



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



A Reabilitação em Construções de Taipa com a Utilização de Argamassas com Terra com a Adição de Ligantes

ANDREIA SOFIA SAMARRO PINTO

Licenciada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de
Engenharia de Lisboa

Trabalho Final de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Edificações

Orientador:

Doutora Maria Idália da Silva Gomes, Professora Adjunta (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Especialista João António Antunes Hormigo

Doutora Maria Idália da Silva Gomes

Janeiro de 2018

Agradecimentos

Culminando esta etapa muito importante da minha vida, gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram e me apoiaram ao longo de todo o meu percurso académico.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais pelo amor e apoio incondicional que sempre me deram, pela paciência, compreensão e força dada para superar cada adversidade, nunca me deixando desistir.

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Idália da Silva Gomes, agradeço a sua ajuda na escolha do tema, a sua disponibilidade, transmissão de conhecimentos teóricos e práticos, paciência e incentivo nos momentos de desalento.

A todos colegas de curso que me acompanharam ao longo deste percurso académico, em especial, aos colegas que desenvolveram os seus trabalhos finais de mestrado comigo, Daniel Bravo, Marco Costa e Dino Ferreira, obrigada pela companhia, ajuda, partilha de conhecimentos, amizade e espírito de equipa.

Agradeço ao técnico do laboratório de Materiais de Construção da ADEC-ISEL, Paulo Martins, pela ajuda facultada no decorrer dos trabalhos experimentais e à técnica do Laboratório de Solos da ADEC-ISEL, Cátia Valente, pelo seu apoio e transmissão de conhecimentos. Agradeço ainda ao Professor Doutor Pedro Silva pelo seu apoio nas questões técnicas de manuseamento de equipamentos e pela sua boa disposição que contagiava todos os presentes no laboratório.

Ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção do DEC da FCT-UNL, engenheiro Vítor Silva, pelo apoio dado na realização dos ensaios efetuados naquela instituição de ensino e ainda à Professora Doutora Paulina Faria da FCT-UNL pela colaboração e concordância na utilização do laboratório referido.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu namorado, Rui Caetano, a todos os meus amigos e restante família pelo apoio incondicional, incentivo, compreensão, amor, amizade e conselhos transmitidos que contribuíram para a pessoa que sou hoje.

Resumo

A terra é um dos principais materiais de construção utilizados pelo homem, uma vez que é um material de fácil acesso e transformação. No entanto, a construção com terra caiu em desuso com o passar dos tempos, perdendo-se o conhecimento empírico sobre as suas técnicas de execução e aplicação.

Hoje em dia, com a crescente preocupação com as questões ambientais, as construções com terra voltaram a ter destaque, uma vez que é um material abundante, reutilizável, de fácil transformação e com baixa energia incorporada, portanto é bastante ecológico.

Portugal é um país com tradição em construções com terra e possui um grande património edificado recorrendo a técnicas construtivas como a taipa. Assim, surge a necessidade de reabilitar e conservar edifícios antigos com técnicas adequadas, assunto sobre o qual a informação ainda é escassa.

Quanto às questões técnicas acerca dos rebocos de argamassas com terra, há necessidade de proceder a uma avaliação através de procedimentos normalizados, de modo a comparar as diferentes argamassas com terra entre si.

Assim, a presente dissertação tem como objetivo caracterizar cinco famílias de argamassas com terra, avaliando as suas propriedades físicas, hídricas e mecânicas e ainda, as suas vantagens e desvantagens em relação a outros tipos de argamassas no que se refere à reabilitação de construções em taipa. Quatro das cinco famílias são argamassas com terra com ou sem adição/substituição de cal aérea e a quinta família é uma argamassa de areia e cal aérea. As famílias foram caracterizadas no seu estado fresco, endurecido e aplicadas num suporte, aos 60 e 90 dias de idade, de modo a avaliar a evolução das características ao longo do tempo.

Com o presente trabalho foi possível concluir que a inclusão da cal nas argamassas com terra foi desvantajosa no que diz respeito ao comportamento hídrico, contudo melhorou alguns dos parâmetros resistentes. No que se refere à ação do tempo nas características das argamassas com terra verificou-se que, de forma geral, não houve grandes diferenças nos resultados com o avançar da idade.

Termos chave: Reabilitação; Argamassa com terra; Taipa; Caracterização de argamassas.

Abstract

The earth is one of the most construction materials used by the humanity, since it is a material of easy access and transformation. However, earth construction has fallen into disuse over time and the empirical knowledge about its execution and application techniques has been lost.

Nowadays, with growing concern about environmental issues, earth construction have once again become prominent, because it is an abundant, reusable, easily processed material and with low embodied energy, so it is quite environmentally friendly.

Portugal is a country with tradition in earth construction and it has a great built heritage using construction techniques like rammed earth. So, the need of rehabilitate and conserve old buildings arises, using adequate techniques, a matter which information still scarce.

About the technical issues concerning earth mortars, it is necessary to use standard procedures in order to compare and evaluate each earth mortar.

The present dissertation has as main objective to characterize five families of earth mortars, evaluating their physic, hydraulic and resistant properties and also their advantages and disadvantages in relation to other mortars in what concerns to rehabilitation of rammed earth constructions. Four out of five families are earth mortars with or without addition of non-hydraulic lime and the fifth family is a non- hydraulic mortar. The families will be characterized in fresh and hardened state at 60 and 90 days in order to evaluate the evolution of the characteristics over time.

With this present dissertation it was possible to conclude that the inclusion of non-hydraulic lime had negative influence on hydraulic parameters of earth mortars, however it has improved the results of some of the resistant parameters.

About the evolution of the characteristics over time, it was verified that, in general, there is no big differences in the results with the aging.

Key- Words: Rehabilitation; Earth mortars; Rammed earth; Mortars characterization.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Organização e estrutura do trabalho	3
2. Estado atual do conhecimento	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Terra como material de construção	8
2.2.1 Regulamentação	8
2.2.2 Terra	10
2.2.3 Importância da água	11
2.2.4 Sistemas construtivos.....	12
2.3 Anomalias das paredes em taipa.....	16
2.4 Conservação das paredes em taipa	20
2.5 Caracterização de argamassas	22
2.5.1 Caracterização de argamassas no estado fresco.....	23
2.5.2 Caracterização de argamassas no estado endurecido	23
3. Materiais	27
3.1 Constituição das argamassas	27
3.1.1 Argila.....	28
3.1.2 Areia	30
3.1.3 Cal aérea hidratada.....	31
3.1.4 Água de amassadura.....	33
4. Procedimentos de ensaio adotados.....	35
4.1 Considerações iniciais.....	35
4.2 Ensaios de caracterização de materiais	36
4.2.1 Baridade.....	36

4.2.2	Equivalente de areia	37
4.2.3	Peneiração.....	38
4.2.4	Análise granulométrica do material argiloso (PD)	39
4.3	Execução das argamassas	42
4.4	Ensaio de caracterização de argamassas no estado fresco	43
4.4.1	Massa volúmica	43
4.4.2	Teor de vazios	44
4.4.3	Consistência por espalhamento.....	45
4.5	Ensaio de caracterização de argamassas no estado endurecido	46
4.5.1	Massa volúmica aparente	47
4.5.2	Resistência à tração por flexão e compressão.....	47
4.5.3	Módulo de elasticidade dinâmico	49
4.5.4	Retração linear e volumétrica	50
4.5.5	Absorção de água por capilaridade	51
4.5.6	Secagem.....	53
4.6	Ensaio de caracterização de argamassas aplicadas em suporte	54
4.6.1	Condutibilidade térmica	55
4.6.2	Dureza superficial	56
4.6.3	Resistência à abrasão.....	57
4.6.4	Aderência ao suporte.....	58
4.6.5	Esclerómetro pendular.....	59
4.6.6	Absorção de água sob baixa pressão	61
5.	Apresentação e discussão de resultados	63
5.1	Considerações iniciais.....	63
5.2	Ensaio no estado fresco	63
5.2.1	Massa volúmica	64
5.2.2	Teor de vazios	65
5.2.3	Espalhamento.....	66
5.3	Ensaio no estado endurecido	68
5.3.1	Massa volúmica aparente	69
5.3.2	Resistência à tração por flexão	70
5.3.3	Resistência à compressão	72
5.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico	75
5.3.5	Retração linear e volumétrica	76
5.3.6	Absorção de água por capilaridade	77

5.3.7 Secagem.....	80
5.4 Ensaio de caracterização de argamassas aplicadas em suporte	83
5.4.1 Condutibilidade térmica	84
5.4.2 Dureza superficial	85
5.4.3 Resistência à abrasão.....	87
5.4.4 Aderência ao suporte.....	88
5.4.5 Esclerómetro pendular.....	89
5.4.6 Absorção de água sob baixa pressão	91
5.5 Relação entre os vários resultados obtidos	94
6. Conclusões e desenvolvimentos futuros	99
6.1 Conclusões	99
6.2 Desenvolvimentos futuros.....	104
Referências Bibliográficas	105
Anexos.....	111
Anexo A - Ficha de Segurança da Cal Aérea Hidratada	111
Anexo B - Quantidades de Material das Argamassas	113
Anexo C – Temperatura e Humidade Relativa da Sala Condicionada.....	123

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Construções com terra	5
Figura 2.2 – Castelo de Paderne	6
Figura 2.3 – Distribuição geográfica das construções tradicionais portuguesas com terra	6
Figura 2.4 – Construções com terra no mundo.....	7
Figura 2.5 – Técnicas construtivas com terra.....	12
Figura 2.6 - Compactação de terra com recurso a compactador pneumático	14
Figura 2.7 - Fabrico manual de blocos de adobe	14
Figura 2.8 – Construção com blocos de terra comprimida	15
Figura 2.9 – Construção em tabique numa parede exterior.....	16
Figura 2.10 – Curva de absorção de água por capilaridade	25
Figura 2.11 – Fases da secagem	25
Figura 2.12 – Curva característica de secagem de um material poroso.....	26
Figura 3.1 – Edifício do Monte do Pá Danado em Odemira.....	28
Figura 3.2 – Recolha de amostras: remoção do bloco e corte da taipa em blocos	28
Figura 3.3 – Difratograma de raio X do edifício	29
Figura 3.4 – Curva granulométrica da argila PD.....	30
Figura 3.5 – Curva granulométrica da areia do rio	31
Figura 4.1 – Ensaio de sedimentação.....	40
Figura 4.2 – Ensaio de densidade de partículas.....	41
Figura 4.3 – Execução de argamassas.....	42
Figura 4.4 – Ensaio da massa volúmica de uma argamassa.....	43
Figura 4.5 – Ensaio do teor de vazios	45
Figura 4.6 – Ensaio de consistência por espalhamento.....	46
Figura 4.7 – Execução dos provetes	47
Figura 4.8 – Ensaio de resistência	49
Figura 4.9 – Ensaio de retração linear e volumétrica.....	51
Figura 4.10 – Impermeabilização dos provetes.....	52
Figura 4.11 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.	52
Figura 4.12 – Secagem dos provetes em sala com temperatura e humidade relativa condicionada.....	53
Figura 4.13 – Aplicação da massa no suporte.	55

Figura 4.14 – Ensaio de condutibilidade térmica	56
Figura 4.15 – Ensaio de resistência à abrasão.	58
Figura 4.16 – Ensaio de aderência ao suporte	58
Figura 4.17 – Ensaio de aderência ao suporte	59
Figura 4.18 – Ensaio do esclerómetro pendular.	60
Figura 4.19 – Ensaio de esclerómetro pendular	60
Figura 4.20 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão	62
Figura 5.1 – Resultados do ensaio de massa volúmica das argamassas no estado fresco	64
Figura 5.2 – Resultados no ensaio de teor de vazios das argamassas no estado fresco ..	66
Figura 5.3 – Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas no estado fresco ..	67
Figura 5.4 – Resultados do ensaio de massa volúmica aparente	69
Figura 5.5 – Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão	71
Figura 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão	73
Figura 5.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	75
Figura 5.8 – Resultados do ensaio de retração volumétrica	76
Figura 5.9 – Curva de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade	78
Figura 5.10 – Curva de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade	78
Figura 5.11 – Curva de Secagem aos 60 dias de idade	80
Figura 5.12 – Curva de Secagem aos 90 dias de idade	80
Figura 5.13 – Taxa de secagem aos 60 e aos 90 dias de idade	82
Figura 5.14 – Resultados do ensaio de determinação do coeficiente de condutibilidade térmica	84
Figura 5.15 – Resultados do ensaio de dureza superficial	86
Figura 5.16 – Resultados do ensaio de resistência à abrasão	87
Figura 5.17 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte	88
Figura 5.18 – Resultados do ensaio de esclerómetro pendular	89
Figura 5.19 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr	92
Figura 5.20 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr+25C	92
Figura 5.21 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família 25C_PdAr	92
Figura 5.22 -- Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr_25C	93
Figura 5.23 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família CAr	93

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Traço volumétricos das cinco famílias de argamassas com terra em estudo	27
Tabela 3.2 – Composição mineralógica por DRX da fração fina do material, adaptado de Gomes (2013)	29
Tabela 4.1 - Classes de dureza do ensaio de dureza superficial, adaptado de Tavares (2009)	57
Tabela 4.2 - Classes de resistência, perda de coesão e perda de aderência do ensaio de esclerómetro pendular, adaptado de Tavares (2009)	61
Tabela 5.1 – Características das argamassas no seu estado fresco	63
Tabela 5.2 – Características mecânicas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade	68
Tabela 5.3 – Características mecânicas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade	68
Tabela 5.4 – Características hídricas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade	69
Tabela 5.5 – Características das argamassas aplicadas em suporte (Coeficiente de condutibilidade térmica e Desgaste) , aos 60 e aos 90 dias de idade	83
Tabela 5.6 – Características das argamassas aplicadas em suporte (Força de arrancamento e Ângulo de resalto), aos 60 e aos 90 dias de idade	83
Tabela 5.7 – Coeficientes de condutibilidade térmica de inertes, solos ou terra, adaptado de Pina dos Santos et al (2006)	85
Tabela 5.8 – Resultados obtidos no ensaio de determinação de dureza superficial e classificação segundo Tavares (2009), aos 60 e aos 90 dias de idade	85
Tabela 5.9 – Resultados obtidos para a resistência das argamassas no ensaio de esclerómetro pendular e classificação segundo Tavares (2009), aos 60 e aos 90 dias de idade	90

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As argamassas com terra foram muito utilizadas no passado nomeadamente em rebocos interiores de paredes construídas com terra (recorrendo às técnicas construtivas da taipa, adobe ou tabique), mas também como argamassas de assentamento em alvenarias (Santos, 2014). No entanto, com a evolução dos tempos e o aparecimento de novas tecnologias e materiais construtivos, a construção com terra caiu em desuso, assim como o conhecimento maioritariamente empírico acerca dos métodos construtivos com terra que também foi desaparecendo.

Portugal apresenta-se como um dos países com maior tradição em construções com terra, com especial enfoque no Alentejo recorrendo ao método construtivo da taipa. Deste modo, existe muito património a ser reabilitado e conservado recorrendo a técnicas adequadas.

Além do fator patrimonial, atualmente em Portugal, o interesse pela construção com terra tem vindo a crescer, o que se deve em grande parte à sua sustentabilidade, às condições climáticas favoráveis do país e à necessidade de conservar o património edificado (Torgal & Jalali, 2010). A construção com terra é utilizada em larga escala por dois grandes motivos: recorre a materiais locais, com baixa energia incorporada, e pode ser uma construção económica. O uso da terra como material de construção oferece ainda muitas vantagens em termos de sustentabilidade: é natural, provavelmente não tóxico, ecológico, reciclável e de baixo custo. É também não combustível e pode contribuir para aumentar o desempenho térmico e acústico (Gomes, 2017).

É também sabido que as argamassas com terra devem grande parte do seu sucesso devido à grande abundância da sua matéria-prima e ao facto de não necessitar de muita energia para os seus processos de extração e transformação.

Outra das suas vantagens mais relevantes das argamassas com terra é a melhoria do bem estar no interior da construção, como referido através do bom comportamento acústico e térmico e ainda contribuindo para o controlo da humidade relativa do ar interior (Pires, 2013) por serem muito permeáveis ao vapor de água e muito higroscópicas.

Há ainda que salientar que as argamassas com terra são altamente compatíveis com paredes construídas com terra ou paredes com características mecânicas semelhantes, uma vez que o seu comportamento mecânico é similar, sendo mais aconselhadas nestes casos do que argamassas à base de cimento. Estas argamassas, apesar de apresentarem

melhor comportamento em presença da água, são exageradamente rígidas para uma alvenaria com terra (Hamard et al, 2013).

As argamassas com terra além de possuírem as vantagens inúmeradas, oferecem também uma infinidade de possibilidades de acabamento, uma vez que é possível alterar a sua aparência, cor, granulometria, e ainda a adição de materiais como por exemplo fibras (Santos, 2014).

A escolha do tema para a realização deste trabalho surgiu devido à grande necessidade de conhecer melhor este material de construção. Segundo Gomes (2013), uma das técnicas para a reparação das paredes em taipa, especialmente nas zonas de fendas, fissuras ou apenas zonas degradadas, é a utilização de argamassas com terra. No entanto, hoje em dia, o uso da terra na construção baseia-se em conhecimentos e técnicas empíricas, existindo carência de informação, nomeadamente (Gomes, 2013): ao nível de técnicos com formação e experiência na área; documentos de referência; conhecimento sobre a sua compatibilidade entre materiais; conhecimento acerca dos processos de degradação dos materiais com terra.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo principal desta dissertação é contribuir para o conhecimento das argamassas com terra, através da caracterização hídrica e mecânica de uma família de argamassas com terra com adição ou substituição de cal aérea. Deste modo, espera-se contribuir para a melhoria dos métodos de conservação de construções com terra.

Para responder ao objetivo deste trabalho, surgiram diversos pontos que deveriam ser analisados e que basearam todas as etapas do trabalho laboratorial:

- 1) caracterizar os materiais utilizados na execução das argamassas com terra;
- 2) caracterizar cinco famílias de argamassas com terra (com adição ou substituição de cal aérea) no seu estado fresco;
- 3) caracterizar cinco famílias de argamassas com terra (com adição ou substituição de cal aérea) no seu estado endurecido, analisando diversos parâmetros hídricos e mecânicos;
- 4) caracterizar cinco famílias de argamassas com terra (com adição ou substituição de cal aérea) no seu estado endurecido quando aplicadas no suporte;
- 5) avaliar a evolução das cinco famílias de argamassas com terra (com adição ou substituição de cal aérea) ao longo do tempo, nomeadamente aos 60 e 90 dias de idade;

- 6) analisar das vantagens e inconvenientes da adição e substituição da cal aérea nas argamassas com terra.

Este trabalho foi realizado nos laboratórios de materiais de construção da ADEC/ISEL e do DEC/FCT-UNL.

Para caracterizar as argamassas no seu estado fresco, realizaram-se os ensaios de consistência ao espalhamento, massa volúmica e teor de vazios. Para o estado endurecido executaram-se provetes de 40 mm x 40mm x 160 mm, que se ensaiaram aos 60 e 90 dias de idade recorrendo aos seguintes ensaios: massa volúmica aparente, resistência à tração por flexão e compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade e secagem; provetes de 30 mm x 30 mm x 300 mm, para o ensaio de retração linear e volumétrica. Para caracterizar as argamassas aplicadas no suporte, executaram-se rebocos de 10 mm de espessura aplicados sobre um suporte de alvenaria de tijolo furado, onde se realizaram os ensaios de condutibilidade térmica, dureza superficial, resistência à abrasão, aderência ao suporte, ensaio por esclerómetro pendular e absorção de água sob baixa pressão, também aos 60 e 90 dias de idade.

1.3 Organização e estrutura do trabalho

Este trabalho começou pela escolha dos materiais a utilizar e pela decisão dos ensaios a realizar de modo a satisfazer os principais objetivos pretendidos e, de seguida, efetuou-se um planeamento e calendarização da campanha experimental.

Após a fase laboratorial estar concluída, deu-se início à análise dos resultados obtidos, conseguindo desta forma retirar conclusões.

O documento apresentado divide-se em seis capítulos e respetivos anexos, como se apresenta de seguida.

Capítulo 1 – Introdução

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema e demonstra a sua importância. É também aqui que se apresenta o objetivo e as etapas deste trabalho.

Capítulo 2 – Estado atual do conhecimento

Apresentam-se no segundo capítulo os conhecimentos atuais sobre as argamassas com terra que possuem especial relevância para o tema, resultante de uma pesquisa bibliográfica alargada. Ao longo deste capítulo demonstra-se também a importância das diversas questões que deram origem ao objetivo deste trabalho.

Capítulo 3 – Materiais

Todos os materiais utilizados neste trabalho e as suas características são mencionados no terceiro capítulo.

Capítulo 4 – Procedimentos de ensaio adotados

No quarto capítulo apresentam-se todos os procedimentos de ensaio empregues durante a campanha experimental desenvolvida. São referidos os métodos de produção das argamassas, de execução dos provetes para ensaiar e de aplicação da argamassa no suporte bem como a metodologia dos ensaios realizados e respetivas referências normativas.

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados

O quinto capítulo destina-se à análise e discussão dos resultados obtidos em todos os ensaios efetuados, obtendo-se uma completa caracterização das cinco famílias de argamassa com terra em estudo, segundo os objetivos deste trabalho. Ainda neste capítulo é realizada uma discussão cuidada desses mesmos resultados, apresentando críticas e comparações com os resultados de outros autores.

Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo indica-se sucintamente as principais conclusões que se retiraram ao longo de todo o estudo, nomeadamente as vantagens e desvantagens das argamassas estudadas, bem como as respostas aos objetivos que conduziram este trabalho. Finalmente indicam-se possíveis perspetivas de desenvolvimento futuro para outros trabalhos no âmbito das argamassas com terra.

No final, é ainda possível encontrar as Referências Bibliográficas onde podem ser visualizados todos os documentos consultados e referenciados durante todo o trabalho e por fim os Anexos onde consta informação relevante sobre os ensaios e os materiais utilizados.

2. Estado atual do conhecimento

2.1 Considerações iniciais

A terra é um dos materiais de construção mais antigos que se conhece. Segundo Minke (2006), Pollock (1999) e Berge (2009) a construção com terra iniciou-se há mais de 9000 ou 10000 anos, concluindo-se que teve o seu início nas primeiras sociedades agrícolas que remontam entre 12000 a 7000 A.C. (Torgal et al., 2010).

É de notar a existência de várias construções com terra com milhares de anos que conseguiram chegar ao séc. XXI, como é o caso da cidade de Shibam do Iémen (Figura 2.1 a) que ainda hoje é habitada. Esta cidade teve origem no séc. II, contudo os edifícios que perduram até aos nossos dias são maioritariamente do século XVI.

Contrariamente ao que seria de supor, não existem apenas pequenas construções com terra, existem também edifícios de grande escala como por exemplo troços da Muralha da China e as pirâmides de Saqqarah no Egipto (Figura 2.1 b).



Figura 2.1 – Construções com terra: a) Cidade de Shibem, Iémen (Glamgrid, sem data); b) Pirâmide de Saqqarah, Egipto (Wikipedia Commons, 2007)

Relativamente a Portugal, a construção com terra surgiu por influência de diversos povos, sendo de realçar a importância dos Muçulmanos (Ribeiro, 1969). Atualmente ainda é possível observar em quase todo o território português construções com terra, tendo maior expressão na zona abaixo do Tejo até ao Algarve. Exemplo da arquitetura militar islâmica em taipa em Portugal é o Castelo de Paderne (Figura 2.2) e de Silves.

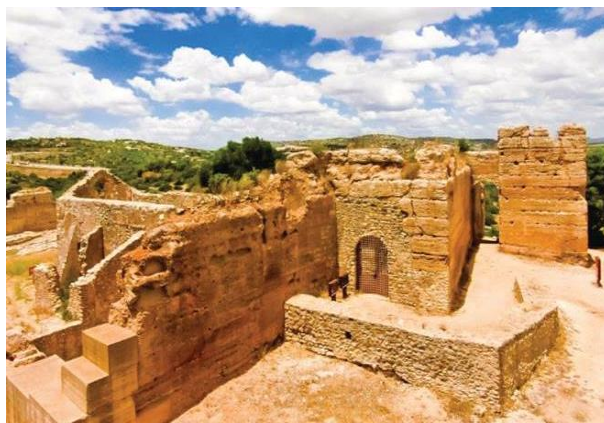


Figura 2.2 – Castelo de Paderne (Sulinformação, 2017)

As diversas técnicas tradicionais utilizadas na construção com terra são o adobe, o tabique e a taipa. Na Figura 2.3 pode observar-se a distribuição geográfica, em Portugal, das construções tradicionais de construção com terra.

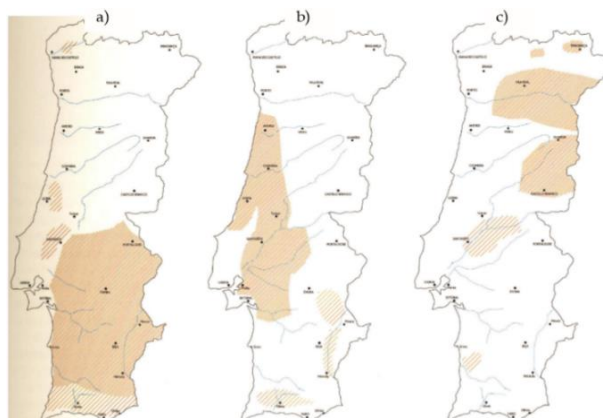


Figura 2.3 – Distribuição geográfica das construções tradicionais portuguesas com terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (Jorge et al., 2006)

O território em Portugal com maior incidência das construções com terra é a região sul, Alentejo e Algarve, sobretudo recorrendo à técnica construtiva de taipa (Gomes, et al., 2012). A construção com terra assentava em conhecimentos empíricos. Este conhecimento era passado ao longo das gerações, no entanto o conhecimento das características físicas dos materiais era escasso, dificultando a escolha da matéria-prima mais adequada para a construção. Assim, juntando estes fatores à fama de ser uma construção de poucos recursos financeiros, criou-se a ideia de que as construções com terra eram pobres e fracas (Santos, 2014).

A partir dos anos 80 surgiu uma crescente preocupação acerca do ambiente, o que levou a uma mudança de mentalidades, trazendo de novo a terra como material de construção como uma ótima opção.

A terra continua a ser um dos materiais mais comuns na construção, tanto pela sua abundância como pelo seu fácil acesso, extração e transformação, não esquecendo a sua capacidade em se tornar reutilizável e o facto ser incombustível, apresentando-se assim como um material de reduzido impacto energético e amigo do ambiente (Minke, 2006). Assim, a terra deixou de ser vista como um material pobre para se tornar num material de primeira escolha tanto para reabilitações e reparações como para novas construções, havendo cada vez mais interesse pela arquitetura com terra. É ainda de salientar que as argamassas de reboco apresentam propriedades que lhes permitem melhorar a qualidade e conforto do ambiente no interior dos edifícios e ainda possuem uma elevada capacidade de absorção de água, sendo por isso recomendadas para os revestimentos interiores. Evidencia-se assim o contributo destas argamassas para o equilíbrio higrométrico do ambiente interior de um edifício e, por consequência, a menorização dos problemas de saúde associados a humidades (Santos, 2014 citando Lima, 2013).

Hoje em dia, estima-se que cerca de 50% da população mundial vive em edifícios construídos com terra (Torgal et al., 2009) (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Construções com terra no mundo (Torgal et al., 2009)

É espectável que a terra continue a assumir um papel cada vez mais relevante no futuro, tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos, visto que os materiais e sistemas construtivos industrializados não são sustentáveis (Minke, 2006).

No entanto, existem ainda diversas lacunas no conhecimento das argamassas com terra devidas ao escasso conhecimento das suas características e propriedades, o que resulta num aparecimento prematuro de anomalias nas construções. É necessário, conhecer os materiais, as técnicas e as metodologias corretas que prolonguem o tempo de vida útil das novas construções ou das obras de reabilitação em edifícios de construção com terra,

sendo também fundamental caracterizar argamassas de reboco que garantam a compatibilidade com o suporte, assegurando o êxito da conservação do património.

2.2 Terra como material de construção

As construções com terra surgiram como meio de resposta à necessidade que o Homem tinha de construir os seus abrigos, uma vez que a terra é um material disponível na natureza, muito abundante e reutilizável, tornando-se desta forma económico e ecológico.

Assim, de acordo com o local, clima e cultura variavam os materiais e as técnicas de construção utilizadas.

No entanto, apesar das vantagens enumeradas, a terra apresenta também fragilidades construtivas, sendo vista por muitos como um material de construção sem qualidade, associada a métodos construtivos pobres. Para vencer essas fragilidades, a terra tem que ser aplicada de modo adequado, onde se têm em consideração as suas próprias características.

2.2.1 Regulamentação

Hoje em dia, verifica-se um aumento do interesse acerca das construções com terra, sendo que vários países pelo mundo fora já possuem regulamentação específica, no entanto, o mesmo não se verifica em Portugal. A regulamentação existente ainda é pouco expressiva quando comparada com outras áreas da engenharia civil.

Em Portugal, quando se pretende executar um edifício garantindo a segurança a ações sísmicas, apenas resta a opção de utilizar uma estrutura resistente a sismo, deixando as alvenarias com terra apenas para compartimentação (Torgal et al., 2009).

De seguida e de forma sucinta apresenta-se a regulamentação específica para construções com terra, em vários países.

Alemanha

Em 1944 surgem na Alemanha, as primeiras regras técnicas sobre a construção com terra, conhecidas por “*Earth Building Code*”. No entanto, após a 2ª Guerra Mundial, com o declínio da indústria e o crescente interesse na terra como material de construção, os regulamentos técnicos, publicados pelo Instituto Alemão para Normalização – DIN, passaram a ser efetivamente aplicados.

Em 1971, estes documentos foram considerados obsoletos, acabando por ser retirados, no entanto continuaram a ser utilizados como regras de boa arte.

Segundo Torgal (2009) e Gomes (2013) citando Schroeder (2012), a Fundação Alemã para o Ambiente, em 1997 e 1998, elaborou um documento normativo de recomendações técnicas para a construção com terra, incluindo um estudo relativo ao estado da arte da construção com terra, que ficou conhecido por “*Lhmbau Regeln*”. Este documento foi aplicado em quase todos os estados alemães.

Em 2008, procedeu-se a uma revisão do “*Lhmbau Regeln*”, tendo essa nova versão sido certificada pelos organismos europeus nesse mesmo ano. “*Lhmbau Regeln*” constitui ainda hoje, na União Europeia, o mais importante conjunto de normas aceites no domínio da construção com terra, tendo sido adotadas na sua íntegra por outros países (Torgal et al., 2009).

Austrália

A Austrália foi também um dos primeiros países a ter documentos específicos sobre a construção com terra. Em 1952 foi publicado pela *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO) o *Bulletin 5*, que foi reeditado várias vezes, nomeadamente em 1976, 1981, 1987 e 1992 (Torgal et al., 2009).

No entanto, reconhecendo que o *Bulletin 5* não respondia a algumas questões, duas associações tentaram criar normas conjuntas para a construção com terra, sem grande sucesso (Gomes, 2013). Assim, surge em 2002, o Manual de construção com terra Australiano elaborado por uma comissão técnica. O referido documento reúne um conjunto de recomendações sobre as boas práticas da construção com terra (Torgal et al., 2009).

Espanha

Apesar de Espanha não estar regulamentada no que respeita a construções com terra, tal como Portugal, em 1992 o Ministério dos Transportes e Obras Públicas publicou um documento de apoio ao projeto e construção de edifícios com terra, “*Bases para el Diseno y Construction com Tapial*”, dando especial importância à construção em taipa, embora também seja referida a técnica do adobe (Gomes, 2013).

Estados Unidos

Nos Estados Unidos existem três regulamentos para o setor da construção de edifícios. Cada regulamento refere-se a ações específicas consoante a zona do país (tornados no Sudeste, vento e neve no Norte e ação sísmica nos Estados do Oeste). No

entanto, apesar de nenhum regulamento abranger a construção com terra, o regulamento relativo à ação sísmica tem sido utilizado para este contexto (Torgal et al., 2009).

Ainda assim, o Estado do Novo México tem desde 1991 um regulamento próprio para a construção com taipa e adobe, o “*New Mexico Earthen Building Material Code*” (Gomes, 2013).

Nova Zelândia

Segundo Torgal (2009), o regulamento utilizado na Nova Zelândia para a construção com terra é um dos mais completos a nível internacional, tem força legal e está estruturado em três partes, correspondendo a normas nacionais: NZS 4297:1998 – *Engineering Design and Earth Buildings*; NZS 4298:1998 – *Materials and Workmanship for Earth Buildings*; NZS 4299:1998 – *Earth Buildings not Requiring Specific Design*.

Neste país, a regulamentação da construção com terra é feita em função da altura dos edifícios, sendo que para alturas inferiores a 3,3 m não há necessidade de um projeto específico. No entanto, as alvenarias de taipa utilizadas nestes edifícios devem respeitar o disposto na Especificação NZS 4298:1998.

Zimbabué

Em 2001 foi publicada uma especificação “*Zimbabwe Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures*” que resulta de uma adaptação da obra “*Code of Practice for Rammed Earth Structures*” (Keable, 1996). Assim, como é possível perceber pelo título da adaptação referida, o regulamento do Zimbabué para a construção com terra é específico para construções recorrendo à técnica de taipa (Gomes, 2013).

2.2.2 Terra

Segundo a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil E-219 (1968), designa-se por solo todo o conjunto de partículas que podem ser separadas por agitação em água. O solo é, na sua maioria, material proveniente do intemperismo das rochas, ou seja, processos que desintegram e/ou decompõem a rocha, como por exemplo a decomposição física (fragmentação mecânica), química (reações químicas nos minerais) e biológica (ação direta de organismos vivos) (Gomes, 2013).

Após este processo, o solo sofre transformações e deposita-se paralelamente ao terreno, com características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas e microestruturais diferentes, formando um perfil (Gomes, 2013).

O solo é um meio trifásico, ou seja, tem constituintes nas três fases da matéria: partículas sólidas (fase sólida), água (fase líquida) e ar (fase gasosa) (Santos, 2014) e é constituído por matéria mineral (desagregação da rocha mãe) e orgânica (proveniente de organismos vivos ou vegetais).

Segundo Gomes (2013), os constituintes minerais têm características muito diferentes entre si e podem dividir-se em:

- 1) cascalhos e areia – elementos estáveis quando estão secos, sendo que a areia apresenta alguma coesão quando está húmida. Estes materiais não podem ser utilizados na construção sem recorrer a adição de nenhum ligante;
- 2) siltes – elementos coesos quando estão húmidos, contudo apresentam alguma instabilidade conforme o grau de humidade;
- 3) argilas – elementos instáveis conforme o grau de humidade, contudo apresentam coesão e plasticidade na presença de água.

Assim, apesar da instabilidade da argila, basta uma pequena quantidade para garantir a coesão da areia, apresentando excelentes propriedades como ligante.

Gomes (2013) indica ainda que basta uma terra com 10% de argila para garantir as propriedades plásticas e de coesão necessárias para a construção com terra, no entanto, há que ter cuidado com a adição de argila visto que para valores em torno dos 40 a 50% de argila adicionada, a terra fica com as propriedades da argila, ou seja, torna-se muito instável, absorvendo muita água e alterando o seu volume, o que é inadequado para a construção com terra.

Ao longo deste trabalho, o material solo será designado por terra.

2.2.3 Importância da água

A quantidade de água de amassadura de uma argamassa influencia as suas características físicas, a sua trabalhabilidade e a sua aplicação.

Segundo (Gomes, 2013), diversos estudos relacionam a influência do teor de água na trabalhabilidade, sendo um aspeto fundamental. Esta importância deve-se à presença de argilas na elaboração deste tipo de argamassas, que alteram as suas propriedades físicas na presença de água, tais como a plasticidade, a compactação e a retração.

Após executada a construção com terra, ao longo da sua vida, a presença de água em excesso é também prejudicial, uma vez que uma das desvantagens destas construções é a sua rápida degradação com a presença de água.

Segundo Santos (2014) citando Castilla (2011) e Röhlen e Ziegert (2011), a construção com terra deve evitar o contacto entre as paredes e o solo, uma vez que possibilita o acesso da água às paredes através de fenómenos de capilaridade, recorrendo a sistemas de drenagem de águas periféricas eficazes, execução de cortes de capilaridade entre a fundação e o início da parede, utilizando por exemplo membranas betuminosas ou alvenaria de pedra seca.

É também importante referir que a escorrência de água por superfícies de paredes com terra ou revestidas com argamassas com terra pode provocar uma erosão rápida e intensa. A terra não é adequada para ambientes expostos a ciclos de humedecimento e secagem, verificando-se uma diminuição da coesão da superfície.

2.2.4 Sistemas construtivos

A nível mundial, existem várias técnicas de construção com terra que se podem dividir, como estabelecido pelo CRATerre (Centro Internacional de Arquitetura em Terra – associação destinada à pesquisa laboratorial sobre a arquitetura em terra) em 1986, em três tipos fundamentais de sistemas construtivos englobando 18 sistemas construtivos, como:

- 1) sistemas monolíticos – destaca-se como principal técnica a taipa (Figura 2.5 a);
- 2) sistemas de alvenaria – blocos de adobe (Figura 2.5 b) e blocos de terra comprimida (BTC);
- 3) sistemas de enchimento ou revestimento – material não estrutural, como o tabique (Figura 2.5 c).



Figura 2.5 – Técnicas construtivas com terra (Torgal et al., 2009): a) parede em taipa; b) blocos de adobe; c) parede em tabique

Os métodos de construção mais recorrentes em Portugal são a taipa e o adobe, sendo as argamassas de reabilitação para construções em taipa o objeto de estudo deste trabalho. Contudo, é possível observar as técnicas construtivas com blocos de terra

comprimida e o tabique. De seguida, apresenta-se sucintamente uma explicação de cada um dos métodos (taipa, adobe, blocos de terra comprimida e tabique).

Taipa

A taipa é um sistema monolítico de construção com terra, consistindo na compactação de terra húmida com recurso a taipais, ou seja, uma cofragem de madeira.

Este método construtivo com terra foi muito comum em Portugal, predominantemente na zona sul do país até aos anos 50 do século XX (Gomes, 2013). Era tradicionalmente executado recorrendo a cofragens de madeira (taipais) com 40 a 70 cm de largura, 50 cm de altura e 2 m de comprimento.

As fundações eram, normalmente, executadas em alvenaria de pedra e atualmente em betão armado, de modo a evitar a humidade ascendente pelas paredes de taipa. A terra era compactada em camadas de 10 cm até ao topo do molde, com recurso a um maço de madeira. Uma vez que o trabalhador executa a compactação dentro do taipal, a largura da cofragem deveria ser 40 cm, no mínimo (Torgal et al. 2009). Na compactação manual, é usual trabalharem 3 homens, um na zona central e os outros dois junto a cada taipal (Moreia, 2008). Posteriormente, o taipal é removido e reerguido para executar a camada seguinte. Em cada nível, fixam-se os taipais ao anterior através de peças, a que se dá o nome de “agulhas” (Gomes, 2013).

Recentemente, com recurso às novas tecnologias, surgiu a taipa mecanizada. Este método é semelhante ao antigo, no entanto, melhoraram-se a qualidade, as dimensões da cofragem e a compactação. As cofragens são em madeira e metálicas, podendo ser móveis ou amovíveis, sendo essencial garantir que os elementos de cofragem possuam uma rigidez elevada suportando, assim, as tensões e os impactos da vibração e da compactação. A compactação é realizada por impacto, recorrendo a um compactador pneumático e por vibração (Figura 2.6), diminuindo o tempo necessário para compactar a terra (Moreia, 2008).



Figura 2.6 - Compactação de terra com recurso a compactador pneumático (Torgal et al., 2009)

Adobe

O adobe é um sistema de alvenaria que consiste no fabrico manual dos blocos de terra crua, recorrendo a um molde de madeira que é preenchido com solo plástico argiloso (Figura 2.7), sendo descofrado ainda no estado fresco e deixado a secar à temperatura ambiente. Este procedimento necessita de uma maior quantidade de água relativamente à técnica de construção em taipa. Assim, uma vez que se recorre a solos plásticos argilosos para o fabrico dos blocos, surgem muitas vezes fissuras devidas à retração do material. Esta situação é facilmente controlada com a inserção de fibras vegetais nos blocos.

A construção com blocos de adobe é semelhante à execução de uma parede de alvenaria em tijolo, utilizando uma argamassa de assentamento com terra para assentar os blocos em fiadas (Torgal et al., 2009).

Recentemente, com recurso às novas tecnologias, já se executam blocos de forma mecanizada, utilizando máquinas semelhantes a máquinas agrícolas, tornando todo o processo mais rápido.



Figura 2.7 - Fabrico manual de blocos de adobe (Arquitetesuasideias, 2016)

Blocos de Terra Comprimida (BTC)

O BTC é um sistema de alvenaria e representa uma evolução do adobe. O BTC não é mais do que blocos de terra crua comprimida, recorrendo a meios mecânicos para estabilizar o solo, prensando o solo meio húmido dentro do molde. Neste processo, a terra é normalmente estabilizada com recurso a uma certa percentagem de cal ou cimento (Gonçalves, 2012).

A prensagem pode ser manual ou mecanizada, resultando em blocos de terra comprimida, mais resistentes e duráveis que os blocos de adobe devido ao aumento do contacto entre as partículas e eliminação de vazios, diminuindo a porosidade (Moreia, 2008). As prensas manuais são mais económicas energeticamente, no entanto, as prensas mecânicas fabricam blocos com maior rapidez e com maiores resistências. Os blocos de BTC podem ser maciços ou perfurados, permitindo a passagem de tubagens.

Na Figura 2.8 mostra-se a execução de um paramento com blocos de terra comprimida.



Figura 2.8 – Construção com blocos de terra comprimida (Ecoblocos, sem data)

Tabique

Esta técnica é um sistema de revestimento ou enchimento de paredes e consiste em colocar terra sobre uma estrutura de madeira maciça ou reticulada em ambas as faces (Figura 2.9) ou no interior da estrutura. É comum encontrar-se esta técnica construtiva no Norte de Portugal. As paredes executadas segundo esta técnica são maioritariamente paredes divisórias, recorrendo a tábuas de madeira verticais ligadas entre si por ripas horizontais.



Figura 2.9 – Construção em tabique numa parede exterior (Olhares, 2011)

2.3 Anomalias das paredes em taipa

Como seria de esperar, a terra é um dos materiais de construção mais vulnerável. Assim, à medida que a idade de um edifício construído com terra avança, é necessário recorrer à sua conservação e reabilitação. É ainda de realçar que mesmo com outros materiais mais avançados na sua tecnologia é necessário conservar o edifício.

Como é facilmente observável em Portugal, muitos dos edifícios antigos encontram-se deteriorados, no entanto, não se deve apenas à falta de manutenção, mas também a tentativas de reparação com técnicas e materiais inadequadas.

Assim, para que a conservação e reabilitação das construções com terra seja feita adequadamente, é necessário conhecer quais os mecanismos que levam à sua degradação, tendo em conta que a terra é mais vulnerável a certos fatores do que outros materiais de construção.

No entanto, não se pode apenas atribuir todas as patologias verificadas na construção com terra a um único fator, sendo que a degradação destas construções advém de várias causas (Gomes, 2013).

Segundo Keable (1996) e Gomes (2013) as principais patologias encontradas na superfície de paredes de taipa são:

- deterioração da superfície – perda de coesão;
- fendilhação;
- destacamento;
- eflorescências.

E as principais causas são:

- incapacidade de resistir à tensão estrutural instalada;
- falta de deformabilidade;

- acesso de água;
- contaminação por sais;
- reduzida capacidade de secagem;
- aderência insuficiente de um revestimento;
- falta de proteção por um revestimento.

Todas estas causas advêm de problemas como: concepção deficiente, técnicas de construção e materiais inadequados, envelhecimento natural da construção, falta de manutenção e reparações mal-executadas.

De seguida, apresentam-se sucintamente os fatores que têm maior impacto na degradação das construções em taipa:

Humidades

Como seria de esperar, a água tem um peso enorme no que respeita à degradação física com o decorrer do tempo. Na presença de água, a construção com terra perde a sua coesão e, conseqüentemente diminui a sua resistência mecânica, podendo também potenciar a ação de sais solúveis e o desenvolvimento biológico.

Segundo Gomes (2013), *“a água pode penetrar na construções por: capilaridade a partir do solo; por condensação de vapor de água produzido no interior da edificação, nomeadamente em pontes térmicas (como por exemplo, a introdução de estruturas de betão armado), ou por higroscopicidade própria do material – capacidade em absorver humidade do ar, por progressão pela zona superficial das paredes, através da chuva direta, escorrências da cobertura ou por salpicos provocados por veículos a circular em época de chuva; por infiltração pelo topo das paredes, por deficiências na cobertura, ou através de fendas existentes; por rotura de canalizações”*.

Quando a humidade resulta das águas que ascendem por capilaridade nas paredes com terra, origina-se diversas patologias, algumas delas causadas pelo transporte de sais solúveis. Os sais solúveis são comuns em edifícios antigos uma vez que estiveram sujeitos à contaminação com sulfatos (poluição ambiental), cloretos (ambientes marítimos) e nitratos (contaminação dos materiais de construção por dejetos animais)

Estes sais, uma vez no interior da parede, provocam tensões internas ao cristalizarem. Os ciclos de molhagem/secagem levam à perda de coesão do material construtivo da parede, degradando-a. O processo de cristalização dos sais solúveis pode acontecer de duas formas:

- 1) criptoflorescência – a cristalização ocorre no interior da parede, podendo levar ao destacamento da argamassa do seu suporte, como acontece com as argamassas rígidas;
- 2) eflorescência – a cristalização ocorre na superfície da parede, como acontece com as argamassas permeáveis ao vapor de água.

A taxa de evaporação também influencia o aparecimento de eflorescências ou criptoflorescências, ou seja, quanto menor a taxa de evaporação, maior a tendência para ocorrer eflorescências. Quando ocorre criptoflorescência, o destacamento da argamassa de reboco o seu suporte leva à perda de material, podendo mesmo provocar a sua queda, sendo necessário colmatar esta falta de material com argamassas compatíveis.

Segundo Santos (2014), citando Lima (2013), a melhor contribuição de um reboco com terra para o conforto e qualidade do ambiente interior de um edifício é a sua elevada capacidade de trocar vapor de água com o ar, regulando e equilibrando o ambiente interior, pois absorve o vapor de água quando o ar está mais húmido e liberta-o quando o ar fica mais seco novamente. Esta capacidade da argamassa de reboco com terra influencia a perceção do conforto térmico e a salubridade do ar do ambiente interior.

Este contributo depende também da espessura do reboco e da velocidade de absorção e libertação do vapor de água. Segundo Santos (2014), pode admitir-se que a utilização de um reboco de argamassa com terra em paramentos interiores contribui para a regulação diária da humidade relativa do ar interior e contribui, simultaneamente, para a melhoria de salubridade do ar interior, diminuindo alguns problemas de saúde relacionadas com as humidades interiores.

Gomes (2013), citando Röhlen (2012), refere que na presença de humidades relativas do ar interior elevadas, acima dos 70% e de temperaturas entre os 20-30°C é normal verificar o aparecimento de fungos e bolores. Além da terra apresentar uma grande capacidade de absorção de humidade, apresenta também uma elevada presença de nutrientes, levando ao aparecimento de fungos no interior da construção.

Erosão

O vento, ao transportar poeiras, apresenta-se como um agente degradante das paredes em taipa resultando na sua erosão. Quanto maiores forem as partículas transportadas, maior será a erosão provocada (Faria, 2005).

Há ainda que ter em conta quando vento é associado a fenómenos naturais, tais como um tornado ou ciclone, pois a sua elevada intensidade provoca ações horizontais

significativas. Segundo Gomes (2013), a ação do vento torna-se mais prejudicial quando se combina com a ação da água, como por exemplo a chuva.

Assim, a água da chuva pode atuar diretamente (penetrando na parede, nas suas fendas e fissuras ou erodindo a superfície da parede) e indiretamente (sendo absorvida pela parede por capilaridade).

Fendilhação

A baixa resistência mecânica das construções com terra leva ao aparecimento de fendas nas paredes. Estas fendas podem ser causadas por anomalias estruturais e não estruturais.

Segundo Gomes (2013), as anomalias estruturais devem-se, essencialmente, a alterações de carga, ocorrência de um sismo, assentamentos diferenciais, erros de execução e causas acidentais. Apesar das paredes em taipa apresentarem boa resistência à compressão, as cargas suportadas por estas não devem ser excessivas nem aplicadas num único ponto (atuando como carga concentrada). É frequente observar a estrutura da cobertura assentada diretamente nas paredes em taipa, originando esmagamento nessa zona da parede, levando à fendilhação em profundidade da taipa. Por sua vez, no que diz respeito às forças de tração, flexão e de corte, é de lembrar a fraca resistência mecânica das construções com terra. A autora refere ainda que o excesso de água durante a compactação pode resultar em fendas verticais.

As anomalias não estruturais mais comuns são fendas devidas à retração, normalmente consequências de má execução da construção, como por exemplo utilização de material inadequado ou variações higrométricas. É ainda importante referir que existem fendas provocadas pelo crescimento de vegetação em que as raízes penetram nas paredes (Gomes, 2013).

Destacamento de revestimentos

Segundo Gomes (2013), o destacamento de um revestimento tem como consequência a exposição do seu suporte e do reboco à água, facilitando a sua penetração, criando diversas anomalias. Assim que a água se infiltra na parede, o seu material perde resistência, podendo ocorrer a queda de parte do reboco e do seu suporte, degradando ainda mais a zona referida.

Estes destacamentos podem dever-se à aplicação de revestimentos frágeis e de baixa coesão, sendo mais gravoso em zonas mais expostas, como por exemplo, as esquinas. Por sua vez, se o revestimento for demasiado rígido, este pode fissurar e

destacar-se pois não acompanha os movimentos do suporte. Neste caso, muitas vezes, a fissura ocorre já na parede, levando à ocorrência de destacamentos de maior espessura.

Muitas das patologias observadas em obras de reabilitação de um edifício com terra devem-se a incompatibilidades entre as argamassas de reparação utilizadas e o suporte em causa.

Este procedimento é altamente incorreto pois as argamassas de reparação devem ser semelhantes ao seu suporte (fisicamente, quimicamente e mecanicamente) (Gomes, 2013) sob pena de provocarem outras anomalias como destacamentos do seu revestimento, já referido.

2.4 Conservação das paredes em taipa

A construção com terra foi um dos métodos construtivos mais utilizado em Portugal, sendo visível pelo país fora diversas construções (edifícios habitacionais, monumentos, castelos, entre outros) ao abandono. Dia após dia, estas construções estão expostas a agentes destruidores, muitas vezes sem qualquer ação de conservação, reabilitação ou manutenção. Com o passar dos tempos, este património tem vindo a perder-se, representando uma parte da história e da cultura de Portugal que corre o risco de desaparecer.

No entanto, nos últimos tempos, surgiu um despertar para este tipo de construções e para a sua matéria-prima, a terra. Este acontecimento deve-se, como referido, à tentativa de preservar o património edificado, mas também à crescente preocupação com os aspetos ecológicos e de preservação do ambiente. A terra despertou o interesse da comunidade científica pois representa um método de construção ecológico, sustentável, económico e que proporciona um conforto térmico e acústico.

No entanto, é recorrente encontrar edifícios que foram sujeitos a tentativas de reabilitação que só pioraram a situação, uma vez que foram utilizadas técnicas e materiais inadequados, sem ter em conta as especificidades de uma construção com terra. Um bom exemplo desta situação é o recurso a argamassas com ligantes hidráulicos, como o cimento, para reparar uma parede de taipa. Uma argamassa de cimento é incompatível com este tipo de suporte, uma vez que apresenta uma elevada rigidez e não acompanha os movimentos da parede com terra. Assim, muitos dos edifícios já “reabilitados” apresentam ainda mais anomalias do que possuíam anteriormente.

Esta situação deriva da falta de conhecimento acerca deste tipo de construções e dos seus materiais de construção, englobando o conhecimento acerca dos seus métodos

construtivos e a maneira como ocorre a sua degradação. É também importante referir a escassez de formação disponível para técnicos especializados, habilitando-os a executar corretamente estes trabalhos, e ainda a não existência de normas específicas para as construções com terra em Portugal.

Assim, antes de se proceder a qualquer obra de reabilitação de uma construção em taipa, deve-se analisar o tipo de anomalias presentes e quais as suas possíveis causas. O mais adequado será intervir, primeiramente, nas causas do problema (Gomes, 2013).

Ainda segundo Gomes (2013) citando Guillaud (2008), “*existem algumas “regras de ouro” que devem ser aplicadas sempre que são necessárias intervenções de conservação e reabilitação (...):*

- i. observar e documentar o estado inicial do edifício;*
- ii. minimizar a intervenção, e utilizar materiais e técnicas compatíveis;*
- iii. assegurar a reversibilidade das intervenções;*
- iv. documentar as intervenções;*
- v. inspecionar e realizar uma manutenção regular”.*

Torgal et al. (2009) apresenta também diversas propostas de reabilitação das construções com terra, nomeadamente ao nível de:

Fundações

Deve aumentar-se a sua secção ou proceder a recalçamento, consolidar com ligantes e, sempre que possível, subir a fundação em altura para evitar problemas decorrentes de humidades ascensionais. Assim, aumenta-se também a rigidez da estrutura e uma melhora-se a sua estabilidade mecânica.

Caso a humidade surja por capilaridade, não se aconselha a utilização de produtos hidrófugos por injeção, já que estes não garantem uma estanquidade absoluta. Sempre que possível, deve-se subir a fundação até a uma cota de 0,70 m acima do solo ou colocar uma barreira estanque imediatamente acima da fundação, impedindo a subida das humidades ascensionais, como por exemplo, membranas para este fim (pinturas betuminosas, faixas de polietileno, mastiques asfálticos). Aconselha-se também a colocar drenagem em volta da habitação, afastando rapidamente a água das fundações das paredes de alvenaria e escoar as águas da cobertura de modo a que estas não se infiltrem junto às fundações.

Paredes e cobertura

Caso a degradação se deva a fissuração e a sua causa esteja corrigida, deve-se preencher as fissuras com uma argamassa à base de terra. Quando se deve a tensões excessivas em aberturas, deve utilizar-se nessas zonas ombreiras, vergas e peitoris em pedra ou em tijolo de burro.

Sempre que possível, não se deve recorrer a lajes aligeiradas de betão. Contudo, se for inevitável, deve-se proceder à colocação de um lintel, distribuindo uniformemente as cargas ao longo da parede. Quando a reabilitação da cobertura é errada, as consequências influenciam negativamente o comportamento das paredes de alvenaria de terra. São exemplos dessa má reabilitação a utilização de elementos de betão pré-fabricados uma vez que representam uma sobrecarga excessiva para este tipo de paredes. Assim, deve-se tentar reabilitar a cobertura original ou fazer-se a sua substituição por uma outra cobertura em madeira.

Revestimentos

Primeiramente, há que resolver a causa que contribuiu para a degradação do revestimento. A reabilitação dos revestimentos das construções em terra deve ter em conta a adequada compatibilidade entre estes materiais e os suportes nos quais são aplicados. Assim, devem utilizar-se argamassas à base de cal e nunca à base de cimento, aplicadas em várias camadas, com baixa resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e elevada permeabilidade ao vapor de água.

2.5 Caracterização de argamassas

Como referido anteriormente, na reparação de construções com terra, nomeadamente construções em taipa, recorre-se a argamassas para preencher zonas degradadas, fendas e fissuras. Essas argamassas devem ser adequadas ao suporte em questão, garantindo a compatibilidade entre estes dois elementos e uma durabilidade satisfatória.

Para escolher uma determinada argamassa com terra, há que ter em conta as suas características. Essa argamassa pode ser avaliada no seu estado fresco, como por exemplo, a sua trabalhabilidade, e avaliada no seu estado endurecido, como por exemplo as suas características hídricas, mecânicas e ainda a aderência ao suporte.

2.5.1 Caracterização de argamassas no estado fresco

A característica mais importante de uma argamassa no seu estado fresco é, sem dúvida, a sua trabalhabilidade, uma vez que influencia a qualidade de uma argamassa, durante a sua aplicação e no seu estado endurecido.

A trabalhabilidade relaciona-se com a quantidade de água utilizada na preparação da argamassa (Rodrigues, 2004), ou seja, a trabalhabilidade traduz a facilidade com que uma argamassa é aplicada no suporte. Uma argamassa com pouca trabalhabilidade corresponde uma argamassa de difícil manuseamento, sendo demasiado seca ou fluida (Gomes, 2013). Esta característica é difícil de avaliar/quantificar, uma vez que é influenciada por diversos fatores, como por exemplo, a proporção água/ligante, a forma e granulometria dos grãos, a natureza do ligante, o clima ou ação humana (Gomes, 2013).

No caso de argamassas cimentícias e/ou cal, é habitual recorrer à mesa de espalhamento para caracterizar a sua trabalhabilidade, sendo que neste trabalho se utilizou este método para avaliar a trabalhabilidade de argamassas com terra, tal como noutros estudos realizados com argamassas com terra.

Gomes (2013) aponta diversos estudos onde se executaram argamassas com terra para diferentes aplicações e os respetivos valores de trabalhabilidade obtidos, concluindo assim que existe uma grande variabilidade de valores para avaliar a trabalhabilidade de uma argamassa. Segundo a autora, as argamassas de reparação com terra consideram-se excelentes, do ponto de vista da trabalhabilidade, se apresentarem valores de espalhamento entre os 160 e 176 mm recorrendo à mesa de espalhamento.

2.5.2 Caracterização de argamassas no estado endurecido

Para caracterizar uma argamassa com terra no seu estado endurecido, recorreu-se a diversos ensaios com o fim de conhecer as suas propriedades hídricas, mecânicas e de aderência ao suporte, garantindo assim a sua adequabilidade para reabilitar uma construção com terra.

Segundo (Gomes, 2013) citando Costa e Coelho (2005), “ *os requisitos básicos para argamassas de reparação (...) traduzem-se nas seguintes características:*

- i. *razão resistência à flexão/resistência à compressão elevada, ou seja, uma ductilidade elevada;*
- ii. *elevada permeabilidade ao vapor de água de modo a permitir a eliminação da água presente na parede;*

- iii. *baixo coeficiente de capilaridade de modo a minimizar a infiltração de águas nas zonas não fendilhadas;*
- iv. *boa aderência ao suporte e preferencialmente com rotura pela argamassa;*
- v. *baixo módulo de elasticidade de modo a minimizar a fendilhação por deformações do suporte ou da estrutura resistente;*
- vi. *elevada capacidade de retenção de água inicial de modo a minimizar a fendilhação inicial devida a fenómenos de secagem prematura;*
- vii. *razão espalhamento/água de amassadura elevada (trabalhabilidade) de modo a garantir a trabalhabilidade em fresco da argamassa sem ser necessário recorrer a quantidades excessivas de água;*
- viii. *resistências mecânicas adequadas ao fim a que se destinam.”*

Assim, as argamassas com terra, em estudo neste trabalho, foram ensaiadas no estado endurecido para avaliar a sua resistência à tração por flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração linear e volumétrica, absorção de água por capilaridade, secagem, dureza superficial e aderência ao suporte.

De seguida, explica-se sucintamente dois fenómenos de extrema importância na avaliação de argamassas com terra: absorção de água e secagem

Absorção capilar

As argamassas com terra, ao possuírem poros no seu interior, têm a capacidade de absorver água por capilaridade. A capilaridade traduz a capacidade com que um material se satura, estando em contacto com a água no estado líquido, por forças de sucção (Gomes, 2013).

Segundo Rodrigues (2004), quanto mais finos forem os capilares, maior é a altura alcançada pela água ascendente, contudo a velocidade de absorção é menor.

A curva de capilaridade traduz a quantidade de água absorvida por unidade de superfície (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo decorrido ($\text{s}^{1/2}$). Normalmente este gráfico apresenta-se por dois segmentos retos para os materiais com poros de dimensões homogéneas e bem interligados (Figura 2.10):

- 1) primeiro troço – corresponde ao coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade, representando a velocidade com que a maioria dos poros foram preenchidos por água;

- 2) segundo troço – possui um declive menos acentuado e representa a velocidade com que os restantes poros são preenchidos através da difusão na água do ar retido.

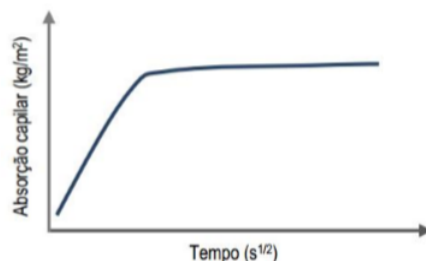


Figura 2.10 – Curva de absorção de água por capilaridade (Gomes, 2013)

O ponto em que se muda do primeiro troço para o segundo troço corresponde ao momento em que a franja capilar atinge a superfície do provete.

Secagem

A secagem define-se como a extração de um líquido de maneira a obter um material seco, transformando a água contida no interior do material em vapor de água. Quando um material saturado é colocado num meio com temperatura e humidade relativa constantes, a secagem divide-se em três fases (Figura 2.11):

- 1) primeira fase – a água em estado líquido é transportada por capilaridade para a superfície do material num fluxo constante, em quantidade equivalente ao vapor que o material liberta por evaporação a taxa constante, ocorrendo a evaporação à superfície, onde se encontra a água em estado líquido,
- 2) segunda fase – a evaporação começa a dar-se no interior do material visto que a água líquida se torna incapaz de atingir a superfície em quantidade suficiente para compensar a evaporação;
- 3) terceira fase – o fluxo de secagem tende assintoticamente para zero.

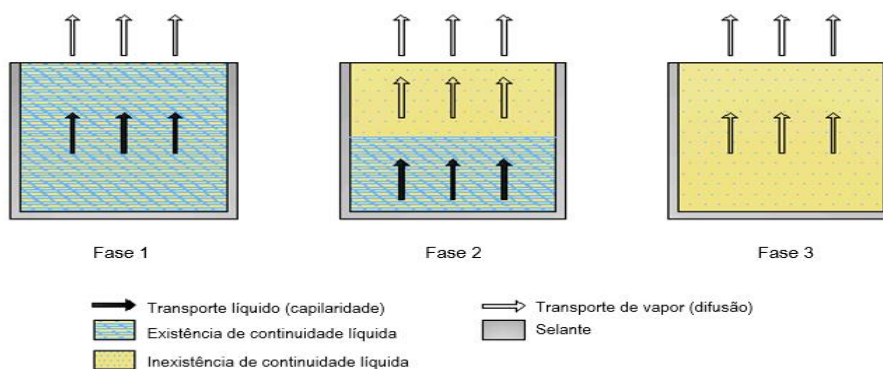


Figura 2.11 – Fases da secagem (Gomes, 2013)

Estas fases são visíveis na curva de secagem de um material poroso (Figura 2.12). Segundo (Gomes, 2013), o ponto em que se transita da primeira para a segunda fase de secagem corresponde ao teor de água crítico.

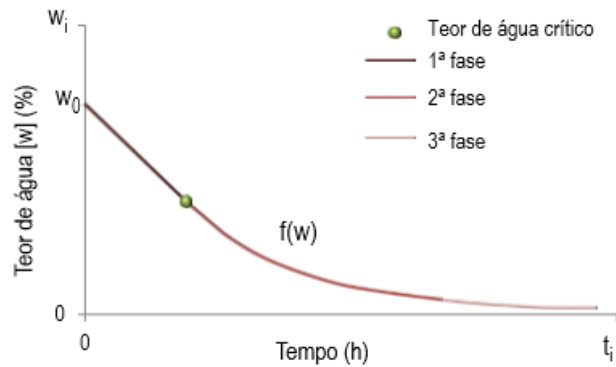


Figura 2.12 – Curva característica de secagem de um material poroso (Gomes, 2013)

Deste modo, recorrendo à curva de secagem, é possível obter o índice de secagem através da expressão [2.1]:

$$IS = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(w) \times dt}{w_0 \times t_i} \quad [2.1]$$

Em que:

IS - índice de secagem;

t_i - instante i (h);

t_0 - instante inicial (h);

w - teor de humidade (%);

w_0 - teor de humidade inicial (%).

É ainda possível obter a taxa de secagem recorrendo à curva de secagem com o tempo (h) nas abcissas e com a água absorvida pelo provete (kg/m^2) nas ordenadas, retirando o declive do seu troço inicial. Esta taxa de secagem corresponde à maior ou menor velocidade com que uma argamassa secou.

3. Materiais

3.1 Constituição das argamassas

Neste capítulo apresentam-se todos os materiais utilizados na execução das argamassas e suas respectivas características.

O presente trabalho focou-se numa caracterização de cinco famílias de argamassas com terra. Para o fabrico dessas argamassas foram utilizados três materiais: areia, argila e como ligante a cal aérea hidratada.

Na Tabela 3.1 apresenta-se a nomenclatura de cada família bem como o respetivo traço volumétrico.

Tabela 3.1 – Traço volumétricos das cinco famílias de argamassas com terra em estudo

Família	Traço volumétrico		
	Argila	Areia	Cal aérea hidratada
PdAr	1	4	-
PdAr+25C	1	4	Adição de 25%
25C_PdAr	1	4	Substituição de 25% de cal aérea na massa de argila
PdAr_25C	1	4	Substituição de 25% de cal aérea na massa de areia
CAr	-	4	1

Nota: os 25% de massa de cal aérea foi sempre calculada em relação à massa de argila

As cinco famílias são referidas ao longo de todo o trabalho segundo a nomenclatura apresentada na Tabela 3.1, abaixo explicada:

- 1) **PdAr** – argamassa de areia e argila;
- 2) **PdAr+25C** – argamassa de areia com argila e cal aérea com adição de 25% de cal aérea;
- 3) **25C_PdAr** – argamassa de areia com argila e cal aérea com substituição de 25% de cal aérea na massa de argila;
- 4) **PdAr_25C** – argamassa de areia com argila e cal aérea com substituição de 25% de cal aérea na massa de areia;
- 5) **CAr** – argamassa de areia e cal aérea.

3.1.1 Argila

A argila utilizada neste trabalho experimental é resultado de uma amostra recolhida de uma construção em taipa que foi caso de estudo no trabalho realizado por Gomes (2013).

Segundo Gomes (2013), o edifício do qual foi recolhida a amostra situa-se no Monte do Pá Danado, na localidade de Taliscas em Odemira (Figura 3.1) e o material foi designado por Pá Danado (PD) ao longo de todo o seu estudo. Também aqui será designado por PD. O edifício data dos finais do século XIX, é de piso térreo, com uma planta retangular, encontrando-se já em ruínas.



Figura 3.1 – Edifício do Monte do Pá Danado em Odemira (Gomes, 2013)

A amostra foi extraída de uma zona de taipa que se encontrava limpa e sem anomalias visíveis (Figura 3.2), tentando que a amostra fosse representativa da construção original, o que foi difícil devido à heterogeneidade da taipa.



Figura 3.2 – Recolha de amostras: remoção do bloco e corte da taipa em blocos (Gomes, 2013)

O material foi transportado para o laboratório, evitando perdas e contaminação do mesmo. Gomes (2013), avaliou a composição mineralógica deste material através do ensaio de difração de raios x (DRX). Na Tabela 3.2 apresenta-se os compostos cristalinos

constituintes do material utilizado e na Figura 3.3 apresenta-se o respetivo difratograma obtido.

Tabela 3.2 – Composição mineralógica por DRX da fração fina do material, adaptado de Gomes (2013)

Compostos cristalinos	Pá Danado, Odemira (PD)
Quartzo	+++
Feldspato	Vtg
Mica	+ / ++
Clorite	?
Caulinite	+ / ++
Gesso	-
Anfíbola	-
Hematite	+

Notação: +++ proporção elevada; ++ proporção média, + proporção fraca, Vtg vestígios, ? dúvidas na presença, - não identificado

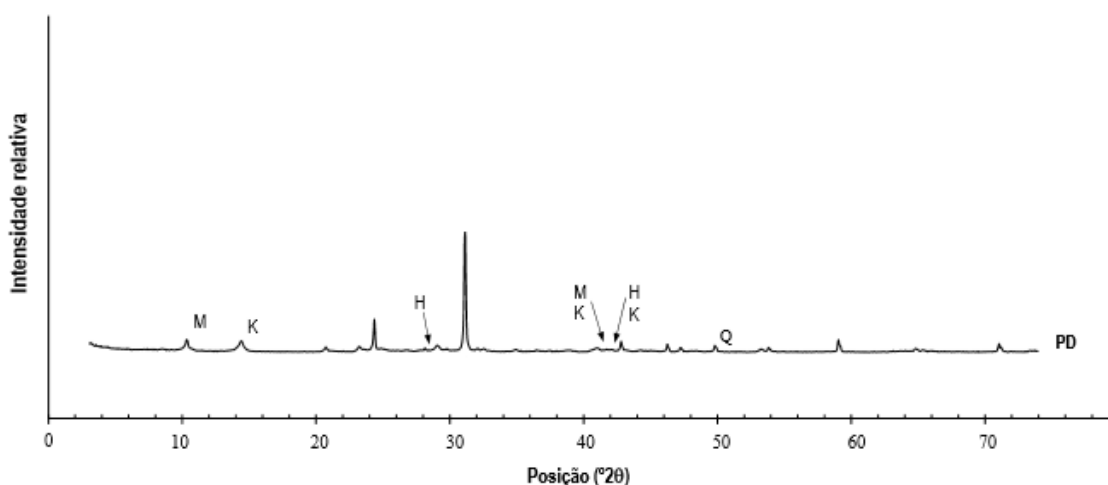


Figura 3.3 – Difratograma de raio X do edifício. Os picos correspondem a uma fase cristalina identificada: Q – quartzo; M – mica/ilit; K – caulinite; H – hematite, adaptado de Gomes (2013).

Segundo (Gomes, 2013), os minerais argilosos presentes na amostra apresentam uma fraca variação volumétrica. A caulinite é um dos minerais argilosos cristalinos menos ativo, com um comportamento muito estável. Oferece pouco poder de retenção de água devido à sua fraca absorção superficial e é o que apresenta menor superfície específica. A cor avermelhada desta amostra deve-se à presença de óxido de ferro.

No entanto, para utilizar esta argila na execução das argamassas, estas foram sujeitas a uma preparação prévia descrita por Gomes (2013) no seu trabalho, que

consistiu, resumidamente, numa peneiração por via húmida através do peneiro de 2mm (nº10 ASTM), seguida de uma decantação do material passado pelo peneiro, sendo o material sólido seco em estufa ventilada a uma temperatura de 40°C e, finalmente, o material foi moído recorrendo a um moinho de maxilas e homogeneizado com um repartidor.

De seguida, apresentam-se algumas características deste material.

Baridade

O ensaio é referido no ponto 4.2.1 e a argila obteve uma baridade de 1108,11 kg/m³.

Curva granulométrica

O ensaio é referido no ponto 4.2.4 cujo resultado se apresenta na Figura 3.4.

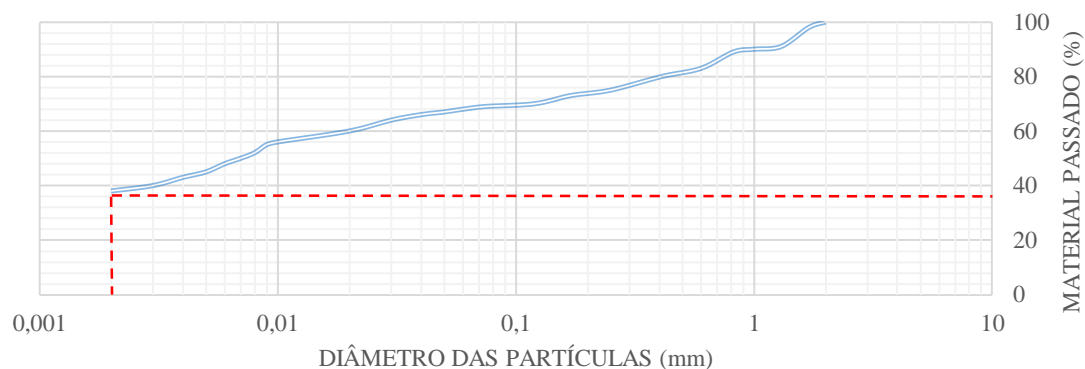


Figura 3.4 – Curva granulométrica da argila PD

Diversos documentos normativos apontam que as partículas de dimensão inferior a 0,002 mm são consideradas argila. Assim, como se pode verificar pela curva granulométrica da terra PD, na Figura 3.4, 38% deste material é argila.

Densidade de partículas

O ensaio é referido no ponto 4.2.5 e a argila PD apresenta uma densidade de partículas de 2,79.

3.1.2 Areia

As areias são um agregado e contribuem para a compacidade, resistência mecânica e diminuição da retração de uma argamassa (Martins, 2008).

As areias são o resultado da decomposição de rochas, podendo classificar-se quimicamente como:

- areia siliciosa - derivam dos rios ou areeiros;
- areia calcária - são o resultado de desperdícios de pedreiras de rochas calcárias.

Todas as famílias de argamassas estudadas tiveram na sua composição um único agregado, que neste caso foi uma areia do rio lavada com dimensão 0/4 (d/D – mínima/máxima dimensão do agregado).

Apresenta-se de seguida algumas características da areia utilizada.

Baridade

O ensaio é referido no ponto 4.2.1 e a areia apresenta uma baridade de 1440,56 kg/m³.

Equivalente de areia

O ensaio é referido no ponto 4.2.2 e a areia apresenta um valor de equivalente de areia (SE) de 99,76%.

Curva granulométrica

O ensaio é referido no ponto 4.2.3 cujo resultado se apresenta na Figura 3.5.

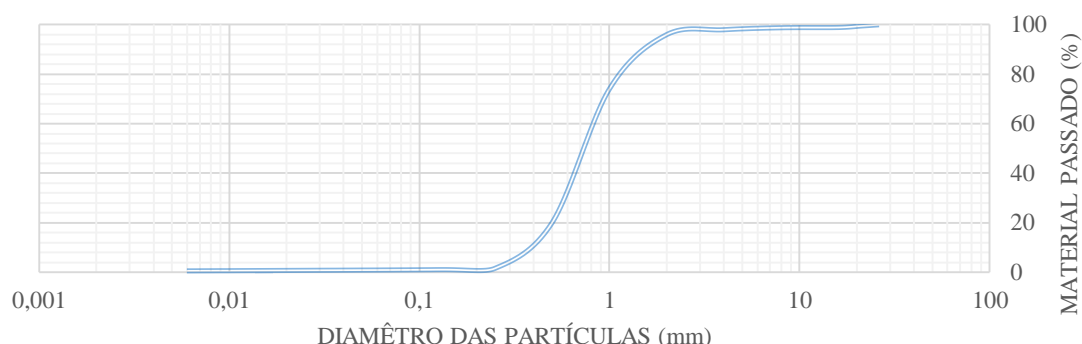


Figura 3.5 – Curva granulométrica da areia do rio

A areia apresenta um módulo de finura de 3,1 e uma percentagem de finos de 0,05%, obtidos através do ensaio descrito no ponto 4.2.3.

É ainda importante referir que as areias devem estar limpas e secas, sem substâncias prejudiciais, como por exemplo a existência de matéria orgânica ou sais solúveis.

3.1.3 Cal aérea hidratada

As cal utilizadas na construção são a cal aérea e cal hidráulica, diferenciando-se na percentagem de rocha calcária, na temperatura de calcinação e no modo como ganham

presa. A cal aérea não ganha presa em contato com a água, ao contrário da cal hidráulica, uma vez que não tem propriedades hidráulicas.

A cal aérea resulta da decomposição de uma rocha com 95% de carbonato de cálcio, pelo menos - rocha cálcica CaCO_3 – ou carbonato de cálcio e magnésio – rocha dolomítica $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, pela ação da temperatura. A rocha dolomítica dá origem à cal aérea dolomítica ou magnesiana, designada por DL e a rocha cálcica dá origem à cal cálcica, designada por CL. As cals aéreas classificam-se em cal viva (Q) ou cal hidratada (S) e, relativamente ao teor de impurezas, dividem-se em gordas e magras. As cals aéreas gordas provêm de calcários quase puros e as cals aéreas magras provêm de calcários com impurezas, compreendidas entre 1 e 5%.

A produção de cal aérea começa na extracção de calcários com impurezas até 5%, que posteriormente são transportados até uma fábrica onde começa a sua britagem. De seguida, o material é encaminhado para o forno onde se dá a calcinação a cerca dos 900°C , obtendo-se óxido de cálcio (CaO) - mais conhecido por cal viva - e libertando dióxido de carbono (CO_2). Uma vez que a cal viva é um produto muito instável, necessita de ser hidratada. Este processo é conhecido por extinção da cal viva e pode ocorrer por imersão, aspersão de água ou outras técnicas. A cal viva é altamente reativa na presença de água e quando ocorre essa reação dá-se origem a temperaturas elevadas. O resultado dessa reação é o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), mais conhecido como cal apagada, cal extinta ou cal hidratada. Através da cal viva, facilmente se obtém a cal hidratada em pó recorrendo a um processo de hidratação, seguido de moagem (Coelho et al, 2009).

A capacidade da cal viva se apagar e reagir com o dióxido de carbono da atmosfera (carbonatação), depende do tratamento térmico que foi sujeita e da matéria-prima, sendo esta capacidade designada por reatividade da cal (Rodrigues, 2004).

A cal utilizada neste estudo foi uma cal área hidratada, fornecida pela empresa Calcidrata (Anexo A) e foi utilizada para avaliar as suas vantagens/desvantagens da sua utilização em maior ou menor quantidade.

Para caracterizar esta cal aérea hidratada e uma vez que se possuía a ficha técnica do material, apenas foi necessário determinar a baridade segundo o ensaio descrito no ponto 4.2.1. cujo resultado obtido foi de $517,89 \text{ kg/m}^3$.

3.1.4 Água de amassadura

Para se proceder à mistura de todos os materiais foi necessário recorrer a um líquido, a água. A água hidrata os ligantes da mistura e promove a aglutinação entre todos os materiais, conferindo a consistência necessária à aplicação da argamassa.

A quantidade de água que se deve utilizar deve ser a estritamente necessária para conferir uma trabalhabilidade adequada à argamassa, assegurar a sua plasticidade e uma adequada aderência ao suporte. Quando se utiliza demasiada água, após a evaporação desta, poderá resultar num maior volume de vazios, diminuindo a resistência mecânica. No entanto, utilizar uma quantidade de água insuficiente também não é desejável (Martins, 2008) porque não será possível hidratar e molhar todo o material sólido.

Assim, para cada família, foram utilizadas diferentes relações água/mistura sólida devido à sua diferente composição (Anexo B). A água que se utilizou estava limpa, isenta de impurezas tanto quanto possível, isto é, sem sais dissolvidos, sem matéria orgânica e à temperatura ambiente.

4. Procedimentos de ensaio adotados

4.1 Considerações iniciais

O referente trabalho, no que concerne à parte experimental, foi maioritariamente realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). No entanto, alguns ensaios decorreram no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), nomeadamente os ensaios de resistência à tração por flexão e compressão, condutibilidade térmica, dureza superficial, resistência à abrasão, aderência ao suporte e esclerómetro pendular.

A campanha experimental decorreu entre março e setembro de 2016.

Os ensaios realizados podem-se dividir em:

- **Ensaio de caracterização de materiais**

1. baridade;
2. equivalente de areia;
3. peneiração: para a areia;
4. análise granulométrica;
5. densidade das partículas.

- **Ensaio de caracterização de argamassas no estado fresco**

1. massa volúmica;
2. teor de vazios;
3. consistência por espalhamento.

- **Ensaio de caracterização de argamassas no estado endurecido**

1. massa volúmica aparente;
2. resistência à tração por flexão e compressão;
3. módulo de elasticidade dinâmico;
4. retração linear e volumétrica;
5. absorção de água por capilaridade;
6. secagem.

Relativamente aos ensaios definidos para o estado endurecido foram necessários 12 provetes de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm de cada família de argamassas (no

total são cinco famílias), 6 para os ensaios aos 60 dias de idade e os outros 6 para os ensaios aos 90 dias de idade. Assim, fez-se um total de 60 provetes.

Além destes, foram ainda moldados três provetes de cada família com as dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm, perfazendo um total de 15 provetes.

- **Ensaio de caracterização de argamassas aplicadas em suporte**

1. condutibilidade térmica;
2. dureza superficial;
3. resistência à abrasão;
4. aderência ao suporte;
5. esclerómetro pendular;
6. absorção de água sob baixa pressão.

Os ensaios de caracterização das argamassas aplicadas no suporte conseguiram-se efetuar todos num único suporte, para a mesma argamassa. As argamassas foram aplicadas numa face de tijolo furado com uma área de 290x190 mm e com 10 mm de espessura. Para cada família aplicou-se a respetiva argamassa em 2 suportes, a fim de realizar os ensaios aos 60 e 90 dias de idade, perfazendo um total de 10 tijolos.

4.2 Ensaio de caracterização de materiais

Para conhecer e caracterizar os materiais utilizados na execução das argamassas foram efetuados diversos ensaios, cujos procedimentos são apresentados resumidamente.

4.2.1 Baridade

O ensaio de baridade foi realizado para todos os materiais utilizados segundo a norma NP EN 1097-3:2000. Esta norma é utilizada para caracterizar agregados, no entanto, para este trabalho foi também utilizada para a caracterização dos restantes materiais (cal aérea hidratada, terra e areia).

Todos os materiais foram previamente secos em estufa a uma temperatura de 110°C até se obter massa constante. De seguida, retiram-se da estufa, deixando arrefecer até atingir a temperatura ambiente.

Pesou-se um recipiente de 3 litros de volume vazio obtendo-se assim a massa do recipiente. No entanto, não foi respeitada a norma, uma vez que esta indica que se deve utilizar um recipiente de apenas 1 litro de volume no caso dos materiais com 4 mm de

dimensão máxima. O recipiente utilizado possui uma relação entre a sua altura e o seu diâmetro entre 0,5 e 0,8.

De seguida, preencheu-se o recipiente com cada um dos materiais sem recorrer a compactação. O excesso foi retirado com uma régua e pesou-se novamente, obtendo-se o peso do conjunto recipiente e material.

A baridade do material obtém-se segundo a expressão [3.1]:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} [kg/m^3] [3.1]$$

Sendo:

ρ_b – baridade do provete [kg/m^3];

m_1 – massa do recipiente vazio [kg];

m_2 – massa do recipiente cheio com o material [kg];

V – volume do recipiente [m^3].

Este procedimento repetiu-se três vezes, sendo o valor da baridade de cada material a sua média aritmética. O resultado deve ser arredondado a duas casas decimais para agregados de massa normal.

4.2.2 Equivalente de areia

Para caracterizar a areia recorreu-se ao ensaio do equivalente de areia segundo a norma NP EN 933-8:2012. Este ensaio determina a quantidade de impurezas e de finos existentes no agregado, sendo que quanto maior o valor do equivalente de areia, menor a quantidade de finos na amostra.

Inicialmente secou-se o agregado em estufa a 110°C até atingir massa constante e, de seguida, retirou-se o material da estufa deixando arrefecer até atingir a temperatura ambiente.

Peneirou-se o material pelo peneiro de 2 mm e reservou-se duas amostras de 120g provenientes do material peneirado.

Numa proveta adequada ao ensaio colocou-se uma solução de lavagem composta por uma solução anti floculante e água até atingir o primeiro traço de referência. De seguida, imergiu-se a amostra na solução indicada, repousando 10 minutos.

Depois do tempo de repouso, colocou-se a proveta, selada previamente, num agitador de 90 ciclos durante 30 segundos. Finalmente, a proveta volta à mesa de trabalho.

O passo seguinte foi a lavagem das paredes do tubo e da rolha e o enchimento da proveta com a solução de lavagem até atingir o traço superior de referência, deixando repousar novamente pelo menos durante 20 minutos.

Passado esse tempo, mediu-se a altura desde a base da proveta até à superfície floculada, sendo este o valor h_1 .

Seguidamente colocou-se um conjunto mergulhador cuidadosamente na proveta até que a ponta assentasse sobre o sedimento. Assim, obteve-se a altura entre a face inferior do mergulhador e a face superior do anel que assentou no topo da proveta, ou seja, h_2 .

O valor do equivalente de areia obtém-se recorrendo à expressão [3.2]:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 [\%] \quad [3.2]$$

Sendo:

SE – equivalente de areia [%];

h_1 – altura desde a base da proveta até à superfície floculada [cm];

h_2 – altura desde a face inferior do mergulhador até à face superior do anel que assenta no topo da proveta [cm].

Assim, o valor de SE é a média dos resultados obtidos nos dois provetes, sendo que deve existir três resultados, ou seja, este procedimento repetiu-se 6 vezes. Caso a diferença entre o equivalente de areia de dois provetes, do mesmo ensaio, seja superior a 4% o ensaio deverá ser repetido.

4.2.3 Peneiração

O ensaio de peneiração foi efetuado para a caracterização da areia segundo a norma NP EN 933-1:2014.

Inicialmente colocou-se em estufa a 110°C o agregado referido até alcançar massa constante. Posteriormente, deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente.

Segundo a norma, utilizou-se uma amostra de 200 g uma vez que a máxima dimensão da areia era igual ou inferior a 4 mm. Assim, pesou-se o material registando a massa M_1 .

De seguida, lavou-se o material recorrendo a um peneiro de 0,063 mm sobre água corrente até que a água ficasse limpa. O material retido no peneiro, ou seja, com granulometria superior a 0,063 mm foi colocado novamente na estufa até alcançar massa

constante e posteriormente deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente. Esse material foi pesado correspondendo à massa M_2 .

Posteriormente, passou-se o material pela série de peneiros indicados pela norma (0,063 mm; 0,125 mm; 0,250 mm; 0,50 mm; 1 mm; 2 mm; 4 mm) e pesou-se a massa retida em cada um, obtendo-se a percentagem de massa retida que serviu de base para traçar a curva granulométrica.

Finalmente, calculou-se a percentagem de finos que passou no peneiro de 0,063 mm recorrendo à expressão [3.3]:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \text{ [%]} \text{ [3.3]}$$

Sendo:

f – percentagem de finos que passa através do peneiro 0,063 mm [%];

M_1 – massa seca do provete a ensaiar [kg];

M_2 – massa seca retida no peneiro 0,063 mm após a lavagem do provete a ensaiar [kg];

P – massa do material peneirado que ficou retido no fundo dos peneiros [kg].

4.2.4 Análise granulométrica do material argiloso (PD)

A caracterização da granulometria do material argiloso (PD) foi apenas efetuada para a fase de sedimentação (dado o tamanho do material) e realizou-se segundo as especificações do LNEC E-196 (1966) e E-239 (1970).

Começou-se por levar o material à estufa a 110°C até atingir massa constante e posteriormente retirou-se da estufa até atingir a temperatura ambiente.

A peneiração realizou-se por via húmida com base na especificação E-239 (1970). Primeiramente fez-se passar o material seco pelo peneiro de 2 mm (nº10). Do material que passou, retirou-se 50 g e foi introduzido num copo com 250 cm³ de água e solução anti floculante, deixando repousar 1 hora. Após esse período de tempo, colocou-se a solução no peneiro de 0,074 mm (nº200) e lavou-se a amostra sob um jato de água. O material que ficou retido no peneiro foi colocado novamente na estufa a 110°C até atingir massa constante e posteriormente deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente. Após seco, fez-se passar este material numa série de peneiros compreendidos entre a malha 0,841 mm e a malha 0,074 mm, resultando assim na curva granulométrica de peneiração.

Para obter a curva granulométrica da sedimentação retirou-se três amostras de 50 g (Figura 4.1 a) do material que passou através do peneiro de 2 mm (nº10).

Essas amostras foram colocadas em *gobelets* juntamente com uma solução de 100 ml de anti floculante, que se aqueceram durante 10 minutos. De seguida, agitou-se a mistura por 15 minutos recorrendo a um agitador elétrico (Figura 4.1 b).

Após este processo, a solução foi passada pelo peneiro de 0,074 mm (nº200) e lavada com água destilada, não ultrapassando a quantidade de 500 ml. O material retido no peneiro nº200 foi desprezado. A mistura foi transferida para uma proveta, sem perder material e encheu-se até aos 1000 ml, onde se situa o traço de referência.

De seguida, tapou-se a proveta com parafina filme e agitou-se energeticamente durante um minuto, colocando-se depois a proveta na mesa dando-se início à contagem do tempo. Aos 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 e 2880 minutos realizaram-se as medições da temperatura e as leituras do densímetro (Figura 4.1 c).

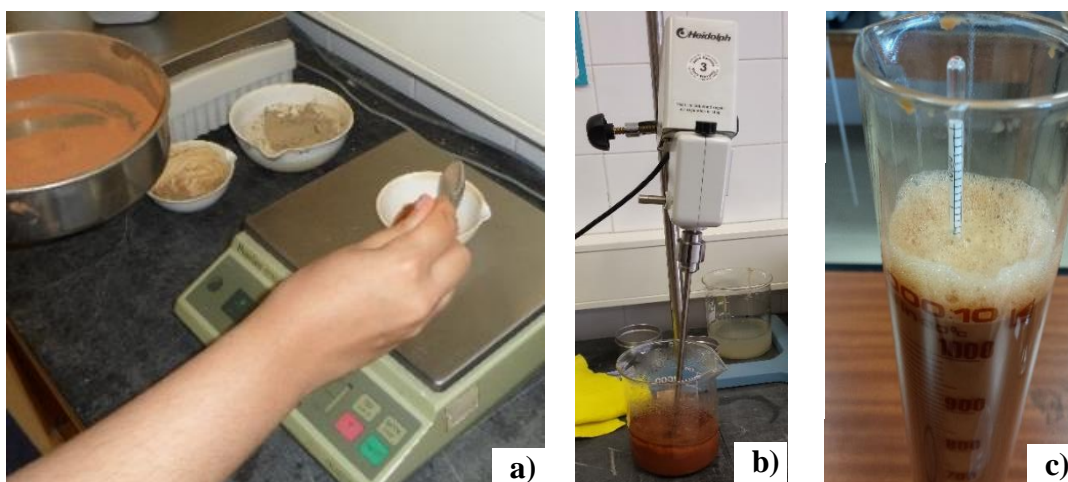


Figura 4.1 – Ensaio de sedimentação: a) Pesagem do material que passou no peneiro nº10; b) Agitação da mistura de argila com anti floculante; c) Leitura do densímetro.

Para obter o valor da densidade das partículas da argila PD realizou-se o ensaio normalizado pela norma NP 83 (1965) que se inicia com a pesagem de um picnómetro vazio, lavado e seco, registando-se m_1 . De seguida, encheu-se o picnómetro com água destilada até ao traço de referência, registando-se m_2 . Regista-se também a temperatura t_1 .

Posteriormente encheu-se o picnómetro com 25 g de argila PD registando-se m_4 e colocou-se água destilada até $\frac{3}{4}$ do volume do picnómetro, deixando em repouso 12 h. Para retirar o ar restante recorreu-se a um exsiccador em sílica gel com uma bomba de vácuo por 10 minutos (Figura 4.2 a) e de seguida encheu-se o picnómetro com água destilada até ao traço de referência e registou-se m_5 (Figura 4.2 b) e a respetiva temperatura.

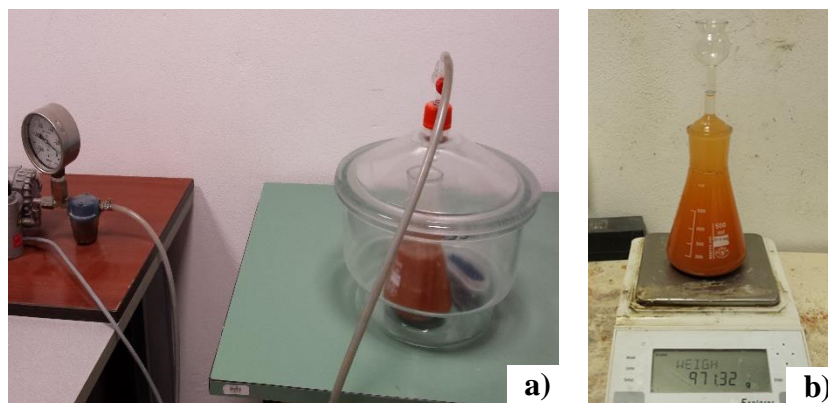


Figura 4.2 – Ensaio de densidade de partículas: a) Remoção do ar com recurso a um exsiccador em sílica gel com uma bomba de vácuo; b) Registo da massa m_5 .

Recorrendo às massas m_1 e m_2 foi facilmente obtida a massa do picnómetro à temperatura t_2 , ou seja, m_3 , segundo a expressão [3.4]:

$$m_3 = \frac{d_a^{t_1}}{d_a^{t_2}} \times (m_2 - m_1) + m_1 \text{ [g]} \quad [3.4]$$

Sendo:

m_1 – massa do picnómetro seco [g];

m_2 – massa do picnómetro cheio de água à temperatura t_1 [g];

m_3 – massa do picnómetro à temperatura t_2 [g];

$d_a^{t_1}$ – densidade da água à temperatura t_1 ;

$d_a^{t_2}$ – densidade da água à temperatura t_2 .

Por fim, a densidade das partículas obtém-se recorrendo à expressão [3.5]:

$$d_{20}^{t_2} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k \quad [3.5]$$

Sendo:

$d_{20}^{t_2}$ – densidade das partículas à temperatura t_2 em relação a água destilada a 20°C;

m_4 – massa do provete seco [g];

m_5 – massa do picnómetro com o provete à temperatura t_2 [g];

k – quociente da densidade da água à temperatura t_2 pela densidade da água a 20°C.

4.3 Execução das argamassas

A execução de todas as argamassas fundamentou-se na norma NP EN 196-1:2006 com algumas adaptações. Para realizar a mistura da argamassa utilizou-se uma misturadora mecânica constituída por uma cuba em aço inoxidável com capacidade de 3 litros e uma pá misturadora, possuindo a velocidade lenta e a velocidade rápida.

Este procedimento baseou-se em:

- 1) homogeneizar manualmente a mistura dos materiais que compõem a argamassa;
- 2) introduzir a água na cuba da misturadora (Figura 4.3 a);
- 3) introduzir a mistura homogeneizada dos materiais na cuba da misturadora (Figura 4.3 b);
- 4) iniciar a mistura durante 90 segundos em velocidade lenta (Figura 4.3 c);
- 5) parar a misturadora deixando a argamassa em repouso durante 90 segundos, aproveitando os 15 segundos iniciais para juntar a argamassas que aderiu às paredes da cuba à restante mistura (Figura 4.3 d);
- 6) reiniciar a mistura durante 60 segundos em velocidade lenta.



Figura 4.3 – Execução de argamassas: a) Introdução da água na cuba da misturadora; b) Introdução da mistura homogeneizada dos materiais da argamassa; c) Contagem do tempo de mistura; d) Junção da argamassa retida nas paredes da cuba à restante mistura.

Refere-se ainda que as quantidades de material e as relações mássicas água/material sólido utilizadas na execução de cada família de argamassa estão indicadas no Anexo B.

4.4 Ensaios de caracterização de argamassas no estado fresco

Para conhecer e caracterizar as argamassas no seu estado fresco foram realizados vários ensaios cujos procedimentos são apresentados resumidamente.

4.4.1 Massa volúmica

O ensaio para a determinação da massa volúmica executa-se segundo a norma EN 1015-6:1998 e corresponde à massa por unidade de volume.

Este ensaio inicia-se com uma pesagem prévia de um recipiente metálico normalizado, registando-se a sua massa (m_1) e o seu volume (V).

Depois, terminada a execução de uma argamassa, encheu-se o recipiente até metade da sua capacidade (Figura 4.4 a). De seguida, compactou-se a argamassa com uma oscilação alternada perfazendo um total de 10 pancadas. Após este passo, encheu-se o recipiente até ao topo (Figura 4.4 b), repetindo-se a compactação (Figura 4.4 c). Por fim, o topo do recipiente foi rasado de modo a eliminar o excesso de argamassa. Finalmente, pesa-se o conjunto recipiente e argamassa, registando m_2 .

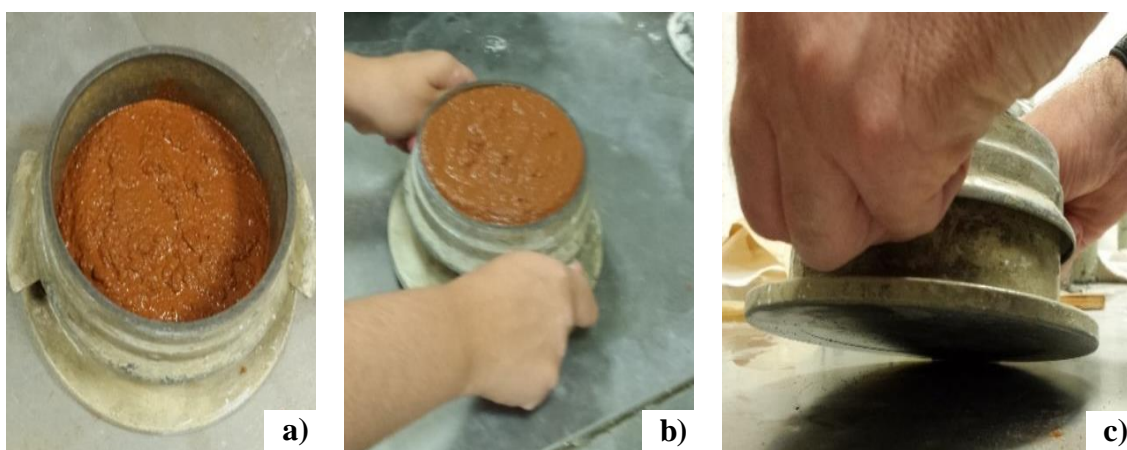


Figura 4.4 – Ensaio da massa volúmica de uma argamassa: a) Enchimento da primeira camada de argamassa; b) Enchimento da última camada de argamassa; c) Compactação da última camada de argamassa.

A massa volúmica é obtida através da expressão [3.6]:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} [kg/m^3] [3.6]$$

Sendo:

ρ – massa volúmica [kg/m^3];

m_1 – massa do recipiente vazio [kg];

m_2 – massa do conjunto recipiente cheio com a argamassa [kg];

V – volume do recipiente [m^3].

Para cada argamassa efetuou-se este procedimento três vezes, sendo a massa volúmica de uma família de argamassa a média dos seus três ensaios.

4.4.2 Teor de vazios

O ensaio para determinar o teor de vazios, isto é, a percentagem de vazios presente em cada argamassa num dado volume conhecido, foi realizado segundo a norma EN 1015-7:2009.

Este procedimento foi realizado após o ensaio de massa volúmica, recorrendo ao mesmo recipiente metálico normalizado, totalmente preenchido com a argamassa do mesmo modo como indicado no ponto 4.4.1.

De seguida, colocou-se no recipiente metálico a parte superior do aerómetro e, antes de começar o ensaio, posicionou-se o ponteiro de leitura no valor 0 (Figura 4.5 a). Após este passo, introduziu-se água por um dos orifícios do equipamento destinado a esse fim, até começar a sair água pelo orifício oposto. Nesse momento, fechou-se rapidamente as válvulas de ambos os orifícios.

A água penetrou em todos os vazios da argamassa devido ao recurso de um sistema de bombear ar e o ar expulso seguiu para uma câmara adjacente, permitindo medir a percentagem do seu volume. (Figura 4.5 b). Na Figura 4.5 c) mostra-se o aspeto da argamassa após o término do ensaio, quando os seus vazios se encontram preenchidos por água.

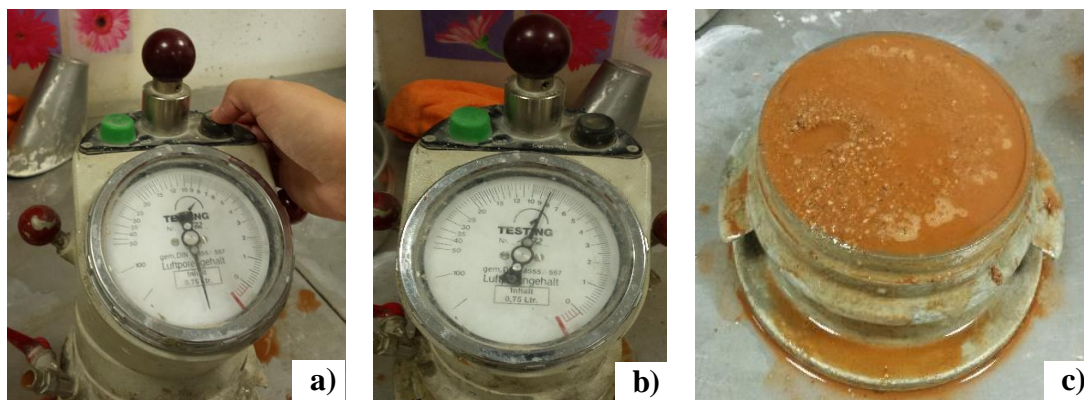


Figura 4.5 – Ensaio do teor de vazios: a) Posicionamento do ponteiro de leitura no valor 0; b) Leitura do ensaio do aerómetro após o ensaio; c) Aspeto da argamassa após o término do ensaio.

4.4.3 Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento quantifica a trabalhabilidade de uma argamassa. O procedimento para este ensaio foi seguido segundo a norma EN 1015-3:2009.

Assim, segundo Gomes (2013), o espalhamento para argamassas de terra deve estar compreendido entre 160 mm e 176 mm, considerando-se assim uma argamassa excelente do ponto de vista da trabalhabilidade.

Este ensaio realizou-se após a amassadura de uma argamassa, preenchendo-se um molde troncocónico (Figura 4.6 a) com a argamassa até metade da sua capacidade. De seguida, compactou-se com recurso a um pilão, aplicando 10 pancadas em movimento circular no sentido dos ponteiros do relógio. Depois deste procedimento, preencheu-se a totalidade do molde troncocónico e repetiu-se o procedimento de compactação. Finalmente, rasou-se a superfície do molde com uma régua removendo o excesso de argamassa.

Após todo este procedimento, retirou-se o molde cuidadosamente, evitando perturbações horizontais e procedeu-se à realização de 15 pancadas na mesa de espalhamento, ao ritmo de uma pancada por segundo. De seguida, utilizando uma craveira, mediu-se dois diâmetros ortogonais da argamassa que ficou espalhada na mesa (Figura 4.6 b), sendo o valor do espalhamento a média desses dois diâmetros.

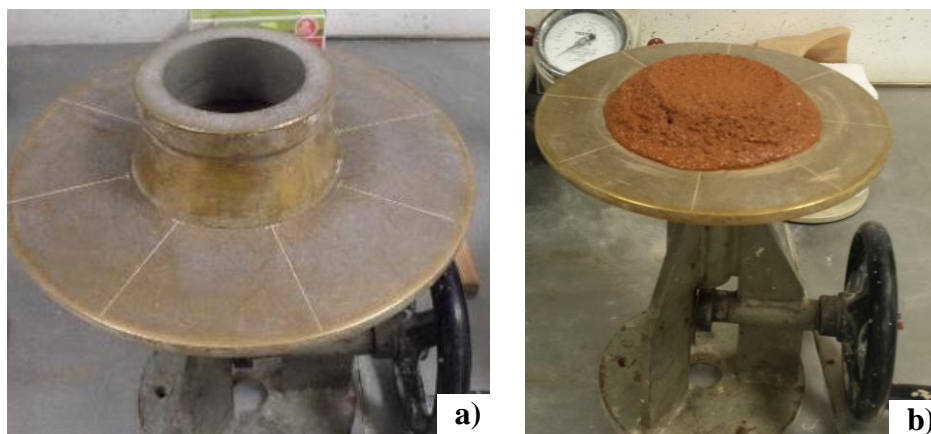


Figura 4.6 – Ensaio de consistência por espalhamento: a) Mesa de espalhamento; b) Após a aplicação das 15 pancadas.

4.5 Ensaios de caracterização de argamassas no estado endurecido

Após os ensaios aos materiais utilizados e os ensaios às argamassas no seu estado fresco, seguem-se os ensaios às argamassas no seu estado endurecido. Para isso, foram realizados diversos ensaios, a seguir apresentados.

Para a realização destes, houve que proceder à execução prévia de provetes prismáticos de 160 mm x 40 mm x 40 mm e provetes de 300 mm x 30 mm x 30 mm. Como referido, foram necessários 12 provetes de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm de cada família de argamassas, dos quais 6 são para realizar os ensaios aos 60 dias de idade e os restantes 6 são para os ensaios aos 90 dias de idade. Os provetes de 300 mm x 30 mm x 30 mm foram utilizados para avaliar a retração, que se manifesta imediatamente após secagem da argamassa, assim sendo apenas foram realizadas 3 amostras para cada família.

Para a execução destes provetes utilizou-se moldes metálicos prismáticos de dimensão 160 mm x 40 mm x 40 mm, sendo que cada molde resulta em 3 provetes. Procedeu-se à execução da argamassa, cuja relação água/material sólido (Anexo B) foi encontrado segundo o ensaio de espalhamento, por forma a cumprir um espalhamento com valores entre 160 mm e 176 mm. A argamassa foi colocada no molde metálico até metade da sua capacidade e compactou-se, aplicando 25 pancadas com um maço. Após este processo, encheu-se todo o molde (Figura 4.7 a), repetindo a compactação. Com recurso a uma régua, rasou-se o topo do molde removendo o excesso de argamassa. Deixou-se repousar durante 7 dias como se mostra na Figura 4.7 b) até proceder ao desmolde dos provetes (Figura 4.7 c), sendo depois colocados numa sala condicionada e controlada, à temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $55\pm 5\%$ (Figura 4.7 d).

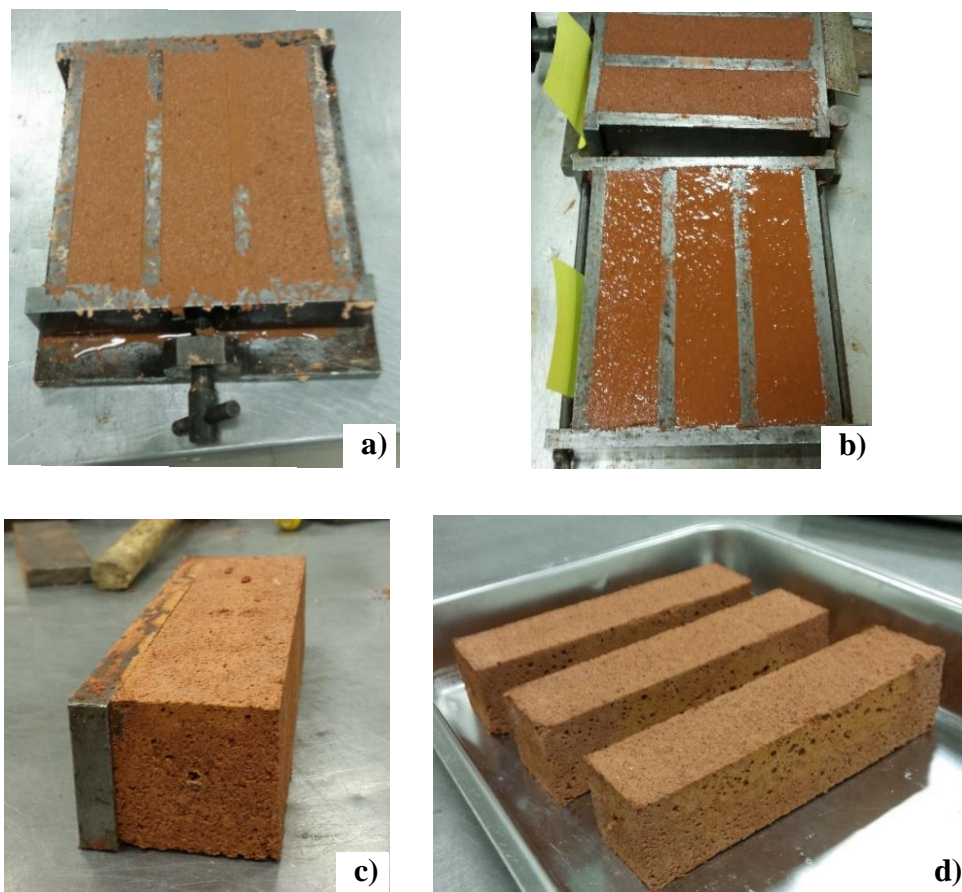


Figura 4.7 – Execução dos provetes: a) Molde completamente preenchido com argamassa; b) Secagem das argamassas durante 7 dias; c) Desmoldagem dos provetes; d) Provetes na sala de temperatura e humidade relativa condicionada.

4.5.1 Massa volúmica aparente

O ensaio de massa volúmica inicia-se com os provetes na estufa a uma temperatura de 110°C. Depois destes atingirem massa constante, deixaram-se arrefecer até à temperatura ambiente e posteriormente foi registada a sua massa e as respetivas medições nas três dimensões ortogonais do provete. Com as dimensões referidas, obteve-se o volume aparente de cada provete. O quociente entre a massa do provete e o seu volume aparente resulta na massa volúmica aparente dos provetes. Este ensaio foi realizado aos 60 e aos 90 dias de idade.

4.5.2 Resistência à tração por flexão e compressão

O ensaio de resistência à tração por flexão e compressão teve como objetivo caracterizar cada família de argamassa segundo a sua resistência mecânica, sendo este ensaio realizado segundo a norma EN 1015-11:1999.

Primeiramente decorreu o ensaio de resistência à flexão. Este ensaio decorreu numa prensa mecânica, apoiando-se um provete prismático de 160 mm x 40 mm x 40 mm sobre dois rolos a distância normalizada. De seguida, num ponto a meio do provete, aplicou-se uma carga a velocidade constante.

A norma que regulamenta este ensaio especifica que a velocidade a que a carga é aplicada deve:

- 1) permitir a rotura do provete entre os 30 e os 90 segundos;
- 2) deve ser entre 10 e 50 N/s.

No entanto, quando se aplicou uma velocidade de aplicação da carga de 10 N/s, a rotura acontecia fora do intervalo de tempo indicado, por isso, aplicou-se uma velocidade de carga que respeitasse esse mesmo intervalo. Assim, a velocidade de carga foi de 0,7 mm/s.

Após a rotura de cada provete, registou-se a força que deu origem a essa mesma rotura, obtendo-se este resultado através da leitura do *software* associado ao equipamento utilizado, a prensa mecânica (Figura 4.8 a). Recorrendo à expressão [3.7], calculou-se a resistência à flexão:

$$Rf = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \times h^2} \text{ [MPa]} [3.7]$$

Sendo:

Rf – resistência à tração por flexão [N/mm²/MPa];

F – força necessária para a rotura do provete [N];

L – distância entre os dois rolos de apoio do provete [mm];

b – largura do provete [mm];

h – altura do provete [mm].

Terminado o ensaio de tração por flexão, os três provetes de cada família ficaram divididos em metades, ou seja, resultaram 6 amostras de cada família, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade. Assim, deu-se início ao ensaio de resistência à compressão. Sobre cada amostra, tendo em conta que a área de compressão é de, aproximadamente, 40x40 mm, foi aplicada uma carga à velocidade constante de 1,2 mm/s (Figura 4.8 b), resultando numa rotura dentro do intervalo de tempo entre 30 e 90 segundos.

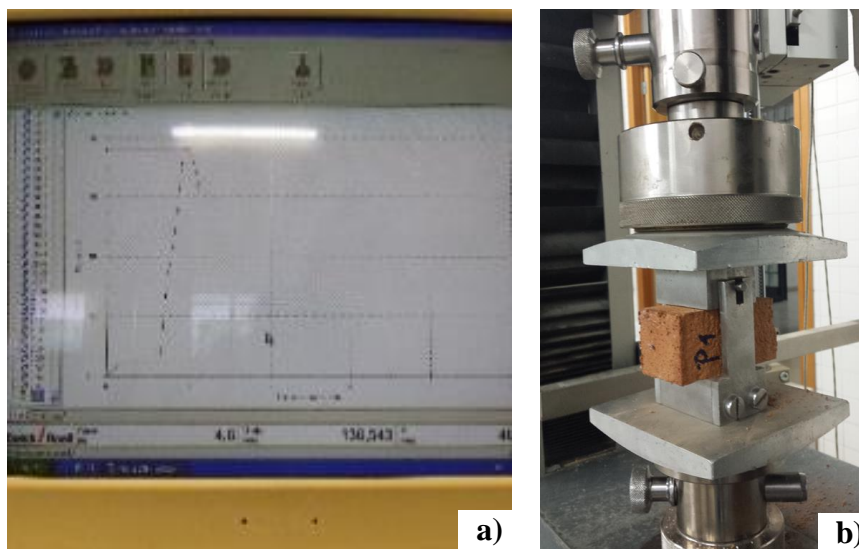


Figura 4.8 – Ensaio de resistência: a) Leitura de resultados através do software no ensaio de resistência à tração por flexão; b) Aplicação de carga na prensa no ensaio de resistência à compressão.

4.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado em provetes de 160 mm x 40 mm x 40 mm utilizando o aparelho *TICO Ultrachall-Meter* segundo a norma ASTM C597-09 (ASTM, 2009) de modo a determinar a velocidade das ondas ultrassónicas. No entanto, há que mencionar que a referida norma é específica para provetes em betão, portanto este ensaio foi realizado com cuidado e reserva relativamente aos resultados obtidos, pois os provetes ensaiados neste trabalho são com terra em vez de betão.

Previamente, antes de se dar início ao ensaio, calibrou-se o equipamento com recurso a um cilindro metálico normalizado. Para isso, encostaram-se dois transdutores de 54 Hz nos topos do cilindro, lubrificados com uma camada de massa de contacto (vaselina sólida, neste caso) até que a transmissão de ondas entre os transdutores atingisse o tempo pré-definido para o cilindro normalizado em questão, ou seja 20,1 μ s.

Após este processo prévio, deu-se início ao ensaio nos provetes em estudo. Lubrificaram-se os topos dos provetes com a massa de contacto, neste caso, vaselina sólida e encostaram-se os dois transdutores. Iniciou-se a passagem de ondas ultrassónicas e registou-se o valor da velocidade de propagação das ondas (m/s) bem como o tempo de transmissão de ondas entre os dois transdutores (μ s).

O módulo de elasticidade dinâmico obtém-se segundo a expressão [3.9]:

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1+\nu)}{(1+\nu)} [3.9]$$

Sendo:

E_d – módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

ρ – massa volúmica aparente do provete ensaiado [kg/m^3], determinado pelo ensaio descrito no ponto 4.5.1;

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

ν – coeficiente de Poisson. Para argamassas com terra este valor é de 0,2 (Gomes, 2013).

Chama-se a atenção para o facto da referida norma mencionar que os provetes devem estar saturados, uma vez que assim a velocidade das ondas é menos sensível a alterações e é 5% mais rápida quando o betão está completamente seco. No entanto, como neste trabalho, os provetes são com terra, estes foram ensaiados completamente secos.

4.5.4 Retração linear e volumétrica

A retração linear e volumétrica foi ensaiada em provetes de 300 mm x 30 mm x 30 mm, segundo o procedimento de Keable (1996). Aplicou-se previamente óleo descofrante nos moldes de madeira com as dimensões já referidas.

Após a execução da argamassa, encheu-se o molde numa primeira camada e procedeu-se à sua compactação dando 25 pancadas com um maço normalizado. Depois, encheu-se totalmente o molde, compactou-se novamente e rasou-se a sua superfície com recurso a uma régua, retirando o excesso de argamassa (Figura 4.9 a). Os moldes preenchidos ficaram em repouso durante 14 dias numa sala condicionada e controlada, a uma temperatura de $20\pm 3^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $55\pm 5\%$. Decorrido esse tempo, desmoldaram-se os provetes (Figura 4.9 b) e efetuaram-se as seguintes medições:

- comprimento do provete;
- altura e largura do provete em 4 pontos igualmente espaçados (Figura 4.9 c).

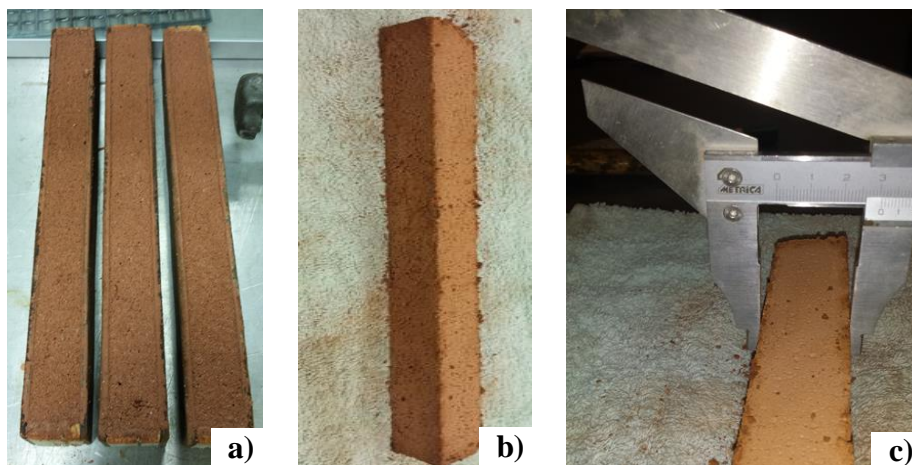


Figura 4.9 – Ensaio de retração linear e volumétrica: a) Moldes encheidos e em repouso; b) Desmoldagem do provete; c) Medição da altura do provete.

A retração linear obtém-se segundo a expressão [3.10] e a retração volumétrica obtém-se segundo a expressão [3.11]:

$$L_L = \frac{C_m - C_p}{C_m} \times 100 \text{ [%]} \quad [3.10]$$

Sendo:

L_L – retração linear [%];

C_m – comprimento do molde [cm];

C_p – comprimento do provete [cm].

$$L_V = \frac{V_m - V_p}{V_m} \times 100 \text{ [%]} \quad [3.11]$$

Sendo:

L_V – retração volumétrica [%];

V_m – volume do molde [cm³];

V_p – volume do provete [cm³].

4.5.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem por objetivo determinar o coeficiente de capilaridade e a velocidade de absorção de água das cinco famílias de argamassas em estudo. Este ensaio é realizado com os provetes de 160 mm x 40 mm x 40 mm, segundo a norma *Test N°II.6 “Water Absorption Coefficient”*, com algumas alterações à mesma.

Antes de iniciar o ensaio, levaram-se os provetes à estufa a 110°C até atingir massa constante. De seguida, deixaram-se arrefecer até à temperatura ambiente e foi registado a

sua massa. As quatro faces laterais dos provetes foram impermeabilizadas com recurso a uma mistura, em partes iguais em massa, de cera de abelha e resina de pez de louro (Figura 4.10 a). Esta impermeabilização teve como objetivo garantir que a absorção de água se dava apenas pela base do provete. Para que o provete não se desagregasse em contacto com a água, perdendo assim material, na base de cada provete colocou-se um tecido de algodão (Figura 4.10 b), este passo não se encontra na norma mas era imprescindível visto este tipo de argamassas serem muito friáveis em contacto com a água.

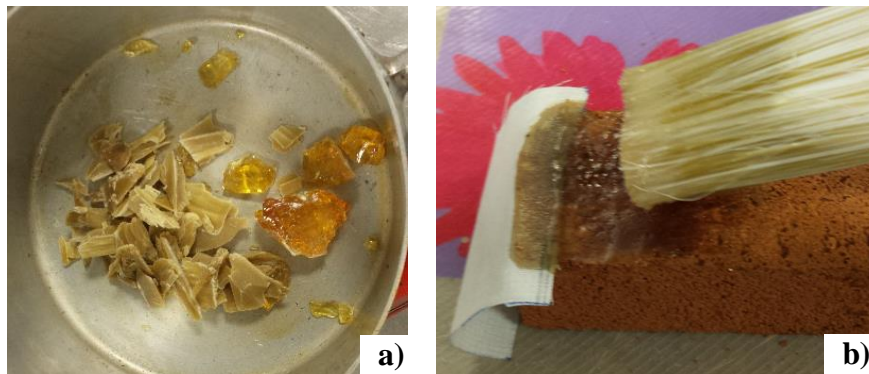


Figura 4.10 – Impermeabilização dos provetes: a) Execução da mistura de impermeabilização (cera de abelha e resina pez de louro); Execução da impermeabilização lateral do provete.

Após este procedimento, depositou-se uma rede dentro de uma tina. Esta rede serviu de base para assentar os provetes durante o ensaio de modo a garantir que a absorção de água pelo provete fosse livre.

De seguida, colocou-se os provetes impermeabilizados dentro da tina e sobre a rede (Figura 4.11 a). Foi introduzida água até se conseguir uma altura de água entre 2 a 4 mm acima da base do provete. A tina foi fechada com uma tampa de vidro para que o ambiente se tornasse saturado, evitando também a evaporação da água (Figura 4.11 b).

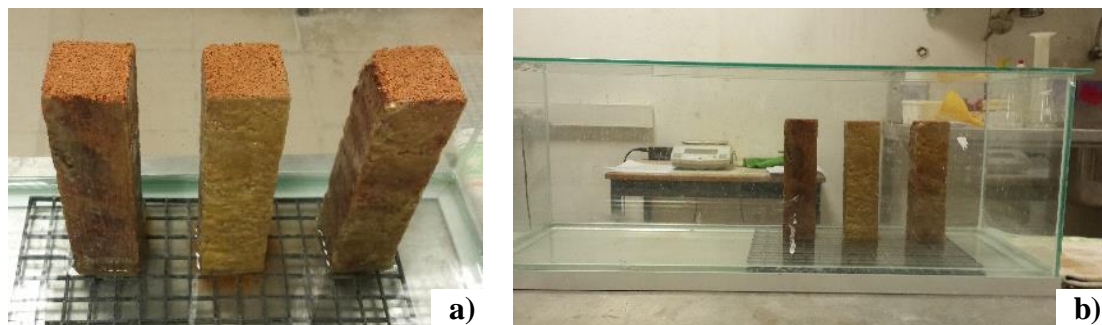


Figura 4.11 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Colocação dos provetes sobre a rede; b) Provetes no interior da tina em ambiente saturado.

A partir deste momento, os provetes foram pesados em intervalos de tempo estabelecidos previamente.

A água absorvida por unidade de área obtém-se segundo a expressão [3.12]:

$$W_i = \frac{m_i - m_{seco}}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]} \text{ [3.12]}$$

Sendo:

W_i – água absorvida por unidade de área no instante i [kg/m²];

m_i – massa do provete no instante i [kg];

m_{seco} – massa do provete seco [kg];

S – área da base do provete [m²].

A água absorvida por unidade de área em função da raiz do tempo resulta na curva de absorção capilar de onde se pode retirar o coeficiente de capilaridade, que corresponde ao declive do primeiro troço linear da curva (Figura 2.10).

4.5.6 Secagem

O ensaio de secagem realizou-se segundo o procedimento *Test N°II.5 “Evaporation Curve”* e foi realizado nos provetes provenientes do ensaio de absorção de água por capilaridade após estes alcançarem a sua saturação.

Assim, terminado o ensaio de absorção de água por capilaridade, envolveu-se a base de cada um do provete - a face por onde ocorreu a absorção de água - com película aderente. Deste modo, garantiu-se que a secagem se efetuou unicamente pela face superior do provete, numa única direção.

Antes de se colocar os provetes numa sala condicionada e controlada, à temperatura de 20±3°C e humidade relativa de 55±5% (Figura 4.12), realizou-se uma pesagem. A partir deste momento, as pesagens foram feitas periodicamente em intervalos de tempo estabelecidos previamente.

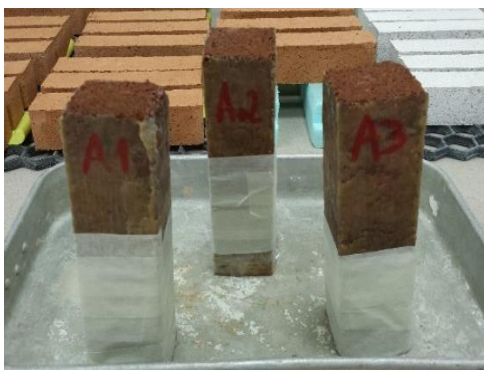


Figura 4.12 – Secagem dos provetes em sala com temperatura e humidade relativa condicionada

O teor de água obtém-se segundo a expressão [3.13]:

$$W_i = \frac{m_i - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 [\%] \quad [3.13]$$

Sendo:

W_i – teor de água [%];

m_i – massa do provete no instante i [kg];

m_{seco} – massa do provete seco [kg].

O teor de água em função do tempo resulta na curva de secagem. A taxa de secagem corresponde ao declive do primeiro troço linear da curva que relaciona a água absorvida por unidade de área em função do tempo (Figura 2.12).

O índice de secagem obtém-se segundo a explicação dada no ponto 2.5.2 recorrendo à expressão [2.1].

4.6 Ensaio de caracterização de argamassas aplicadas em suporte

Para caracterizar as cinco famílias de argamassa quando aplicadas em suporte, foram realizados diversos ensaios cujos procedimentos são apresentados resumidamente.

Para caracterizar as argamassas aplicadas em suporte foi necessário aplicá-las num suporte que, no caso deste trabalho, foi um tijolo furado com a dimensão de 290x190x70 mm, numa única camada com 1 cm de espessura.

Para isso, colocou-se o tijolo horizontalmente no pavimento e colocou-se à sua volta um molde fabricado manualmente em poliestireno extrudido, facilitando o trabalho e garantindo a espessura de 1 cm em toda a camada de reboco. De seguida, humedeceu-se a face do tijolo, evitando que exista absorção de água por parte deste assim que entrasse em contacto com a argamassa, prevenindo futuras situações de falta de aderência ou fendilhamento (Figura 4.13 a).

Com a argamassa já preparada, esta foi deixada cair de uma altura compreendida entre 1 a 1,50m, com auxílio de uma colher de pedreiro (Figura 4.13 b). Este procedimento teve como objetivo simular o movimento realizado em obra para executar o reboco de uma parede. De seguida, com uma régua rasou-se a superfície do molde em poliestireno extrudido, eliminando o excesso de argamassa e garantindo uma superfície lisa.

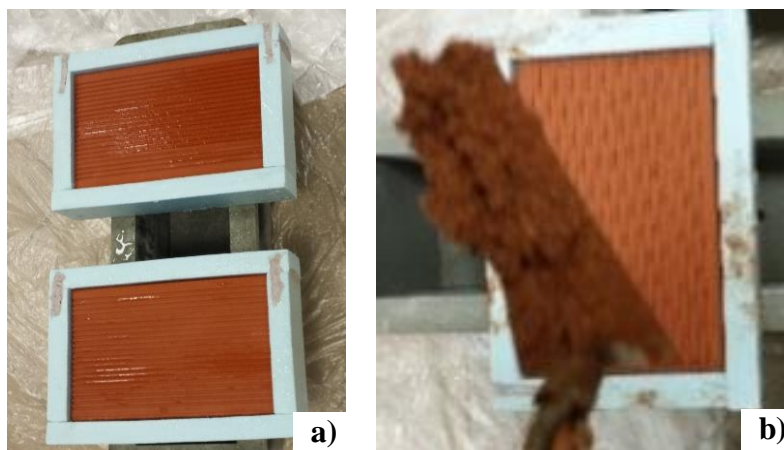


Figura 4.13 – Aplicação da massa no suporte: a) Colocação dos moldes em poliestireno extrudido e humedecimento dos tijolos; b) Aplicação da argamassa no tijolo em queda livre.

Decorrido um tempo de repouso de 30 minutos, onde se deu início ao processo de presa, retirou-se o molde com cuidado. Os provetes de tijolo e argamassa foram colocados numa sala controlada e condicionada, a uma temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $55\pm 5\%$.

4.6.1 Condutibilidade térmica

Este ensaio avaliou a condutibilidade térmica da argamassa aplicada no suporte de tijolo furado com $290\times 190\times 10$ mm, com uma espessura de 1 cm. O ensaio foi realizado segundo as instruções do equipamento *ISOMET Heat Transfer Analyzer*, modelo 2104 (Figura 4.14 a), numa sala com temperatura e humidade relativa condicionadas a $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

Este equipamento é dotado de uma sonda transmissora de calor e apresenta como resultado do ensaio o seu coeficiente λ (W/m.K) (Figura 4.14 b). É importante referir que este equipamento necessita de 1 cm de espessura de argamassa para ler adequadamente o coeficiente, sendo aconselhável espessuras superiores.

Para dar início ao ensaio, colocou-se o provete sobre num bloco de poliestireno extrudido, evitando que o calor se transmitisse ao aparelho (Figura 4.14 c). Este ensaio consistiu em duas medições, no entanto, caso se verificasse uma diferença superior a 5% entre elas, devia realizar-se uma terceira medição.

As medições foram feitas aleatoriamente, no entanto, escolheram-se pontos mais distantes possíveis, de modo a que calor transmitido na leitura anterior não tivesse influência na leitura seguinte.

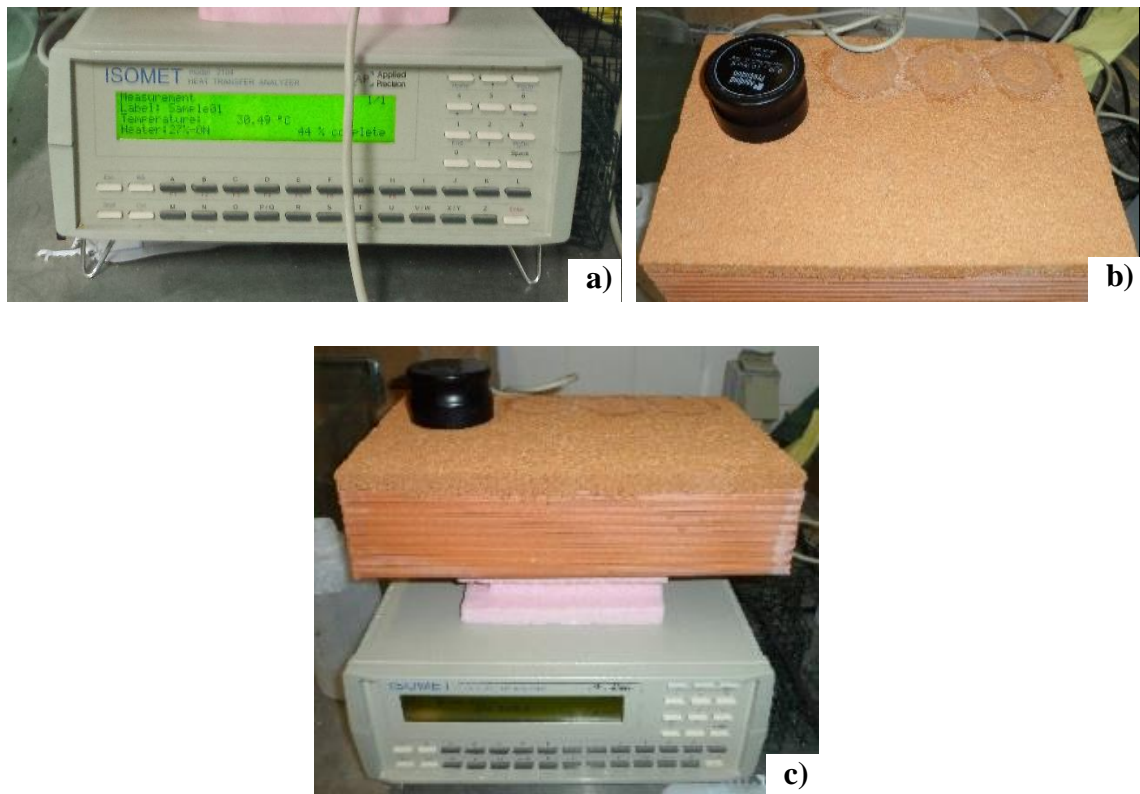


Figura 4.14 – Ensaio de condutibilidade térmica: a) Equipamento ISOMET Heat Transfer Analyser modelo 2104; b) Colocação da sonda transmissora de calor sobre o reboco; c) Ensaio a decorrer.

4.6.2 Dureza superficial

O ensaio de dureza superficial avalia a dureza superficial da argamassa aplicada no suporte de tijolo furado com 290x190x10 mm com 1 cm de espessura, de forma não destrutiva. Este procedimento foi realizado segundo a norma americana ASTM D2240-00 e o equipamento utilizado para este ensaio foi um durómetro Shore A, indicado para materiais macios como borrachas. Contudo, é comum utilizar-se também em argamassas. Este equipamento aplicou, em diversos pontos escolhidos aleatoriamente, uma carga padronizada, fazendo com que um pino penetrasse na argamassa e voltasse para o interior do equipamento, avaliando a capacidade da argamassa de se deixar penetrar.

O resultado é lido no visor analógico do durómetro, cuja escala está compreendida entre 0 a 100. Segundo Tavares (2009), conforme o valor registado pelo durómetro, é possível classificar a resistência e o tipo de perda de coesão, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classes de dureza do ensaio de dureza superficial, adaptado de Tavares (2009)

Valores de resistência Shore A	Classificação da resistência	Tipificação da anomalia
		Perda de coesão
>88	Muito dura	Bom estado de conservação
70-87	Normal	Bom estado de conservação
50-70	Moderada	Perda de coesão superficial (aprox. até 2 mm)
30-50	Fraca	Perda de coesão intermédia (<15 mm)
<30	Muito fraca	Perda de coesão em profundidade (>15 mm)

Acrescenta-se ainda que, como as rugosidades afetam negativamente os resultados deste ensaio, devido ao funcionamento do durómetro, decidiu-se ensaiar o reboco nos locais que apresentavam menor rugosidade, ou seja, o ensaio foi realizado sobre as faces laterais do reboco.

4.6.3 Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão tem como objetivo avaliar a resistência à abrasão da argamassa colocada no suporte de tijolo furado com dimensões de 290x190x10 mm e 1 cm de espessura, segundo a norma alemã DIN 18947 (NABau, 2013).

Colocou-se uma escova de dureza média perpendicularmente ao plano em que estava a argamassa aplicada no suporte (Figura 4.15 a), exercendo uma força de 19,6 N na superfície da argamassa. Assim que a escova entrou em contacto com a superfície do reboco (Figura 4.15 b), procedeu-se a 20 rotações da escova, aplicadas a um ritmo próximo de uma rotação por segundo (Figura 4.15 c).

Para avaliar a resistência à abrasão, pesou-se o conjunto tijolo e argamassa antes e depois do ensaio, visto que pesar somente o material desagregado torna-se praticamente impossível devido à perda de material durante o decorrer do ensaio. Assim, de forma mais expedita, obteve-se a massa do material destacado pela subtração das duas massas mencionadas.

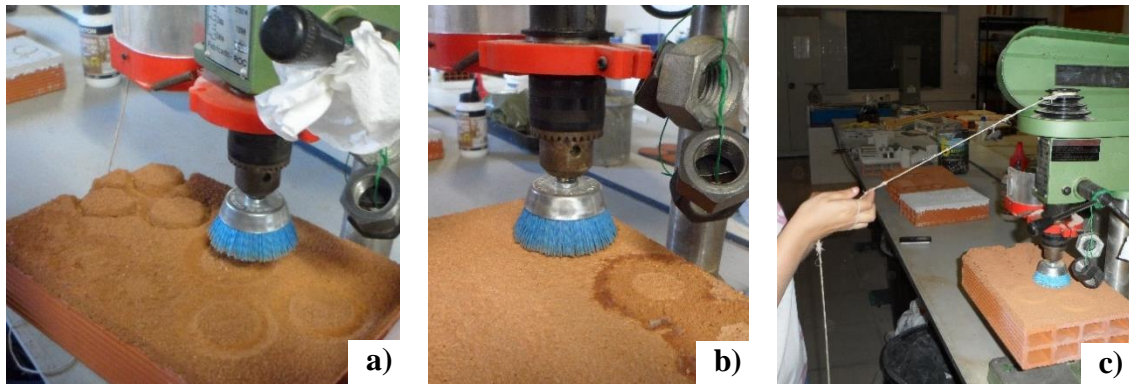


Figura 4.15 – Ensaio de resistência à abrasão: a) Colocação do tijolo no equipamento; b) Posicionamento da escova antes do início das rotações da escova; c) Aplicação da rotação da escova.

4.6.4 Aderência ao suporte

O ensaio de aderência ao suporte tem como objetivo determinar a força necessária ao arrancamento das argamassas aplicadas no suporte em tijolo furado com 290x190x10 mm com 1 cm de espessura, segundo a norma EN-1015-12:2000.

Previamente, com uma coroa dentada, fizeram-se 3 incisões circulares na argamassa (Figura 4.16 a), muito cuidadosamente e manualmente, auxiliadas com um aspirador, uma vez que as argamassas com terra se desagregam facilmente e o material desagregado aumentava a abrasão, favorecendo o arrancamento precoce da argamassa do seu suporte (Figura 4.16 b).

As incisões foram feitas até ficar visível o suporte, de modo a ficarem totalmente independentes do restante reboco.

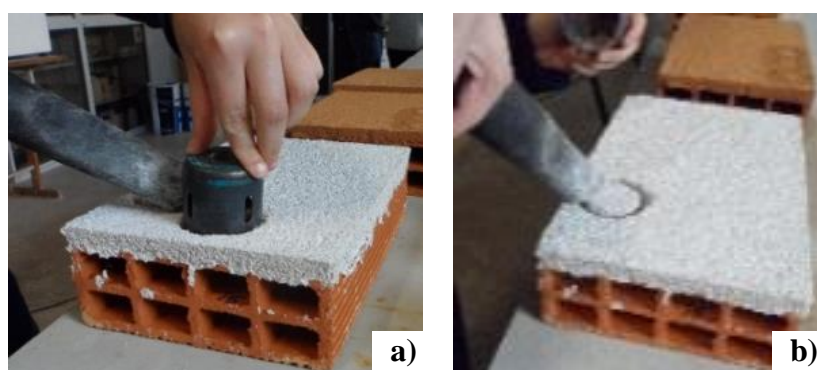


Figura 4.16 – Ensaio de aderência ao suporte: a) Realização das incisões com recurso a uma coroa circular dentada; b) Aspiração do material desagregado.

De seguida, misturaram-se os dois componentes de uma cola epoxídica bi-componente de secagem rápida até obter uma mistura de cor uniforme (Figura 4.17 a) e

colaram-se as pastilhas de arrancamento nas incisões circulares realizados no reboco (Figura 4.17 b).

Deixou-se repousar pelo menos 24 horas e deu-se início ao ensaio.

O equipamento utilizado para promover o arrancamento foi uma prensa adaptada, com uma carga com velocidade pré-definida (Figura 4.17 c), lendo-se o resultado da força de arrancamento no *software* associado à prensa.

Após se verificar o arrancamento, mediram-se 2 diâmetros ortogonais da argamassa que ficou aderida à pastilha (Figura 4.17 d).

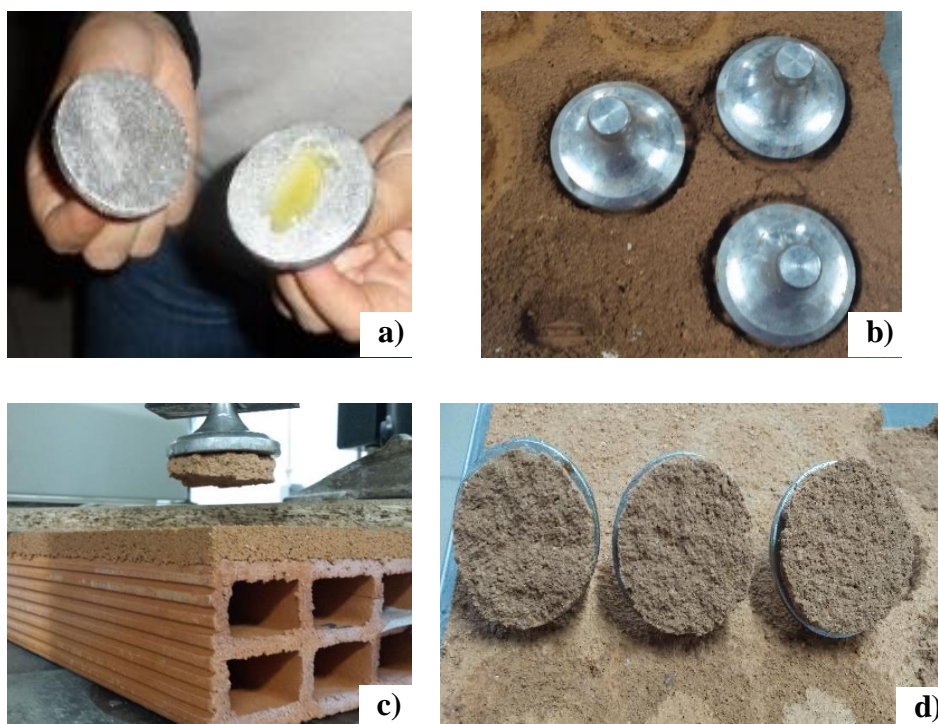


Figura 4.17 – Ensaio de aderência ao suporte: a) Mistura dos dois componentes da cola epóxi de secagem rápida; b) Colagem das pastilhas à argamassa; c) Arrancamento das pastilhas; d) Pastilhas arrancadas.

A rotura pode ser de dois tipos:

- a) coesiva – a rotura ocorre no interior da argamassa (a resistência desta é inferior à do suporte) ou a rotura ocorre no suporte (a resistência da argamassa é superior à do suporte);
- b) adesiva – a rotura ocorre na interface entre a argamassa e o suporte.

4.6.5 Esclerómetro pendular

O ensaio com o esclerómetro pendular é vulgarmente conhecido como martelo do Schmidt (Figura 4.18 a) e foi realizado para avaliar indiretamente a resistência à compressão da argamassa aplicada no suporte em tijolo furado com 290x190x10 mm com

1 cm de espessura em função da sua dureza superficial, segundo a norma ASTM C805-08.

Salienta-se o facto de que o ensaio não foi feito num paramento vertical, mas sim nos tijolos onde foi aplicada cada família de argamassas, individualmente.

Assim, para que o ensaio decorresse em condições semelhantes para todos os provetes, os tijolos foram encostados a uma parede de betão armado, recorrendo a um grampo para garantir o seu suporte (Figura 4.18 b).

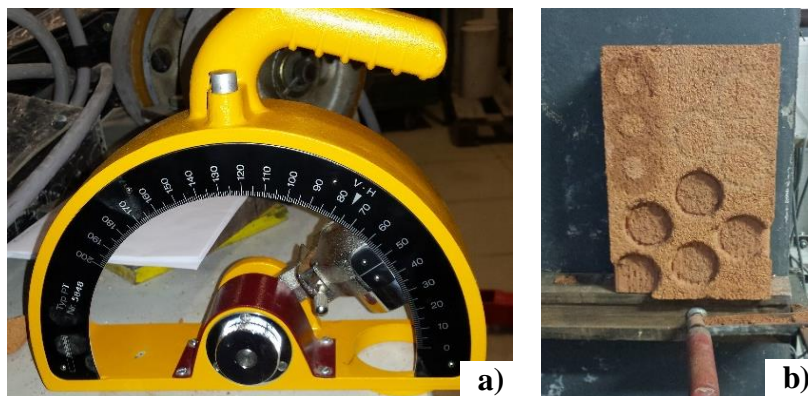


Figura 4.18 – Ensaio do esclerómetro pendular: a) Esclerómetro pendular; b) Tijolo encostado a parede resistente.

De seguida, encostou-se o esclerómetro à argamassa aplicada no suporte e pressionou-se o botão que liberta uma massa pendular (Figura 4.19 a). Essa massa fez um movimento de 180° até alcançar o reboco, o que resultou num ressalto do mesmo pêndulo até este ficar em repouso, registando-se o ângulo de ressalto obtido (Figura 4.19 b).

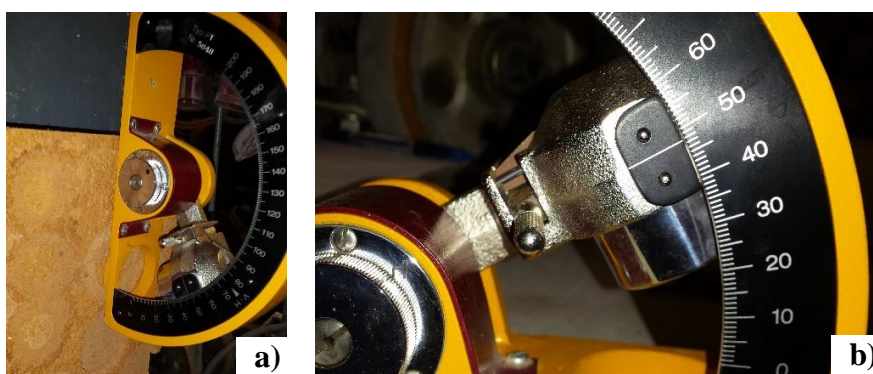


Figura 4.19 – Ensaio de esclerómetro pendular: a) Início do ensaio; b) Leitura do ângulo de ressalto.

É de salientar que todos os ensaios foram igualmente realizados sobre uma zona oca do tijolo, evitando influenciar os resultados, atribuindo uma maior resistência ao reboco que afinal provinha das zonas mais resistentes do tijolo.

O ângulo de ressalto corresponde ao índice esclerométrico sendo que, quanto mais baixo é este angulo, mais baixa é a resistência à compressão da argamassa.

Tavares (2009) classifica as classes de dureza e de estado de conservação segundo intervalos de valores obtidos como resultado deste ensaio. Essa classificação segue abaixo na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Classes de resistência, perda de coesão e perda de aderência do ensaio de esclerómetro pendular, adaptado de Tavares (2009)

Ângulo de ressalto	Classificação da resistência	Perda de coesão	Perda de aderência
>75	Muito dura	Bom estado de conservação	Bom estado de conservação
55-77	Dura	Bom estado de conservação	Bom estado de conservação
40-55	Normal	Bom estado de conservação	Bom estado de conservação
30-40	Moderada	Perda de coesão superficial (aprox. até 2 mm)	Perda de aderência com pouca profundidade
20-30	Fraca	Perda de coesão intermédia (<15 mm)	Perda de aderência intermédia
<20	Muito fraca	Perda de coesão em profundidade (>15 mm)	Perda de aderência com grande profundidade

4.6.6 Absorção de água sob baixa pressão

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão é vulgarmente conhecido como ensaio dos tubos de Karsten e teve como objetivo avaliar a permeabilidade de uma argamassa aplicada em suporte em tijolo furado com 290 mm x 190 mm x 10 mm com 1 cm de espessura à água, segundo a norma EN 16302:2013.

Assim, antes da realização do ensaio, foram colocados 3 tubos de Karsten graduados até 4 ml na argamassa, selados com silicone sanitário (Figura 4.20 a).

Decorrido o tempo de secagem, com um mínimo de 24 horas, deu-se início ao ensaio. Assim, encheu-se o tubo graduado com água até ao nível zero, começando a contar o tempo com recurso a um cronómetro.

Segundo a norma referida, deve-se efetuar medições com uma periodicidade entre 10 a 60 segundos, consoante a porosidade do material a ensaiar. Neste caso, decidiu-se que as medições seriam efetuadas de 10 em 10 segundos (Figura 4.20 b). Além destas medições, registou-se também o tempo de demorou a absorção de 4ml de água. Terminado o ensaio, retiraram-se os tubos de Karsten para promover a secagem da humidade do reboco (Figura 4.20 c).

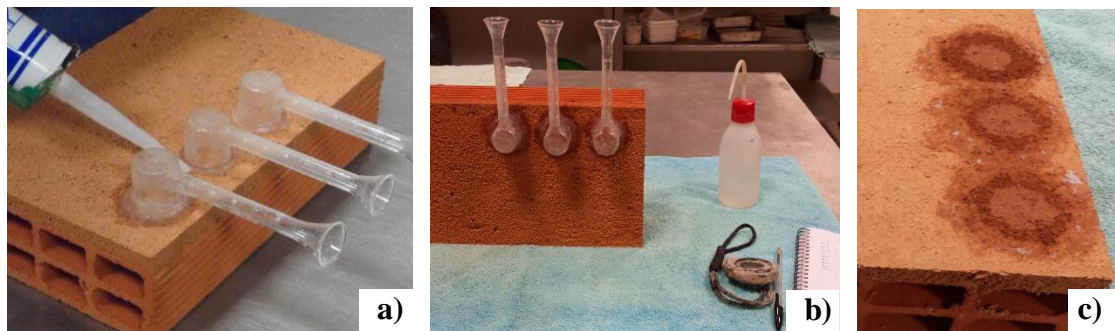


Figura 4.20 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão: a) Colagem dos tubos de Karsten na argamassa com silicone sanitário; b) Realização das leituras periódicas; c) Término do ensaio e remoção dos tubos de Karsten.

5. Apresentação e discussão de resultados

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante toda a campanha experimental, recorrendo a tabelas e figuras. Deste modo, será possível caracterizar as cinco famílias de argamassas em estudo no seu estado fresco, estado endurecido e após aplicadas no suporte.

A fim de avaliar a evolução das características das argamassas com o tempo, os resultados são apresentados, simultaneamente, para uma idade de 60 e 90 dias de idade.

Comparam-se ainda os resultados obtidos com os resultados de outros autores, de modo a retirar conclusões adicionais, destacando-se Bravo (2017) que desenvolveu um estudo semelhante, caracterizando também cinco famílias de argamassas de traço 1:4 (terra:areia), adicionando ou substituindo a mesma de percentagem de cal aérea referida neste trabalho, recorrendo aos mesmos procedimentos experimentais aqui descritos, e analisando o resultado dos ensaios nas argamassas aos 60 e 90 dias de idade. Para a execução das argamassas, Bravo (2017) utilizou apenas uma terra diferente, que no seu caso foi a terra-padrão descrita em Gomes (2013).

5.2 Ensaios no estado fresco

Após ensaiar as argamassas no seu estado fresco foi possível caracterizá-las segundo diversos parâmetros. A relação água/material sólido foi determinada de maneira a obter o espalhamento que traduz uma trabalhabilidade ideal (ponto 4.4.3), o que influenciou todos os outros parâmetros analisados.

Resumidamente, o Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados.

Tabela 5.1 – Características das argamassas no seu estado fresco

Família	Relação água/material sólido (%)	Massa volúmica (kg/m ³)		Teor vazios (%)		Espalhamento (mm)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
PdAr	19	1933,5	8,6	6,0	1,3	16,9	0,3
PdAr+25C	18	1947,9	7,1	5,7	2,1	16,2	0,1
25C_PdAr	18	1929,2	6,4	5,6	0,8	16,3	0,1
PdAr_25C	18	1932,7	15,0	4,9	0,6	16,7	0,5
CAr	20	1925,6	5,4	5,6	1,5	17,0	0,4

5.2.1 Massa volúmica

Na Figura 5.1 apresenta-se graficamente os resultados da massa volúmica das argamassas no estado fresco.

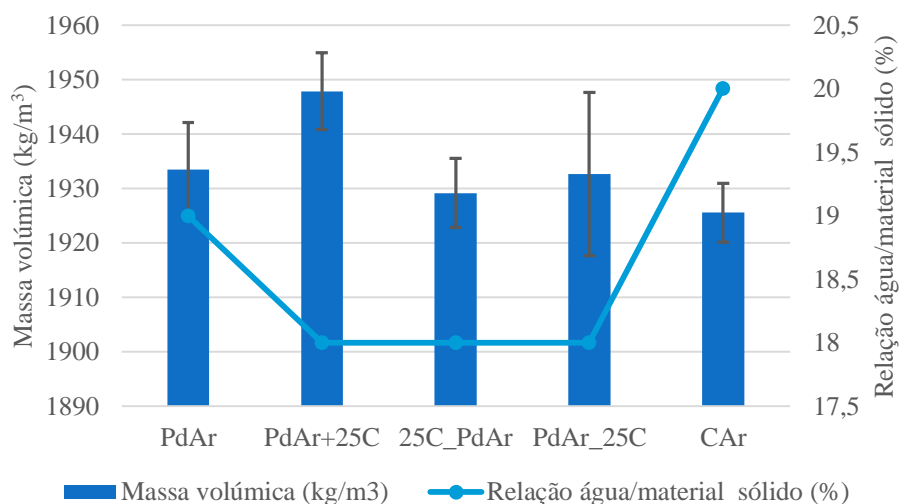


Figura 5.1 – Resultados do ensaio de massa volúmica das argamassas no estado fresco

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.1 e na Figura 5.1, conclui-se que a família PdAr+25C é aquela que apresenta maior massa volúmica, podendo ser justificável com o facto de esta argamassa possuir maior quantidade de material sólido, uma vez que se adicionou 25% da massa de argila em cal. No entanto, a família PdAr_25C possui o maior desvio padrão, destacando-se das restantes famílias, o que revela a possibilidade de existência de algum erro experimental.

Observa-se também que a família com menor massa volúmica e, simultaneamente, menor desvio padrão é a família CAr, o que é justificável pelo facto da cal aérea hidratada ser o material com menor baridade.

Excetuando a família PdAr+25C, todas as outras famílias apresentam valores semelhantes para a massa volúmica no estado fresco, uma vez que todas elas possuem massas de material sólido semelhantes (quando se retirou 25% da massa de argila à própria argila ou à areia, substituiu-se pelo mesmo valor de massa de cal).

Comparando com os resultados de Bravo (2017), conclui-se que os valores obtidos são muito idênticos, uma vez que as baridades das duas argilas são semelhantes (a baridade da terra-padrão é de 1130,36 kg/m³ e a baridade da argila PD é de 1108,11 kg/m³). Assim, este autor chegou às mesmas conclusões aqui apresentadas.

Observando o trabalho realizado por Gomes (2013), esta autora utilizou a mesma terra, a argila PD, para a execução de uma argamassa de traço 1:3 (terra:areia). O resultado

da massa volúmica no estado fresco para esta argamassa foi de $2000,1 \pm 1,0 \text{ kg/m}^3$, que se pode comparar com a argamassa PdAr do presente trabalho, concluindo-se, assim, que a argamassa executada por Gomes (2013) apresenta um valor um pouco superior. Seria de esperar que a massa volúmica obtida pela autora fosse inferior à massa volúmica obtida neste trabalho, visto que a areia é o material com maior baridade e a referida autora utilizou um traço 1:3, que utiliza menos areia do que um traço 1:4. No entanto, Gomes (2013) apresenta uma relação água/material sólido de 20% enquanto no presente trabalho, essa mesma relação foi de 19%.

Por sua vez, Santos (2014) obteve valores na ordem dos 2000 kg/m^3 para argamassas formuladas em laboratório, mais especificamente as argamassas de traço 1:3 (terra: areia grossa) e 1:3 (terra: areia fina), o que é relativamente aproximado dos valores obtidos no presente trabalho. No entanto, deve mencionar-se que os materiais utilizados são diferentes, especialmente a terra que apresenta grande variação de características consoante o seu local de origem.

Segundo Mendonça (2007) e Martins (2008), estes executaram argamassas de cimento com um traço de 1:3 e 2:7 (cimento:areia), respetivamente, apresentando massas volúmicas entre os 2000 e os 2200 kg/m^3 , sendo estes valores superiores aos das massas volúmicas obtidas para as argamassas com terra estudadas, o que se poderá dever às baridades mais altas dos materiais utilizados pelos autores.

5.2.2 Teor de vazios

Apresenta-se na Figura 5.2 os resultados do ensaio do teor de vazios para as cinco famílias estudadas.

Primeiramente, observando os resultados obtidos na Tabela 5.1 e na Figura 5.2, é visível que o teor de vazios é muito semelhante em todas as famílias, apresentando-se o menor valor na família PdAr_25C, o que é compreensível pois a areia é o material que maior granulometria apresenta e foi, em parte, substituída pela cal que é um material muito fino preenchendo mais finos na argamassa.

O maior valor de teor de vazios pertence à família PdAr, concluindo, assim, que a inclusão de cal teve influência na redução do teor de vazios, o que era expectável visto que a cal ocupou parte dos vazios existentes.

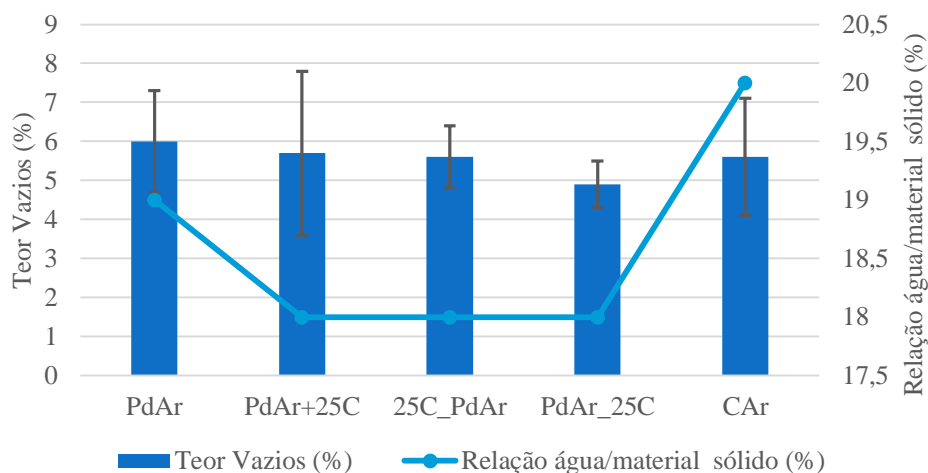


Figura 5.2 – Resultados no ensaio de teor de vazios das argamassas no estado fresco

Comparativamente a Bravo (2017), este obteve resultados para o teor de vazios semelhantes aos do presente trabalho. Este facto pode ser justificado pela semelhança das granulometrias das misturas sólidas das argamassas de ambos os trabalhos, uma vez que se empregou a mesma areia e a mesma cal na execução das argamassas e não existir uma grande discrepância entre as granulometrias das terras utilizadas em cada estudo.

Segundo Jamú (2013), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia), o teor de vazios obtido ronda os 4,2%, um resultado um pouco abaixo do obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, no entanto este resultado era esperado visto que existe maior quantidade de cal aérea num traço de 1:2 e este material ocupou parte dos vazios existentes.

Relativamente às argamassas de cimento, Mendonça (2007) estudou uma argamassa de traço de 1:3 (cimento: areia) e Martins (2008) estudou uma argamassa de traços de 2:7 (cimento: areia), obtendo como resultados 8% e 10,9%, respetivamente. Assim, concluiu-se que o teor de vazios das argamassas de cimento são um pouco superiores ao teor de vazios das argamassas com terra, no entanto, há que ressaltar que existem diversos fatores a condicionar o valor do teor de vazios, sendo a granulometria do agregado um deles.

5.2.3 Espalhamento

Os resultados do ensaio ao espalhamento para as cinco famílias de argamassas são apresentados na Figura 5.3.

É de lembrar que segundo Gomes (2013), a trabalhabilidade ideal para uma argamassa ocorre quando o seu espalhamento está compreendido entre 160 e 176 mm, tendo sido a relação água/material sólido determinada de modo a garantir esta condição.

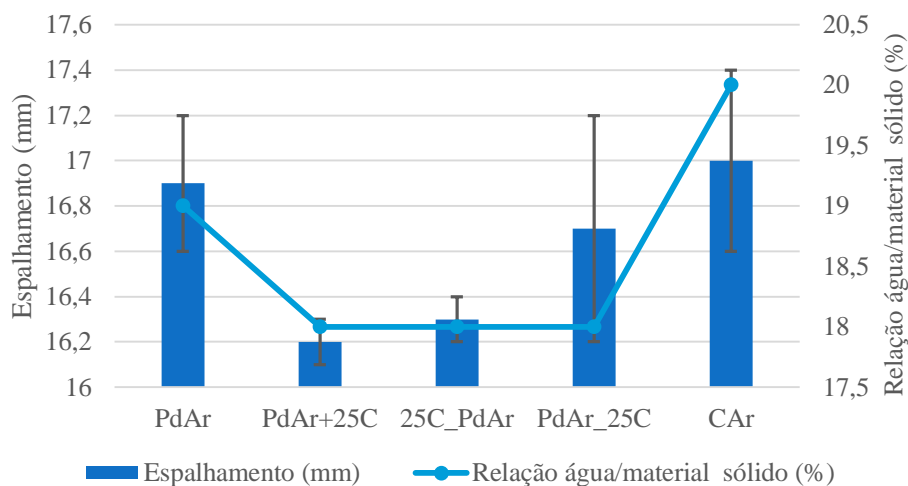


Figura 5.3 – Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas no estado fresco

Assim, observando os resultados obtidos na Tabela 5.1 e na Figura 5.3, é visível que a argamassa CAr é aquela que apresenta maior espalhamento, seguida da argamassa PdAr, o que coincide com as argamassas que apresentam maior relação água/material sólido.

Relativamente à inclusão de cal, verifica-se que as famílias PdAr+25C, 25C_PdAr e PdAr_25C, onde foi incluída cal aérea à mistura de areia e terra, os valores dos espalhamentos obtidos diminuíram. No entanto, não se pode afirmar que estes resultados se devam exclusivamente à inclusão de cal, pois a relação água/material sólido não é igual. O que se pode afirmar é que essas três argamassas apresentam uma relação água/material sólido mais baixa e de valores iguais, e, conseqüentemente, necessitam de menor quantidade de água para garantir um espalhamento dentro do intervalo mencionado.

É ainda observável que, para nenhuma das argamassas, o valor médio com o valor do desvio padrão sai fora do intervalo 160-176 mm.

Comparativamente aos resultados obtidos por Bravo (2017), a argamassa que apresenta maior espalhamento é, também, a argamassa de cal aérea, no entanto, este autor conseguiu concluir que a adição de cal aumentou o espalhamento. Esta conclusão foi possível visto que na família onde se adicionou 25% da massa de cal à mistura de terra e areia, comparativamente com a família de terra e areia unicamente, o espalhamento

diminuiu, mas a relação água/material sólido é igual. Relativamente às outras famílias, o autor também verificou que diminuindo a relação água/material sólido, o espalhamento também diminuiu.

Gomes (2013), para a sua argamassa de traço 1:3 (terra:areia) utilizando a argila PD, obteve um espalhamento de 177 mm e uma relação água/material sólido de 20%. No presente trabalho, a argamassa mais comparável é a argamassa PdAr (argamassa de traço 1:4 (terra:areia) sem a inclusão de cal) que apresenta uma relação água/material sólido de 19% e um espalhamento de 169 mm. Assim, como seria de esperar, conclui-se que quanto maior é a percentagem de terra na mistura sólida da argamassa, maior é a necessidade de adicionar mais água e, conseqüentemente, maior será o espalhamento.

5.3 Ensaio no estado endurecido

De forma a caracterizar o comportamento mecânico, físico e hídrico das cinco famílias de argamassas no seu estado endurecido, procedeu-se a diversos ensaios cujos resultados são apresentados nas Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4.

Tabela 5.2 – Características mecânicas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Resistência à tração por flexão (MPa)				Resistência à compressão (MPa)			
	60 dias		90 dias		60 dias		90 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
PdAr	0,14	0,01	0,12	0,04	0,49	0,03	0,37	0,09
PdAr+25C	0,23	0,02	0,22	0,04	0,54	0	0,45	0,02
25C_PdAr	0,22	0,02	0,21	0,02	0,53	0,03	0,41	0,03
PdAr_25C	0,25	0,25	0,22	0	0,57	0,57	0,44	0,09
CAr	0,15	0,01	0,21	0,01	0,49	0,08	0,30	0,01

Tabela 5.3 – Características mecânicas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Massa volúmica aparente (kg/m ³)				Módulo elasticidade Dinâmico				Retração linear e volumétrica			
	60 dias		90 dias		60 dias		90 dias		Linear		Volumétrica	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
PdAr	1643,12	9,51	1645,91	2,59	1435,00	7,07	1430,00	14,14	0	0	5,10	0,30
PdAr+25C	1671,49	14,31	1684,20	4,34	1460,00	10,00	1423,33	5,77	0	0	0,92	0,32
25C_PdAr	1708,29	17,76	1711,69	32,81	1406,67	32,15	1586,67	5,77	0	0	2,94	1,27
PdAr_25C	1682,16	11,39	1711,30	6,10	1476,67	5,77	1576,67	20,82	0	0	3,10	2,20
CAr	1611,61	6,32	1625,73	8,51	1280,00	10,00	1423,33	5,77	0	0	0,00	0,00

Tabela 5.4 – Características hídricas das argamassas no seu estado endurecido, aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$)		Taxa de secagem	
	60 dias	90 dias	60 dias	90 dias
PdAr	0,02	0,02	0,038	0,027
PdAr+25C	0,07	0,06	0,04	0,037
25C_PdAr	0,07	0,06	0,047	0,038
PdAr_25C	0,07	0,06	0,06	0,047
CAr	0,07	0,05	0,026	0,026

5.3.1 Massa volúmica aparente

Na Tabela 5.3 e na Figura 5.4 apresentam-se os resultados do ensaio de massa volúmica aparente, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, para provetes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm.

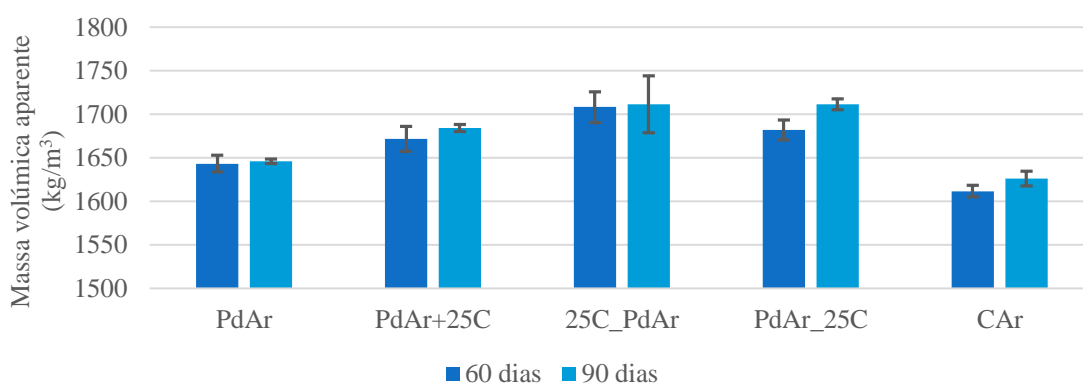


Figura 5.4 – Resultados do ensaio de massa volúmica aparente

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.3 e na Figura 5.4, verifica-se que a maior massa volúmica, aos 60 e aos 90 dias de idade, pertence à argamassa 25C_PdAr e a família com menor massa volúmica aparente é a argamassa CAr, justificável pelo facto de ser esta a argamassa com menor quantidade de material sólido. É também visível que em ambas as idades os resultados foram semelhantes.

Observando também a Tabela 5.1, chega-se à conclusão de que o valor da massa volúmica no estado fresco é cerca de 250 kg/m^3 superior ao valor da massa volúmica aparente no estado endurecido. Esta diferença de valores justifica-se com o peso exercido pela água no estado fresco, que não se manifesta no estado endurecido.

Comparando com os resultados obtidos por Gomes (2013), a massa volúmica aparente verificada numa argamassa de traço 1:3 (terra:areia), utilizando a mesma argila PD, é perto dos 1875 kg/m^3 . Este valor é um pouco superior ao registado no presente

trabalho para a argamassa PdAr, o que não seria de esperar visto que a autora utiliza menor quantidade do material com maior baridade, ou seja, a areia. Não se encontra motivos plausíveis para este resultado.

Bravo (2017), apresenta resultados na mesma gama de valores aos obtidos no presente trabalho, o que era expectável, visto que utilizou o mesmo traço na execução das suas argamassas e os mesmos materiais, excepto a terra. Ainda assim, a terra utilizada pelo autor tem uma baridade semelhante à terra PD empregue no presente trabalho. No que diz respeito à argamassa de cal aérea, igual à argamassa CAr deste estudo, o autor obteve valores semelhantes para a massa volúmica aparente aos 60 dias de idade, no entanto, aos 90 dias de idade, a argamassa de cal aérea de Bravo (2017) registou um aumento significativo, quando comparado com as outras argamassas.

Rodrigues (2004), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 (cal aérea:areia), aos 60 dias de idade, obteve uma massa volúmica aparente de 1720 kg/m^3 , ou seja, um valor mais elevado do que aquele que foi obtido no presente trabalho para a argamassa CAr. Tal como aconteceu com os resultados obtidos por Gomes (2013), não se encontra uma explicação para este resultado visto que, novamente, no presente trabalho utilizou-se maior quantidade do material com maior baridade, esperando-se que a baridade obtida neste estudo fosse superior à baridade obtida por Rodrigues (2004).

Já Jamú (2013), ao ensaiar à tração uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) aos 90 dias de idade, obteve um valor de 1595 kg/m^3 , valor este que é pouco mais baixo do que o obtido neste trabalho para a argamassa CAr, o que se justifica pelo facto do autor utilizar menor quantidade de areia devido ao traço da sua argamassa, sendo a areia o material com maior baridade, obtendo assim uma menor massa volúmica.

5.3.2 Resistência à tração por flexão

Na Tabela 5.2 e na Figura 5.5 apresenta-se os resultados da resistência à tração por flexão para cada família de argamassas, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade.

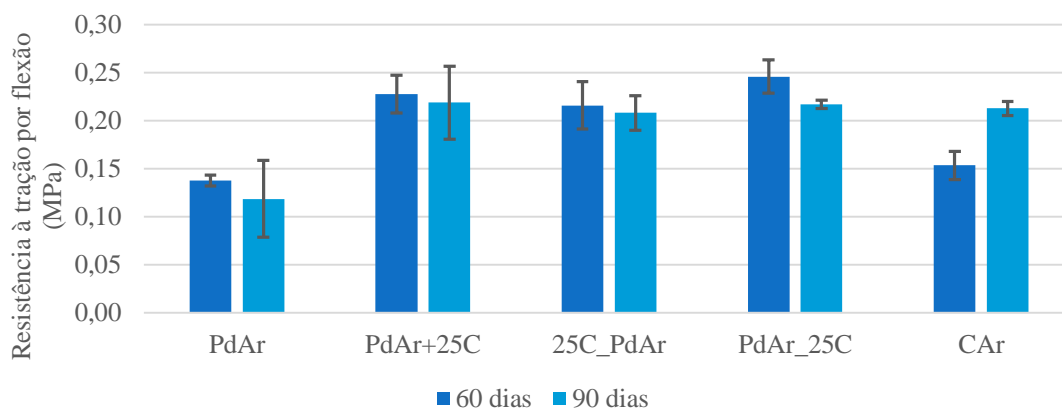


Figura 5.5 – Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.2 e na Figura 5.5, é visível que os resultados aos 60 e aos 90 dias de idade são muito semelhantes, o que se pode justificar com o facto da cal aumentar a sua resistência ao longo do tempo, mas muito devagar, portanto, a diferença de idades aplicadas no presente trabalho não é suficiente para retirar resultados conclusivos.

É também observável que a inclusão de cal contribuiu positivamente para o aumento da resistência à tração por flexão, aumentando a resistência à tração em todas as famílias. É de salientar que a família PdAr_25C é aquela que apresenta o melhor resultado, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, ou seja, quando se retirou parte da areia, que é um agregado, para substituir por cal aérea, que é um ligante, obteve-se o maior valor de resistência à tração, o que é espectável visto que os agregados não possuem tanta influência nas resistências mecânicas como os ligantes.

É notório que, aos 90 dias de idade, os valores das resistências são semelhantes para todas as famílias, exceto para argamassa PdAr, a única que não possui cal na sua constituição.

Comparativamente ao trabalho desenvolvido por Bravo (2017), não foi possível obter os mesmos resultados. Analisando os valores obtidos, verifica-se que aos 60 dias de idade, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho, mas o mesmo não se verifica aos 90 dias de idade. No seu trabalho, Bravo (2017) concluiu que as resistências à tração por flexão aumentavam com o decorrer do tempo, como era expectável e os melhores resultados observaram-se nas argamassas em que a terra ou a areia foram substituídas, em parte, pela cal aérea. No entanto, Bravo (2017) concluiu também que a inclusão de cal nas argamassas teve um efeito benéfico no aumento dos valores das resistências à tração por flexão e, tal como esperado, a sua argamassa de cal

aérea teve resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho, visto que as argamassas possuem o mesmo traço e foram executadas com os mesmos materiais.

Segundo Gomes (2013), a resistência à tração por flexão verificada numa argamassa de traço 1:3 (terra:areia), utilizando a mesma argila PD, apresenta valores de resistência perto dos 0,40 MPa. Este valor é consideravelmente superior ao valor obtido para a argamassa PdAr, o que seria de esperar, visto que a percentagem de terra utilizada pela autora é superior à percentagem de terra utilizada no presente trabalho, ou seja, a quantidade de ligante é maior. Quando se observa o efeito da inclusão de cal nas argamassas estudadas pela referida autora, ainda que formuladas com outra terra, verificou-se que as resistências diminuíram, contrariamente ao que se verificou neste estudo. Há que referir que a percentagem de cal utilizada pela autora é inferior à percentagem de cal utilizada no presente trabalho.

Jamú (2013), ao ensaiar à tração uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) aos 90 dias de idade, obteve um valor de 0,51 MPa e Rodrigues (2004), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 (cal aérea:areia) aos 60 dias de idade, obteve um valor de 0,33 MPa de resistência à tração, valores estes que são consideravelmente superiores ao resultado obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, na mesma idade. No entanto, as argamassas executadas pelos referidos autores utilizaram maior quantidade de cal aérea, sendo por isso expectável que os resultados fossem superiores.

Comparativamente aos valores de resistência à tração por flexão apresentados pelas argamassas de cimento, como seria de esperar, os valores obtidos são muito inferiores. Segundo Mendonça (2007), para uma argamassa de traço 1:3 (cimento: areia), o valor obtido para a resistência à tração por flexão é de 3,3 MPa e segundo Martins (2008), para uma argamassa de traço 2:5 (cimento areia), o valor obtido é de 4,5 MPa.

5.3.3 Resistência à compressão

Na Tabela 5.2 e na Figura 5.6 apresenta-se os resultados da resistência à tração por flexão de cada família de argamassas, aos 60 e aos 90 dias de idade.

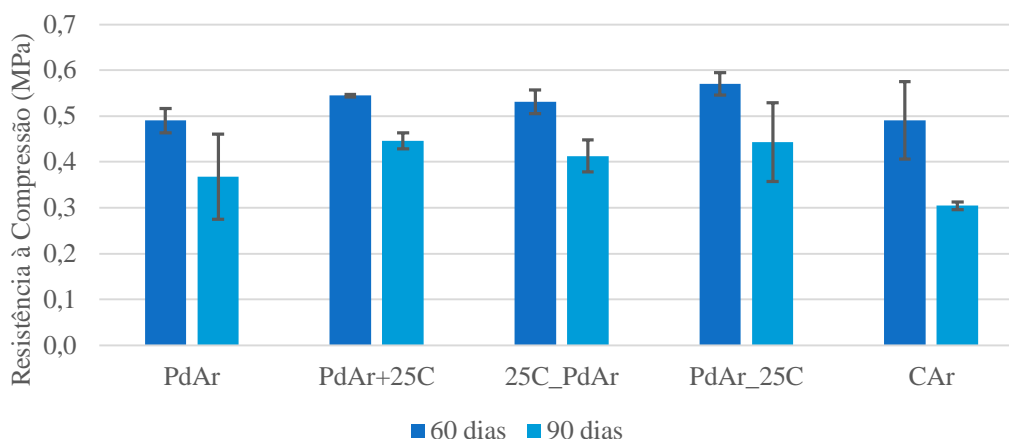


Figura 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.2 e na Figura 5.6, verifica-se que as resistências à compressão são muito superiores aos valores da resistência à flexão por tração, como seria de esperar.

Pode-se constatar como nos resultados obtidos para a resistência à tração por flexão, também na resistência à compressão os resultados diminuíram ao longo do tempo, mas neste ensaio de uma forma mais acentuada, apresentando os melhores resultados nas argamassas onde se incluiu cal aérea na mistura com terra e areia.

A argamassa com melhores resultados aos 60 dias de idade é, tal como se verificou no ensaio de resistência à tração, a PdAr_25C. No entanto, aos 90 dias de idade, tanto a argamassa PdAr+25C como a argamassa PdAr_25C possuem os valores mais elevados e muito próximos. É de salientar que na resistência à tração por flexão, verificaram-se os melhores resultados precisamente para estas famílias, aos 60 e 90 dias de idade. Este facto justifica-se, como já foi referido anteriormente na análise de resultados do ensaio de resistência à tração, pela maior quantidade de ligante na mistura sólida.

Assim, foi possível verificar que a inclusão de cal aérea teve um contributo positivo no aumento das resistências. Verificou-se ainda que, nas argamassas onde se adicionou ou substituiu cal aérea à mistura de areia e argila os valores de resistência aos 60 e aos 90 dias de idade são semelhantes entre si.

Comparando com os resultados obtidos por Bravo (2017), os resultados apresentados neste trabalho são ligeiramente inferiores e não foi possível chegar às mesmas conclusões visto o autor observou que a inclusão de cal aérea diminuiu os resultados da resistência à compressão e esta aumentou com o decorrer do tempo, ao contrário do observado neste trabalho. No que diz respeito à argamassa de cal aérea

executada pelo referido autor, os resultados deviam ser semelhantes aos resultados obtidos para a argamassa CAr, pelos motivos já referidos, mas isso não se verifica. Aos 60 dias de idade, o valor obtido por Bravo (2017) é ligeiramente superior e aumenta com a idade, o que não se verifica no presente estudo. Como não se encontra uma explicação para esta diferença de resultados, deveriam ter sido repetidos os ensaios para despistar eventuais erros.

No seu trabalho, Gomes (2013) para uma argamassa de traço 1:3 (argila:areia), executada com a argila PD, observou valores de resistência à tração próximos de 1 MPa, ou seja, o dobro do valor observado neste trabalho para a argamassa PdAr. Contudo, já seria de esperar que a autora obtivesse um resultado superior visto que utilizou uma maior quantidade de ligante, como se pode verificar pelo traço. Relativamente à influência da inclusão de cal, ainda que em argamassas formuladas com outro tipo de argila, a autora observou que os resultados da resistência à compressão diminuam bastante com a inclusão de cal aérea. Ainda segundo esta autora, a resistência à compressão da taipa não confinada é da ordem dos 0,50-4,00 MPa e para a taipa estabilizada é de 10 MPa, aos 7 dias de idade, sendo que os valores obtidos neste estudo são próximos do limite inferior. No entanto, esta não é uma conclusão negativa, visto que as argamassas de reparação devem ser compatíveis com o suporte, ou seja, não devem ultrapassar as características mecânicas deste.

Jamú (2013), ao ensaiar à compressão uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) aos 90 dias de idade, obteve um valor de 0,70 MPa e Rodrigues (2004), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 (cal aérea:areia) aos 60 dias de idade, obteve um valor de 0,65 MPa de resistência à compressão, valores estes que são consideravelmente superiores ao resultado obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, na mesma idade. No entanto, tal como se verificou na análise de resultados da resistência à tração, as argamassas executadas pelos referidos autores utilizaram maior quantidade de cal aérea, sendo por isso expectável que os resultados fossem mais elevados.

Nos trabalhos desenvolvidos por Mendonça (2007) e Martins (2008), como seria de esperar, é também observável que as resistências à compressão nas argamassas de cimento são muito mais elevadas do que nas argamassas em estudo, apresentando nos seus estudos valores de resistência à compressão de 18,8 MPa para o traço 1:3 (cimento: areia) e 15,8 MPa para o traço 2:7 (cimento: areia), respetivamente.

5.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

A Tabela 5.3 e a Figura 5.7 apresenta os resultados obtidos no ensaio que determinou o módulo de elasticidade dinâmico.

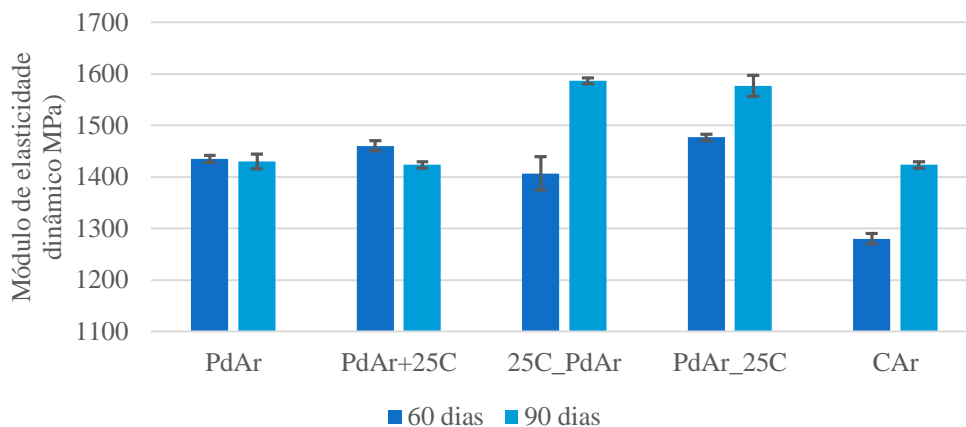


Figura 5.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

É importante referir novamente que, contrariamente ao que indica a norma, os provetes utilizados neste ensaio estavam totalmente secos. No entanto, este ensaio é indicado para provetes de betão saturados.

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.3 e na Figura 5.7, é notório que a evolução ao longo do tempo foi pouco expressiva e é possível observar que, nas argamassas onde a areia ou a argila foram substituídas, em parte, por cal aérea, houve um aumento mais significativo do módulo de elasticidade dinâmico com o decorrer do tempo. O mesmo se verificou na argamassa de areia e cal aérea.

Comparando com o estudo feito por Bravo (2017), este apresenta valores compreendidos entre 1700 MPa e 2200 MPa para o módulo de elasticidade dinâmico, o que é substancialmente superior aos resultados obtidos neste trabalho. O autor verificou também que os melhores resultados foram obtidos para a famílias de areia e cal aérea. Não era expectável que os resultados das família de areia e cal aérea de ambos os estudos fossem tão diferentes, visto que possuem o mesmo traço e foram elaboradas com os mesmos materiais, em condições semelhantes, não se encontrando um motivo plausível para esta discrepância de resultados.

Rodrigues (2004), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 (cal aérea:areia) aos 60 dias de idade, obteve um valor de 2300 MPa para o módulo de elasticidade dinâmico. Por sua vez Jamú (2013), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) aos 90 dias de idade, obteve um valor de 2900 MPa para o módulo de

elasticidade dinâmico. Ambos os estudos apresentam valores muito superiores ao resultado obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, nas referidas idades, o que se pode justificar pela utilização de uma maior quantidade de cal aérea, como se pode verificar pelo traço de ambas as argamassas.

O mesmo se verifica nos resultados obtidos por Gomes (2013) que, ao ensaiar a sua argamassa de traço 1:3 (terra:areia) utilizando a argila PD, obteve resultados na ordem dos 3500 MPa, um valor muito superior ao obtido para a argamassa PdAr do presente trabalho, o que se justifica pela maior quantidade de terra existente na mistura sólida.

Como seria expectável, os valores do módulo de elasticidade dinâmico são também muito superiores nas argamassas cimentícias, traduzindo a menor rigidez das argamassas com terra relativamente às argamassas com cimento. Segundo refere Bravo (2017), para uma argamassa de traço 1:1:4 (cimento:cal:areia), obteve-se resultados na ordem dos 8000 MPa.

É importante referir que a obtenção de valores mais baixos para o módulo de elasticidade dinâmico é favorável à caracterização das argamassas com terra. Quanto menor o módulo de elasticidade dinâmico, mais baixa é a rigidez, tornando a argamassa mais indicada para a reabilitação de construções em taipa, que possuem também uma baixa rigidez.

5.3.5 Retração linear e volumétrica

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de retração linear e volumétrica e a Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos apenas no ensaio de retração volumétrica.

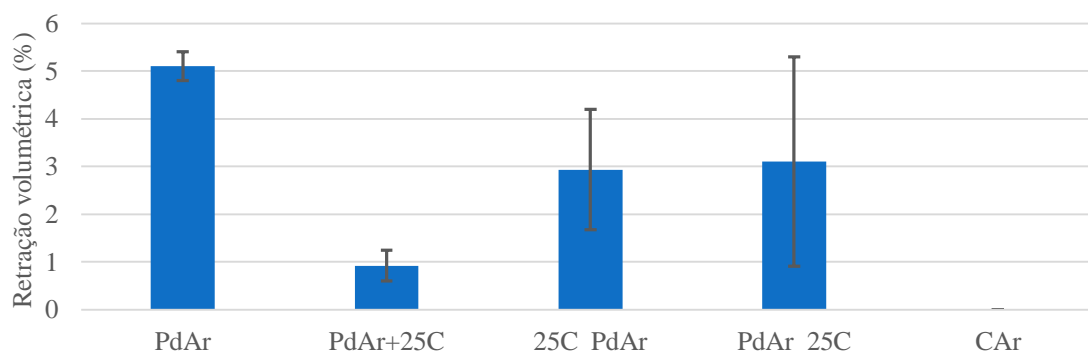


Figura 5.8 – Resultados do ensaio de retração volumétrica

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.3, verifica-se que todas as famílias obtiveram uma retração linear média igual a zero. Assim, apenas se apresenta graficamente os resultados para a retração volumétrica, na Figura 5.8.

No que diz respeito à retração volumétrica, observa-se na Tabela 5.3 e na Figura 5.8, a existência de uma família com um resultado médio e desvio padrão igual a zero, a argamassa CAr, significando que em nenhum dos provetes ocorreu retração volumétrica, ou seja, os provetes preservaram o tamanho do seu molde. Verifica-se também que a família com maior retração volumétrica é a argamassa PdAr, com um valor bastante mais elevado do que as restantes famílias e a argamassa CAr, como já foi referido anteriormente, é a família com menor retração volumétrica, pois apresenta um valor nulo. É ainda bastante visível que as argamassas 25C_PdAr e PdAr_25C apresentam valores de desvio padrão elevados. Pode ainda afirmar-se que a inclusão de cal aérea nas argamassas de terra diminuiu a retração volumétrica

Comparando com o estudo feito por Bravo (2017), os resultados obtidos pelo autor foram semelhantes aos deste trabalho. Bravo (2017) verificou também uma retração linear nula em todas as argamassas, uma retração volumétrica nula para a argamassa de cal aérea e o maior resultado para a argamassa de terra, sem inclusão de cal aérea.

(Rodrigues, 2004) apenas estudou a sua argamassa de cal aérea de traço 1:2 à retração linear, obtendo resultados de 3,58 mm/m e de 3,36 mm/m, aos 60 e aos 90 dias de idade, respetivamente. Extrapolando este resultado para o provete em ensaio neste estudo, de comprimento 300 mm, conclui-se que a retração seria nula, segundo o grau de precisão da craveira utilizada na medição, o que vai de acordo ao resultado obtido neste trabalho para a argamassa de cal aérea.

5.3.6 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 5.9 e na Figura 5.10 apresentam-se as curvas de absorção de água por capilaridade para as argamassas estudadas, aos 60 e aos 90 dias de idade. Cada curva representa os valores médios dos três provetes que foram ensaiados para cada família em cada idade.

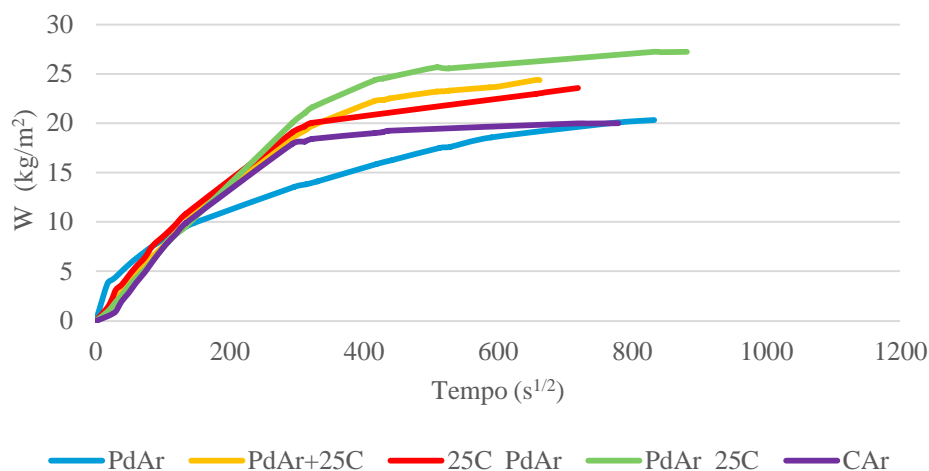


Figura 5.9 – Curva de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade

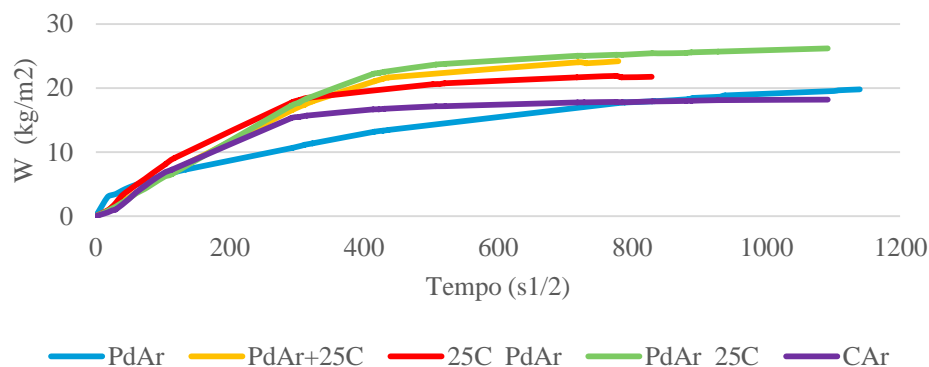


Figura 5.10 – Curva de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade

Primeiramente, é importante destacar o facto de que alguns provetes não atingiram a saturação completa, como se pode verificar na Figura 5.9 e 5.10, algumas curvas não atingem um patamar horizontal. Portanto, deve ter-se em conta que este erro poderá influenciar os resultados obtidos.

Como já referido anteriormente, o declive do primeiro troço de cada curva corresponde ao coeficiente de capilaridade. Na Tabela 5.3 apresentam-se esses mesmos coeficientes de forma resumida.

Quanto mais baixo for o coeficiente de capilaridade, menor é a velocidade de ascensão da água pelos poros da argamassa. No caso das argamassas em estudo, pretende-se que a humidade ascendente seja o menor possível, logo quanto menor for o valor deste coeficiente, mais favorável será o comportamento da argamassa.

Assim, observando os resultados obtidos na Tabela 5.4, Figura 5.9 e 5.10, a argamassa PdAr é aquela que possui menor coeficiente de capilaridade, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, portanto é a argamassa com melhor comportamento face à ascensão

capilar. É também visível que, em todas as famílias, o coeficiente de capilaridade diminuiu com o tempo, exceto na única família com terra sem cal aérea inclusa, a família PdAr, que manteve o seu valor - o que é expectável visto não apresentar nenhum ligante inorgânico, como é o caso das restantes argamassas.

Assim, é visível que a inclusão de cal nas argamassas prejudicou o coeficiente de capilaridade pois o seu valor aumentou e, conseqüentemente, a velocidade de absorção de água por capilaridade é maior. O aumento do coeficiente de capilaridade nas argamassas com cal pode dever-se à diminuição dos poros, uma vez que a cal é um material muito fino e ocupa parte dos vazios existentes, conseqüentemente a absorção de água por capilaridade será tanto mais rápida quanto mais finos forem os poros do material.

Comparando com os resultados obtidos por Bravo (2017), apesar desse obter valores maioritariamente superiores aos obtidos neste trabalho, este chegou à mesma conclusão de que a inclusão de cal levou ao aumento do coeficiente de capilaridade. Relativamente à argamassa de cal aérea, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos para a argamassa CAr do presente trabalho, como seria de esperar.

Relativamente a Gomes (2013), para uma argamassa idêntica à argamassa PdAr em estudo, mas com o traço 1:3, a autora chegou a um resultado semelhante ao obtido neste trabalho. Relativamente à influência de cal nas argamassas, chegou também à conclusão de que o coeficiente de capilaridade aumenta assim que se inclui cal na mistura.

Rodrigues (2004), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 (cal aérea:areia) aos 60 dias de idade, obteve um coeficiente de capilaridade de $0,37 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ e Jamú (2013), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) aos 90 dias de idade, obteve um coeficiente de capilaridade de $0,23 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$. Estes valores são muito superiores ao resultado obtido no presente trabalho para a argamassa CAr, podendo, mais uma vez, concluir-se que quanto mais quantidade de cal aérea existir na mistura sólida, maior será o coeficiente de capilaridade e pior será o comportamento da argamassa.

Comparando com as argamassas cimentícias, Martins (2008) apresenta um coeficiente de capilaridade de $0,10 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ para uma argamassa com o traço 2:5 (cimento:areia) e um coeficiente de capilaridade de $0,08 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ para uma argamassa de traço 2:7 (cimento:areia). Estes resultados são ligeiramente inferiores aos das argamassas com terra estudadas quando possuem cal na sua composição, apresentando assim um melhor comportamento no que diz respeito à absorção de água por capilaridade.

5.3.7 Secagem

Na Figura 5.11 e na Figura 5.12 apresentam-se as curvas de secagem para as argamassas estudadas, aos 60 e aos 90 dias de idade. Cada curva representa os valores médios obtidos nos três provetes que foram ensaiados para cada família.

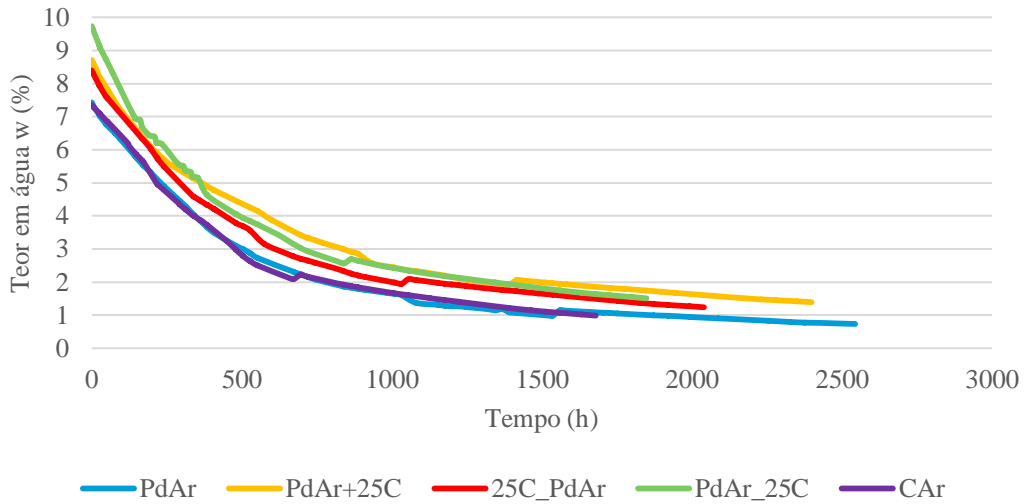


Figura 5.11 – Curva de Secagem aos 60 dias de idade

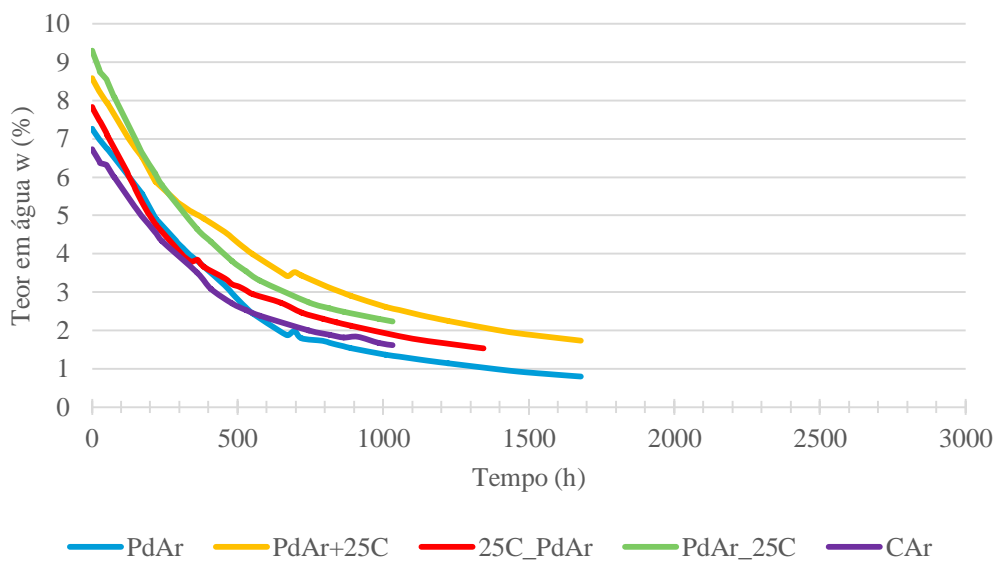


Figura 5.12 – Curva de Secagem aos 90 dias de idade

Antes de qualquer análise, há que referir que os erros existentes no ensaio de absorção por capilaridade comprometem o sucesso do ensaio de secagem, como por exemplo, o facto de alguns provetes de argamassa não terem atingindo uma saturação completa como se observa na Figura 5.11 e Figura 5.12.

É também importante referir que, ao longo do ensaio, houve pequenas degradações da impermeabilização executada nos provetes, ocorrendo pequenos destacamentos de material. No entanto, o material destacado foi sempre pesado juntamente com o provete respetivo. Assim, a área de secagem sofreu pequenas alterações, não sendo precisamente 4 cm x 4 cm e a evaporação não ocorreu exatamente unidireccionalmente.

É ainda visível que as curvas de algumas das argamassas não apresentam um troço final horizontal, o que indica que o ensaio deveria ter decorrido durante mais tempo, o que não se verificou uma vez que o tempo reservado para a campanha experimental tinha terminado.

São ainda visíveis pequenos aumentos do teor de água, todos semelhantes, quando seria de esperar que os valores fossem sempre decrescentes. Este fenómeno é resultado da alteração das condições de temperatura e humidade relativa da sala onde decorreu o ensaio, como se pode observar no Anexo C.

Relativamente às curvas de secagem, observa-se que são muito semelhantes entre si, apresentando um declive inicial com valores muito próximos, o que revela que todas as famílias de argamassas possuem um comportamento idêntico no que diz respeito à secagem.

Na Tabela 5.4 apresenta-se os valores médios da taxa de secagem. A taxa de secagem corresponde ao declive do primeiro troço da curva de evaporação que representa a quantidade de água absorvida por unidade de área em função do tempo. A taxa de secagem corresponde às primeiras 48h, sendo referente à fase de secagem superficial. Quanto maior for o declive e, conseqüentemente, mais elevado for o valor da taxa de secagem, mais rápido decorre a secagem inicial.

Observando-se a Tabela 5.4, é visível que existe uma diminuição da taxa de secagem com o aumento da idade, exceto para a família CAr que mantém o valor da taxa de secagem, independentemente da idade.

Comparando a argamassa sem adição de cal (PdAr) com as argamassas de terra com adição de cal, verifica-se que a taxa de secagem aumentou, ou seja, a adição de cal à argamassa foi benéfica em relação à secagem.

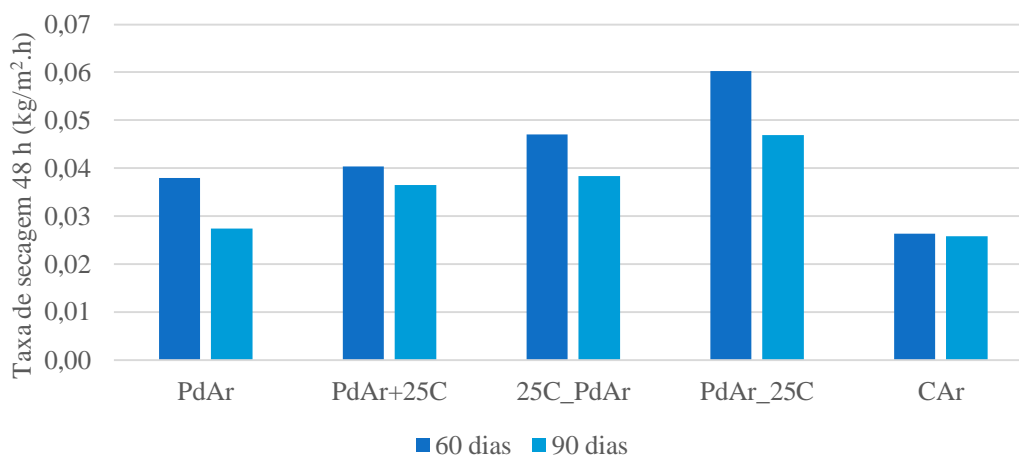


Figura 5.13 – Taxa de secagem aos 60 e aos 90 dias de idade

A argamassa PdAr_25C é aquela que apresenta o melhor resultado, tanto para os 60 como para os 90 dias de idade, revelando que a substituição parcial da areia por cal é a melhor opção, no que diz respeito à secagem deste tipo de argamassas, pois a humidade que pode constar na argamassa pode ser eliminada mais facilmente. Comparando com os resultados da absorção de água por capilaridade verifica-se que a cal aumenta a absorção, mas também favorece a secagem.

Comparando com os resultados de Bravo (2017), este verificou um decréscimo na taxa de secagem com o decorrer do tempo e a adição ou substituição de cal prejudicou o valor da taxa de secagem, ao contrário do que foi verificado neste trabalho. É ainda de referir que os valores obtidos pelo autor foram superiores aos obtidos neste trabalho, indicando que a argila utilizada por este, a terra-padrão, beneficia a secagem das argamassas, ocorrendo de forma mais rápida. Relativamente à argamassa de cal aérea, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos para a argamassa CAr do presente trabalho, como era expectável.

Jamú (2013), para uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia), aos 90 dias de idade, obteve uma taxa de secagem de 0,26 kg/m².h, o que é um valor bastante alto comparando com a argamassa CAr do presente trabalho, o que evidencia mais uma vez que quanto maior a quantidade de cal aérea na mistura sólida, mais beneficiada é a argamassa no que respeita à taxa de secagem.

Por sua vez, Gomes (2013) verificou que a sua argamassa de traço 1:3 (terra: areia), elaborada com a argila PD, apresenta uma taxa de secagem às 24 h dos 90 dias de idade próxima de 0,12 kg/m².h. Este valor está muito acima do valor 0,027 kg/m².h obtido para a família PdAr aos 90 dias de idade. Esta diferença pode dever-se, em parte, à

diferença dos traços das argamassas e do tempo para o qual foi calculada a taxa de secagem, bem como a diferença nas dimensões dos provetes utilizados que, no caso do trabalho realizado por (Gomes, 2013), são provetes cúbicos com 50 mm de aresta enquanto que, no presente trabalho, foram ensaiados provetes prismáticos de 160 mm x 40 mm x 40 mm de dimensão.

5.4 Ensaios de caracterização de argamassas aplicadas em suporte

De forma a caracterizar o comportamento hídrico e resistente das argamassas em estudo quando aplicadas num suporte, realizaram-se diversos ensaios cujos resultados são apresentados na Tabela 5.5 e 5.6 e nos próximos subcapítulos.

Tabela 5.5 – Características das argamassas aplicadas em suporte (Coeficiente de condutibilidade térmica e Desgaste), aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Coeficiente de Condutibilidade Térmica λ (W/(m.K))				Dureza Superficial (Shore A)			
	60 dias		90 dias		60 dias		90 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
PdAr	0,46	0,03	0,45	0,08	54,70	14,88	63,00	9,07
PdAr+25C	0,53	0,05	0,45	0,07	70,10	12,76	71,30	9,48
25C_PdAr	0,48	0,11	0,60	0,06	79,10	4,7	80,40	3,89
PdAr_25C	0,58	0,10	0,66	0,04	71,80	8,15	84,00	9,06
CAr	0,53	0,01	0,42	0,02	72,80	7,41	78,30	8,15

Tabela 5.6 – Características das argamassas aplicadas em suporte (Força de arrancamento e Ângulo de ressalto), aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Desgaste (g)				Força de arrancamento (N)				Ângulo de ressalto ($^{\circ}$ Vickerz)			
	60 dias		90 dias		60 dias		90 dias		60 dias		90 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
PdAr	17,50	1,35	9,80	6,33	28,10	18,38	14,18	2,87	38,00	5,74	38,20	4,66
PdAr+25C	1,93	0,51	0,73	0,12	33,36	7,70	32,40	13,94	59,20	9,01	59,20	10,76
25C_PdAr	1,27	0,38	0,60	0,30	24,70	13,17	48,27	5,34	40,40	11,22	41,20	11,52
PdAr_25C	1,77	0,76	0,63	0,15	31,32	17,05	44,77	NA*	49,40	6,54	50,60	4,98
CAr	0,37	0,06	0,20	0	93,47	31,33	63,70	27,28	35,40	8,08	36,00	7,25

*NA - Apenas foi realizado um ensaio, logo não existe desvio padrão

5.4.1 Condutibilidade térmica

Na Tabela 5.5 e na Figura 5.14 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de determinação do coeficiente de condutibilidade térmica.

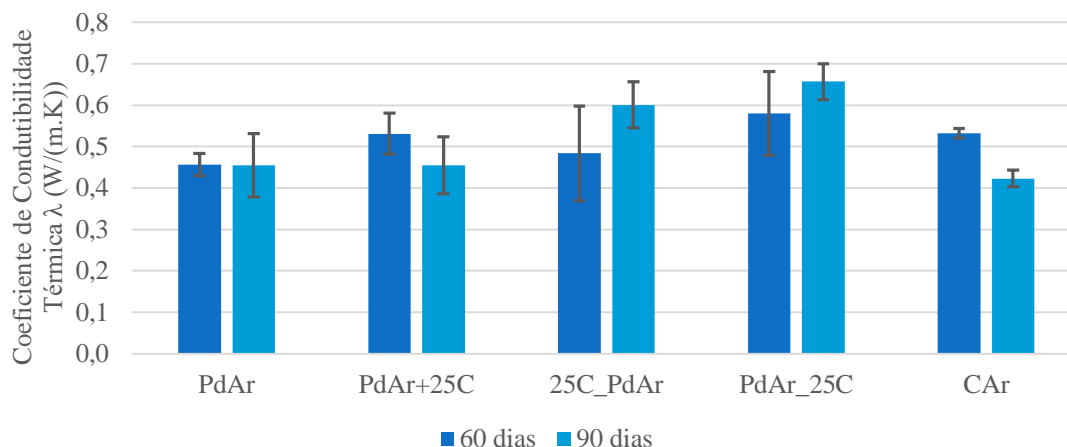


Figura 5.14 – Resultados do ensaio de determinação do coeficiente de condutibilidade térmica

O coeficiente de condutibilidade térmica é obtido diretamente através deste ensaio e permite avaliar a capacidade de transmissão de energia térmica de um material. Assim, quanto maior este coeficiente, pior o comportamento térmico do material.

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.5 e na Figura 5.14, não se pode concluir que exista um aumento ou um decréscimo do valor deste coeficiente com o decorrer do tempo, uma vez que existem argamassas para as quais o valor aumenta e outras em que diminui – ou seja não existe um padrão nos resultados. No entanto, verifica-se que nas argamassas em que ocorreu a substituição de cal na massa de areia ou de argila a condutibilidade térmica aumentou com o tempo, apresentando estas duas famílias (25C_PdAr e PdAr_25C) de argamassas os resultados mais altos aos 90 dias de idade - apresentando o pior comportamento térmico.

Aos 60 dias de idade, a argamassa PdAr apresentava o menor coeficiente de condutibilidade térmica, no entanto, aos 90 dias de idade era a argamassa CAr que apresentava o menor resultado e, portanto, o melhor comportamento térmico.

Comparando com Bravo (2017), os seus resultados indicaram um aumento do coeficiente de condutibilidade térmica ao longo do tempo. O autor concluiu, também, que os maiores desvios padrão ocorreram aos 90 dias de idade, contrariamente ao que aconteceu no presente trabalho. Relativamente à argamassa de cal aérea, o autor obteve os resultados mais baixos, tal como neste estudo aos 90 dias de idade e os valores são semelhantes aos obtidos no presente trabalho, tal como era de esperar.

Na Tabela 5.7 apresenta-se os valores para o coeficiente de condutibilidade térmica indicados pelo ITE50 conforme a massa volúmica seca para materiais como agregados, terras e ainda técnicas construtivas com terra.

Tabela 5.7 – Coeficientes de condutibilidade térmica de inertes, solos ou terra, adaptado de Pina dos Santos et al (2006)

Inertes, solos ou terras	Massa volúmica aparente seca (kg/m ³)	Coeficiente de condutibilidade térmica (W/m.°C)
Areia, gravilha, seixo, brita	1700-2200	2,00
Argila ou lodo	1200-1800	1,50
Adobe, taipa, BTC	1770-2000	1,10

Assim, conclui-se que as argamassas aqui estudadas apresentam valores de condutibilidade térmica inferiores aos das paredes de adobe, taipa ou BTC. No entanto, há que referir a grande diferença de espessuras entre o reboco ensaiado neste trabalho e a espessura de uma parede com terra.

Jamú (2013) ensaiou uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia), obtendo um resultado de, aproximadamente, 0,45 W/m.K aos 90 dias de idade, sendo este resultado muito semelhante ao obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, para a mesma idade.

5.4.2 Dureza superficial

Na Tabela 5.5 e na Figura 5.15 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de dureza superficial de cada família, aos 60 e aos 90 dias de idade. Na Tabela 5.8 apresenta-se ainda as classes de resistência, de acordo com a classificação atribuída por Tavares (2009) apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos no ensaio de determinação de dureza superficial e classificação segundo Tavares (2009), aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Dureza Superficial (Shore A)					
	60 dias			90 dias		
	Média	DP	Classificação da resistência	Média	DP	Classificação da resistência
PdAr	54,70	14,88	Moderada	63,00	9,07	Moderada
PdAr+25C	70,10	12,76	Normal	71,30	9,48	Normal
25C_PdAr	79,10	4,70	Normal	80,40	3,89	Normal
PdAr_25C	71,80	8,15	Normal	84,00	9,06	Normal
CAr	72,80	7,41	Normal	78,30	8,15	Normal

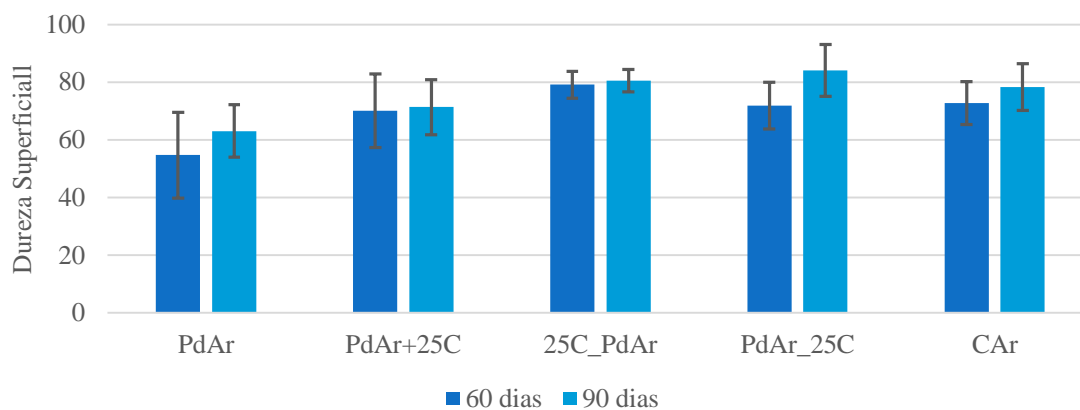


Figura 5.15 – Resultados do ensaio de dureza superficial

Inicialmente, antes de qualquer análise dos resultados obtidos, é importante referir que, embora este ensaio seja utilizado em vários estudos de argamassas, a norma é adequada a elementos de borracha e não a argamassas.

Observando a Tabela 5.5 e a Figura 5.15, é visível que a dureza superficial aumentou com o tempo e com a inclusão de cal aérea nas argamassas.

Assim, aos 60 dias de idade a família 25C_PdAr apresenta o melhor resultado e, simultaneamente, o menor desvio padrão, enquanto aos 90 dias de idade é a família PdAr_25C que apresenta uma dureza superficial mais elevada.

Observando os resultados na Tabela 5.8 verifica-se que apenas a argamassa PdAr se classifica como Moderada, tantos aos 60 como aos 90 dias de idade, sendo todas as restantes de classe Normal. A dureza da argamassa aumentou com a idade, contudo apesar deste aumento o valor não foi o suficiente para a maioria das famílias melhorarem a sua classificação.

Comparando com Bravo (2017), este obteve-se uma maioria das suas argamassas com a classificação Normal, sem evolução da classificação com o decorrer do tempo, à excepção da família de areia e cal aérea e da família em que se substituiu a cal aérea por argila, a classificação evoluiu de Normal para Muito Dura. Os resultados gerais apresentados por este autor são tendencialmente mais elevados do que os do presente trabalho. Relativamente à argamassa de cal aérea, aos 60 dias de idade, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho para a argamassa CAr, no entanto, aos 90 dias de idade, a argamassa do autor já obtinha a classificação de Muito Dura.

Jamú (2013) ensaiou uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia), aos 90 dias de idade, obtendo um resultado de, aproximadamente, 65 Shore A. Este

resultado está um pouco abaixo do resultado obtido para a argamassa CAr do presente trabalho, na mesma idade, podendo esta diferença ser justificada pela menor quantidade de areia existente na argamassa estudada pelo autor, levando a um valor da dureza superficial mais baixo.

5.4.3 Resistência à abrasão

Na Tabela 5.6 e na Figura 5.16 apresentam-se os valores do resultado do ensaio de resistência à abrasão, aos 60 e aos 90 dias de idade, de todas as famílias.

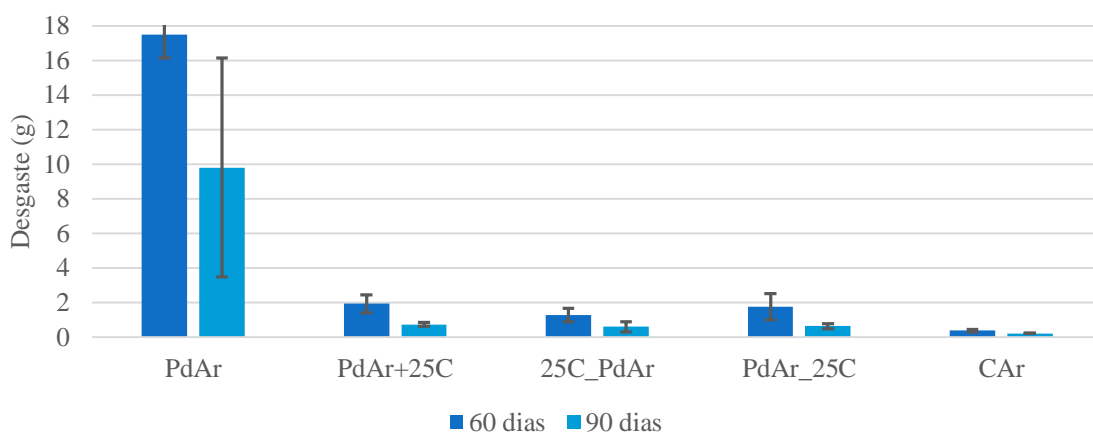


Figura 5.16 – Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.6 e na Figura 5.16, é claramente visível uma grande discrepância entre os valores obtidos para a argamassa PdAr e as restantes. Esta diferença pode ser justificada por diversos problemas na realização do ensaio, nomeadamente, na utilização do equipamento. Este equipamento não é normalizado, foi elaborado no laboratório e adaptado segundo a norma para a realização deste ensaio. Porém, é perceptível uma clara diferença e melhoria nos resultados entre as argamassas que apresentam a adição de cal para a argamassa que não tem cal na sua constituição. No entanto, devido ao alto desvio padrão apresentado pela argamassa PdAr aos 90 dias de idade, deveria ter-se realizado um novo ensaio a essa idade.

Ainda assim, é visível que aos 60 dias de idade a massa destacada foi superior em todas as famílias, diminuindo o desgaste com o decorrer do tempo, revelando uma maior resistência à rotação da escova do equipamento.

Relembra-se, no entanto, os valores obtidos para as resistências mecânicas das argamassas, onde os resultados aos 60 dias de idade eram superiores aos resultados aos

90 dias de idade, revelando uma diminuição da resistência mecânica, ao contrário do que se verifica neste ensaio.

Comparando com o trabalho desenvolvido por Bravo, este obteve valores de massa destacada superiores aos observados neste trabalho, exceto para a família com terra e areia, sem a inclusão de cal aérea em que se obteve valores muito acima dos registados tanto por Bravo (2017) como no presente estudo. No entanto, Bravo (2017) chega também à conclusão que o desgaste diminuiu com o tempo, apresentando o maior valor para a família de argamassa com terra e areia, sem inclusão de cal aérea, tantos aos 60 como aos 90 dias de idade. Relativamente à argamassa de cal aérea, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho para a argamassa CAr, como seria expectável.

5.4.4 Aderência ao suporte

Na Tabela 5.6 e na Figura 5.17 apresentam-se os valores médios do resultado do ensaio de aderência ao suporte, aos 60 e aos 90 dias de idade, de todas as famílias.

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.6 e na Figura 5.17, não se consegue concluir que o decorrer do tempo aumente a aderência ao suporte ou não, visto que não existe um resultado padrão para as várias argamassas. Porém, é visível que nas argamassas em que se substituiu a cal aérea pela areia ou pela argila, a aderência ao suporte aumentou com o tempo.

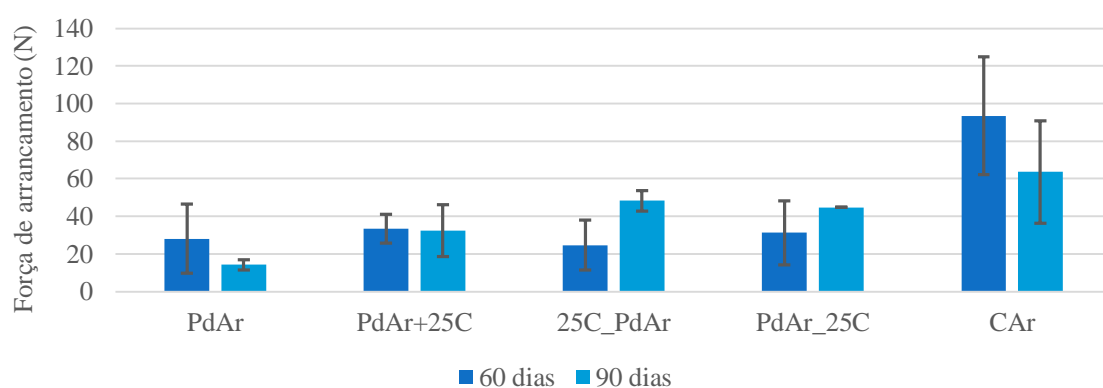


Figura 5.17 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte

Pode-se ainda constatar que aos 90 dias de idade, é também visível que todas as famílias que possuem cal aérea necessitaram de uma força de arrancamento superior à família com terra e areia.

A família CAr é aquela que apresenta melhores resultados aos 60 e aos 90 dias de idade, sendo também a única família que apresentou sempre uma rotura coesiva da argamassa.

É de referir a dificuldade em realizar este ensaio, o que acabou por prejudicar a obtenção de resultados. Em algumas famílias apenas foi possível obter dois resultados, em vez dos 3 registos esperados, existindo ainda um caso em que só foi possível registar um resultado, o que justifica o desvio padrão “não aplicável” da família PdAr_25C aos 90 dias de idade. É também importante mencionar que sempre que ocorreu rotura coesiva entre a cola e a argamassa, o valor da força de arrancamento foi considerado nulo. Estes resultados justificam-se pela falta de coesão da argamassa, que resultou diversas vezes em roturas adesiva entre o reboco e a cola.

Deste modo, em 57% dos casos verificou-se a rotura coesiva da argamassa, em 14% dos casos a rotura deu-se a meio do reboco e em 29% dos casos observou-se rotura adesiva entre o reboco e a cola.

Devido à ambiguidade de resultados obtidos e ao insucesso do ensaio, considera-se que o ensaio de aderência ao suporte não se deve ter em conta na caracterização destas argamassas.

5.4.5 Esclerómetro pendular

Na Tabela 5.6 e na Figura 5.18 apresentam-se os valores médios do resultado do ensaio de esclerómetro pendular, aos 60 e aos 90 dias de idade, de todas as famílias.

Este ensaio decorreu após o ensaio de aderência ao suporte, uma vez que ambos os ensaios foram realizados na mesma superfície de reboco.

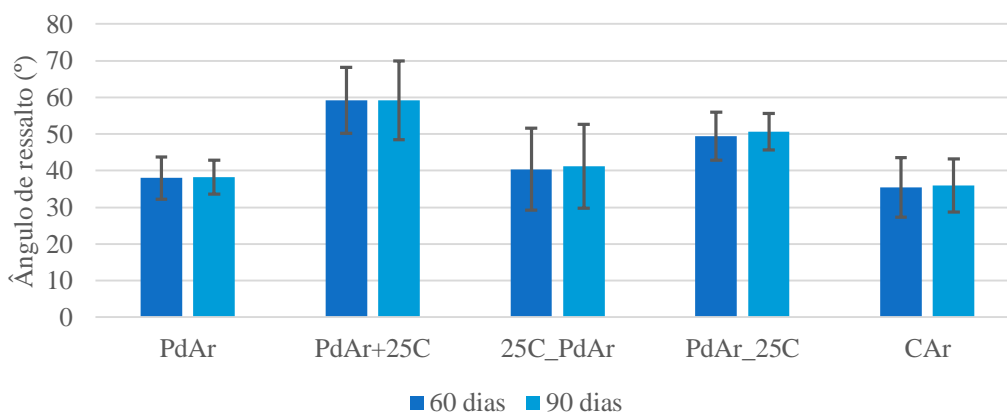


Figura 5.18 – Resultados do ensaio de esclerómetro pendular

Analisando os resultados obtidos na Tabela 5.6 e na Figura 5.18 verifica-se que a família com o melhor resultado, em ambas as idades, foi a argamassa PdAr+25C e a família com pior resultado foi a argamassa CAr, quase a par com a família PdAr, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade. É visível também que, em todas as argamassas, houve um aumento dos valores obtidos com o decorrer do tempo, ainda que sem grande expressão. Constata-se que a adição ou substituição de cal aérea à mistura com areia (PdAR+25C e PdAr_25C) teve benefícios no que diz respeito aos resultados observados. Para a argamassa com substituição de cal na massa de argila não foram observadas grandes melhorias.

Tabela 5.9 – Resultados obtidos para a resistência das argamassas no ensaio de esclerómetro pendular e classificação segundo Tavares (2009), aos 60 e aos 90 dias de idade

Família	Ângulo de ressalto (° Vickerz)					
	60 dias			90 dias		
	Média	DP	Classificação da resistência	Média	DP	Classificação da resistência
PdAr	38,00	5,74	Moderada	38,20	4,66	Moderada
PdAr+25C	59,20	9,01	Dura	59,20	10,76	Dura
25C_PdAr	40,40	11,22	Normal	41,20	11,52	Normal
PdAr_25C	49,40	6,54	Normal	50,60	4,98	Normal
CAr	35,40	8,08	Moderada	36,00	7,25	Moderada

Observando a tabela 5.9, concluiu-se que, ainda que os ângulos de ressalto tenham aumentado com o tempo, não foi o suficiente para aumentar a classe de resistência em nenhuma das argamassas.

As classes de resistência para as argamassas estudadas vão de Moderadas a Duras, sendo maioritariamente Normais e apenas uma argamassa, PdAr+25C, obtém a classificação de Dura.

Comparando com os resultados obtidos por Bravo (2017), verificou-se que se obteve uma gama de valores semelhante entre trabalhos. O autor concluiu também que não houve grandes melhorias nos resultados ao longo do tempo, exceto para a família de cal aérea e cal, onde existiu uma grande evolução. No entanto, há que referir que esta argamassa é igual à argamassa CAr do presente trabalho, sendo expectável obter os mesmos resultados, o que não se verifica. Aos 60 dias de idade, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho, mas o mesmo não se verificou na segunda idade

de ensaio. Há que salientar que o autor realizou os ensaios aos 120 dias em vez dos 90 dias de idade, no entanto a diferença entre os resultados não deveria ser tão grande.

Assim sendo, deverá ter ocorrido algum erro experimental em alguns dos estudos. Portanto, a fim de verificar onde está o erro, analisou-se os resultados obtidos por Jamú (2013). Esta autora ensaiou uma argamassa de cal aérea de traço 1:2 (cal aérea:areia) e, aos 90 dias de idade, obteve resultados entre os 75 e os 85 ° Vickerz, o que são resultados bastante superiores aos obtidos no presente trabalho e aos obtidos por Bravo (2017). Assim sendo, não se consegue concluir onde está o erro, se no presente trabalho ou no trabalho desenvolvido por Bravo (2017), uma vez que nenhum se aproxima dos resultados apresentados por Jamú (2013), podendo apenas concluir-se que a autora utilizou materiais mais resistentes para a execução das suas argamassas.

Relativamente às argamassas cimentícias, Martins (2008) apresenta um ângulo de ressalto de 63° Vickerz para argamassas com traço 2:5 (cimento: areia) e 55° Vickerz para um traço 2:7 (cimento: areia), aos 28 dias de idade. Estas argamassas, segundo a classificação de Tavares (2009) são Duras, podendo dizer-se que não se encontram longe dos valores apresentados neste trabalho para as argamassas com terra e adição de cal (PdAr+25C).

5.4.6 Absorção de água sob baixa pressão

Da Figura 5.19 à Figura 5.23, apresentam-se os resultados do ensaio de absorção de água sob baixa pressão, aos 60 e aos 90 dias de idade, de cada família de argamassa.

Foram aplicados em cada argamassa três tubos de Karsten e obtiveram-se resultados distintos entre si. Por este facto, decidiu-se apresentar os resultados de cada família separadamente, e em simultâneo os resultados aos 60 e aos 90 dias de idade; seria bastante penalizador apresentar uma curva média dos valores de absorção de água dos três tubos uma vez que os resultados são bastante díspares entre argamassas.

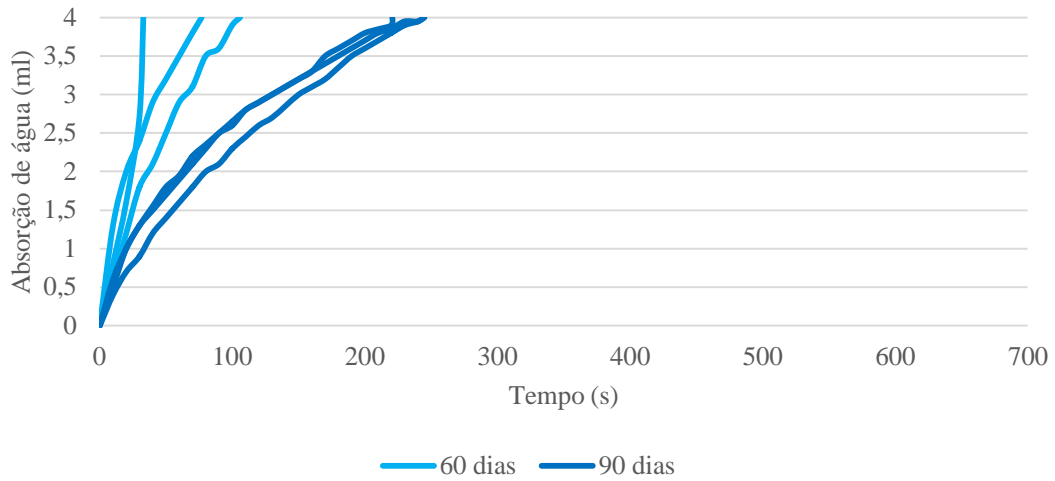


Figura 5.19 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr

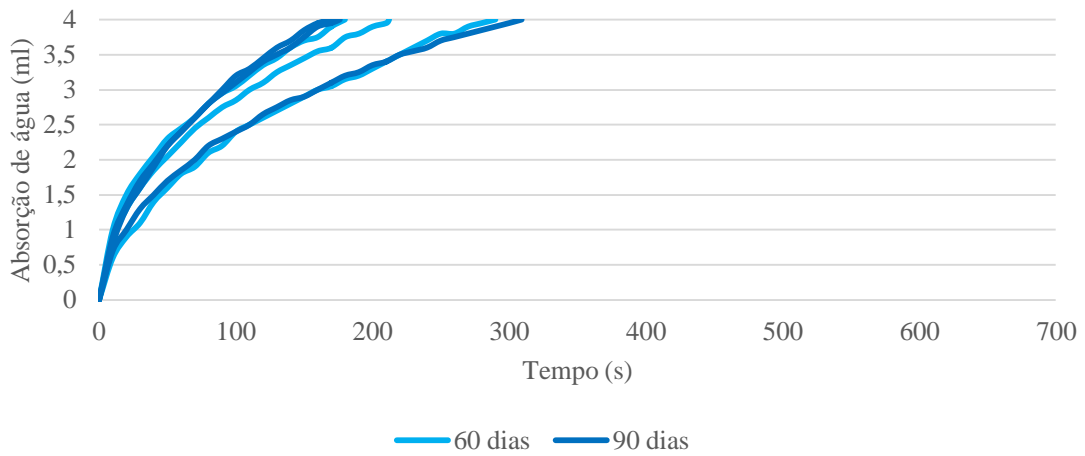


Figura 5.20 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr+25C

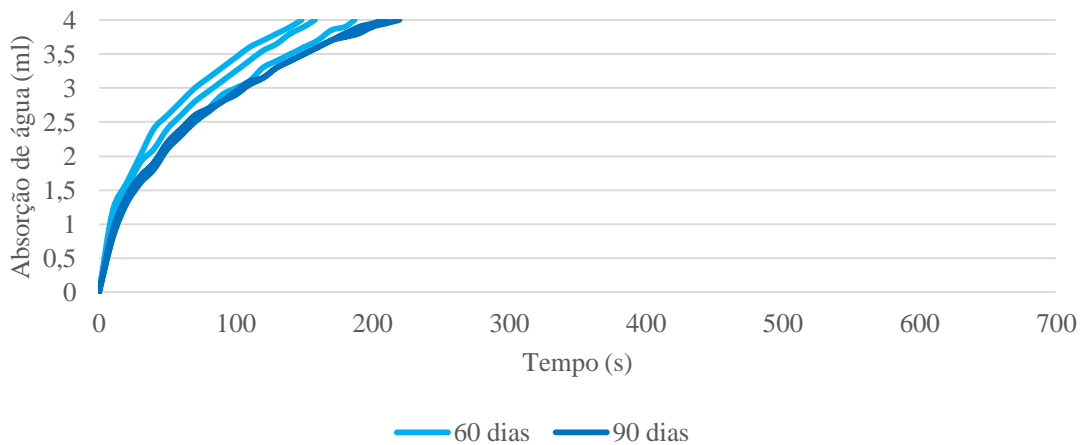


Figura 5.21 – Curva de absorção de água sob baixa pressão da família 25C_PdAr

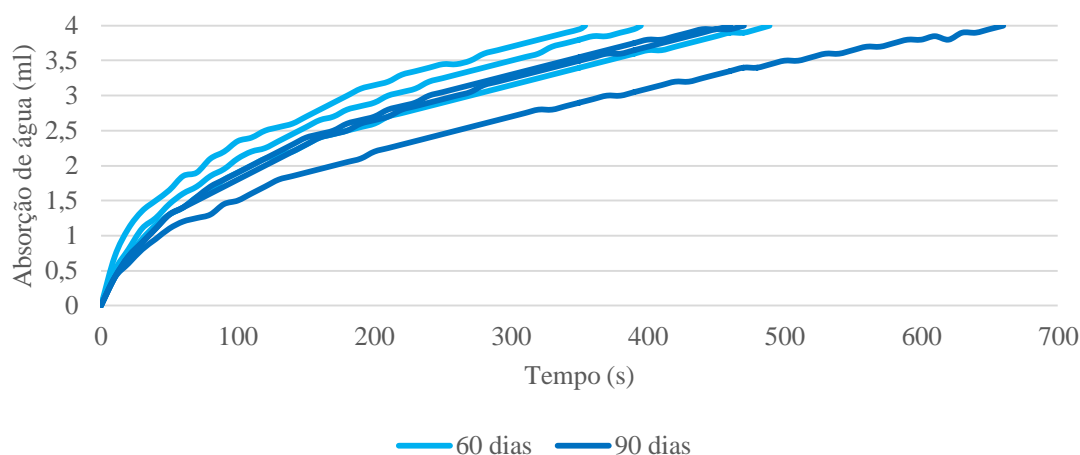


Figura 5.22 - - Curva de absorção de água sob baixa pressão da família PdAr_25C

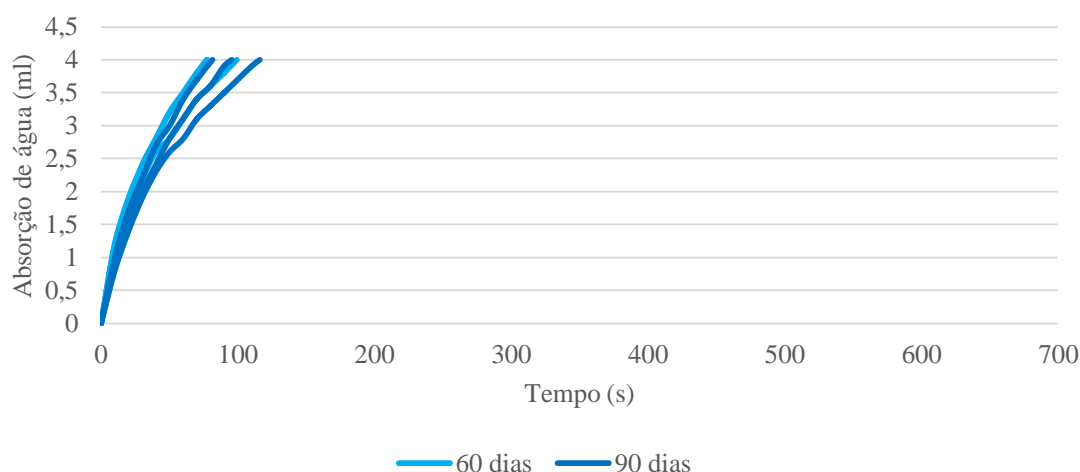


Figura 5.23 - Curva de absorção de água sob baixa pressão da família CAR

Pela análise da Figura 5.19 à Figura 5.23, observa-se que as curvas de absorção, para cada família, são bastante próximas entre si, mesmo as curvas referentes aos 60 dias de idade e as curvas referentes aos 90 dias de idade.

É visível que a argamassa PdAr, aos 60 dias de idade, apresenta o pior resultado, demorando cerca de 30 segundos a absorver os 4 ml de água. É, de facto, na argamassa PdAr que se verifica uma maior discrepância entre os valores obtidos aos 60 e aos 90 dias de idade, o que pode ser justificado pela dificuldade inicial em realizar o ensaio de forma adequada, como por exemplo, vedar corretamente a interface entre o tubo de Karsten e o reboco. Assim sendo, assumindo um eventual erro de execução do ensaio, a argamassa que apresenta os piores resultados, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, é a argamassa CAR.

O melhor resultado é verificado para a argamassa PdAr_25C aos 90 dias de idade, demorando quase 700 segundos a absorver a mesma quantidade de água.

Analisando todas as figuras, observa-se que a argamassa 25C_PdAr é aquela que apresenta praticamente o mesmo resultado para os três ensaios aos 90 dias de idade.

A diferença entre os tempos de absorção registrados, para a mesma argamassa e com a mesma idade, justifica-se com a rugosidade do reboco e a existência de eventuais vazios em certos locais, tornando o revestimento um material heterógeno no que diz respeito à absorção de água.

Comparando com os resultados obtidos por Bravo (2017), o autor também verificou que os piores resultados foram registrados para a argamassa de areia e terra, aos 60 dias de idade e para a argamassa de areia e cal aérea, aos 60 e aos 90 dias de idade. Os melhores resultados pertenceram à argamassa onde se substituiu parte da areia por cal aérea, tal como no presente estudo. Relativamente à argamassa de cal aérea, tanto aos 60 como aos 90 dias de idade, os resultados obtidos pelo autor estão na mesma gama de valores aos obtidos neste trabalho para a argamassa CAr.

5.5 Relação entre os vários resultados obtidos

Após a análise dos resultados de todos os ensaios efetuados, verificou-se que seria interessante comparar os resultados de diversos ensaios entre si, procurando estabelecer relações, retirando mais conclusões que permitam caracterizar as argamassas com terra estudadas. Assim, de seguida, seguem-se as diversas relações que se procuraram estabelecer entre os resultados dos ensaios indicados.

Massa volúmica no estado fresco e massa volúmica aparente no estado endurecido

Observando os resultados obtidos na Tabela 5.3 e na Figura 5.4, verifica-se que a maior massa volúmica, aos 60 e aos 90 dias de idade, pertence à argamassa 25C_PdAr. Seria de esperar que o ensaio de massa volúmica aparente confirmasse o resultado obtido pelo ensaio de massa volúmica realizado no estado fresco, mas não acontece. No entanto, a família com menor massa volúmica aparente, a argamassa CAr, é também a argamassa com menor massa volúmica no estado fresco.

Teor de vazios, resistência à tração e resistência à compressão

Observando a Tabela 5.2, é visível que as argamassa com piores resultados na resistência à tração são as argamassas PdAr e CAr, verificando-se o mesmo na resistência

à compressão. Por sua vez, a argamassa com melhores resultados, tanto à tração como à compressão, é a argamassa PdAr_25C.

Relativamente ao teor de vazios, observando a Tabela 5.1, a argamassa que apresenta um maior resultado é a argamassa PdAr e o menor resultado é a argamassa PdAr_25C.

Assim, facilmente se consegue relacionar o teor de vazios com as resistências mecânicas das argamassas, uma vez que quando se verificou o maior teor de vazios, também se verificou piores resultados dos parâmetros resistentes.

Teor de vazios e retração linear e volumétrica

Como já foi referido anteriormente, observando a Tabela 5.1, a argamassa que apresenta o maior teor de vazios é a argamassa PdAr e menor teor de vazios é a argamassa PdAr_25C.

Analisando a Tabela 5.3, verifica-se que a nenhuma das famílias registou retração linear, no entanto, no que diz respeito à retração volumétrica, a família com piores resultados é a argamassa PdAr e a família com melhores resultados é a família CAr.

Assim, pode concluir-se que a retração volumétrica mais alta se verifica na argamassa com maior teor de vazios, o que é expectável.

Resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade

Tal como foi referido anteriormente, as argamassas com piores resultados na resistência à tração são as argamassas PdAr e CAr, verificando-se o mesmo na resistência à compressão. Por sua vez, a argamassa com melhores resultados, tanto à tração como à compressão, é a argamassa PdAr_25C.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico, observando a Tabela 5.3, o melhor resultado verificou-se para a argamassa PdAr_25C e o pior resultado verificou-se para a argamassa CAr.

Assim, tal como aconteceu com o teor de vazios, quando o módulo de elasticidade dinâmica diminui, as resistências à tração e à compressão também diminuem.

Resistência à tração, resistência à compressão e dureza superficial

Já sabendo quais os melhores e os piores resultados relativamente às resistências à tração e à compressão, no que diz respeito à dureza superficial, observando a Tabela 5.5, verifica-se que a melhor argamassa, aos 60 dias de idade, é a argamassa 25C_PdAr

e aos 90 dias de idade é a argamassa PdAr_25C. No que diz respeito aos piores resultados, tantos aos 60 como aos 90 dias de idade, estes pertencem à argamassa PdAr.

Assim, conclui-se quanto maior a resistência mecânica da argamassa, maior será a sua dureza superficial.

Resistência à tração, resistência à compressão e resistência à abrasão

Observando a Tabela 5.6, verifica-se que a família com melhores resultados no ensaio de resistência à abrasão, ou seja, com menor desgaste verificado, é a argamassa Car. O pior resultado é observado na argamassa PdAr, argamassa onde se obteve maior desgaste.

Assim, já sabendo quais as argamassas com resistências mecânicas de valor mais alto e mais baixo, não é possível chegar a uma conclusão visto que nas argamassas com piores resistências, PdAr e Car, apresentam também o melhor e o pior comportamento no ensaio de resistência à abrasão.

No entanto, ao analisar o desgaste verificado para as argamassas com maiores resistências mecânicas, a argamassa PdAr+25C e a argamassa PdAr_25C, verifica-se que são aquelas que apresentam um maior desgaste, se se excluir o resultado obtido pela argamassa PdAr.

Portanto, será de esperar que tenha ocorrido um erro no decorrer do ensaio de resistência à abrasão, nomeadamente no ensaio da argamassa PdAr. Ao excluir os resultados desta família, consegue-se concluir que quanto maior a resistência mecânica da argamassa, maior o desgaste à abrasão.

Resistência à tração, resistência à compressão e esclerómetro

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.6, relativamente ao ensaio do esclerómetro, a argamassa que apresenta um maior ângulo de ressalto é a argamassa PdAr+25C, em ambas as idades, e o menor ângulo de ressalto pertence à argamassa CAR.

Assim, conclui-se que quanto menor a resistência mecânica, menor será o ângulo de ressalto, no entanto, a mesma conclusão não se pode retirar tão linearmente para as resistências mais altas. No entanto, apesar da argamassa que apresenta o maior ângulo de ressalto não ser aquela possui as melhores características resistentes, é das argamassas com resultados mais altos.

Absorção capilar e absorção de água sob baixa pressão

A absorção capilar será tanto maior quanto mais finos forem os canais da argamassa, ou seja, maior é a velocidade de ascensão da água pelos poros da argamassa.

Pelo contrário, no que se refere aos tubos de Karsten, a absorção será mais rápida quanto mais largos forem os canais e, conseqüentemente, menor for o coeficiente de capilaridade.

Assim, como a argamassa PdAr é aquela que registou os resultados mais baixos para o coeficiente de capilaridade, como se pode verificar na Tabela 5.4, seria de esperar que fosse a argamassa onde a absorção de água sob baixa pressão decorresse de forma mais rápida.

Analisando as Figuras 5.19 a 5.23, observa-se que a família que mais rapidamente absorveu os 4 ml de água, recorrendo aos tubos de Karsten, foi a família CAr, no entanto, foi seguida da família PdAr.

Comparando o melhor e o pior resultado para o coeficiente de capilaridade, ou seja, a argamassa CAr e PdAr_25C, espera-se que a família CAr, tendo o menor coeficiente de capilaridade, absorva mais rapidamente os 4 ml de água através do tubo de Karsten, o que realmente se verifica.

Absorção capilar e secagem

Como referido, a absorção capilar será tanto maior quanto mais finos forem os canais da argamassa, ou seja, maior é a velocidade de ascensão da água pelos poros da argamassa

A taxa de secagem representa a velocidade de secagem da argamassa, ou seja, quanto mais elevado for esse valor, mais rapidamente a argamassa seca.

Assim sendo, analisando a Tabela 5.4, seria interessante verificar que a argamassa com menor coeficiente de capilaridade tivesse a taxa de secagem mais alta, o que não acontece pois a argamassa com menor coeficiente de capilaridade é a argamassa PdAr, no entanto, a argamassa com maior taxa de secagem é a argamassa PdAr_25C.

No entanto, consegue-se verificar também que a argamassa com a pior taxa de secagem, a argamassa CAr, é das argamassas com maior coeficiente de capilaridade, apresentando o pior comportamento face à presença de água, pois absorve-a rapidamente, mas seca mais lentamente.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo caracterizar quatro famílias de argamassa com terra, adicionando ou substituindo cal aérea à sua composição, de forma a discutir a sua adequabilidade para a reabilitação de construções em taipa, e ainda uma argamassa *standard* utilizada abundantemente no mercado – argamassa de cal e areia

Assim, com este objetivo traçado, procedeu-se a uma campanha experimental a fim de avaliar as características físicas, hídricas e mecânicas das argamassas no seu estado fresco, endurecido e ainda após aplicadas no suporte. Com este trabalho foi também possível determinar as vantagens e desvantagens da adição de cal à mistura com terra e areia, bem como observar a evolução de todas as características analisadas com o decorrer do tempo, executando ensaios aos 60 e aos 90 dias de idade.

Após o término de todos os ensaios, registo de todos os resultados e análise desses mesmos valores, foi possível chegar a diversas conclusões, tentando responder ao objetivo principal deste trabalho.

Inicialmente procedeu-se aos ensaios às argamassas no seu estado fresco. Estes ensaios foram condicionados pelo valor do espalhamento pretendido, uma vez que existia um intervalo de valores ótimos de modo a obter uma trabalhabilidade ideal e tornar possível a reprodução destas mesmas argamassas. Assim, realizaram-se os ensaios de massa volúmica, teor de vazios e como referido anteriormente, espalhamento. As argamassas apresentaram massas volúmicas entre 1925 a 1948 kg/m³ e um teor de vazios entre 4,9 a 5,6 %. A inclusão de cal mostrou-se positiva, na medida em que permitiu obter um menor volume de vazios. Os espalhamentos das argamassas ficaram dentro do intervalo de 160 a 176 mm, sendo que a adição e substituição de cal aérea melhorou a trabalhabilidade das argamassas com terra, uma vez que diminuiu a quantidade de água necessária e conseqüentemente diminuindo a porosidade nas argamassas. De seguida, realizaram-se os ensaios à argamassa no estado endurecido, caracterizando-as segundo parâmetros hídricos e resistentes. Estes valores são muito relevantes para a escolha de uma ou outra composição de argamassas com terra para reabilitar edifícios com terra, facto este muito importante pois, normalmente, as construções com terra recorrem a terras existentes no local, diferindo entre si em bastantes parâmetros.

Deste modo, realizaram-se os ensaios de massa volúmica aparente, resistência à tração por flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, retração linear e volumétrica, absorção de água por capilaridade e secagem.

Relativamente ao ensaio de massa volúmica aparente, verificou-se que os resultados se mantiveram semelhantes em ambas as idades, sendo o resultado mais elevado apresentado pela família 25C_PdAr e o resultado mais baixo apresentado pela família CAr, o que era expectável visto que apresenta uma massa de material sólido inferior. Pode dizer-se que a inclusão de cal aérea aumentou os resultados obtidos para as massas volúmicas aparentes, uma vez que a massa de material sólido é igual à argamassa PdAr.

No que diz respeito às resistências das argamassas estudadas, foi possível verificar que tanto na resistência à tração como na resistência à compressão houve decréscimo dos resultados com o decorrer do tempo – entre os 60 e 90 dias de idade –, em todas as argamassas, exceto no ensaio de resistência à tração para argamassa CAr. A resistência à tração apresenta valores entre os 0,12 MPa e os 0,25 MPa, sendo o melhor resultado registado na família PdAr_25C. No que concerne à inclusão de cal, este procedimento revelou-se benéfica, aumentando os valores da resistência. No que diz respeito às resistências à compressão, os valores apresentados encontram-se entre os 0,30 MPa e os 0,57 MPa. Tal como na resistência à tração, a família que apresentou o melhor resultado aos 90 dias de idade, para a resistência à compressão foi a família PdAr_25C. Relativamente à inclusão de cal, também para a resistência à compressão este procedimento foi benéfico, aumentando os valores obtidos, em todas as argamassas com terra.

A análise dos parâmetros resistentes indica a adequabilidade de uma argamassa para a reabilitação de uma construção em taipa. A argamassa de reparação deve ser compatível com a base existente, apresentado menor resistência mecânica e maior deformabilidade que este tipo de paramentos.

Relativamente aos módulos de elasticidade dinâmicos, os valores obtidos encontram-se entre os 1280 MPa e os 1587 MPa. Quanto mais alto o valor do módulo de elasticidade dinâmico, maior a rigidez, sendo que os valores mais elevados se registaram para a família PdAr_25C aos 60 dias de idade e para a família 25C_PdAr aos 90 dias de idade, enquanto os resultados mais baixos pertencem à família CAr. No que diz respeito à inclusão de cal, aos 90 dias de idade, a substituição de cal aérea na massa de argila ou de areia aumenta os resultados do módulo de elasticidade dinâmico, ou seja, aumentou a

rigidez das argamassas, sendo que a adição de 25% da massa de argila em cal aérea à mistura com terra e areia obteve um resultado médio igual à argamassa de cal aérea e areia.

De acordo com os resultados obtidos para o ensaio de retração linear e volumétrica, nenhuma das argamassas apresenta retração linear, o que é muito positivo visto que os provetes conservaram as dimensões do seu molde. No que diz respeito à retração volumétrica, o maior valor verifica-se para a argamassa PdAr e o menor valor para a argamassa CAr, sendo visível que a inclusão de cal aérea nas argamassas de terra teve uma influência positiva na retração volumétrica, diminuindo bastante o seu valor.

No que diz respeito aos parâmetros hídricos, com os ensaios de absorção de água por capilaridade e o ensaio de secagem, obteve-se o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem. No caso do coeficiente de capilaridade, obtiveram-se valores entre os 0,02 e os 0,07 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$. É de ressaltar que quanto mais baixo for o coeficiente de capilaridade, melhor o comportamento da argamassa na presença de humidades, ou seja, menor é a velocidade de ascensão de água por capilaridade. Assim, a argamassa com melhor comportamento em ambas as idades foi a argamassa PdAr. Foi também visível que o coeficiente de capilaridade aumentou com a inclusão de cal, prejudicando o comportamento das argamassas na presença de humidade e este coeficiente diminuiu com o decorrer do tempo, beneficiando as argamassas. Relativamente ao ensaio de secagem, quanto maior a taxa de secagem, mais rápido ocorrerá a secagem inicial, sendo preferível na construção argamassas com este comportamento. A taxa de secagem corresponde ao declive do troço inicial da curva de secagem (em kg/m^2) em função do tempo. Esta taxa refere-se à primeira fase de secagem onde a fase líquida é contínua na rede dos poros. Os valores obtidos vão desde 0,026 aos 0,060 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$, sendo que o melhor resultado é observado para a família PdAr_25C, aos 60 e aos 90 dias de idade. Concluiu-se também que a taxa de secagem diminuiu com o tempo para todas as argamassas, prejudicando o comportamento destas face à presença de humidades. Conclui-se ainda que a inclusão de cal aérea à mistura com terra e areia aumentou a taxa de secagem, revelando-se benéfico este comportamento.

Finalmente, ensaiaram-se as argamassas aplicadas no suporte, neste caso, tijolo furado, procedendo aos ensaios de condutibilidade térmica, dureza superficial, resistência à abrasão, aderência ao suporte, esclerómetro pendular e absorção de água sob baixa pressão. Concluiu-se que nos ensaios de aderência ao suporte, frequentemente ocorreu a rotura entre a cola e o reboco, considerando-se nulo o resultado desse ensaio.

Relativamente ao ensaio de absorção de água sob baixa pressão, foram também observados resultados muito dispersos, mesmo dentro de cada família, podendo assumir-se que estes ensaios não tiveram grande sucesso na sua execução, sendo os seus resultados inconclusivos e, portanto, não devem ter grande destaque na caracterização das argamassas estudadas.

No que diz respeito ao ensaio de condutibilidade térmica, os valores registados variam entre os 0,42 e os 0,66 W/(m.K), sendo o pior resultado do coeficiente de condutibilidade térmica observado na família PdAr_25C, pois quanto mais alto for o valor, pior será o comportamento térmico da argamassa. Para os 90 dias de idade, a argamassa com melhor comportamento térmico é a família CAr. Nas famílias onde se substituiu cal aérea pela areia ou pela cal, os coeficientes de condutibilidade térmica aumentaram com o tempo, sendo que nas outras famílias se verificou o comportamento contrário. No que diz respeito à inclusão de cal, nas famílias com terra e areia, este procedimento revelou-se prejudicial.

O ensaio de dureza superficial registou resultados entre os 54,70 e os 84,00 Shore A, concluindo-se que a dureza aumentou com o decorrer do tempo e que a inclusão de cal foi também benéfica.

Relativamente à resistência à abrasão, a resistência do reboco aumentou com a idade da argamassa, visto que desgaste diminuiu com o tempo. Foi também observável uma grande diminuição do valor do desgaste com a inclusão de cal aérea hidratada, sendo que os piores resultados, aos 60 e aos 90 dias de idade, verificaram-se na família PdAr e o melhor resultado, em ambas as idades, verificou-se para a família CAr. O aumento da idade das argamassas foi benéfico para a resistência à abrasão bem como a inclusão de cal aérea.

Relembra-se, no entanto, os valores obtidos para as resistências mecânicas das argamassas, onde os resultados aos 60 dias de idade eram superiores aos resultados aos 90 dias de idade, revelando uma diminuição da resistência mecânica, ao contrário do que se verifica neste ensaio.

O ensaio de esclerómetro pendular registou resultados entre os 35,50° e os 59,20° Vickerz, observando-se um aumento dos resultados com a inclusão de cal aérea e também com o avançar da idade, contudo, os resultados mantiveram-se muito semelhantes.

No que diz respeito ao ensaio de absorção sob baixa pressão, registaram-se curvas de absorção muito semelhantes entre si, o que quer dizer que o comportamento da argamassa se manteve, mesmo com o decorrer do tempo. Ainda assim, foi observável

uma discrepância nos valores registados para a família PdAr, o que significa que, possivelmente, existiu um erro no decorrer do ensaio. Concluiu-se que a família que obteve o pior resultado foi a argamassa CAr, demorando cerca de 100 segundos a absorver os 4 ml de água através dos tubos de Karsten, enquanto que a família PdAr_25C foi a família com melhores resultados, entre os 300 e os 700 segundos.

Assim, de uma forma geral, os ensaios realizados evidenciaram resultados ambíguos no que diz respeito à inclusão de cal aérea nas misturas de areia e argila, melhorando algumas características das argamassas, mas prejudicando outras. Poderá analisar-se que de um modo geral, a cal aumenta a resistência à tração e à compressão das argamassas, mas aumenta a rigidez. No que se refere aos parâmetros hídricos, a inclusão de cal prejudica as argamassas relativamente à velocidade de absorção de água por capilaridade, mas por sua vez, aumenta a taxa de secagem das argamassas.

Relativamente ao aumento da idade das argamassas, também os resultados foram inconclusivos. No que diz respeito às resistências à tração e à compressão, os resultados diminuiram com o tempo, e quanto ao resultado da condutibilidade térmica, não foi possível chegar a uma conclusão. Verificando os parâmetros hídricos, o coeficiente de capilaridade diminuiu com o tempo, favorecendo o comportamento hídrico das argamassas, contudo a taxa de secagem também diminuiu com o tempo, prejudicando as argamassas. Averigua-se que a grande maioria das características ensaiadas registaram um agravamento com o decorrer do tempo.

Pode ainda dizer-se que quanto menor o teor de vazios e o módulo de elasticidade, maior a resistência mecânica da argamassa e, por sua vez, maior será a sua dureza superficial e o seu desgaste quando sujeito a ações de abrasão e menor será o seu ângulo de ressalto. Foi também visível que a argamassa com o menor coeficiente de capilaridade, a argamassa CAr, absorveu mais rapidamente os 4 ml de água através dos tubos de Karsten, o que seria de esperar, pois possui os capilares de maior dimensão e é a argamassa com a pior taxa de secagem. A argamassa CAr é das argamassas com maior coeficiente de capilaridade.

Comparando as argamassas com terra com as argamassas cimentícias, concluiu-se que apresentam características que as tornam mais adequadas à reabilitação de construções com terra, como por exemplo, as baixas resistências mecânicas. Como referido anteriormente, as argamassas de reparação devem ser compatíveis com as características do suporte, que por si só, já são baixas.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Após a análise dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental e retiradas as conclusões, foram identificadas diversas questões que ficaram pouco esclarecidas e que merecem uma resposta adequada.

Uma dessas questões é a determinação do efeito da adição e substituição de cal aérea hidratada nesta argamassa com terra, pois tanto se revelou benéfica como prejudicial em alguns parâmetros, sendo o resultado inconclusivo. Sugere-se a realização de uma campanha experimental com os mesmos ensaios, mas em argamassas com a adição de cal aérea em diferentes percentagens.

A influência do tempo foi também pouco esclarecedora em alguns ensaios, sendo interessante realizar toda a campanha experimental deste trabalho em argamassas com diferentes idades, em intervalos idênticos, até uma idade superior a 60 dias de idade, como por exemplo, aos 30, 60, 90 e 120 dias.

Relativamente aos ensaios de aderência ao suporte e aos ensaios de absorção de água sob baixa pressão, que não foram realizados adequadamente e não foi possível retirar resultados conclusivos, deveriam repetir-se de modo a retirar conclusões fiáveis.

Relativamente à caracterização das argamassas aplicadas no suporte, deveriam aplicar-se as argamassas a estudar em diferentes suportes, sendo muito interessante incluir um paramento de taipa, comparando assim os resultados obtidos consoante o tipo de base.

Para registar as consequências da reabilitação de construções com recurso a argamassas cimentícias, deveriam aplicar-se argamassas deste tipo, com diferentes traços, em blocos de taipa, registando-se também as patologias observadas com o decorrer do tempo.

Referências Bibliográficas

Arquitete suas Ideias (2016). Conheça mais sobre a Arquitetura Vernacular e o Adobe. Obtido de <http://arquitetesuasideias.com.br/2016/08/31/conheca-mais-sobre-a-arquitetura-vernacular-e-o-adobe/>

ASTM (2000). ASTM D2240-00. Standard Test Method for Rubber Property. Durometer Hardness. West Conchohoken, United States.

ASTM (2008). ASTM C805-08. Standard Test Method for Rebound Hammer of Hardened Concrete. West Conchohoken, United States.

ASTM (2009). ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conchohoken, United States.

Berge, B. (2009). The Ecology of Building Materials. 2º Edition, Architectural Press, ISBN 978185617-537-1, Elsevier Science.

Bravo, D. R. (2017). Conservação de Edifícios em Terra: Argamassas de Reboco. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

CEN (1998). EN 1015-6: 1998. Methods of test for mortar masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. European Committe of Standardization, Brussels.

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

CEN (1999b). EN 1015-7:1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar. European Committe of Standardization, Brussels.

CEN (1999c). EN 1015-11:1999. Methods of test of masonry mortar - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committe of Standardization, Brussels.

CEN (2000). EN 1015-12:2000. Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. European Committee of Standardization, Brussels.

CEN (2013). EN 16302:2013. Conservation of Cultural Heritage - Test Methods - Measurement of Water Absorption by Pipe Method. European Committee of Standardization, Brussels.

Coelho, A. G., Torgal, F. P. & Jalali, S. (2009). A cal na construção (TecMinho). Guimarães: Publidisa.

Ecoblocos (sem data). Tijolos ecológicos em solo cimento. Obtido de <http://ecoblocos.no.comunidades.net/tijolos-ecologicos-em-solo-cimento>

Glamgrid (sem data). Shibam – The Manhattan of Desert. Obtido de <http://glamgrid.com/shibam-the-manhattan-of-the-desert/shibam-the-manhattan-of-the-desert-7/>

Gomes, M. I. (2017). Regulação da qualidade do ar interior através da utilização de argamassas eco-eficientes. II Edição do Encontro Nacional iiSBE Portugal, - “Reabilitação Urbana e Construção Sustentável – do edifício para a escala urbana”. 16 - 17 de novembro, Lisboa.

Gomes, M. I. (2013). Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Gomes, M. I., Gonçalves, T. D. & Faria, P. (2012). Conservação de construções de terra - argamassas para reparação de taipa. Jornadas LNEC, 18 a 20 de junho de 2012, Lisboa.

Gonçalves, T. D. & Gomes, M. I. (2012). Construção de terra crua: Potencialidades e questões em aberto. Jornadas LNEC, 18 a 20 de junho de 2012, Lisboa, 1–7.

Hamard, E.; Morel, J. C.; Salgado, F.; Marcom, A. & Meunier, N. (2013). A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 14, p. 109-115.

IPQ (2002a). NP EN 1097-3:2000. Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002b). NP EN 933-8:2012. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio de equivalente de areia. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2006). NP EN 196-1:2006. Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

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

Jamú, N. (2013). Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência da terra como ligante. Dissertação de Mestrado, FCT UNL

Jorge, F.; Fernandes, M. & Correia, M. (2006). Arquitectura de Terra em Portugal. 1ª Edição, Lisboa, Argumentum ISBN 972-8479-36-0.

Keable, J. (1996). Rammed Earth Structure: A Code of Practice. London: Intermediate Technology Publications Ltd.

Lima, J. (2013). O contributo das argamassas de barro para a qualidade do ambiente interior dos edifícios: o caso das argilas do sotavento algarvio. 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa, LNEC (CD).

LNEC (1966). Especificação E-196. Solos. Análise granulométrica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1970). Especificação E-239. Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Martins, A. M. (2008). Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Mendonça, B. V. (2007). Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas - Influência do ligante. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Minke, G. (2006). Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel- Berlin-Boston.

Moreia, A. M. (2008). Materiais de Construção I – Terra Crua. Sebenta da unidade curricular de Materiais de Construção I. Escola Superior de Tecnologia de Tomar do Instituto Politécnico de Tomar.

NABau (2013). DIN 18947. Earth Plasters. Terms and Definitions, Requirements, Test Methods (in german). Berlin.

NP-83 (1965). Norma Portuguesa 83, Solos: Determinação da densidade das partículas. Lisboa.

Olhares (2011). Tabique. Obtido de http://olhares.sapo.pt/tabique_foto4614931.html

Pina dos Santos, C. A. & Matias, L. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios. ITE50. Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Pires, A. L. G. (2013). Avaliação do comportamento higroscópico de argamassas de reboco. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Pollock, S. (1999). Ancient mesopotamia, Cambridge University Press.

Ribeiro, O. (1969). Geografia e civilização. Temas Portugueses, Coleção Espaço e Sociedade, Livros Horizonte, Lisboa, Portugal.

RILEM (1980a). Recommended Tests to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods. Test No. II.6 «Water Absorption Coefficient (capillarity)». Materials and Structures, Research and Testing 13.

RILEM (1980b). Recommended Tests to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods. Test No. II.5 «Evaporation Curve». Materials and Structures, Research and Testing 13.

Rodrigues, M. F. (2004). Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Santos, T. A. (2014). Argamassas de terra para rebocos interiores - Ensaio de caracterização e influência da formulação. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Sulinformação (2016). Torre albarrã do Castelo de Paderne devolvida à sua monumentalidade com obras de 100 mil euros. Obtido de <http://www.sulinformacao.pt/2016/08/torre-albarra-do-castelo-de-paderne-devolvida-a-sua-monumentalidade-com-obras-de-100-mil-euros/>

Tavares, M. L. (2009). A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Tese de Doutoramento. Faculdade de Arquitectura - Universidade Técnica de Lisboa.

Torgal, F. P.; Eires, R. M. G. & Jalali, S. (2009). Construção em terra (TecMinho, Ed.). Guimarães: Publidisa.

Torgal, F. P. & Jalali, S. (2010). A sustentabilidade dos Materiais de Construção (TecMinho, Ed.). Guimarães: Publidisa.

Wikimedia Commons. (2006). Flickr – Gaspa – Saqqara, piramide a gradoni (1). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flickr_-_Gaspa_-_Saqqara,_piramide_a_gradoni_\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flickr_-_Gaspa_-_Saqqara,_piramide_a_gradoni_(1).jpg)

Anexos

Anexo A - Ficha de Segurança da Cal Aérea Hidratada



FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA
da CAL HIDRATADA [Hidróxido de Cálcio - Ca(OH)₂]
de acordo com o Regulamento (UE) n.º 2015/830

Versão: 1.4
Data Revisão: 05/2017
Data Impressão: 21/06/2017

SECÇÃO 1. IDENTIFICAÇÃO DA SUBSTÂNCIA/MISTURA E DA SOCIEDADE/EMPRESA

1.1 Identificador do produto

Nome da substância: Hidróxido de cálcio, Dihidróxido de cálcio
Sinónimos: Cal Hidratada, Cal apagada, cal extinta, cal morta, cal para construção, cal em pasta
Nome químico e fórmula: Hidróxido de Cálcio – Ca(OH)₂
Designação comercial: **Cal Hidratada, Cal Hidratada Normal, Cal Hidratada Super Ventilada, Cal em pasta**
N. CAS: 1305-62-0
N. CE / EINECS: 215-137-3
Peso molecular: 74.09 g/mol
Número de registo REACH: 01-2119475151-45-0115

1.2 Utilizações identificadas relevantes da substância ou mistura e utilizações desaconselhadas

Utilizações da substância: Construção civil, indústria química, agricultura, biocida, protecção ambiental (tratamento de efluentes gasosos, tratamento de águas residuais, tratamento de lamas, etc.), tratamento de água potável, ração animal, indústria alimentar e farmacêutica, engenharia civil, indústria papelreira e de tintas, metalomecânica.

Utilizações relevantes: Verifique as utilizações identificadas no quadro 1 do Apêndice desta FDS.

Utilizações desaconselhadas: Não se aplica

1.3 Identificação do fornecedor da ficha de dados de segurança

Nome: Calcidrata – Industrias de Cal, S.A.
Endereço: Estrada 5 de Outubro, Pé da Pedreira
2025 - 161 Alcanede - PORTUGAL
N.º de Telefone: (+351) 243 40 90 30
N.º de Fax: (+351) 243 40 90 39
E-mail: calcidrata@calcidrata.pt
E-mail do responsável pela FDS: nuno.baptista@calcidrata.pt

1.4 Número de telefone de emergência

N.º Emergência Europeu: 112
N.º Centro de Informação Antivenenos (CIAV): (+351) 808 250 143
N.º Emergência da empresa: (+351) 243 40 90 30
Disponibilidade 24h: Sim

SECÇÃO 2. IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS

2.1 Classificação da substância ou mistura

Irritação cutânea 2, H315
STOT Exposição única 3, H335 - Via de exposição: Inalação
Lesão ocular 1, H318

Anexo B - Quantidades de Material das Argamassas

Família PdAr – Relação água/material sólido 19%

Amassadura ensaios de massa volúmica e teor de vazios		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,798
Areia	4	4,149
Água	-	0,940

Nota: Quantidades utilizadas para realizar um ensaio de massa volúmica e teor de vazios.

Amassadura ensaios de resistência mecânica e ensaios hídricos		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,545
Areia	4	2,832
Água	--	0,642

Nota: Quantidades utilizadas para executar 6 provetes prismáticos de dimensões 160x40x40 mm.

Amassadura ensaios de retração		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,287
Areia	4	1,494
Água	-	0,338

Nota: Quantidades utilizadas para executar 3 provetes prismáticos de dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm.

Amassadura ensaios sobre aplicações		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,635
Areia	4	3,302
Água	-	0,748

Nota: Quantidades utilizadas para executar 2 aplicações de dimensões 290 mm x 190 mm x 10 mm.

Família PdAr+25C – Relação água/material sólido 18%

Amassadura ensaios de massa volúmica e teor de vazios		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,798
Areia	4	4,149
Cal aérea	-	0,199
Água	-	0,926

Nota: Quantidades utilizadas para realizar um ensaio de massa volúmica e teor de vazios.

Amassadura ensaios de resistência mecânica e ensaios hídricos		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,545
Areia	4	2,832
Cal aérea	-	0,136
Água	-	0,632

Nota: Quantidades utilizadas para executar 6 provetes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm.

Amassadura ensaios de retração		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,287
Areia	4	1,494
Cal aérea	-	0,072
Água	-	0,333

Nota: Quantidades utilizadas para executar 3 provetes prismáticos de dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm.

Amassadura ensaios sobre aplicações		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,635
Areia	4	3,302
Cal aérea	-	0,159
Água	-	0,737

Nota: Quantidades utilizadas para executar 2 aplicações de dimensões 290 mm x 190 mm x 10 mm.

Família 25C_PdAr – Relação água/material sólido 18%

Amassadura ensaios de massa volúmica e teor de vazios		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,598
Areia	4	4,149
Cal aérea	-	0,200
Água	-	0,890

Nota: Quantidades utilizadas para realizar um ensaio de massa volúmica e teor de vazios.

Amassadura ensaios de resistência mecânica e ensaios hídricos		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,409
Areia	4	2,832
Cal aérea	-	0,136
Água	-	0,608

Nota: Quantidades utilizadas para executar 6 provetes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm.

Amassadura ensaios de retração		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,215
Areia	4	1,494
Cal aérea	-	0,072
Água	-	0,321

Nota: Quantidades utilizadas para executar 3 provetes prismáticos de dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm.

Amassadura ensaios sobre aplicações		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,476
Areia	4	3,302
Cal aérea	-	0,159
Água	-	0,709

Nota: Quantidades utilizadas para executar 2 aplicações de dimensões 290 mm x 190 mm x 10 mm.

Família PdAr_25C – Relação água/material sólido 18%

Amassadura ensaios de massa volúmica e teor de vazios		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,798
Areia	4	3,949
Cal aérea	-	0,200
Água	-	0,890

Nota: Quantidades utilizadas para realizar um ensaio de massa volúmica e teor de vazios.

Amassadura ensaios de resistência mecânica e ensaios hídricos		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,545
Areia	4	2,696
Cal aérea	-	0,136
Água	-	0,608

Nota: Quantidades utilizadas para executar 6 provetes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm.

Amassadura ensaios de retração		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,287
Areia	4	1,422
Cal aérea	-	0,072
Água	-	0,321

Nota: Quantidades utilizadas para executar 3 provetes prismáticos de dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm.

Amassadura ensaios sobre aplicações		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Argila PD	1	0,635
Areia	4	3,143
Cal aérea	-	0,159
Água	-	0,709

Nota: Quantidades utilizadas para executar 2 aplicações de dimensões 290 mm x 190 mm x 10 mm.

Família CAr – Relação água/material sólido 20%

Amassadura ensaios de massa volúmica e teor de vazios		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Cal aérea	1	0,373
Areia	4	4,149
Água	-	0,904

Nota: Quantidades utilizadas para realizar um ensaio de massa volúmica e teor de vazios.

Amassadura ensaios de resistência mecânica e ensaios hídricos		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Cal aérea	1	0,255
Areia	4	2,832
Água	-	0,617

Nota: Quantidades utilizadas para executar 6 provetes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm.

Amassadura ensaios de retração		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Cal aérea	1	0,134
Areia	4	1,494
Água	-	0,326

Nota: Quantidades utilizadas para executar 3 provetes prismáticos de dimensões 300 mm x 30 mm x 30 mm.

Amassadura ensaios sobre aplicações		
Material	Traço Volumétrico	Massa (kg)
Cal aérea	1	0,297
Areia	4	3,302
Água	-	0,720

Nota: Quantidades utilizadas para executar 2 aplicações de dimensões 290 mm x 190 mm x 10 mm.

Anexo C – Temperatura e Humidade Relativa da Sala Condicionada

Dia	T (°C)	Humidade Relativa (%)	Dia	T (°C)	Humidade Relativa (%)
19/04/2016	17,7	61%	21/06/2016	20,8	54%
20/04/2016	17,2	62%	24/06/2016	21,5	58%
21/04/2016	17,4	61%	27/06/2016	21,3	59%
22/04/2016	17,7	60%	28/06/2016	21,4	57%
26/04/2016	17,5	53%	29/06/2016	21,6	56%
27/04/2016	17,7	49%	30/06/2016	21,9	55%
28/04/2016	17,9	49%	01/07/2016	22,0	54%
29/04/2016	18,0	53%	04/07/2016	22,1	57%
02/05/2016	18,2	38%	05/07/2016	21,8	60%
03/05/2016	18,5	43%	06/07/2016	21,7	60%
04/05/2016	19,1	59%	07/07/2016	22	64%
05/05/2016	18,1	59%	08/07/2016	21,9	57%
06/05/2016	18,7	59%	11/07/2016	22,1	55%
09/05/2016	18,1	60%	12/07/2016	20,4	52%
10/05/2016	17,6	60%	13/07/2016	21,7	46%
11/05/2016	17,4	59%	14/07/2016	21,9	47%
12/05/2016	17,4	61%	15/07/2016	21,8	47%
13/05/2016	17,5	58%	18/07/2016	22,0	53%
16/05/2016	18,0	60%	19/07/2016	22,1	55%
17/05/2016	18,0	57%	20/07/2016	22,4	57%
18/05/2016	18,7	57%	21/07/2016	22,5	56%
19/05/2016	18,4	56%	22/07/2016	22,6	58%
20/05/2016	18,8	61%	25/07/2016	22,7	57%
23/05/2016	18,7	48%	26/07/2016	22,9	59%
24/05/2016	19,6	61%	27/07/2016	22,9	60%
25/05/2016	19,2	59%	28/07/2016	22,9	59%
27/05/2016	19,0	59%	29/07/2016	22,9	58%
30/05/2016	18,9	56%	01/08/2016	23,1	54%
31/05/2016	18,9	55%	03/08/2016	22,7	57%
01/06/2016	19,4	57%	05/08/2016	22,8	59%
02/06/2016	19,0	55%	08/08/2016	23,1	58%
03/06/2016	19,3	57%	10/08/2016	23,4	55%
06/06/2016	20,3	64%	12/08/2016	23,3	56%
07/06/2016	20,5	62%	17/08/2016	23,1	51%
08/06/2016	20,3	59%	19/08/2016	23,6	53%
09/06/2016	20,3	60%	22/08/2016	23,2	50%
14/06/2016	20,8	60%	24/08/2016	23,6	53%
15/06/2016	20,7	56%	26/08/2016	23,7	58%
16/06/2016	20,4	53%	29/08/2016	23,1	49%
17/06/2016	20,4	53%	31/08/2016	23,3	56%