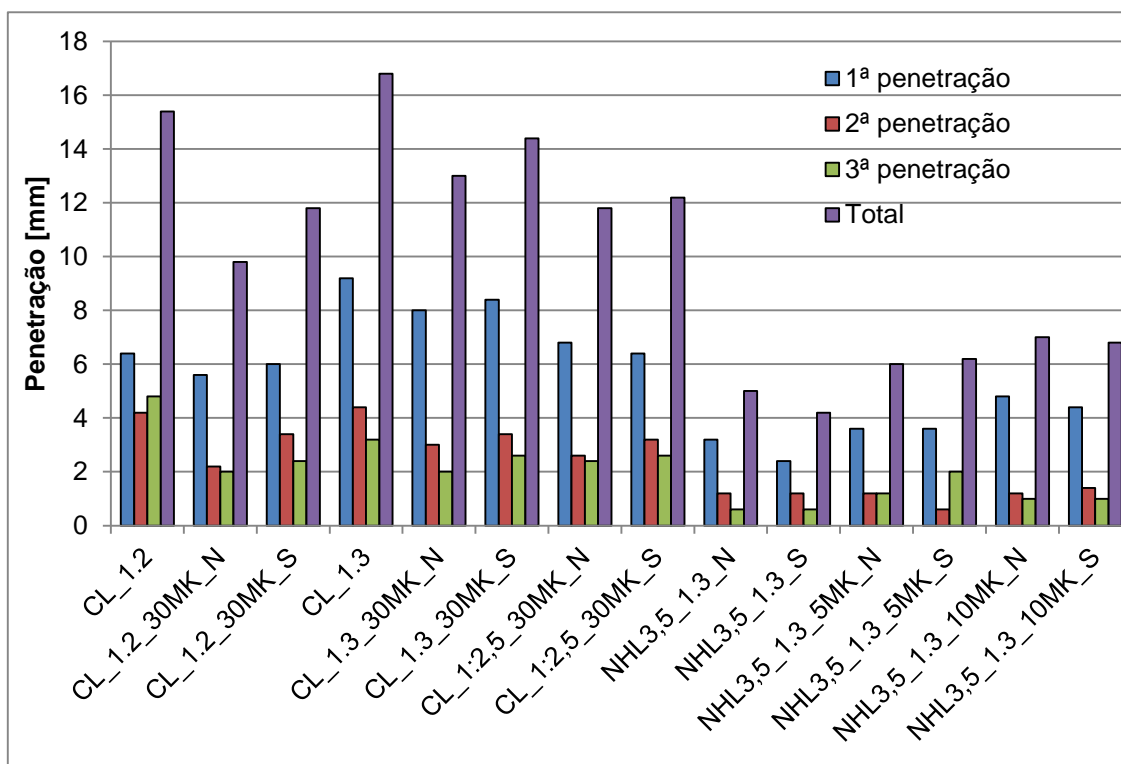


Fig. 3.20 – Profundidades de penetração obtidas no ensaio de penetração controlada

### 3.7.7. Ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons é uma metodologia totalmente não destrutiva, que avalia a homogeneidade das argamassas, para além de permitir detetar a existência de eventuais zonas degradadas nos rebocos, nomeadamente microfissuração interna, porosidade elevada ou perda de coesão. Adicionalmente, em complemento com outros ensaios *in situ*, permite obter estimativas relativamente à resistência mecânica dos revestimentos.

A velocidade de propagação dos ultrassons é calculada através do tempo que a onda longitudinal demora a percorrer a distância – conhecida - entre 2 pontos, na superfície a ensaiar. Assim, um transdutor eletroacústico, colocado em contacto com a superfície, produz um impulso de vibração longitudinal. Após atravessar o material, este impulso é reconvertido num sinal elétrico por um segundo transdutor, colocado a uma distância conhecida. O registo dos valores dos tempos e respetivas distâncias permite calcular as velocidades de propagação das ondas no revestimento a ensaiar.

A presença de zonas degradadas, devido, por exemplo, a microfissuração interna, pode ser detetada através deste ensaio, manifestando-se através de um maior tempo de percurso entre as ondas, algo que se traduz numa menor velocidade de propagação de ultrassons. Este aumento do tempo de percurso está relacionado com a difração do impulso nas descontinuidades existentes no interior do revestimento. Este ensaio permite também estimar as características mecânicas de uma argamassa, através da estimativa do módulo de elasticidade dinâmico. É sabido que, pelo princípio da propagação de ondas elásticas, a velocidade de propagação é diretamente proporcional à raiz quadrada do módulo de elasticidade, sendo esta mais uma importante ferramenta no âmbito dos ensaios in-situ.

Neste trabalho, foi usado o método indireto para determinar a velocidade de propagação. Este método é o utilizado em campo, para analisar revestimentos de parede, e difere do método direto pelo facto de se colocar o transdutor transmissor e o transdutor recetor na mesma face da superfície a ensaiar. O ensaio baseou-se na norma de ensaio NP EN 12504-4 (IPQ, 2007) e na ficha de ensaio FE Pa 43 (LNEC, 2010). Foram escolhidos 3 percursos de ensaio, a diferentes alturas do reboco. Cada percurso era constituído por 10 pontos, distando 2 cms entre si, perfazendo um comprimento total de 20 cm. Em cada um dos pontos efetuaram-se 3 leituras.

- **Equipamento e material**

- Aparelho Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7;
- Escalas graduadas com o percurso de pontos a ensaiar;

- **Procedimento experimental**

- Fixaram-se as escalas graduadas aos muretes;
- Ligou-se o aparelho e colocou-se o transdutor transmissor no 0 da escala, mantendo-o fixo nesse ponto, colocando o transdutor recetor no ponto 1, tendo o cuidado de garantir que os transdutores fizessem um ângulo de cerca de 45° com a superfície;
- Através do pedal acessório ligado ao aparelho, deu-se um impulso e mediu-se o tempo de percurso no aparelho, em  $\mu\text{s}$ , repetindo-se este processo mais 2 vezes;
- Repetiram-se os passos anteriores para os restantes 9 pontos de cada percurso;

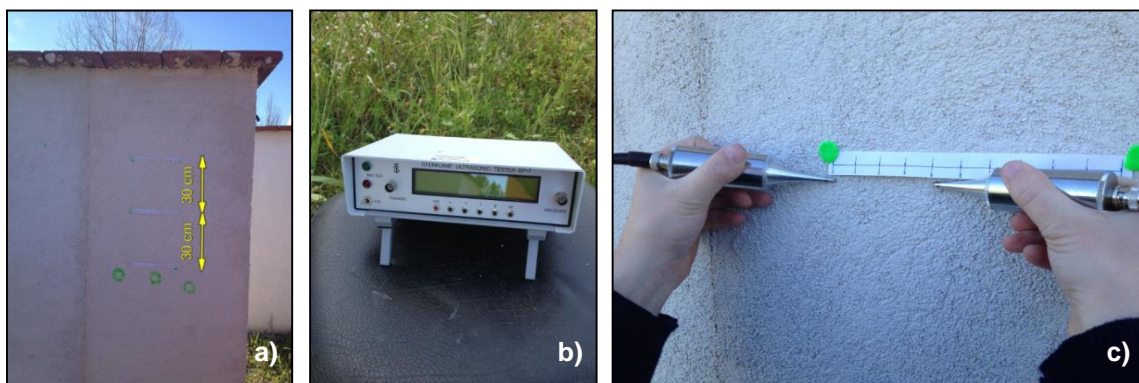


Fig. 3.21 – Fixação das escalas graduadas (a) aparelho de ensaio (b) realização do ensaio (c)

## • Resultados

Os resultados obtidos no ensaio apresentam-se no Quadro 3.15 e na Figura 3.22. O primeiro fator a saltar à vista são os elevados desvios padrão obtidos através deste método de ensaio, que, nas argamassas de cal aérea (à exceção da argamassa CL\_1.3), vão diminuindo com a idade de ensaio. Apesar do erro elevado dificultar a interpretação de resultados, verifica-se que a argamassa CL\_1.2 é a que apresenta menor velocidade de propagação, o que pode indicar uma menor compacidade. Aos 180 dias, as restantes argamassas de cal aérea apresentam valores bastante semelhantes de velocidade de propagação. As argamassas de cal hidráulica natural apresentam valores de velocidade de ultrassons superiores às verificadas na cal aérea, registando, por outro lado, valores de desvio padrão mais elevados, algo que pode indiciar microfissuração. Destaca-se o facto de não haver uma evolução regular da velocidade de propagação com o aumento da idade de estudo. Nalguns casos a velocidade aumentou com a idade, noutros casos diminuiu, e ainda noutros manteve valores muito semelhantes. A introdução de MK origina, em geral, um aumento da velocidade de ultrassons, principalmente nas primeiras idades de estudo (28 e 90 dias), o que indicia maior compacidade.

Quadro 3.15 – Valores médios e desvios-padrão da velocidade de propagação de ultrassons, aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	28 dias		90 dias		180 dias	
	Média [m/s]	DP	Média [m/s]	DP	Média [m/s]	DP
<b>CL_1.2</b>	618	95	617	65	871	96
<b>CL_1.2_30MK_N</b>	1185	198	1068	161	1087	137
<b>CL_1.2_30MK_S</b>	1151	190	1061	148	1016	110
<b>CL_1.3</b>	722	95	829	108	1103	137
<b>CL_1.3_30MK_N</b>	1336	221	1286	193	984	121
<b>CL_1.3_30MK_S</b>	1449	351	1225	216	924	89
<b>CL_1.2,5_30MK_N</b>	1258	264	1107	225	1091	161
<b>CL_1.2,5_30MK_S</b>	1549	230	1127	256	1204	284
<b>NHL3,5_1.3_N</b>	1393	184	1569	237	1774	316
<b>NHL3,5_1.3_S</b>	1301	251	1541	245	1464	217
<b>NHL3,5_1.3_5MK_N</b>	1548	264	1525	299	1555	284
<b>NHL3,5_1.3_5MK_S</b>	1283	300	1329	226	1554	289
<b>NHL3,5_1.3_10MK_N</b>	1616	263	1137	323	1323	253
<b>NHL3,5_1.3_10MK_S</b>	1458	235	1261	210	1385	250

Como referido acima, é possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico de um material através da velocidade de propagação de ultrassons, tendo também informação acerca da massa volúmica aparente desse material, calculada no subcapítulo 3.7.9. Esta estimativa pode ser calculada através da Equação 3.4.

$$E_d = V^2 \times MV_{ap} \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 + \nu)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

em que:

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico [N/mm<sup>2</sup>]

$V$  – velocidade de propagação das ondas ultrassónicas [km/s]

$MV_{ap}$  – massa volúmica aparente [kg/m<sup>3</sup>]

$\nu$  – coeficiente de Poisson

Relativamente ao coeficiente de Poisson, não tendo sido possível aferir esta característica de forma experimental, seguiu-se a aproximação feita por Zach *et al.* (2011) e por Rosell *et al.* (2009), e adotou-se um valor de 0,20. No Quadro 3.16 e na Figura 3.23 apresentam-se os valores da estimativa de  $E_d$  obtido através do ensaio de ultrassons.

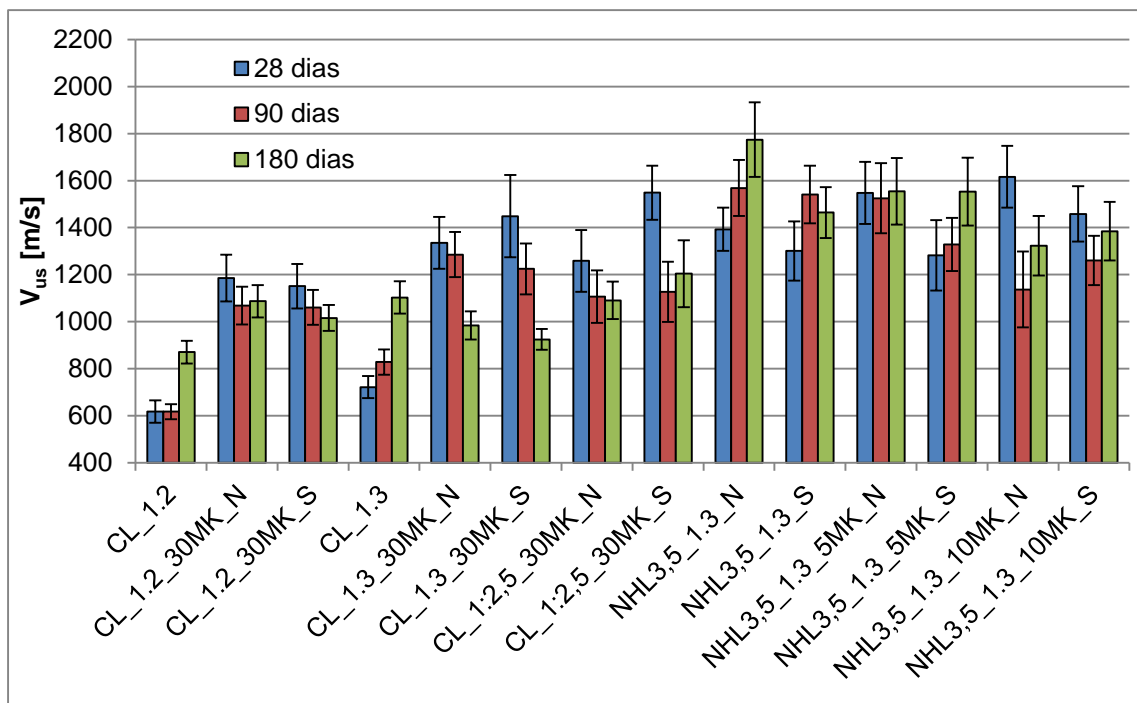


Fig. 3.22 – Velocidade dos ultrassons das argamassas aplicadas nos muretes, aos 28, 90 e 180 dias

Quadro 3.16 – Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons

Argamassa	$E_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]
CL_1.2	1093
CL_1.2_30MK_N	1615
CL_1.2_30MK_S	1445
CL_1.3	1823
CL_1.3_30MK_N	1311
CL_1.3_30MK_S	1129
CL_1:2,5_30MK_N	1646
CL_1:2,5_30MK_S	1953
NHL3,5_1.3_N	5203
NHL3,5_1.3_S	3548
NHL3,5_1.3_5MK_N	3915
NHL3,5_1.3_5MK_S	3820
NHL3,5_1.3_10MK_N	2933
NHL3,5_1.3_10MK_S	3179

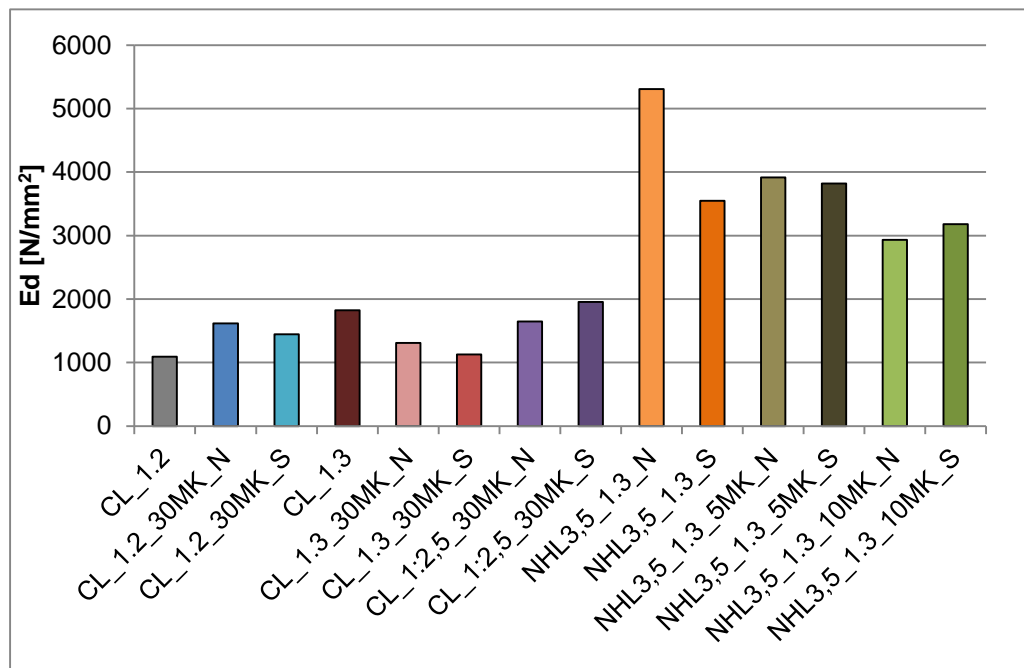


Fig. 3.23 – Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons

Como seria de esperar, o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal hidráulica natural é bastante superior ao apresentado pelas argamassas de cal aérea. A formulação NHL3,5\_1.3 é a que apresenta maior valor de  $E_d$ , na face Norte. Nas argamassas de NHL, o módulo de elasticidade diminui com o aumento da percentagem de MK. Nas argamassas com traço 1:2, o MK contribui para o aumento de  $E_d$ , mas, no traço 1:3, há uma inversão dessa tendência.

### 3.7.8. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão com Tubos de Karsten

O ensaio com tubos de Karsten é um método totalmente não-destrutivo, que permite medir a absorção de água de argamassas de reboco, ou outros materiais porosos. O ensaio utiliza tubos de vidro abertos, constituídos por uma coluna mais fina, com uma escala graduada, e um corpo cilíndrico mais largo na extremidade inferior, o qual é fixo à superfície a ensaiar através de um material vedante (como mástique ou massa de moldar). Uma vez fixo à superfície, enche-se o tubo com água, e regista-se a quantidade de água absorvida durante um período de tempo determinado, através da leitura da escala graduada. Esta escala vai dos 0 aos 4 ml, dividida em sub-graduações de 0,1 ml. A coluna de água tem uma altura de 9,8 cm, medida desde o início da escala, até ao centro do corpo cilíndrico, exercendo uma pressão de 961,38 Pa na superfície. Esta pressão corresponde ao efeito de gotas de chuva a atingir uma parede sob efeito de uma velocidade do vento estático de 140 km/h, perpendicular à parede (Van Hees *et al.*, 1995). O ensaio foi realizado de acordo com a ficha de ensaio FE Pa n.º39 (LNEC, 2002), que se baseia na recomendação TEST N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980). A cada uma das idades de estudo, utilizaram-se 3 tubos de ensaio em simultâneo, para cada painel experimental.

- **Equipamento e material**

- Tubos de Karsten verticais;
- Massa de moldar;
- Esguicho;
- Cronómetro

- **Procedimento experimental**

- Com massa de moldar, revestiu-se a superfície do bordo do tubo que fica em contacto com o revestimento, assegurando que não havia fugas de ar, mas evitando excessos de forma a não diminuir a área de contacto;
- Pressionou-se o tubo de Karsten contra a superfície
- Encheu-se o tubo com água, lentamente, até atingir a marca dos 0 ml, e iniciou-se a contagem do cronómetro;
- Efetuaram-se leituras aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos; caso os 4 ml fossem absorvidos antes dos 60 minutos, registou-se o tempo decorrido até atingir esta marca.

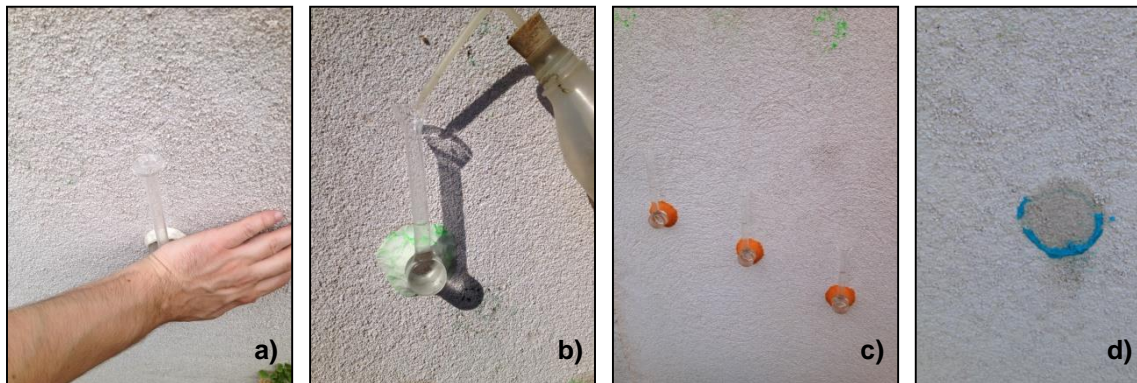


Fig. 3.24 – Fixação do tubo ao revestimento (a) preenchimento do tubo com água (b) ensaio em curso (c) final do ensaio (d)

- **Resultados**

Os resultados do ensaio de absorção de água sob baixa pressão apresentam-se nos Quadros 3.17 a 3.21, e nas Figuras 3.24 e 3.25. É possível constatar que, aos 28 dias, a maior parte dos rebocos de cal aérea demoram mais de 60 minutos a absorver os 4 ml de água. Comparando com as outras 2 idades de estudo, verifica-se tratar de uma situação que não caracteriza o verdadeiro comportamento destas argamassas, e que poderá estar relacionado com o facto de, aos 28 dias, a água de amassadura ainda não ter sido consumida (por evaporação ou pela reação hidráulica), e os poros estarem ainda saturados, dificultando a absorção de água. Analisando os valores obtidos aos 180 dias, é possível concluir que, entre as argamassas de cal aérea, é a formulação com traço 1:2,5 e 30% de MK que apresenta o melhor comportamento face à água, uma vez que demora mais tempo a absorver os 4 ml. Em sentido oposto, as argamassas de referência (CL\_1.2 e CL\_1.3) são as que apresentam o comportamento menos satisfatório, demorando menos de 10 minutos a absorver os 4 ml de água. Nas argamassas de NHL, é a formulação de referência que apresenta o melhor comportamento, enquanto as 2 formulações com metacaulino apresentam um comportamento semelhante. Assim, o metacaulino parece influenciar positivamente o comportamento face à água dos rebocos de cal aérea, e negativamente os de cal hidráulica natural. Não é possível estabelecer uma tendência relativamente à orientação do reboco.

Quadro 3.17 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal aérea, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios)

Argamassa	28 dias [cm <sup>3</sup> ]		90 dias [cm <sup>3</sup> ]		180 dias [cm <sup>3</sup> ]	
<b>CL_1.2</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	2,00	5 min	3,40	5 min	3,33
	10 min	2,65	10 min	> 4,00	10 min	> 4,00
	15 min	3,45	15 min	> 4,00	15 min	> 4,00
	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1.2_30MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,47	5 min	1,23	5 min	1,93
	10 min	0,77	10 min	1,83	10 min	> 3,10
	15 min	1,03	15 min	2,30	15 min	> 3,63
	30 min	1,77	30 min	> 3,30	30 min	> 4,00
	60 min	3,03	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1.2_30MK_S</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,57	5 min	2,27	5 min	1,83
	10 min	1,03	10 min	3,17	10 min	3,00
	15 min	1,40	15 min	> 3,70	15 min	> 3,80
	30 min	2,03	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 3,20	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1.3</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	2,40	5 min	2,87	5 min	2,80
	10 min	3,53	10 min	> 3,30	10 min	> 4,00
	15 min	> 4,00	15 min	> 3,53	15 min	> 4,00
	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1.3_30MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,20	5 min	1,30	5 min	2,23
	10 min	0,37	10 min	1,93	10 min	3,53
	15 min	0,47	15 min	2,47	15 min	> 4,00
	30 min	0,73	30 min	> 3,43	30 min	> 4,00
	60 min	1,13	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1.3_30MK_S</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	1,05	5 min	1,10	5 min	1,83
	10 min	1,55	10 min	1,75	10 min	2,90
	15 min	2,00	15 min	2,20	15 min	> 3,53
	30 min	> 2,90	30 min	3,45	30 min	> 4,00
	60 min	> 3,50	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00

Quadro 3.18 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal aérea, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios) (continuação)

Argamassa	28 dias [cm <sup>3</sup> ]		90 dias [cm <sup>3</sup> ]		180 dias [cm <sup>3</sup> ]	
<b>CL_1:2,5_30MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,60	5 min	1,63	5 min	1,43
	10 min	0,95	10 min	2,47	10 min	2,20
	15 min	1,25	15 min	3,10	15 min	2,83
	30 min	2,00	30 min	> 3,97	30 min	> 3,90
	60 min	3,30	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>CL_1:2,5_30MK_S</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,45	5 min	1,57	5 min	1,10
	10 min	0,80	10 min	2,07	10 min	1,63
	15 min	1,10	15 min	2,43	15 min	2,07
	30 min	1,70	30 min	3,47	30 min	3,23
	60 min	2,55	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00

Quadro 3.19 – Água absorvida sob baixa pressão, pelos painéis de cal hidráulica, aos 28, 90 e 180 dias (valores médios)

Argamassa	28 dias [cm <sup>3</sup> ]		90 dias [cm <sup>3</sup> ]		180 dias [cm <sup>3</sup> ]	
<b>NHL3,5_1.3_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	1,17	5 min	0,97	5 min	1,17
	10 min	1,83	10 min	1,53	10 min	1,83
	15 min	2,50	15 min	2,03	15 min	2,43
	30 min	> 3,93	30 min	3,80	30 min	> 3,47
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>NHL3,5_1.3_S</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	1,63	5 min	0,87	5 min	1,37
	10 min	2,43	10 min	1,43	10 min	2,07
	15 min	3,03	15 min	1,90	15 min	2,73
	30 min	> 4,00	30 min	3,00	30 min	> 3,50
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>NHL3,5_1.3_5MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,87	5 min	1,63	5 min	1,73
	10 min	1,43	10 min	2,63	10 min	2,97
	15 min	1,83	15 min	> 3,40	15 min	> 3,93
	30 min	2,97	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>NHL3,5_1.3_5MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	1,40	5 min	1,43	5 min	1,23
	10 min	2,23	10 min	2,20	10 min	1,93
	15 min	2,97	15 min	2,83	15 min	2,67
	30 min	> 3,93	30 min	> 3,87	30 min	> 3,80
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>NHL3,5_1.3_10MK_N</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	0,87	5 min	1,47	5 min	1,37
	10 min	1,33	10 min	2,30	10 min	2,67
	15 min	1,77	15 min	2,97	15 min	> 3,63
	30 min	2,93	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00
<b>NHL3,5_1.3_10MK_S</b>	0 min	0,00	0 min	0,00	0 min	0,00
	5 min	1,10	5 min	2,17	5 min	1,87
	10 min	1,57	10 min	3,23	10 min	2,93
	15 min	2,00	15 min	> 3,73	15 min	> 3,63
	30 min	3,00	30 min	> 4,00	30 min	> 4,00
	60 min	> 3,80	60 min	> 4,00	60 min	> 4,00

Quadro 3.20 – Tempo médio de absorção de 4 ml de água sob baixa pressão, aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	T <sub>tk</sub> (28 dias) [min:seg]	T <sub>tk</sub> (90 dias) [min:seg]	T <sub>tk</sub> (180 dias) [min:seg]
<b>CL_1.2</b>	72:33	06:23	07:15
<b>CL_1.2_30MK_N</b>	84:17	44:20	16:12
<b>CL_1.2_30MK_S</b>	85:12	15:37	15:38
<b>CL_1.3</b>	12:52	13:07	08:39
<b>CL_1.3_30MK_N</b>	260:57	37:05	12:22
<b>CL_1.3_30MK_S</b>	139:55	28:39	17:38
<b>CL_1:2,5_30MK_N</b>	122:33	25:09	27:49
<b>CL_1:2,5_30MK_S</b>	177:23	42:01	44:39
<b>NHL3,5_1.3_N</b>	29:15	36:08	32:09
<b>NHL3,5_1.3_S</b>	21:50	39:28	29:42
<b>NHL3,5_1.3_5MK_N</b>	46:34	18:53	15:16
<b>NHL3,5_1.3_5MK_S</b>	26:04	26:50	27:32
<b>NHL3,5_1.3_10MK_N</b>	47:25	24:14	17:19
<b>NHL3,5_1.3_10MK_S</b>	49:32	14:53	16:32

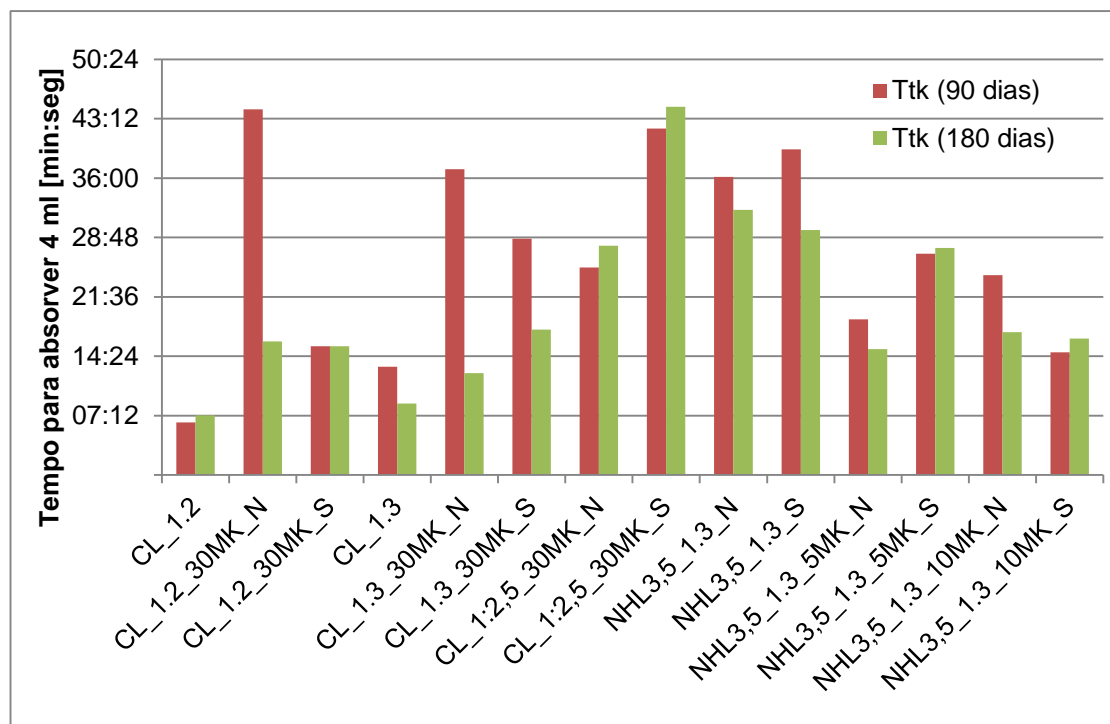


Fig. 3.25 - Tempo necessário para absorver 4 ml de água sob baixa pressão, aos 90 e 180 dias

Optou-se por determinar um coeficiente de absorção de água, cuja fórmula foi retirada do catálogo de um fabricante (Proceq, 2001), que depende da quantidade de água absorvida e do diâmetro da superfície de contacto do tubo de Karsten. No caso definiu-se o coeficiente de absorção do tempo necessário para o reboco absorver os 4 ml de água (Eq. 3.1). O comportamento face à água será tanto melhor, quanto mais baixo for o coeficiente de absorção, por ser inversamente proporcional à raiz do tempo necessário para absorver os 4 ml de água.

$$C_{abs.4ml} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

em que:

$C_{abs.4ml}$  – Coeficiente de absorção de água aos 4ml [kg/(m<sup>2</sup>.t<sup>0,5</sup>)]

X – Quantidade de água absorvida (4 ml)

$d^2$  – diâmetro da superfície de contacto do tubo de Karsten [mm]

t – duração da leitura [min]

Verifica-se que, aos 28 dias, são as argamassas CL\_1.3\_30MK e NHL3,5\_1.3\_10MK que têm os melhores comportamentos, com um coeficiente de absorção mais baixo e as composições CL\_1.3 e NHL\_1.3 que apresentam os comportamentos menos satisfatórios, com um valor mais elevado de  $C_{abs}$ . Aos 90 dias, as argamassas CL\_1.2,5\_30MK e CL\_1.3\_30MK são, entre as argamassas de cal aérea, as que absorvem a água de forma mais lenta, e a formulação CL\_1.2 a que absorve de forma mais rápida. Entre as argamassas NHL, a argamassa de referência é a que apresenta o melhor comportamento à água, e a argamassa NHL\_1.3\_10MK é a que apresenta o comportamento menos satisfatório. Aos 180 dias, é novamente a argamassa CL\_1.2,5\_30MK que apresenta o  $C_{abs}$  mais baixo, e a formulação CL\_1.2 a que apresenta o maior valor de  $C_{abs}$ . As tendências observadas nas argamassas de cal hidráulica natural são também semelhantes às observadas aos 90 dias.

Quadro 3.21 – Coeficiente de absorção sob baixa pressão de 4 ml de água, aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	$C_{abs.4ml}$ (28 dias) [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	$C_{abs.4ml}$ (90 dias) [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	$C_{abs.4ml}$ (180 dias) [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
CL_1.2	0,82	2,77	2,59
CL_1.2_30MK_N	0,76	1,05	1,74
CL_1.2_30MK_S	0,76	1,77	1,77
CL_1.3	1,95	1,93	2,38
CL_1.3_30MK_N	0,43	1,15	1,99
CL_1.3_30MK_S	0,59	1,31	1,66
CL_1:2,5_30MK_N	0,63	1,39	1,32
CL_1:2,5_30MK_S	0,52	1,08	1,05
NHL3,5_1.3_N	1,29	1,16	1,23
NHL3,5_1.3_S	1,50	1,11	1,28
NHL3,5_1.3_5MK_N	1,02	1,61	1,79
NHL3,5_1.3_5MK_S	1,37	1,35	1,33
NHL3,5_1.3_10MK_N	1,01	1,42	1,68
NHL3,5_1.3_10MK_S	0,99	1,81	1,72

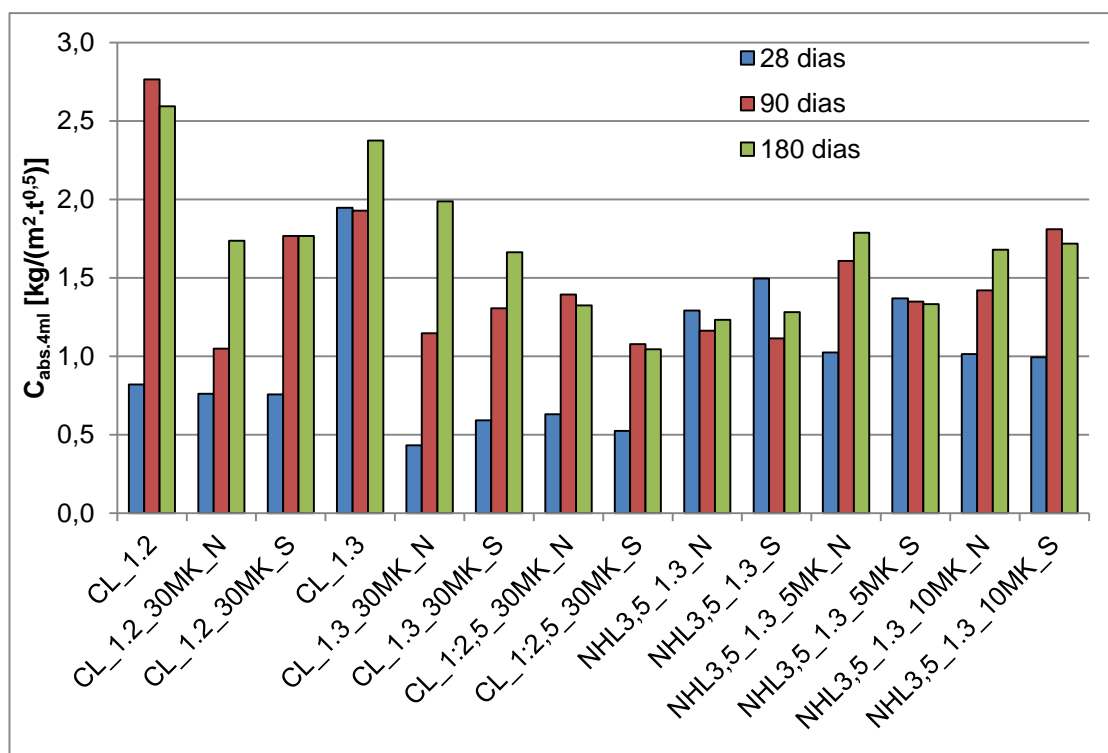


Fig. 3.26 – Coeficiente de absorção de 4 ml de água, aos 28, 90 e 180 dias

### 3.7.9. Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Aos 180 dias de idade dos rebocos, retiraram-se amostras para realização do ensaio de determinação de porosidade aberta e massa volúmica aparente, com o auxílio de uma rebarbadora.

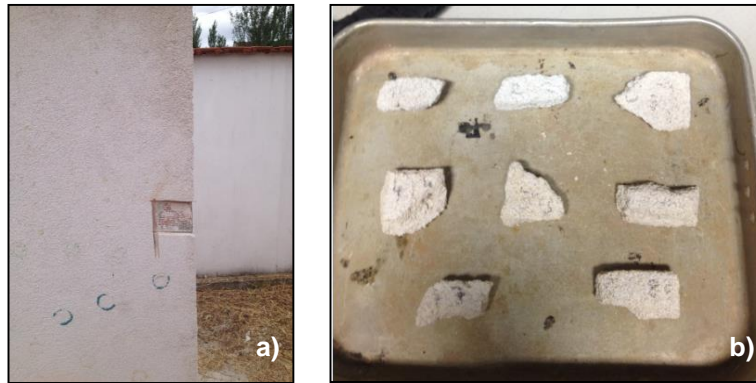


Fig. 3.27 – Murete com amostra retirada (a) amostras dos painéis de cal aérea (b)

Este ensaio permite calcular os valores de porosidade aberta, assim como os valores de massa volúmica aparente, e foi efetuado com base na norma NP EN 1936 (IPQ, 2008). Este método de determinação da porosidade é visto como um método simples, económico e que fornece resultados fiáveis. Outra vantagem é o facto de poder ser aplicado a amostras irregulares e de pequenas dimensões, algo importante quando é necessário extrair amostras de argamassas de edifícios antigos. As amostras devem ser secas, e o ar no seu interior removido por sucção. Posteriormente, força-se a entrada de um líquido nos poros (água), e a porosidade aberta pode ser calculada por diferença de massa. Este método baseia-se na assunção de que apenas os poros podem ser preenchidos com água, e não as partes sólidas da amostra (Stefanidou, 2010).

As amostras retiradas dos muretes foram colocadas em estufa a 60° C durante mais de 48 horas, até atingirem massa constante. Findo este processo, os provetes foram envolvidos em fino tecido de *nylon*, fechadas com fio do mesmo material, de modo a evitar a desagregação da amostra durante o ensaio, e conseqüente perda de massa.

- **Equipamento e material**

- Rebarbadora;
- Estufa;
- Tecido de *nylon*;
- Fio de *nylon*;
- Exsiccador;
- Bomba de vácuo;
- Balança de precisão 0,001g, adaptada para pesagem hidrostática.

- **Procedimento experimental**

- Colocaram-se as amostras na estufa, a 60°, durante mais de 48 horas;
- Retiraram-se as amostras da estufa e prepararam-se as amostras, envolvendo em tecido de *nylon* e fechando com fio do mesmo material;
- Pesaram-se as amostras secas, em balança de precisão 0,001 g;
- Colocaram-se as amostras no exsiccador, e ligou-se a bomba de vácuo;
- Ao fim de 24 horas, abriu-se a torneira da parte superior do exsiccador, imergindo lentamente as amostras em água;
- Após 24 horas, desligou-se a bomba de vácuo e abriram-se as entradas de ar do exsiccador, ficando as amostras imersas e sujeitas à pressão ambiente;
- Findas outras 24 horas, efetuaram-se as pesagens das amostras. Inicialmente fez-se a pesagem hidrostática, através de uma estrutura acessória fixada à balança. Terminada a pesagem hidrostática de cada amostra, retirou-se o excesso de água com um pano húmido, e pesou-se a amostra saturada.

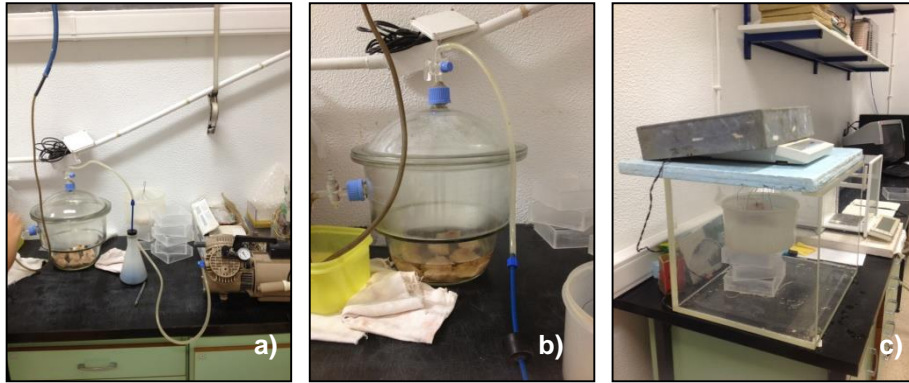


Fig. 3.28 – Aspecto geral do equipamento (a) provetes imersos em água à pressão ambiente (b) pesagem hidrostática (c)

• **Resultados**

A porosidade aberta é calculada através da Equação 3.2 e a massa volúmica aparente através da Equação 3.3. Os resultados obtidos neste ensaio podem ser consultados no Quadro 3.22 e na Figura 3.29.

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

em que:

- $P_{ab}$  – Porosidade aberta [%];
- $m_1$  – massa seca da amostra [g];
- $m_2$  – massa hidrostática da amostra [g];
- $m_3$  – massa saturada da amostra [g]

$$MV_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

em que:

- $MV_{ap}$  – Massa volúmica aparente [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $m_1$  – massa seca da amostra [g];
- $m_2$  – massa hidrostática da amostra [g];
- $m_3$  – massa saturada da amostra [g]

Dentro do esperado, as argamassas de NHL apresentam valores de  $P_{ab}$  inferiores aos verificados nas argamassas de cal aérea. Verifica-se não existir uma grande variação entre as diferentes composições de argamassas de cal hidráulica natural. Com efeito, todas apresentam valores na gama dos 24-28%. Nota-se uma tendência para valores ligeiramente inferiores de  $P_{ab}$  nas argamassas com MK, relativamente à formulação de referência. Nas argamassas CL, a argamassa de referência ao traço 1:2 é a que apresenta valor mais baixo de  $P_{ab}$ , aproximando-se inclusive dos valores de NHL. No traço 1:3, o MK contribui para uma diminuição de porosidade aberta, enquanto no traço 1:2, a tendência é contrária.

Quadro 3.22 – Valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente das amostras retiradas dos muretes

Argamassa	P <sub>ab</sub> [%]	Mv <sub>ap</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
CL_1.2	32,8	1602
CL_1.2_30MK_N	38,6	1519
CL_1.2_30MK_S	37,4	1557
CL_1.3	38,5	1537
CL_1.3_30MK_N	35,7	1497
CL_1.3_30MK_S	34,4	1666
CL_1:2,5_30MK_N	38,5	1505
CL_1:2,5_30MK_S	39,7	1469
NHL3,5_1.3_N	28,4	1836
NHL3,5_1.3_S	28,2	1839
NHL3,5_1.3_5MK_N	27,2	1799
NHL3,5_1.3_5MK_S	27,9	1759
NHL3,5_1.3_10MK_N	24,6	1863
NHL3,5_1.3_10MK_S	24,2	1845

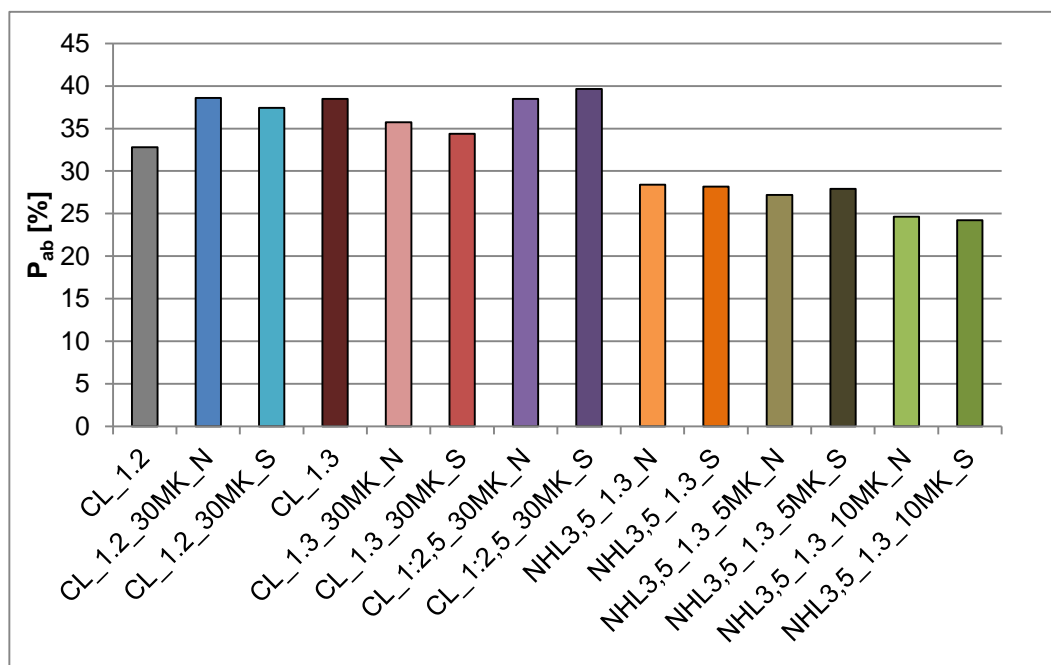


Fig. 3.29 – Valores de porosidade aberta aos 180 dias

### 3.7.10. Identificação de sais solúveis com fitas colorimétricas

Este ensaio consiste em colocar uma fita plástica em contacto com a superfície, previamente humedecida. As fitas possuem zonas específicas de reação, que em contacto com a superfície permitem identificar a presença de iões específicos. Se um determinado ião está presente, a fita muda de cor, em diferentes tonalidades, consoante a quantidade de iões presentes. Cada tipo de fita é sensível a apenas um tipo de ião. Esta é uma técnica semi-quantitativa, cujos resultados são expressos em patamares de concentração de iões, em mg/l. No presente trabalho utilizaram-se as fitas que permitem identificar iões cloreto e iões sulfato.

- **Equipamento e material**
  - Fitas colorimétricas;
  - Borrifador.

- **Procedimento experimental**

- Borrifou-se a superfície com água destilada;
- Encostou-se a fita à superfície, fazendo pressão para assegurar o contacto total;
- Ao fim de 1 minuto comparou-se a cor da fita colorimétrica com a escala de cores presente na embalagem, e retirou-se a gama de valores de concentração do ião ;

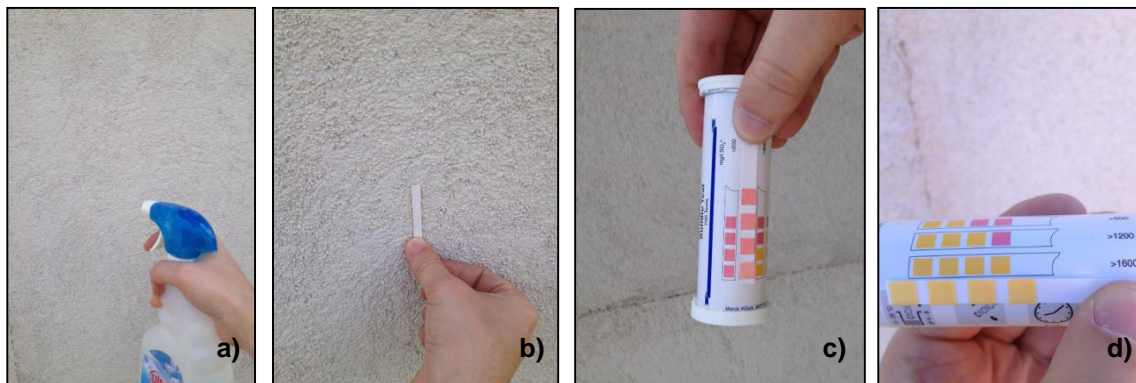


Fig. 3.30 - Humedecimento da superfície com água destilada (a) fita colorimétrica em contacto com a superfície (b) comparação do resultado com a escala da embalagem (c) e (d)

- **Resultados**

Os resultados obtidos podem ser consultados no Quadro 3.23. Aos 90 dias, na argamassa CL\_1.2, detetou-se a concentração máxima de sulfatos, o que pode indicar que houve contaminação do depósito utilizado para a água de amassadura, no dia da aplicação do reboco no referido painel. Aos 180 dias verificou-se uma ligeira diminuição da concentração de sulfatos, mas ainda assim regista-se um valor elevado. Nas argamassas CL\_1.3 e CL\_1.3\_30MK\_N, detetou-se uma pequena concentração de cloretos, aos 180 dias. No geral, pode concluir-se que os constituintes das argamassas não contêm teores significativos de cloretos nem de sulfatos. Apesar da elevada poluição atmosférica existente no local de estudo, causada pelo intenso tráfego rodoviário e aéreo, esta não é suficiente para que, aos 180 dias, haja já uma concentração significativa de sulfatos nas argamassas. A chuva aparenta ter sido capaz de eliminar parte da contaminação inicial com sulfatos da argamassa CL\_1.2.

Quadro 3.23 – Resultados do ensaio de identificação de sais com fitas colorimétricas

Argamassa	Cloretos [mg/l]		Sulfatos [mg/l]	
	90 dias	180 dias	90 dias	180 dias
CL_1.2	0	0	> 1600	> 800
CL_1.2_30MK_N	0	0	< 200	< 200
CL_1.2_30MK_S	0	0	< 200	< 200
CL_1.3	0	500	< 200	< 200
CL_1.3_30MK_N	0	500	< 200	< 200
CL_1.3_30MK_S	0	0	< 200	< 200
CL_1:2,5_30MK_N	0	0	< 200	< 200
CL_1:2,5_30MK_S	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_N	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_S	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_5MK_N	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_5MK_S	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_10MK_N	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_10MK_S	0	0	< 200	< 200



## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo os resultados obtidos na campanha experimental serão relacionados entre si, e também comparados com resultados obtidos por outros autores, com argamassas sujeitas a exposição natural e analisadas em condições laboratoriais.

### 4.1. Quadros Síntese

No Quadro 4.1 é apresentado uma síntese dos valores médios e desvios padrão da resistência superficial com esclerômetro pendular e com durômetro, e no Quadro 4.2. apresenta-se um resumo com os valores de choque de esfera e penetração controlada.

Quadro 4.1 – Valores de resistência superficial por esclerômetro e durômetro, aos 28, 90 e 180 dias

Composição	D <sub>Se</sub> (escala de Vickers)						D <sub>Sd</sub> (Shore A)					
	28 d		90 d		180 d		28 d		90 d		180 d	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
CL_1.2	8,5	2,3	11,6	2,1	22,2	2,3	71,7	2,6	75,2	4,0	78,3	2,6
CL_1.2_30MK_N	30,3	1,3	32,4	3,1	33,7	2,5	73,0	3,0	77,4	3,1	78,5	3,1
CL_1.2_30MK_S	25,3	2,6	31,0	2,1	31,5	1,5	73,0	4,5	74,3	3,9	79,3	2,8
CL_1.3	10,2	3,3	22,2	4,0	23,7	2,2	69,8	4,0	70,9	4,4	73,9	2,3
CL_1.3_30MK_N	19,0	2,7	21,8	1,9	24,6	2,2	65,4	9,2	74,3	5,8	74,5	2,4
CL_1.3_30MK_S	19,6	2,8	23,8	1,2	24,8	1,6	63,3	11,2	73,9	4,2	74,8	2,0
CL_1:2,5_30MK_N	24,1	1,5	27,4	1,8	27,8	0,9	74,2	6,0	76,4	4,6	79,8	3,4
CL_1:2,5_30MK_S	25,3	2,8	30,0	2,9	29,9	2,3	70,9	3,7	74,7	2,3	79,3	3,2
NHL3,5_1.3_N	36,0	1,4	37,0	1,9	38,9	1,2	75,0	6,0	79,7	3,9	79,9	2,6
NHL3,5_1.3_S	36,6	2,2	40,3	3,1	40,9	2,6	74,3	3,9	79,1	3,0	80,0	2,3
NHL3,5_1.3_5MK_N	30,2	1,8	34,9	1,7	37,3	1,8	79,0	3,9	79,9	3,1	80,4	2,1
NHL3,5_1.3_5MK_S	38,1	1,6	39,4	2,4	39,2	1,7	79,6	5,1	81,5	2,9	80,3	1,7
NHL3,5_1.3_10MK_N	30,0	1,5	34,9	1,6	37,8	1,5	79,5	3,2	81,3	4,1	82,0	2,0
NHL3,5_1.3_10MK_S	32,2	1,7	33,6	1,5	34,3	2,3	78,8	2,8	78,3	4,3	81,4	2,2

Quadro 4.2 – Valores de choque de esfera e penetração controlada, aos 180 dias

Composição	Choque Esfera [mm]		Penetração controlada [mm]			
	180 d		180 d			
	Média	DP	1ª penetr	2ª penetr	3ª penetr	Total
CL_1.2	19,0	1,6	6,4	4,2	4,8	15,4
CL_1.2_30MK_N	14,2	1,5	5,6	2,2	2,0	9,8
CL_1.2_30MK_S	15,0	1,6	6,0	3,4	2,4	11,8
CL_1.3	18,6	1,1	9,2	4,4	3,2	16,8
CL_1.3_30MK_N	16,2	1,9	8,0	3,0	2,0	13,0
CL_1.3_30MK_S	14,2	0,8	8,4	3,4	2,6	14,4
CL_1:2,5_30MK_N	16,2	1,8	6,8	2,6	2,4	11,8
CL_1:2,5_30MK_S	14,0	1,0	6,4	3,2	2,6	12,2
NHL3,5_1.3_N	8,2	0,4	3,2	1,2	0,6	5,0
NHL3,5_1.3_S	8,4	1,1	2,4	1,2	0,6	4,2
NHL3,5_1.3_5MK_N	10,4	0,5	3,6	1,2	1,2	6,0
NHL3,5_1.3_5MK_S	10,6	1,3	3,6	0,6	2,0	6,2
NHL3,5_1.3_10MK_N	9,6	1,5	4,8	1,2	1,0	7,0
NHL3,5_1.3_10MK_S	10,0	0,7	4,4	1,4	1,0	6,8

No Quadro 4.3 apresenta-se um quadro síntese com os valores médios e desvios padrão da velocidade de propagação de ultrassons, aos 28, 90 e 180 dias.

Quadro 4.3 – Valores de velocidade de propagação de ultrassons, aos 28, 90 e 180 dias e estimativa do módulo de elasticidade dinâmico, aos 180 dias

Composição	$V_{us}$ [m/s]						$E_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	28 d		90 d		180 d		180 d
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	
CL_1.2	618,2	95,3	617,2	64,8	870,5	96,3	1092,6
CL_1.2_30MK_N	1185,3	198,0	1067,8	160,7	1086,9	136,9	1614,8
CL_1.2_30MK_S	1150,9	189,9	1060,5	148,1	1015,6	110,3	1445,1
CL_1.3	721,7	95,0	828,5	108,0	1102,7	137,2	1822,8
CL_1.3_30MK_N	1335,5	220,9	1285,5	193,1	984,0	120,7	1311,2
CL_1.3_30MK_S	1449,0	350,9	1224,9	216,4	924,2	88,5	1128,8
CL_1:2,5_30MK_N	1258,4	264,0	1106,5	224,6	1090,8	160,5	1645,5
CL_1:2,5_30MK_S	1548,5	230,2	1126,9	255,7	1204,2	283,9	1953,3
NHL3,5_1.3_N	1392,7	184,0	1568,8	237,4	1774,4	316,3	5202,8
NHL3,5_1.3_S	1300,8	251,1	1540,6	244,7	1464,1	217,4	3547,5
NHL3,5_1.3_5MK_N	1547,8	263,8	1525,1	298,6	1554,9	283,5	3914,7
NHL3,5_1.3_5MK_S	1282,8	299,6	1329	226,3	1553,6	289,2	3820,1
NHL3,5_1.3_10MK_N	1616,3	263,2	1137,1	323,1	1322,8	253,3	2933,4
NHL3,5_1.3_10MK_S	1458,4	235,3	1260,5	209,5	1384,8	249,9	3178,9

No Quadro 4.4 apresenta-se um quadro resumo com os valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente, determinados aos 180 dias, e de identificação de sais com fitas colorimétricas, aos 90 e 180 dias.

Quadro 4.4 – Valores de porosidade aberta, massa volúmica aparente e identificação de sais com fitas colorimétricas

Composição	$P_{ab}$ [%]	$MV_{ap}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Sais Solúveis			
			Cloretos [mg/l]		Sulfatos [mg/l]	
			180 d	180 d	90 d	180 d
CL_1.2	32,8	1602,3	0	0	> 1600	> 800
CL_1.2_30MK_N	38,6	1518,7	0	0	< 200	< 200
CL_1.2_30MK_S	37,4	1556,8	0	0	< 200	< 200
CL_1.3	38,5	1536,6	0	500	< 200	< 200
CL_1.3_30MK_N	35,7	1496,7	0	500	< 200	< 200
CL_1.3_30MK_S	34,4	1665,7	0	0	< 200	< 200
CL_1:2,5_30MK_N	38,5	1504,5	0	0	< 200	< 200
CL_1:2,5_30MK_S	39,7	1468,5	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_N	28,4	1836,0	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_S	28,2	1838,8	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_5MK_N	27,2	1799,1	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_5MK_S	27,9	1758,6	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_10MK_N	24,6	1862,8	0	0	< 200	< 200
NHL3,5_1.3_10MK_S	24,2	1844,6	0	0	< 200	< 200

No Quadro 4.5 apresenta-se o resumo dos resultados do ensaio dos tubos de Karsten, nomeadamente, o tempo necessário para o reboco absorver 4 ml de água, e os coeficientes de absorção correspondentes ao tempo necessário para o reboco absorver os 4 ml de água, e ao fim de 5 minutos de absorção.

Quadro 4.5 – Resultados do ensaio dos tubos de Karsten, aos 28, 90 e 180 dias

Composição	Tempo necessário para absorver 4ml [min:seg]			Coeficiente de absorção aos 4ml [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]			Coeficiente de absorção aos 5 min [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]		
	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d
CL_1.2	72:33	06:23	07:15	0,82	2,77	2,59	1,56	2,66	2,60
CL_1.2_30MK_N	84:17	44:20	16:12	0,76	1,05	1,74	0,37	0,96	1,51
CL_1.2_30MK_S	85:12	15:37	15:38	0,76	1,77	1,77	0,45	1,77	1,43
CL_1.3	12:52	13:07	08:39	1,95	1,93	2,38	1,87	2,24	2,19
CL_1.3_30MK_N	260:57	37:05	12:22	0,43	1,15	1,99	0,16	1,02	1,74
CL_1.3_30MK_S	139:55	28:39	17:38	0,59	1,31	1,66	0,82	0,86	1,43
CL_1:2,5_30MK_N	122:33	25:09	27:49	0,63	1,39	1,32	0,47	1,27	1,12
CL_1:2,5_30MK_S	177:23	42:01	44:39	0,52	1,08	1,05	0,35	1,23	0,86
NHL3,5_1.3_N	29:15	36:08	32:09	1,29	1,16	1,23	0,91	0,76	0,91
NHL3,5_1.3_S	21:50	39:28	29:42	1,50	1,11	1,28	1,27	0,68	1,07
NHL3,5_1.3_5MK_N	46:34	18:53	15:16	1,02	1,61	1,79	0,68	1,27	1,35
NHL3,5_1.3_5MK_S	26:04	26:50	27:32	1,37	1,35	1,33	1,09	1,12	0,96
NHL3,5_1.3_10MK_N	47:25	24:14	17:19	1,01	1,42	1,68	0,68	1,15	1,07
NHL3,5_1.3_10MK_S	49:32	14:53	16:32	0,99	1,81	1,72	0,86	1,69	1,46

## 4.2. Avaliação de tendências

Neste subcapítulo faz-se uma análise global dos resultados obtidos nos diversos ensaios efetuados às diferentes composições de argamassas, avaliando-se as tendências verificadas na análise de resultados.

### 4.2.1. Características mecânicas

As características mecânicas das argamassas foram avaliadas através dos ensaios de esclerómetro pendular, durómetro, choque de esfera, penetração controlada e velocidade de propagação de ultrassons. Os primeiros 4 ensaios permitiram avaliar diretamente essas características, uma vez que permitem quantificar a resistência superficial ou das camadas mais internas – no caso da penetração controlada – dos rebocos. O ensaio da velocidade de propagação de ultrassons permitiu avaliar indiretamente o módulo de elasticidade dinâmico, através de estimativa e ter uma indicação sobre a compacidade do revestimento. Na Figura 4.1 apresentam-se os valores de resistência superficial obtidos com esclerómetro pendular e durómetro. Na Figura 4.2 encontram-se reunidos os resultados de resistência superficial obtidos com durómetro, choque de esfera e penetração controlada. Por fim, na Figura 4.3 registam-se os valores de estimativa do módulo de elasticidade dinâmico e os valores de resistência superficial retirados do ensaio de choque de esfera. Na Figura 4.1 é possível constatar que, aos 180 dias, os resultados de resistência superficial obtidos com durómetro são, em geral, coerentes com os obtidos com esclerómetro. Os valores mais baixos de índice esclerométrico são acompanhados de valores baixos de resistência medida com durómetro, à exceção da composição CL\_1.2, sendo que valores elevados desse parâmetro também são acompanhados de valores elevados do ensaio com durómetro. Na Figura 4.2 é possível verificar que valores mais baixos de índice esclerométrico resultam em valores mais elevados de choque de esfera e de 1ª penetração, no ensaio de penetração controlada; esta situação é algo expectável, uma vez que valores baixos de índice esclerométrico indicam baixa resistência superficial. A mesma tendência é também verificada para valores altos de resistência superficial, traduzindo-se em baixos diâmetros de moosa com choque de esfera. Na Figura 4.3 pretendeu-se relacionar 2 parâmetros (módulo de elasticidade dinâmico e choque de esfera) para avaliar a deformabilidade dos rebocos. É sabido que um maior diâmetro da moosa e um menor valor de  $E_d$  indicam uma maior deformabilidade, sendo possível

observar essa mesma tendência nos rebocos analisados - quanto maior o diâmetro da moça, menor o módulo de elasticidade dinâmico.

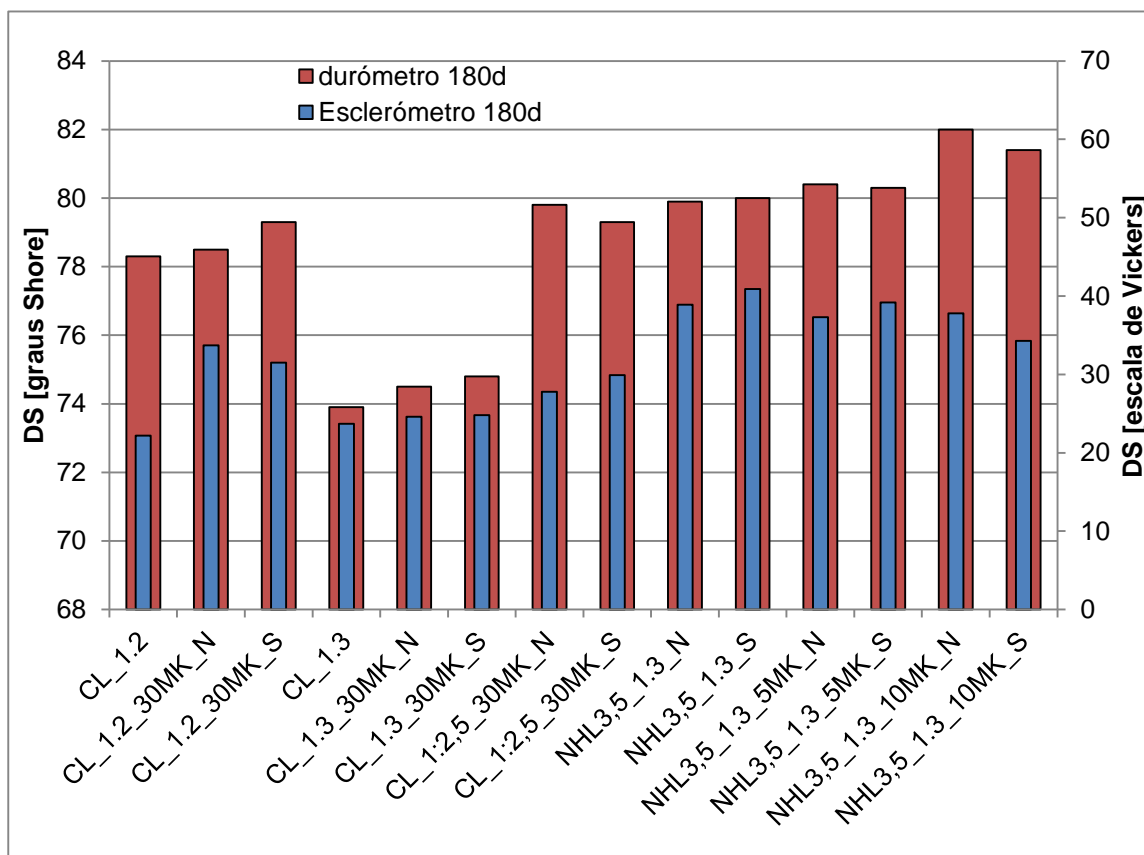


Fig. 4.1 – Resistência superficial com esclerômetro e durômetro, aos 180 dias

#### 4.2.1.1 Entre composições

De forma a fazer uma análise qualitativa da influência que a introdução do metacaulino tem nas argamassas analisadas, e também para estabelecer uma comparação entre o comportamento das argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural, criaram-se tabelas com setas representativas da subida ou descida dos valores obtidos nos diferentes ensaios, e com cores que indicam a influência positiva (verde) ou negativa (vermelho) que essas variações representam, em comparação com as argamassas de referência. Assim, os Quadros 4.6 a 4.8 analisam a influência da introdução de metacaulino nas propriedades mecânicas das argamassas, nas 3 idades de estudo analisadas, enquanto o Quadro 4.9 analisa a diferença de comportamento mecânico das argamassas de cal aérea, em comparação com as argamassas de cal hidráulica natural.

É possível constatar que, de forma geral, o metacaulino contribui para uma melhoria das propriedades mecânicas das argamassas de cal aérea, originando aumento dos valores de resistência superficial e das camadas mais internas, e também da velocidade de propagação de ultrassons. Por outro lado, nas argamassas de cal hidráulica natural, a tendência geral é contrária, com o metacaulino a contribuir para um decréscimo dos valores de resistência e de velocidade de propagação de ultrassons. Analisando as propriedades mecânicas das argamassas de NHL, tendo como referência os valores das argamassas CL, é possível verificar valores superiores em todos os parâmetros que permitem avaliar as propriedades mecânicas, e também da estimativa de módulo de elasticidade dinâmico, algo que vai de encontro ao que seria expectável.

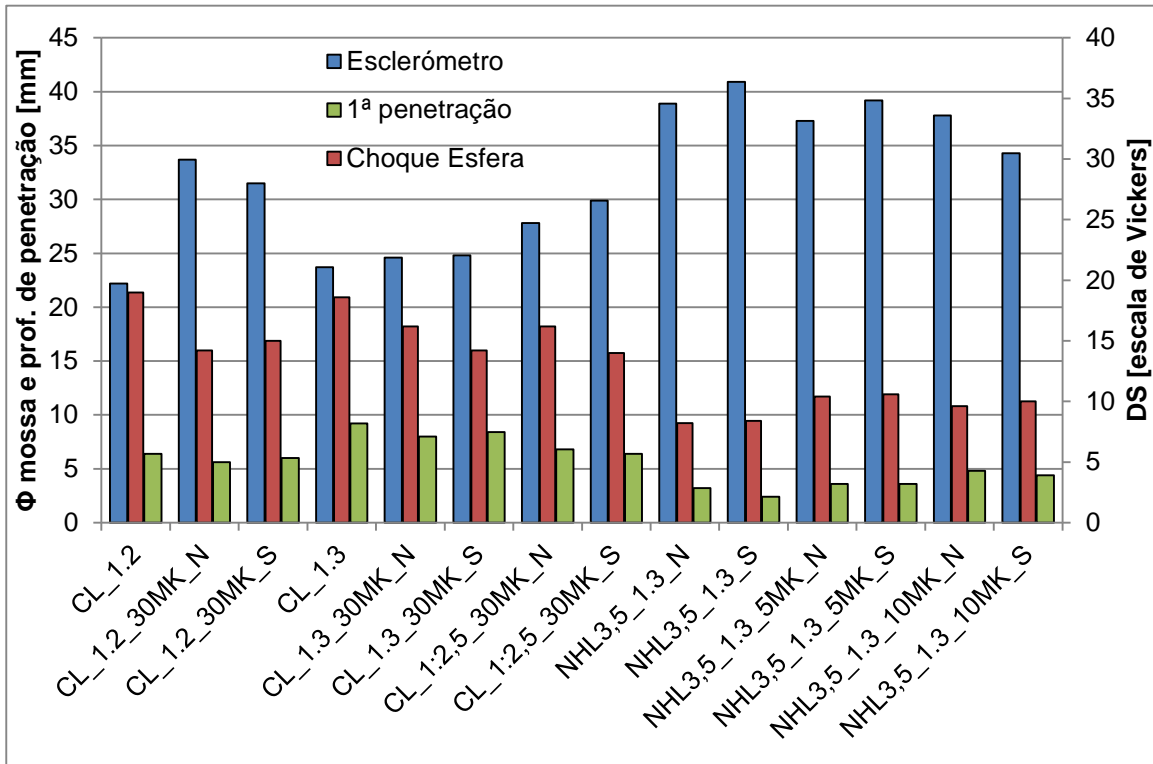


Fig. 4.2 – Resistência superficial com choque de esfera, penetração controlada e esclerómetro, aos 180 dias

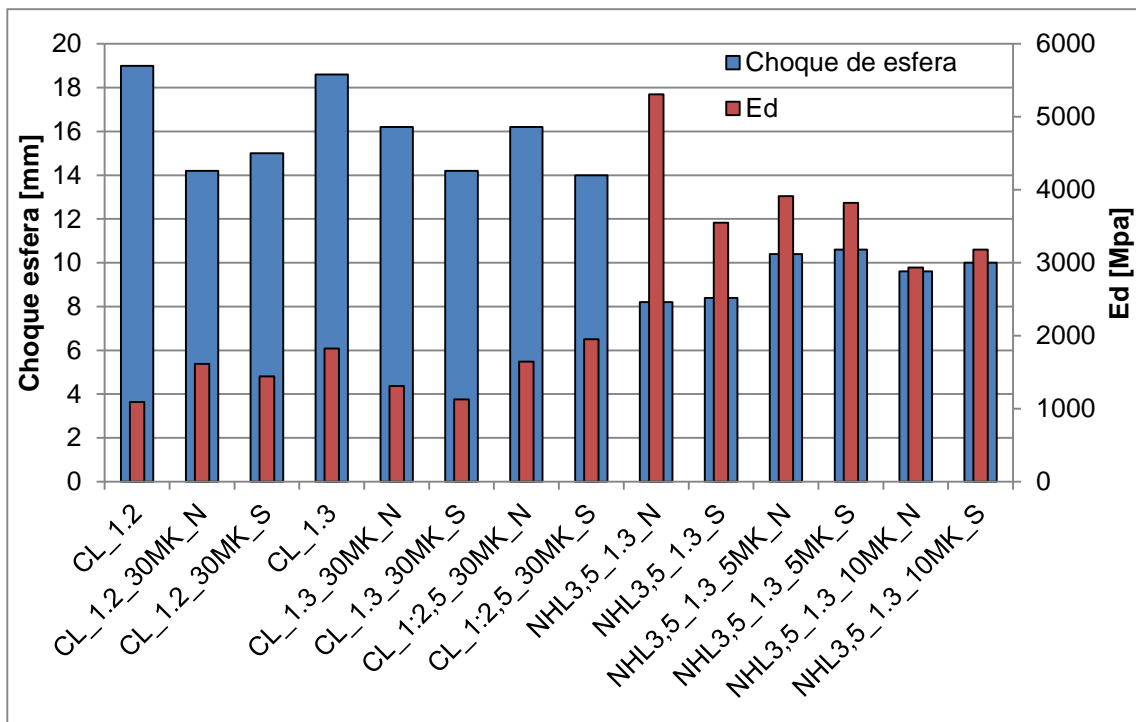


Fig. 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistência superficial com choque de esfera, aos 180 dias

Quadro 4.6 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerômetro, durômetro e ultrassons, aos 28 dias

Argamassa	DS <sub>e</sub> [escala Vickers]	DS <sub>d</sub> [graus Shore]	V <sub>us</sub> [m/s]
CL_1.2	8,5	71,7	618,2
CL_1.2_30MK_N	↑	↑	↑
CL_1.2_30MK_S	↑	↑	↑
CL_1.3	10,2	69,8	721,7
CL_1.3_30MK_N	↑	↓	↑
CL_1.3_30MK_S	↑	↓	↑
NHL3,5_1.3_N	36,0	75,0	1392,7
NHL3,5_1.3_S	36,6	74,3	1300,8
NHL3,5_1.3_5MK_N	↓	↑	↑
NHL3,5_1.3_5MK_S	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	↓	↑	↑
NHL3,5_1.3_10MK_S	↓	↑	↑

Quadro 4.7 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerômetro, durômetro e ultrassons, aos 90 dias

Argamassa	DS <sub>e</sub> [escala Vickers]	DS <sub>d</sub> [graus Shore]	V <sub>us</sub> [m/s]
CL_1.2	11,6	75,2	617,2
CL_1.2_30MK_N	↑	↑	↑
CL_1.2_30MK_S	↑	↓	↑
CL_1.3	22,2	70,9	828,5
CL_1.3_30MK_N	↓	↑	↑
CL_1.3_30MK_S	↑	↑	↑
NHL3,5_1.3_N	37,0	79,7	1568,8
NHL3,5_1.3_S	40,3	79,1	1540,6
NHL3,5_1.3_5MK_N	↓	↑	↓
NHL3,5_1.3_5MK_S	↓	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	↓	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_S	↓	↓	↓

Quadro 4.8 – Análise comparativa da influência do metacaulino nas propriedades mecânicas, por esclerômetro, durômetro e ultrassons, aos 180 dias

Argamassa	DS <sub>e</sub> [escala Vickers]	DS <sub>d</sub> [graus Shore]	Choque de esfera [mm]	Penetração controlada [mm]			V <sub>us</sub> [m/s]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]
				1ª P	2ª P	3ª P			
CL_1.2	22,2	78,3	19,0	6,4	4,2	4,8	870,5	1092,6	32,8
CL_1.2_30MK_N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
CL_1.2_30MK_S	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
CL_1.3	23,7	73,9	18,6	9,2	4,4	3,2	1102,7	1822,8	38,5
CL_1.3_30MK_N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓
CL_1.3_30MK_S	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓
NHL3,5_1.3_N	38,9	79,9	8,2	3,2	1,2	0,6	1774,4	5202,8	28,4
NHL3,5_1.3_S	40,9	80,0	8,4	2,4	1,2	0,6	1464,1	3547,5	28,2
NHL3,5_1.3_5MK_N	↓	↑	↓	↓	↔	↓	↓	↓	↓
NHL3,5_1.3_5MK_S	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	↓	↑	↓	↓	↔	↓	↓	↓	↓
NHL3,5_1.3_10MK_S	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Quadro 4.9 – Análise comparativa das propriedades da cal hidráulica natural em relação à cal aérea, por esclerômetro, durômetro, choque de esfera, penetração controlada, ultrassons, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade aberta, aos 180 dias

Argamassa	D <sub>se</sub> [escala Vickers]	D <sub>Sd</sub> [graus Shore]	Choque de esfera [mm]	Penetração controlada [mm]			V <sub>us</sub> [m/s]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]
				1ª P	2ª P	3ª P			
CL_1.2	22,2	78,3	19,0	6,4	4,2	4,8	870,5	1092,6	32,8
CL_1.2_30MK_N	33,7	78,5	14,2	5,6	2,2	2,0	1086,9	1614,8	38,6
CL_1.2_30MK_S	31,5	79,3	15,0	6,0	3,4	2,4	1015,6	1445,1	37,4
CL_1.3	23,7	73,9	18,6	9,2	4,4	3,2	1102,7	1822,8	38,5
CL_1.3_30MK_N	24,6	74,5	16,2	8,0	3,0	2,0	984	1311,2	35,7
CL_1.3_30MK_S	24,8	74,8	14,2	8,4	3,4	2,6	924,2	1128,8	34,4
CL_1:2,5_30MK_N	27,8	79,8	16,2	6,8	2,6	2,4	1090,8	1645,5	38,5
CL_1:2,5_30MK_S	29,9	79,3	14,0	6,4	3,2	2,6	1204,2	1953,3	39,7
NHL3,5_1.3_N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_S	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_5MK_N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_5MK_S	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_S	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓

#### 4.2.1.2 Entre idades

Procedimento semelhante foi seguido para avaliar a evolução do comportamento mecânico das argamassas em cada uma das idades de estudo, apresentando-se essa comparação no Quadro 4.10.

É possível constatar um aumento progressivo da resistência superficial em cada uma das idades de estudo. Relativamente à velocidade de propagação de ultrassons, aos 90 dias, a tendência aponta para um decréscimo dos valores, relativamente aos obtidos aos 28 dias, indiciando uma maior compactidade dos rebocos. Dos 90 para os 180 dias, a tendência, na maior parte das composições, é para um aumento dos valores de V<sub>us</sub>.

Quadro 4.10 – Evolução com a idade do comportamento mecânico das argamassas, por esclerômetro, durômetro e ultrassons

Argamassa	D <sub>Se</sub> [escala Vickers]			D <sub>Sd</sub> [graus Shore]			V <sub>us</sub> [m/s]		
	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d
CL_1.2	8,5	↑	↑	71,7	↑	↑	618,2	↓	↑
CL_1.2_30MK_N	30,3	↑	↑	73,0	↑	↑	1185,3	↓	↑
CL_1.2_30MK_S	25,3	↑	↑	73,0	↑	↑	1150,9	↓	↓
CL_1.3	10,2	↑	↑	69,8	↑	↑	721,7	↑	↑
CL_1.3_30MK_N	19,0	↑	↑	65,4	↑	↑	1335,5	↓	↓
CL_1.3_30MK_S	19,6	↑	↑	63,3	↑	↑	1449	↓	↓
CL_1:2,5_30MK_N	24,1	↑	↑	74,2	↑	↑	1258,4	↓	↓
CL_1:2,5_30MK_S	25,3	↑	↓	70,9	↑	↑	1548,5	↓	↑
NHL3,5_1.3_N	36,0	↑	↑	75,0	↑	↑	1392,7	↑	↑
NHL3,5_1.3_S	36,6	↑	↑	74,3	↑	↑	1300,8	↑	↓
NHL3,5_1.3_5MK_N	30,2	↑	↑	79,0	↑	↑	1547,8	↓	↑
NHL3,5_1.3_5MK_S	38,1	↑	↓	79,6	↑	↓	1282,8	↑	↑
NHL3,5_1.3_10MK_N	30,0	↑	↑	79,5	↑	↑	1616,3	↓	↑
NHL3,5_1.3_10MK_S	32,2	↑	↑	78,8	↓	↑	1458,4	↓	↑

#### 4.2.2. Comportamento à ação da água

O comportamento em relação à água dos rebocos foi avaliado através do ensaio de permeabilidade sob baixa pressão com tubos de Karsten. Idealmente, tendo em conta o objetivo de aplicação das argamassas estudadas em reabilitação de rebocos de edifícios antigos, pretende-se que estas argamassas absorvam a menor quantidade de água, e o mais lentamente possível. Na Figura 4.4. apresentam-se os resultados do coeficiente de absorção do tempo necessário para absorver os 4 ml de água e de porosidade aberta. Como é possível observar, entre as argamassas de cal aérea, ao menor valor de porosidade aberta corresponde o valor mais elevado de coeficiente de absorção (CL\_1.2). Por outro lado, os valores mais elevados de  $P_{ab}$  coincidem com os valores mais baixos de  $C_{abs.4ml}$  (CL\_1:2,5\_30MK). Nas argamassas de NHL, observa-se tendência semelhante, ou seja, aos valores mais elevados de  $P_{ab}$  correspondem os menores valores de absorção de água, na argamassa de referência, e aos valores mais baixos de  $P_{ab}$  correspondem valores mais altos de  $C_{abs.4ml}$  (NHL3,5\_1.3\_10MK). Esta tendência, importa referir, é contrária à que seria expectável. Esperar-se-ia que as argamassas com maior  $P_{ab}$  absorvessem maior quantidade de água. No entanto, este comportamento inesperado pode dever-se ao tamanho dos poros, ou seja, pode dar-se o caso de, nas composições estudadas, as argamassas com menor porosidade aberta terem poros com maiores dimensões, uma vez que o coeficiente de absorção é tanto maior quanto maior for o diâmetro dos poros, dentro da gama capilar. Esta possível explicação é sustentada por Moropoulou *et al.* (2009), que indica que as argamassas de cal com pozolanas artificiais possuem poros com raio menor do que as argamassas apenas de cal. No entanto, esta teoria só poderá ser confirmada através de um estudo mais aprofundado da estrutura porosimétrica das argamassas. Outra possível explicação para esta tendência será o facto de a porosidade aberta ter sido obtida através do estudo de apenas uma amostra por painel, havendo a possibilidade de não traduzir o comportamento de todo o painel.

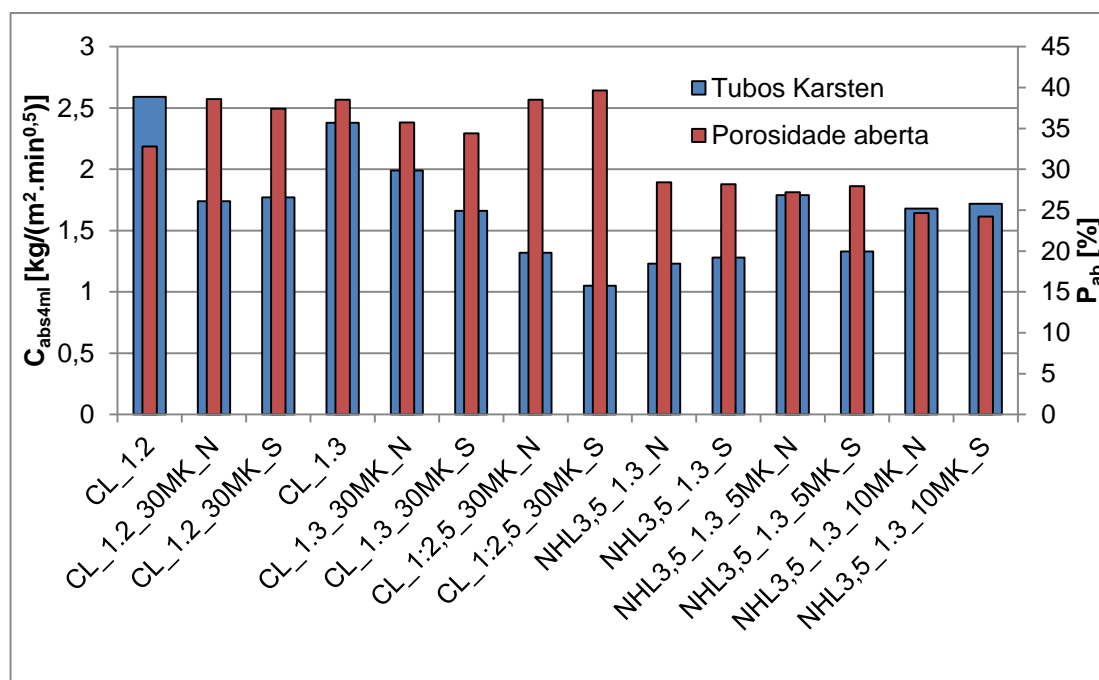


Fig. 4.4 – Coeficiente de absorção do tempo para absorver 4 ml e porosidade aberta

## 4.2.2.1 Entre composições

Quadro 4.11 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 28 dias

Argamassa	Tempo necessário para absorver 4 ml [min:seg]	Coefficiente de absorção aos 4 ml [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
CL_1.2	72:33	0,82
CL_1.2_30MK_N	↑	↓
CL_1.2_30MK_S	↑	↓
CL_1.3	12:52	1,95
CL_1.3_30MK_N	↑	↓
CL_1.3_30MK_S	↑	↓
NHL3,5_1.3_N	29:15	1,29
NHL3,5_1.3_S	21:50	1,50
NHL3,5_1.3_5MK_N	↑	↓
NHL3,5_1.3_5MK_S	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	↑	↓
NHL3,5_1.3_10MK_S	↑	↓

Quadro 4.12 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 90 dias

Argamassa	Tempo necessário para absorver 4 ml [min:seg]	Coefficiente de absorção aos 4 ml [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
CL_1.2	06:23	2,77
CL_1.2_30MK_N	↑	↓
CL_1.2_30MK_S	↑	↓
CL_1.3	13:07	1,93
CL_1.3_30MK_N	↑	↓
CL_1.3_30MK_S	↑	↓
NHL3,5_1.3_N	36:08	1,16
NHL3,5_1.3_S	39:28	1,11
NHL3,5_1.3_5MK_N	↓	↑
NHL3,5_1.3_5MK_S	↓	↑
NHL3,5_1.3_10MK_N	↓	↑
NHL3,5_1.3_10MK_S	↓	↑

É de notar que, em todas as idades de estudo, o metacaulino demonstra ter uma influência benéfica no comportamento à ação da água de todas as composições de argamassas de cal aérea. Já nas argamassas de NHL, excetuando a análise feita aos 28 dias, o metacaulino contribui para uma pioria do comportamento face à água.

Quadro 4.13 – Análise comparativa da influência do metacaulino no comportamento à ação da água, aos 180 dias

Argamassa	Tempo necessário para absorver 4 ml [min:seg]	Coefficiente de absorção aos 4 ml [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>-0,5</sup> )]
CL_1.2	07:15	2,59
CL_1.2_30MK_N	↑	↓
CL_1.2_30MK_S	↑	↓
CL_1.3	08:39	2,38
CL_1.3_30MK_N	↑	↓
CL_1.3_30MK_S	↑	↓
NHL3,5_1.3_N	32:09	1,23
NHL3,5_1.3_S	29:42	1,28
NHL3,5_1.3_5MK_N	↓	↑
NHL3,5_1.3_5MK_S	↓	↑
NHL3,5_1.3_10MK_N	↓	↑
NHL3,5_1.3_10MK_S	↓	↑

#### 4.2.2.2 Entre idades

Quadro 4.14 – Evolução com a idade do comportamento das argamassas à ação da água

Argamassa	Tempo necessário para absorver 4ml [min:seg]			Coefficiente de absorção aos 4 ml [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]		
	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias
CL_1.2	72:33	↓	↑	0,82	↑	↓
CL_1.2_30MK_N	84:17	↓	↓	0,76	↑	↑
CL_1.2_30MK_S	85:12	↓	↔	0,76	↑	↔
CL_1.3	12:52	↑	↓	1,95	↓	↑
CL_1.3_30MK_N	260:57	↓	↓	0,43	↑	↑
CL_1.3_30MK_S	139:55	↓	↓	0,59	↑	↑
CL_1:2,5_30MK_N	122:33	↓	↑	0,63	↑	↓
CL_1:2,5_30MK_S	177:23	↓	↑	0,52	↑	↓
NHL3,5_1.3_N	29:15	↑	↓	1,29	↓	↑
NHL3,5_1.3_S	21:50	↑	↓	1,5	↓	↑
NHL3,5_1.3_5MK_N	46:34	↓	↓	1,02	↑	↑
NHL3,5_1.3_5MK_S	26:04	↑	↑	1,37	↓	↓
NHL3,5_1.3_10MK_N	47:25	↓	↓	1,01	↑	↑
NHL3,5_1.3_10MK_S	49:32	↓	↑	0,99	↑	↓

Analisando a evolução com a idade do comportamento à água, verifica-se que, na maior parte dos casos, o tempo de absorção vai diminuindo com a idade. Essa tendência é ainda mais acentuada na comparação entre os 28 e os 90 dias, com uma diferença de valores considerável, algo que, como foi explicado no capítulo anterior, poderá dever-se ao facto de, aos 28 dias, os poros ainda estarem saturados com a água de amassadura. Entre os 90 e os 180 dias, a tendência geral aponta também para um decréscimo do tempo de absorção, e para um aumento do coeficiente de absorção necessário para absorver os 4 ml de água, embora com diferenças de valores menos significativas.

### 4.3. Comparação com resultados de outros autores

#### 4.3.1. Argamassas com exposição natural

Neste subcapítulo faz-se uma comparação dos resultados obtidos nos estudos efetuados no âmbito desta dissertação, com os resultados apresentados no Capítulo 2, referentes a argamassas aplicadas em condições de exposição natural, ensaiados *in situ*.

##### 4.3.1.1 Características mecânicas

Quadro 4.15 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores

Estudo	Argamassa	Argamassa de comparação	Choque esfera [mm]	Penetração controlada [mm]			Esclerómetro [escala Vickers]	Durómetro [graus Shore]	V <sub>us</sub> [m/s]
				1ª P	2ª P	3ª P			
Veiga <i>et al.</i> (2009)	Cal aérea, mk e areia (1:0,5:2,5)	CL_1.2_30MK	↑	↔	↔	↔	-	-	-
		CL_1.2,5_30MK	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.3_30MK	↑	↑	↑	↔	-	-	-
Tavares <i>et al.</i> (2008)	Cal aérea, mk e areia (1:1:4)	CL_1.2_30MK	↔	↑	↓	↓	↑	↓	-
		CL_1.2,5_30MK	↔	↑	↔	↔	↑	↓	-
		CL_1.3_30MK	↔	↑	↑	↓	↔	↓	-
Veiga <i>et al.</i> (2011a)	Cal aérea e areia (1:3)	CL_1.3	↓	↓	↓	↓	-	-	-
	Cal aérea, mk e areia (1:0,5:3,5)	CL_1.2_30MK	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.2,5_30MK	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.3_30MK	↑	↑	↑	↑	-	-	-
Magalhães <i>et al.</i> (2003)	Cal aérea e areia (1:3)	CL_1.3	↑	↑	↑	↑	↓	-	↔
	Cal aérea, pozolana e areia (1:1:4)	CL_1.2_30MK	↓	↑	↑	↑	↑	-	↑
		CL_1.2,5_30MK	↓	↑	↑	↑	↔	-	↑
		CL_1.3_30MK	↓	↑	↑	↑	↓	-	↔
Jamú (2013)	Cal aérea e areia (1:2)	CL_1.2	-	-	-	-	↑	↑	
Dias (2013)	Cal aérea e areia (1:3)	CL_1.3	-	-	-	-	↑	↑	

No Quadro 4.15 apresenta-se uma comparação entre os valores obtidos neste trabalho (que servem como referência) e os consultados em bibliografia. As setas para cima indicam que as argamassas estudadas neste trabalho apresentam valores superiores às da bibliografia, e para baixo valores inferiores, enquanto as cores verde e vermelha indicam tendências positivas ou negativas dessas variações. Em geral, as argamassas de cal e metacaulino estudadas por outros autores apresentam valores de resistência superficial e das camadas interiores superiores aos registados no presente trabalho, sendo a argamassa CL\_1.2\_30MK a que mais se aproxima da gama de valores analisada, apresentando mesmo, em alguns parâmetros, comportamento superior. Por outro lado, as argamassas de referência de cal aérea ao traço 1:2 e 1:3 analisadas neste trabalho exibem características mecânicas superiores a argamassas semelhantes, analisadas por outros autores. No estudo de Veiga *et al.* (2011a) verifica-se que, tal como no presente estudo, o MK contribui para um aumento das propriedades mecânicas das argamassas. Importa no entanto referir que nos estudos

analisados, o MK, a cal e os agregados eram diferentes dos utilizados neste trabalho, introduzindo assim variações no comportamento das argamassas.

#### 4.3.1.2 Comportamento à água

Quadro 4.16 – Comparação entre o comportamento à água das argamassas estudadas neste trabalho, aos 90 dias, e as argamassas estudadas por outros autores

Estudo	Argamassa	Argamassa de comparação	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]					Tempo para absorver 4ml [min]	C <sub>abs.4ml</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	C <sub>abs.5min</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
			5 min	10 min	15 min	30 min	60 min			
Veiga <i>et al.</i> (2009)	Cal aérea, mk e areia (1:0,5:2,5)	CL_1.2_30MK	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.2,5_30MK	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.3_30MK	↑	↓	↓	↑	↑	-	-	-
Tavares <i>et al.</i> (2008)	Cal aérea, mk e areia (1:1:4)	CL_1.2_30MK	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	-
		CL_1.2,5_30MK	↓	↓	↓	↓	↑	-	-	-
		CL_1.3_30MK	↓	↓	↓	↓	↑	-	-	-
Veiga <i>et al.</i> (2011a)	Cal aérea e areia (1:3)	CL_1.3	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-
	Cal aérea, mk e areia (1:0,5:3,5)	CL_1.2_30MK	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-
		CL_1.2,5_30MK	↑	↓	↓	↓	↓	-	-	-
		CL_1.3_30MK	↔	↓	↓	↓	↓	-	-	-
Jamú (2013)	Cal aérea e areia (1:2)	CL_1.2	-	-	-	-	-	-	↓	
Dias (2013)	Cal aérea e areia (1:3)	CL_1.3	-	-	-	-	-	↑	↓	↓

O comportamento face à água foi também comparado com o obtido nos estudos de caracterização de outros autores, como se pode ver no Quadro 4.16. De forma geral, as argamassas com metacaulino estudadas absorvem, aos 90 dias, a água de forma mais rápida que as analisadas em bibliografia, em idade de estudo aproximada (100 dias). As argamassas analisados por Veiga *et al.* (2009) apresentam, em geral, um comportamento mais satisfatório, mas, em relação aos restantes estudos, as argamassas com metacaulino caracterizadas nesta dissertação exibem, na maior parte dos casos, melhor comportamento. A argamassa CL\_1.3\_30MK é aquela que, em comparação, apresenta um melhor comportamento face à água. As argamassa de cal aérea de referência 1:2 e 1:3, analisadas por Jamú (2013) e Dias (2013), respetivamente, apresentam um comportamento menos satisfatório em comparação com as argamassas com o mesmo traço caracterizadas nesta dissertação. Por outro lado, a argamassa de referência 1:3 analisada por Veiga *et al.* (2011a) apresenta comportamento superior à argamassa CL\_1.3. Verifica-se nos outros trabalhos que, tal como neste, o MK contribui para que a absorção de água se processe de forma mais lenta.

#### 4.3.2. Ensaios realizados sobre rebocos aplicados em tijolos, em condições laboratoriais

Neste subcapítulo faz-se uma comparação dos resultados obtidos nos estudos efetuados no âmbito desta dissertação, com resultados referentes a camadas simples de argamassas aplicadas em tijolos, em condições laboratoriais. A areia utilizada por todos os autores citados foi a mesma que se utilizou no presente trabalho. No Quadro 4.17 apresentam-se os valores médios dos resultados obtidos, aos 90 dias, nos estudos dos autores citados.

Quadro 4.17 – Valores médios dos resultados obtidos por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias

Estudo	Argamassa	Durómetro [graus Shore]	V <sub>us</sub> [m/s]	Tempo para absorver 4ml [min]	C <sub>abs.4ml</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	C <sub>abs.5min</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
Jamú (2013)	Cal aérea 1:2	65,7	936,1	19,11	1,90	0,62
Dias (2013)	Cal aérea 1:3	60,8	1016,1	5,08	3,70	7,7
Fontes (2013)	NHL 1:3	74,7	1262	-	-	2,36
	NHL 1:3 com 5% MK + 5% resíduo cerâmico	67,0	1411	-	-	3,20
	NHL 1:3 com 10% MK + 5% resíduo cerâmico	65,1	1137	-	-	3,94
Pascoal (2012)	Cal aérea 1:4	74,2	1446,0	0,55	-	-
	Cal aérea 1:4 com 25% MK	82,0	1444,8	3,38	-	-
Andrejkovicová <i>et al</i> (2013) *	Cal aérea 1:3	-	1800	0,80	-	-
	Cal aérea 1:3 com 20% MK	-	1900	1,13	-	-

\* Bloco de adobe

#### 4.3.2.1 Características mecânicas

No Quadro 4.18 apresenta-se uma comparação entre os resultados que permitem avaliação das características mecânicas, obtidos nesta dissertação, em condições de exposição natural, e efetuados por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias.

Quadro 4.18 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias

Estudo	Argamassa	Argamassa de comparação	Durómetro [graus Shore]	V <sub>us</sub> [m/s]
Jamú (2013)	Cal aérea 1:2	<b>CL_1.2</b>	↑	↓
Dias (2013)	Cal aérea 1:3	<b>CL_1.3</b>	↑	↑
Fontes (2013)	NHL 1:3	<b>NHL_1.3</b>	↑	↑
	NHL 1:3 com 5% MK + 5% resíduo cerâmico	<b>NHL_1.3_5MK</b>	↑	↔
	NHL 1:3 com 10% MK + 5% resíduo cerâmico	<b>NHL_1.3_10MK</b>	↑	↔
Pascoal (2012)	Cal aérea 1:4	<b>CL_1.3</b>	↓	↓
	Cal aérea 1:4 com 25% MK	<b>CL_1.3_30MK</b>	↓	↓
Andrejkovicová <i>et al</i> (2013)	Cal aérea 1:3	<b>CL_1.3</b>	-	↓
	Cal aérea 1:3 com 20% MK	<b>CL_1.3_30MK</b>	-	↓

Comparando as argamassas analisadas neste estudo, em condições de exposição natural, constata-se que apresentam valores de dureza superficial superiores relativamente às argamassas estudadas em laboratório por Dias (2013), Jamú (2013) e Fontes (2013), mas valores mais baixos que os apresentados por Pascoal (2013). Relativamente à velocidade de propagação de ultrassons, verificam-se valores superiores aos de Dias (2013), valores bastante semelhantes aos de Fontes (2013), e valores inferiores aos de Pascoal (2012), Andrejkovicová *et al* (2013) e Jamú (2013).

#### 4.3.2.2 Comportamento à água

No Quadro 4.19 apresenta-se uma comparação entre os resultados dos ensaios de avaliação de comportamento face à água, obtidos no presente trabalho, em condições de exposição natural, e efetuados por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias.

Quadro 4.19 – Comparação entre o comportamento à água das argamassas estudadas neste trabalho e as argamassas estudadas por outros autores, em condições laboratoriais, aos 90 dias

Estudo	Argamassa	Argamassa de comparação	Tempo para absorver 4ml [min]	C <sub>abs.4ml</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	C <sub>abs.5min</sub> [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
Jamú (2013)	Cal aérea 1:2	<b>CL_1.2</b>	↓	↑	↑
Dias (2013)	Cal aérea 1:3	<b>CL_1.3</b>	↑	↓	↓
Fontes (2013)	NHL 1:3	<b>NHL_1.3</b>	↑	-	↓
	NHL 1:3 com 5% MK + 5% resíduo cerâmico	<b>NHL_1.3_5MK</b>	↑	-	↓
	NHL 1:3 com 10% MK + 5% resíduo cerâmico	<b>NHL_1.3_10MK</b>	↑	-	↓
Pascoal (2012)	Cal aérea 1:4	<b>CL_1.3</b>	↑	-	-
	Cal aérea 1:4 com 25% MK	<b>CL_1.3_30MK</b>	↑	-	-
Andrejkovicová <i>et al</i> (2013)	Cal aérea 1:3	<b>CL_1.3</b>	↑	-	-
	Cal aérea 1:3 com 20% MK	<b>CL_1.3_30MK</b>	↑	-	-

Como é possível constatar, todas as argamassas estudadas neste trabalho, com um traço volumétrico igual ou o mais aproximado possível, apresentam melhor comportamento à água do que as argamassas caracterizadas em contexto laboratorial por outros autores (exceto a argamassa de Jamú) absorvendo menor quantidade de água, e de forma mais lenta. Tal pode dever-se a diferenças no sistema de aplicação das argamassas (camada simples vs sistema de reboco; aplicação na horizontal em laboratório vs aplicação *in situ* na vertical) e às curas distintas as que foram sujeitas.

#### 4.3.3. Ensaios realizados sobre provetes prismáticos, em condições laboratoriais

Neste subcapítulo faz-se uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados de ensaios laboratoriais efetuados sobre provetes prismáticos, produzidos com formulações semelhantes aos utilizados na presente dissertação. Nos Quadros 4.20 a 4.24 apresentam-se os resultados dos referidos ensaios. Analisaram-se apenas os resultados relativos à cura húmida, que se considera ser a que mais se assemelha às condições de cura obtidas na situação de exposição natural ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$  de temperatura e  $90 \pm 5\%$  de HR).

Quadro 4.20 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos  
(Faria *et al.*, 2012b)

Argamassa	Traço	Cura	Idade	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]	CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
<b>CL</b>	1:3	H	28 d	0,08	0,13	29,0	-
<b>CL_30Mk</b>	1:3	H	28 d	0,59	1,16	33,0	-

Quadro 4.21 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos  
(Branco, 2013)

Argamassa	Traço	Idade	Cura	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]	CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
<b>L3</b>	1:3	28 d	H	0,08	0,13	729	29,5	0,84
		90 d		0,24	0,41	3191	31,1	1,14
<b>L3_Mk30</b>	1:3	28 d	H	0,59	1,16	4245	32,8	1,20
		90 d		0,16	0,81	1629	35,7	1,61
<b>L2</b>	1:2	28 d	H	0,18	0,30	1969	30,5	1,40
		90 d		0,36	0,62	3007	23,3	1,04
<b>L2_Mk30</b>	1:2	28 d	H	0,67	2,99	6104	33,4	0,91
		90 d		0,65	3,61	6370	31,2	0,94

Quadro 4.22 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos  
(Bandeira, 2012)

Argamassa	Traço	Cura	Idade	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]	CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
<b>CL.3</b>	1:3	H	180 d	0,24	0,37	3092	24,5	3,54
<b>CL.3_Mk30</b>	1:3	H	180 d	0,17	0,53	1360	31,9	2,59
<b>CL.2</b>	1:2	H	180 d	0,30	0,48	3290	25,4	3,57
<b>CL.2_Mk30</b>	1:2	H	180 d	0,48	1,41	3605	32,6	3,00
<b>NHL.3</b>	1:3	H	180 d	0,36	0,90	2969	28,2	2,99
<b>NHL.3_5Mk</b>	1:3	H	180 d	0,44	1,83	3708	27,8	2,85
<b>NHL.3_10Mk</b>	1:3	H	180 d	0,36	1,57	2602	30,2	2,55

Quadro 4.23 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos  
(Grilo, 2013)

Argamassa	Traço	Cura	Idade	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]	CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
<b>NHL</b>	1:3	H	28 d	0,87	1,51	5181	28,7	2,9
			90 d	1,19	2,36	6982	27,7	2,6
			180 d	1,27	2,50	7243	25,9	2,7
<b>NHL_10Mk</b>	1:3	H	28 d	0,75	3,75	9185	27,9	2,1
			90 d	1,30	4,02	9425	27,3	2,6
			180 d	1,38	3,62	8285	26,7	2,3

Quadro 4.24 – Resultados de ensaios em provetes prismáticos  
(Fontes, 2013)

Argamassa	Traço	Idade	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	V <sub>us</sub> [m/s]	E <sub>d</sub> [MPa]	P <sub>ab</sub> [%]	CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
<b>NHL</b>	1:3	28 d	0,77	1,81	-	5960	23,2	2,1
		90 d	1,48	2,86	1262	-	23,6	2,0
<b>NHL_5Mk+5T</b>	1:3	28 d	0,81	2,61	-	8300	25,7	1,8
		90 d	0,85	4,23	1411	-	26,6	1,8
<b>NHL_10Mk+5T</b>	1:3	28 d	0,72	3,03	-	9529	24,0	1,7
		90 d	1,00	4,80	1137	-	26,7	1,6

É possível observar que, tal como nos ensaios efetuados sobre os rebocos sujeitos a exposição natural, também nos ensaios realizados sobre provetes prismáticos existe uma tendência para melhoria dos parâmetros mecânicos, com a introdução de metacaulino. No caso dos provetes prismáticos, esta tendência revela-se através do aumento dos valores de resistência à tração e à compressão. Também em relação à evolução do traço se conseguem notar tendências semelhantes, já que tanto nos rebocos como nos provetes prismáticos, traços mais fortes em ligante apresentam propriedades mecânicas mais elevadas do que nos traços mais fracos. Analisando os resultados obtidos por Bandeira (2012) e Branco (2013), é possível constatar que, entre as composições de cal aérea, a formulação com cal CL partindo do traço 1:2, com 30% de MK, é aquela em que se registam os maiores valores de R<sub>t</sub> e R<sub>c</sub>, ou seja, é a formulação com maior resistência mecânica. Estes resultados são consistentes com os obtidos na presente dissertação, em argamassa com o mesmo traço volumétrico e a mesma percentagem de MK (CL\_1.2\_30MK), que foi a que apresentou os maiores valores de resistência superficial. No que diz respeito às formulações de NHL, verifica-se nos resultados de Bandeira (2012), Grilo (2013) e Fontes (2013) um aumento das resistências à tração e à compressão com a introdução de 5 e 10 % de MK, algo que não traduz exatamente a tendência observada neste trabalho, em que se verifica uma ligeira diminuição da resistência superficial, com a introdução de MK. No entanto, nos resultados de Bandeira (2012), é possível verificar que há uma diminuição da resistência mecânica nas argamassas NHL com 10% de MK, em relação às com apenas 5% desta pozolana.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico, Branco (2013) conclui que, aos 28 e aos 90 dias, é a argamassa CL 1:2 com 30% de MK que apresenta os maiores valores de E<sub>d</sub>. Tentando estabelecer um paralelo com os valores de V<sub>us</sub> obtidos no presente trabalho, conclui-se que, nas idades referidas, é a formulação CL\_1.3\_30MK que apresenta os maiores valores, e não a argamassa semelhante à de Branco, pelo que não se pode estabelecer nenhuma correlação. Bandeira (2012), por seu lado, verificou que, aos 180 dias, é igualmente a argamassa CL 1:2 com 30% de MK que apresenta o maior valor de E<sub>d</sub>. Nesta idade de estudo, este resultado é consistente com os valores de V<sub>us</sub> obtidos nesta dissertação, que são mais elevados na argamassa CL\_1.2\_30MK. No que diz respeito às argamassas de cal hidráulica natural, Fontes (2013) obteve maiores valores de E<sub>d</sub>, aos 28 dias, numa argamassa NHL 1:3 com 10% de MK e 5% de resíduo cerâmico. Comparando com os resultados de V<sub>us</sub> obtidos neste trabalho, igualmente aos 28 dias, verifica-se que é a argamassa semelhante que apresenta os maiores valores (NHL3,5\_1.3\_10MK). Bandeira (2012), por seu lado, verificou nos ensaios de módulo de elasticidade efetuados aos 180 dias, que o E<sub>d</sub> é mais baixo com a introdução de 10% de MK, do que com a introdução de 5%, tendência semelhante à verificada no ensaio de ultrassons, neste trabalho, aos 180 dias.

Em termos de comportamento à água das argamassas de cal aérea, a tendência observada com a adição de MK nos provetes prismáticos é também semelhante à registada no presente trabalho, com uma diminuição do tempo de absorção de água, relativamente às argamassas de referência. Já no que diz respeito ao aumento do traço, não se conseguem registar semelhanças nas tendências. Branco conclui que, aos 28 dias, é a argamassa de referência 1:3 que apresenta o menor CC, logo uma absorção de água mais lenta, enquanto aos 90 dias é a argamassa 1:2 com 30% de MK a ter o menor CC, algo que não coincide com os valores de coeficiente de absorção obtidos com tubos de

Karsten, neste trabalho. Aos 180 dias, Bandeira obteve menores valores de CC na argamassa 1:3 com 30% de MK. Nas argamassas NHL, as tendências observadas não são as mesmas das que outros autores observaram em provetes prismáticos. Nos rebocos aplicados em muretes, observou-se que, aos 90 e aos 180 dias, o MK contribuía para um aumento do tempo de absorção das argamassas, enquanto os autores citados notaram uma diminuição do tempo de absorção com a introdução desta pozolana. Fontes, Bandeira e Grilo constataram que a formulação com 10% de MK é a que absorve a água de forma mais lenta, algo que neste trabalho só se verifica aos 28 dias.



## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das tendências observadas, assim como as conclusões finais retiradas do estudo de caracterização de rebocos de argamassas. Em complemento, apresentam-se ainda sugestões para desenvolvimentos futuros deste trabalho.

### 5.1. Conclusões finais

A presente dissertação iniciou-se com uma revisão do estado atual dos conhecimentos, abrangendo uma breve caracterização dos revestimentos de paredes em edifícios antigos, resumindo os requisitos mais importantes das argamassas de substituição e focando as características e processo de fabrico dos materiais que iriam ser utilizados na campanha experimental. Nesta revisão, deu-se especial atenção às características das argamassas de cal e metacaulino, mencionando estudos que permitiram aferir a influência desta pozolana quando incorporadas em argamassas de cal aérea e cal hidráulica. Por fim, mencionaram-se estudos em que foram aplicadas e caracterizadas argamassas de cal e metacaulino em condições de exposição natural. Efetuou-se em seguida uma descrição de todas as fases da campanha experimental levada a cabo neste trabalho, com exposição dos resultados obtidos. Finalmente, fez-se uma análise global desses resultados, avaliaram-se as principais tendências, e fez-se uma comparação dos resultados obtidos com os apresentados por outros autores, para argamassas semelhantes.

O estudo desenvolvido, inserido no âmbito dos projetos financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia METACAL e LIMECONTECH, pretendia contribuir para avaliar o comportamento de rebocos de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino, sujeitos a condições de exposição natural, através de ensaios *in situ*, de forma a aferir a sua adequabilidade na conservação de edifícios antigos. Pretendia-se continuar a avaliar a influência do metacaulino quando aplicado em substituição parcial de massa de cal, nas características mecânicas e de comportamento à água. Para além disso, pretendia-se avaliar as diferenças e semelhanças entre o comportamento das argamassas avaliados em condições laboratoriais e *in situ*.

Analisando as composições, constatou-se que, em geral, as argamassas de cal aérea com metacaulino apresentam valores de dureza superficial e das camadas interiores superiores aos apresentados pelas argamassas de referência. Já nas argamassas de cal hidráulica natural, o metacaulino contribui, em geral, para uma diminuição destes parâmetros mecânicos. Comparando os dois tipos de cais, como seria de esperar, as argamassas de NHL apresentam parâmetros mecânicos superiores aos das argamassas CL. Em relação ao comportamento face à ação da água, a tendência é semelhante: o MK contribui para uma melhoria de comportamento das argamassas de cal aérea, e para comportamento menos satisfatório no caso das argamassas de cal hidráulica natural.

A caracterização do comportamento das argamassas com a evolução da idade também se revela importante, uma vez que em alguns parâmetros estudados notam-se diferenças significativas entre as idades. Assim, foi possível constatar, em geral, um aumento progressivo da resistência superficial em cada uma das idades de estudo, e uma diminuição da velocidade de propagação de ultrassons. No que diz respeito ao comportamento à água, verifica-se uma tendência para a diminuição do tempo de absorção com a idade.

Entre as argamassas de cal aérea, as composições partindo dos traços volumétricos 1:2 e 1:2,5 com 30% de MK são as que apresentam, na generalidade de todos os parâmetros analisados, os melhores comportamentos, parecendo adequadas para aplicação como rebocos de substituição ou conservação em edifícios antigos.

No grupo das composições de cal hidráulica natural, a composição com 5% de MK parece ser a mais vantajosa para aplicação como reboco de substituição. Apesar de, como referido, o MK contribuir para uma diminuição dos parâmetros mecânicos das argamassas, isso pode ser encarado como positivo, uma vez que as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade das argamassas de substituição não devem ser superiores aos do suporte, para evitar a criação de tensões e a consequente degradação do suporte.

A análise visual dos rebocos foi também uma ferramenta utilizada para efetuar a sua caracterização. Verificou-se a inexistência de fissuração visível em todas as composições, até aos 180 dias. As argamassas com traço mais fraco em ligante apresentaram maior friabilidade em relação às argamassas com maior teor em cal, fator que pode ser explicado com a granulometria das areias utilizadas, com reduzida percentagem de finos. A granulometria dos agregados pode também explicar a menor trabalhabilidade das argamassas com traço mais fraco em ligante, algo que não acontece nas argamassas com traços com base em 1:2 e 1:2,5, que apresentaram trabalhabilidade satisfatória.

A comparação dos resultados obtidos na caracterização das argamassas estudadas com argamassas analisadas por outros autores, em condições laboratoriais, com ambiente controlado, permitiu concluir que a cura que se obtém em ambiente de exposição natural permite atingir valores significativamente mais satisfatórios em termos de comportamento face à água, e, nalguns casos, superiores também ao nível de alguns parâmetros mecânicos. A comparação efetuada com ensaios realizados a provetes prismáticos, permite verificar a existência de tendências muito semelhantes na evolução das características mecânicas das argamassas aplicadas em condições de exposição natural, semelhantes às condições reais de obra, em relação aos provetes prismáticos, algo que permite concluir que os resultados dos ensaios efetuados em laboratório a estes provetes traduzem comportamentos bastante próximos da realidade. Verificou-se também que o ensaio de ultrassons permitiu registar algumas tendências semelhantes às apresentadas no módulo de elasticidade dos provetes prismáticos. Por outro lado, não foi possível estabelecer correlações entre o ensaio de absorção de água sob baixa pressão, com tubos de Karsten, e os ensaios de capilaridade efetuados sobre os provetes.

## 5.2. Desenvolvimentos futuros

Após finalizado este trabalho de caracterização dos rebocos de argamassas de cal aérea e cal hidráulica com metacaulino, fica presente a necessidade de aprofundar os conhecimentos relativos a este tipo de material. Para tal considera-se relevante a realização de estudos que permitam:

- estudar as argamassas formuladas e os rebocos aplicados nesta dissertação, em idades mais avançadas;
- retirar amostras das argamassas aplicadas, para realização de ensaios de resistência à compressão, pelo método da argamassa de confinamento, e de resistência aos sulfatos;
- fazer uma avaliação mais abrangente da estrutura porosimétrica das argamassas sujeitas a condições de exposição natural;
- analisar química e mineralogicamente as argamassas aplicadas neste trabalho, de forma a identificar os compostos hidráulicos formados nas argamassas com MK;;
- estudar argamassas de cal aérea com base em traços 1:2 em ligante mas com mais baixas percentagens de metacaulino, igualmente sujeitas a exposição natural;
- estudar argamassas de cal hidráulica natural NHL3,5 com traços mais fracos em ligante, aplicadas em condições de exposição natural;
- caracterizar argamassas com as mesmas formulações aplicadas noutros tipos de suporte, como alvenaria de pedra argamassada ou taipa.

## BIBLIOGRAFIA

- AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. (2011) – *Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries*. Applied Clay Science 53, 15–19.
- AGUIAR, J. ; VEIGA, M. R. (2003) – *Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos*. Procedimentos do 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, FEUP, Março de 2003 (CD).
- ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. (2005) – *Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa (CD).
- ANDREJKOVICOVÁ, S.; VELOSA, A.; ROCHA, F. (2013) – *Air lime–metakaolin–sepiolite mortars for earth based walls*. Construction and Building Materials, 44, 133-141.
- ASTM (2005) – ASTM D2240-05. *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States: 2005.
- BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.; MOROPOULOU, A.; ANAGNOSTOPOULOU, S. (2006) – *Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics metakaolin-lime pastes*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 84, 157-163.
- BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.; MOROPOULOU, A. (2008) – *Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 92, 345-351.
- BANDEIRA, A. (2012) – *Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- BILLONG, N.; MELO, U.C.; NJOPWOUO, D.; BONNET, J.P. (2009) – *Effect of mixture constituents on properties of slaked lime–metakaolin–sand mortars containing sodium hydroxide*. Cement & Concrete Composites, 31, 658–662.
- BILLONG, N.; MELO, U.C.; KAMSEU, E.; KINUTHIA, J.M.; NJOPWOUO, D. (2011) – *Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK)*. Construction and Building Materials, 25, 2157–2161.
- BORSOI, G. ; VEIGA, M.R. ; SANTOS SILVA, A. (2012) – *Consolidação de argamassas históricas de revestimento com produtos compatíveis – avaliação da eficácia*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Univ. Coimbra, 29-30 de Março 2012 (CD).
- BRANCO, J.P. (1981) – *Manual do pedreiro*. Lisboa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- BRANCO, T. (2013) – *Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- CABRERA, J. ; FRÍAS, M. (2001) – *Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system*. Digital CSIC - Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

CABRERA, J.; ROJAS, M. (2001) – *Mechanism of hydration of the metakaolin – lime – water system* – Cement and Concrete Research, 31, 177-182.

CACHIM, P.; VELOSA, A.; ROCHA, F. (2010) – *Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions*. Construction and Building Materials, 24, 71-78.

CALLEBAUT, K.; ELSEN, J.; VAN BALEN, K.; VIAENE, W. (2001) – *Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium): Natural hydraulic lime or cement?*. Cement and Concrete Research. 31, 397-403.

CARNEIRO, J. (2012) – *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, FCT-UNL.

CEN (1998) – EN 1015-2 - *Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels: CEN, 1998.

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

CEN (2001) - EN 12504-2 - *Testing concrete in structures. Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*. Brussels, CEN, 2001.

CERNY, R.; KUNCA, A.; TYDLITAT, V.; DRCHALOVA, J.; ROVNANIKOVA, P. (2006) – *Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters*. Construction and Building Materials, 20, 849-857.

COLLEPARDI, M. (1990) – *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, 23, 81-102.

COUTINHO, A. S. (1988) – *Fabrico e Propriedades do Betão*. 2ª ed., Vol. 1. Lisboa: LNEC.

DAVIDOVITS, J. (1991) – *Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials*, Journal of Thermal Analysis, 37, 1633-1656.

DEGRYSE, P.; ELSEN, J.; WAELKENS, M. (2002) – *Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation*. Cement and Concrete Research, 21, 1457–1463.

DIAS, I. (2013) - *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra – A influência da terra como agregado parcial*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.

FARIA RODRIGUES, P. (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - Reabilitação do Património Edificado, Lisboa, FCT-UNL.

FARIA, P.; MARTINS, A. (2011) – *Influence of curing conditions on lime and lime-metakaolin mortars*. XII DBMC – 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto, FEUP, 713-720.

FARIA, P.; SILVA, V.; FLORES-COLEN, I. (2012a) – *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra (CD).

- FARIA, P.; SILVA, V.; GRILLO, J.; CARNEIRO, J.; BRANCO, T.; MERGULHÃO, D.; ANTUNES, R. (2012b) – *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. CIRea - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas de Antigas de Alvenaria, Lisboa, UNL, 31-40.
- FONTES, T. (2013) – *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- FONTES, T.; FARIA, P.; SILVA, V. (2012) – *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico*. 4º Congresso Nacional de Construção. Coimbra, Dezembro de 2012 (CD).
- FORTES-REVILLA, C.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.; BLANCO-VARELA, M.T. (2006) – *Modelling of slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables*. Cement and Concrete Composites, 28, 458–467.
- FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. (1997) – *Microstructural alterations in fly ash mortar: Study on phenomena affecting particle and pore size*. Cement and Concrete Research, 27, 50-57.
- GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; FARIA, P.; BRANCO, T.; VEIGA, R.; VELOSA, A. (2012) – *Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio*. Cement and Concrete Composites (accepted for publication).
- GRILLO, J. (2013) – *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- GRILLO, J.; SANTOS-SILVA, A.; FARIA, P.; GAMEIRO, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. (2013) – *Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions*. Construction and Building Materials (accepted for publication).
- GUERREIRO, C.; HENRIQUES, F.A.; PINTO, A.P. (2007) – *Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- HENRIQUES, F.A. (1991a) – *Caracterização de argamassas para edifícios antigos- Plano de investigação*, LNEC, Lisboa.
- HENRIQUES, F.A. (1991b) – *A conservação do património histórico edificado. Memória 775*. Lisboa, LNEC.
- HOLMES, M.; WINGATE, H. (1997) – *Building with lime. A practical introduction*, Intermediate Technology Publications, London, UK.
- IGPAI (1973) – *NP 955 - Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Lisboa.
- INE (2012) – Instituto Nacional de Estatística, *Censos 2011 - Resultados definitivos*. Lisboa.
- IPQ (2007) – *NP EN 12504-4 - Ensaios do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*. Monte de Caparica.
- IPQ (2008) – *NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Monte de Caparica.

IPQ (2011) – *NP EN 459-1 - Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Monte de Caparica.

IDL-UL (2013) – Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa. Dados meteorológicos. <http://idl.ul.pt/node/70?destination=node/70>

JAMÚ, N. (2013) – *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra – A influência da terra como ligante*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.

KANAN, M. I. (2008) – *Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal*. – Brasília, DF : Iphan / Programa Monumenta -Cadernos Técnicos - nº 8.

LANAS, J.; ALVAREZ, J.I. (2003) – *Masonry repair lime-based mortar: factors affecting the mechanical behavior*. Cement and Concrete Research, 33, 1867-1876.

LANAS, J.; PEREZ BERNAL, J.L.; BELLO, M.A.; ALVAREZ, J.L. (2004) – *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement and Concrete Research, 34, 2191-2201.

LNEC (1980) – Ficha de ensaio FE Pa 25 - *Revestimento de paredes, Ensaio de choque de esfera*. Lisboa: LNEC/NRI.

LNEC (2002) – Ficha de ensaio FE Pa 39 - *Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa: LNEC/NCC.

LNEC (2010) – Ficha de ensaio FE Pa 43 – *Revestimento de paredes, Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa: LNEC/NRI.

MAGALHÃES, A.C.; COSTA, D.; VEIGA, M.R. (2003) – *Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in-situ. Avaliação da resistência mecânica*. 3º Encore - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Lisboa: LNEC.

MARAVELAKI-KALAITZAKI, P. (2007) – *Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry in Crete*. Cement and Concrete Research, 35, 1577-1586.

MARGALHA, G.; VEIGA, R.; BRITO, J. (2007) – *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. Actas do 2º Congresso Nacional de Argamassas da Construção, Lisboa, APFAC (CD).

MASSENA, R. (2011) – *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.

MILLER, D. (2008) – *Laboratórios LERevPa do LNEC - Os novos Revestimentos*. Engenharia e Vida, 45, 56-59.

MOROPOULOU, A (2000) – *Reverse engineering to discover traditional technologies: a proper approach for compatible restoration mortars*. Proceedings Pact 58 “Compatible Materials for the Protection of European Cultural Heritage” Conference, Technical Chamber of Greece, Athens, 81–107.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKAPOULOU, E. (2004) – *Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis*. Thermochemica Acta, 420, 135-140.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E. (2009) – *Reverse engineering: A proper methodology for compatible restoration mortars*, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, 278-291.

NGOMA, A. (2009) – *Characterization and consolidation of historical lime mortars in cultural heritage buildings and associated structures in East Africa*, Phd Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.

PASCOAL, P. (2012) – *Estudo de produtos para conservação de revestimentos antigos: Consolidação e reintegração cromática*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Lisboa, FCT-UNL.

PAVÍA, S.; FITZGERALD, B. ; TREACY, E. (2005) – *An assessment of lime mortars for masonry repair*. Colloquium on concrete research in Ireland, University College Dublin, 101-108.

PINHO, F. (2000) – *Soluções construtivas de paredes de edifícios antigos em Portugal*. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa (CD).

PROCEQ (2001) – *Porosity measurement according to the Karsten system*. Porositester. [www.proceq.com](http://www.proceq.com).

RATO, V. (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil - Reabilitação do Património Edificado, Lisboa, FCT-UNL.

RILEM (1980) – *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.º11.4. Recommendations provisoires*. Paris.

RILEM (1997) – MS-D.7 – *Determination of pointing hardness by pendulum hammer*. Materials and Structures, 30, 323-324.

RODRIGUES, D. (2010) – *Influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios, Lisboa, FCT-UNL.

ROJAS, M. (2006) – *Study of hydrated phases present in a MK–lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction*. Cement and Concrete Research, 36, 827–831.

ROJAS, M. ; CABRERA, J. (2002) – *The effect of temperature on the hydration rate and the stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems*, Cement and Concrete Research, 32, 133-138.

ROSELL, J.; PÉREZ, F.; RODRIGUEZ-CANTALAPIEDRA, I. (2009) – *Simple method of dynamic young's modulus determination in lime and cement mortars*. 1st International Conference on Construction & Building Research". Madrid: Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica . Universidad Politécnica de Madrid. 1-10.

SEPULCRE-AGUILAR, A.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. (2010) – *Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry*. Cement and Concrete Research, 40, 66–76.

SEQUEIRA, A.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. (2007) – *Cal Hidráulica - Um ligante para reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas e ETICS, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (CD).

SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, G.; SHTER, G. (2003a) – *The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite*. Cement and Concrete Research, 33, 405-416.

SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, G.; SHTER, G. (2003b) – *Hydration of portlandite-metakaolin and portland cement-metakaolin systems*. Proceeding of the 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 843-852.

STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. (2005) – *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Composites, 27, 914–919.

STEFANIDOU, M. (2010) – *Methods for porosity measurement in lime-based mortars*. Construction and Building Materials, 24, 2572-2578.

TAVARES, M.; MAGALHÃES, A.; VEIGA, R.; AGUIAR, J. (2005) – *Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ*. Texto para a Revista Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico – PH.

TAVARES, M.; VEIGA, M.R. (2007) – *A conservação de rebocos antigos - Restituir a coesão perdida através da consolidação com materiais tradicionais e sustentáveis*, VII SBTA – Seminário Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Recife – Pe, ANTAC (CD).

TAVARES, M.; MAGALHÃES, A.; VEIGA, M.R.; VELOSA, A.; AGUIAR, J. (2008) – *Repair mortars for a maritime fortress of the XVII<sup>th</sup> century*. Medachs – Construction Heritage in Coastal and Marine Environments: Damage, Diagnostics, Maintenance and Rehabilitation, Lisboa: LNEC (CD).

TIRONI, A.; TREZZA, M.A.; IRASSAR, E.F.; SCIAN, A.N. (2012) – *Thermal treatment of kaolin: effect on the pozzolanic activity*. Procedia Materials Science, 1, 343-350.

VAN HEES, R.; VAN DER KLUGT, L.; DE WITTE, E.; DE CLERQ, H.; BINDA, L.; BARONIO, G. (1995) – *Test methods for the evaluation of the in situ performance of water-repellent treatments*, Proc. 1st Int. Sym. on Surface Treatment of Building Materials with Water Repellent Agents, Delft, 1-14.

VEIGA, M. R. (1998) – *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LNEC.

VEIGA, M. R. (2000) – *Proteção contra a água de paredes de edifícios antigos. Avaliação experimental da capacidade de proteção de argamassas de reboco com base em cal*. Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas - REPAR 2000. Lisboa, LNEC (CD).

VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. (2000) – *Experimental characterization of lime based rendering and repointing mortars. Definition of relevant laboratorial and “in situ” tests*. Proceedings of the workshop Compatible Materials Recommendations for the Preservation of European Cultural Heritage. Atenas (Grécia): National Technical University of Athens (CD).

VEIGA, M. R.; TAVARES, M. (2002) – *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. Encontro A indústria das tintas no início do Século XXI. Lisboa, APTETI (CD).

VEIGA, M. R. (2003) – *As argamassas na conservação*, 1<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes. Aveiro. Conferência convidada. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa.

VEIGA, M. R. (2006) – *Os revestimentos antigos e a identidade dos edifícios*, *Arquitetura Ibérica*, 12, 36-45.

VEIGA, M. R. (2007) – *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 (CD).

VEIGA, M. R., VELOSA, A., MAGALHÃES, A. (2009) – *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation*. *Construction and Building Materials*, 23, 318-327.

VEIGA, M. R. (2010a) – *Alvenarias de edifícios históricos: intervenções sustentáveis com materiais compatíveis*. VI Encontro de Estudantes de Engenharia Civil, LNEC (CD).

VEIGA, M. R. (2010b) – *Conservation of historic renders and plasters – from laboratory to site*. 2nd Historic Mortars Conference (HMC 2010), Prague (CD).

VEIGA, M. R. (2011a) – *Argamassas de cal e metacaulino para revestimento de paredes antigas: características do revestimento aplicado*, Encontro Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade, Aveiro (CD).

VEIGA, M. R. (2011b) – *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, M. R. (2012) – *Argamassas de alvenarias históricas. Funções e características*. CIRea - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas de Antigas de Alvenaria, pág. 17-27, UNL, Lisboa.

VEJMEJKOVA, E.; KEPPERT, M. ; KERSNER, Z. ; ROVNANIKOVA, P. ; CERNY, R. (2012) – *Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings*. *Construction and Building Materials* 31, 22–28.

VELOSA, A. (2006) – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade de Aveiro. Coleção Teses de Doutoramento, Lisboa, LNEC.

VITRUVIUS, M. (2006) – *Tratado de arquitetura*, tradução do latim por M. Justino Maciel, I.S.T., Lisboa.

VON KONOW, T. (2003) – *Aggregate grain size distribution – A major influence on many properties of lime mortars for restoration*. EUROMAT 2003- European Congress on Advanced Materials and Processes, Symposium P2 – Materials and Conservation of Cultural Heritage, Lausanne, 1-9.

ZACH, J.; BROZOVSKY, J.; HROUDOVA, J. (2011) – *Utilization of the ultrasonic pulse method for determining mechanical characteristics for lightweight thermal-insulating plasters*. 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico (CD).

## **Anexos**



## Anexo I – Ficha técnica da cal aérea CL-90S Lusical H100 da Lusical



<b>Granulometria:</b>	
Retido a 125 microns	≤ 0%.
Teor em Água livre	≤ 1%.
Estabilidade (expansão)	≤ 0,2%.
Teor em Ca(OH) <sub>2</sub>	≥ 93%.
Teor em MgO	≤ 3%.
Densidade aparente na ordem de	0,5.

# Lusical H100

### DESCRIÇÃO

A Lusical H100 é uma cal de construção utilizada como ligante, individual ou incorporada nas misturas formuladas.

É aplicada principalmente nos rebocos, e numa forma geral na construção civil.

### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS e QUÍMICAS

Determinadas pelos métodos Laboratório Grupo em conformidade com os modos operatórios normalizados Nos produtos formulados,

- a granulometria da Lusical H100 otimiza a eficácia do produto acabado.
- sua brancura garante uma qualidade constante dos rebocos.
- seu forte teor em hidróxido de cálcio dá ao reboco a trabalhabilidade e sua permeabilidade ao ar

### DOSAGEM e APLICAÇÃO

A Lusical H100 é entregue sob a forma pulverulenta. Sua dosagem é feita a partir do silo de armazenamento. Ela é extraída do silo com a ajuda de equipamentos de descompactação como fundos vibrantes, canhões de ar, ou desagregadores rotativos.

O produto é transportado por parafusos sem fim. Os materiais de dosagem devem ter em conta as características físicas do produto - densidade, fluidez - respondendo às exigências de precisão requeridas.

### CONDICIONAMENTO

Entregue em saco, big-bag e em sistema, a Lusical H100 é armazenada em silos estanques.

### DADOS de SEGURANÇA

Ficha de segurança: Hidróxido de Cálcio.

O produtor garante que todas as diligências são efetuadas para o respeito dos critérios definidos. No entanto, trata-se de produtos naturais que podem apresentar ligeiras variações nas características físico-químicas sem incidência notável sobre a qualidade do produto

LUSICAL

F.P. 351 - CH 01 B - 06 / 2010



01-06-2010

Valverde—2025-201 Alcanede - Portugal  
Telephone (+351)243 409 040: - Fax (+351) 243 400 474—E-mail: info.lusical@holst.com



## Anexo II – Ficha técnica da cal hidráulica natural NHL 3,5, da Secil



### 1. DESCRIÇÃO

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é um ligante hidráulico constituído maioritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário magoso, seguida de moagem.

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é classificada como NHL 3,5 segundo a NP EN459-1.

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa por carbonatação.

### 2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassas de alvenaria, argamassa de reboco e acabamentos).

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos.

### 3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Características Físicas	Valor	Norma
Cor	Beije	-
Baridade (kg/dm <sup>3</sup> )	0,65 ± 0,05	EN 459-1
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	-
Finura (%)	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 2,0	EN 459-1
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	9000	-
Expansibilidade (mm)	≤ 2,0	EN 459-1
Água livre (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Teor de ar (%)	≤ 5	EN 459-1
Penetração (mm)	<10 e >50	EN 459-1
Tempo de presa (h)	inicial final	> 1,0 ≤ 30,0

Características Mecânicas	Valor	Norma
Resistência mecânica à compressão 28 dias (MPa)	≥ 3,5 e ≤ 10	EN 459-1

Características Químicas	Valor	Norma
Sulfato (SO <sub>4</sub> ) (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Cal disponível Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	≥ 25,0	EN 459-1

### 4. FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de Secil NATURAL LIME NHL 3,5 numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a Secil NATURAL LIME NHL 3,5, tem um papel preponderante como único ligante ou conjugado com outros.

Misturar previamente a Secil NATURAL LIME NHL 3,5 com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade. Como valor orientativo usar uma relação água/ligante de 0,6 expresso em volume.

#### Secil Argamassas

Secil Mattingança, S.A.  
Apto ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Meoção – LRA – Portugal  
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmattinganca.pt



1/3  
www.secilmattinganca.pt



# Anexo III – Ficha técnica do metacaulino Argical M-1200S da Imerys

## ARGICAL-M 1200S



### PRODUCT SPECIFICATION

#### Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by micronising and calcining a kaolinitic clay from the Charentes basin.

ARGICAL-M 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . It is an amorphous non-crystallized material, constituted of lamellar particles. ARGICAL-M 1200S est une pouzzolane artificielle (métakaolin), obtenue par broyage et calcination d'une argile kaolinique du bassin des Charentes.

ARGICAL-M 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé, de composition générale  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . C'est un matériau amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire.

The technical details contained in this data sheet are given in all good faith for indicative purpose only, and do not constitute a guarantee by AGS Minéraux.

Sales are in accordance with our "Conditions of Sale", copies of which will be supplied on request.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'emportent pas obligation pour le fournisseur. Elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications.

Seule la fiche de spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Vente engage notre société auprès des clients.

#### PRODUCT USE

Additive for concretes, mortars and coatings, made from Portland cement or lime

#### Domaine d'utilisation

Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux

#### CHEMICAL ANALYSIS

##### Analyse chimique

SiO <sub>2</sub>	55 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39 %
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	1,0 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8 %
TiO <sub>2</sub>	1,5 %
CaO + MgO	0,6 %

#### LOSS ON IGNITION

##### Perte au feu

1 %

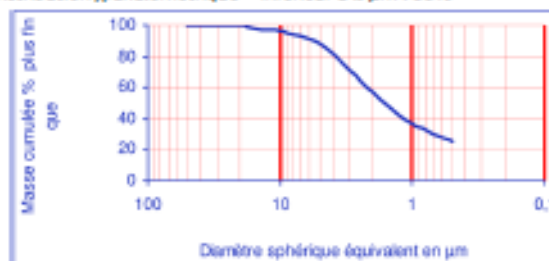
#### TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

##### Caractéristiques physiques moyennes

pH	6
Pozzolanic index (Chapelle test) / Indice pouzzolanique	1400 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Brightness photovolt blue filter / Blanchéur photovolt filtre bleu	74 %
Specific area (BET) / Surface spécifique (BET)	19 m <sup>2</sup> /g
Water demand (Marsh cone) / Demande en eau (Cône de Marsh)	1650 g/kg
Specific gravity / Masse spécifique	2,2 g/cm <sup>3</sup>
Bulk density / Densité apparente	
Loose / Non tassé	250 kg/m <sup>3</sup>
Tamped / Tassé	400 kg/m <sup>3</sup>

#### SIEVE ANALYSIS

##### Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



rac  
 05 46 04 17 11  
 Fax : +33 (0)5 46 04 21 05  
 www.ags-mineraux.com  
 commercial@ags-mineraux.com

Revision 4 – 2008/07/24

