



Pedro Alexandre Lourenço Inácio

ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA

REHABILITATION MORTARS WITH INCORPORATION
OF RED CERAMIC WASTE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e pela Doutora Gina Maria Lourenço Matias

Coimbra, Julho, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Pedro Alexandre Lourenço Inácio

Argamassas de Reabilitação com Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha

REHABILITATION MORTARS WITH INCORPORATION OF RED CERAMIC WASTE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e pela Doutora Gina Maria Lourenço Matias

.....

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Colaboração Institucional



Coimbra, 7 de Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular:

- Às minhas orientadoras, Professora Doutora Isabel Torres e Eng.^a Gina Matias, pela orientação, apoio, disponibilidade e os conhecimentos transmitidos ao longo deste estudo;
- A todos os técnicos do laboratório do ITECONS, pelo auxílio prestado ao longo de toda a campanha experimental;
- A todos os meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo destes anos
- À minha família, em especial os meus pais, pela oportunidade, força e motivação que permitiu concluir esta etapa da minha vida.

A todos, o meu sincero Obrigado!

RESUMO

Na reabilitação e manutenção das fachadas antigas deve ter-se em atenção que são elementos expostos a degradação e, como tal, para um bom desempenho, devem apresentar propriedades mecânicas e físicas adequadas aos requisitos exigidos para o efeito. Sendo assim, é essencial que as argamassas utilizadas possuam uma aparência e constituição compatível com a argamassa pré-existente e com o suporte, de forma a não comprometer a durabilidade do sistema.

Tendo em conta o volume de resíduos produzidos pelas indústrias cerâmicas e da construção, o desenvolvimento de soluções de argamassas de revestimento com incorporação destes resíduos poderá apresentar-se como uma solução viável, não só do ponto de vista técnico, mas também ambiental.

No âmbito desta temática e na sequência de diversos trabalhos anteriormente desenvolvidos foi analisado o comportamento de argamassas de cal com incorporação de resíduos cerâmicos, de acordo com a normalização existente, com o objetivo de se conseguirem formulações que possam ser consideradas argamassas de reabilitação e obter a respetiva marcação CE exigida.

O trabalho desenvolvido permitiu confirmar as vantagens da incorporação resíduos de cerâmica em argamassas de cal substituindo uma percentagem do agregado por resíduos e a adição do adjuvante hidrófugo.

ABSTRACT

When rehabilitating and maintaining old facades it must be considered that the facades are exposed elements subject to degradation, so, in order for them to perform well, they should have adequate mechanical and physical properties. Therefore, it is essential that the mortars used have an appearance and constitution compatible with the pre-existing mortar and support so that durability of the system is not compromised.

Given the volume of waste produced by the ceramic and construction industries, the development of mortars with the incorporation of these wastes could be a viable technical and environmental solution.

In this context, the behavior of lime mortars with the incorporation of ceramic residues was analyzed according to the existing technical norms to verify if they can be considered rehabilitation mortars and obtain the required CE marking.

The study developed confirms the advantages of the incorporation of ceramic residues in lime mortars by replacing a percentage of the aggregate with residues and the addition of the hydrophobic adjuvant.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE QUADROS	VII
ABREVIATURAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1 ARGAMASSAS	4
2.1.1 Agregado	4
2.1.2 Ligante	4
2.1.3 Água de amassadura	5
2.1.4 Adjuvantes	5
2.2 REVESTIMENTOS DE PAREDES	6
2.2.1. Argamassas para rebocos de edifícios antigos	7
2.2.2. Funções e requisitos dos rebocos	7
2.2.3. Características a exigir às argamassas e compatibilidade com o suporte.....	8
2.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE CERÂMICA	12
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	18
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	21
3.2.1. Análise granulométrica por peneiração	22
3.2.2. Módulo de finura	23
3.2.3. Determinação da baridade da areia.....	23
3.2.4. Determinação da massa volúmica e da absorção de água dos materiais	24
3.3. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS (EN 1015-2)	26
3.4. ENSAIO SOBRE ARGAMASSAS FRESCAS	28
3.4.1. Consistência por espalhamento - EN 1015-3	28
3.5. ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS (ENSAIOS PARA MARCAÇÃO CE DO PRODUTO (REQUISITOS DA NP EN 998-1))	29

3.5.1. Aderência - EN 1015-12.....	29
3.5.2. Absorção de água por capilaridade-EN 1015-18.....	31
3.5.3. Permeabilidade ao vapor de água - EN 1015-19	33
3.5.4. Massa volúmica seca - EN 1015-10	36
3.5.5. Resistência à tração flexão - EN 1015-11	36
3.5.6. Resistência à compressão - EN 1015-11	37
3.6. CARACTERIZAÇÃO COMPLEMENTAR	38
3.6.1. Módulo de elasticidade dinâmico - NP EN 14146	38
3.6.2. Ensaio de secagem.....	40
3.6.3. Porosidade aberta e massa volúmica aparente-NP EN 1936.....	41
4. RESULTADOS	44
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	44
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	44
4.2.1. Análise granulométrica.....	44
4.2.2. Módulo de finura	45
4.2.3. Baridade dos materiais.....	46
4.2.4. Massa volúmica e absorção de água dos materiais.....	47
4.3. ENSAIO SOBRE ARGAMASSAS FRESCAS	48
4.3.1. Consistência por espalhamento	48
4.4. ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS	49
4.4.1. Massa volúmica seca	49
4.4.2. Porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	50
4.4.3 Absorção de água por capilaridade.....	51
4.4.4. Ensaio de secagem.....	52
4.4.5 Permeabilidade ao vapor de água	53
4.4.6. Resistência à flexão	54
4.4.7. Resistência à compressão	56
4.4.8. Módulo de elasticidade dinâmico	57
4.4.9. Resistência adesiva.....	58
4.4.10. Análise dos resultados	60
5. CONCLUSÕES.....	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Peneiros de malha quadrada.....	22
Figura 3.2 - Provetes prismático.....	26
Figura 3.3 - Moldes e provetes cilíndricos	27
Figura 3.4 - Provetes de argamassa sobre tijolo cerâmico furado	27
Figura 3.5 - Consistência por espalhamento: Mesa de Espalhamento (CEN,1999).....	28
Figura 3.6 - Ensaio de arrancamento (Quintela,2006).....	29
Figura 3.7 - Ensaio de arrancamento	30
Figura 3.8 - Ensaio de arrancamento	31
Figura 3.9 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	32
Figura 3.10 - Provetes circulares	34
Figura 3.11 - Ensaio de resistência à tração por flexão	37
Figura 3.12 – Ensaio de resistência à compressão.....	38
Figura 3.12 – Módulo de elasticidade dinâmico.....	39
Figura 3.13 – Distinção entre um material com porosidade aberta e um material com porosidade fechada	41
Figura 3.14 - Amostras para determinação da porosidade aberta.....	42
Figura 3.15 - Pesagem hidrostática	43
Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia	45
Figura 4.2 - Módulo de finura dos agregados	46
Figura 4.3- Massas volúmica e absorção de água dos materiais	48
Figura 4.4 – Massa volúmica seca aos 28 e 60 dias	50
Figura 4.5 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 e 60 dias.....	51
Figura 4.6 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	52
Figura 4.7 – Índice de Secagem.....	53
Figura 4.8 - Permeabilidade ao vapor de água	54
Figura 4.9 - Resistência à flexão aos 28, 60 e 90 dias	56
Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias	57
Figura 4.11 - Módulo de elasticidade dinâmico	58
Figura 4.12 - Resistência adesiva aos 28, 60 e 90 dias.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Adjuvantes de argamassas de revestimento.....	5
Quadro 2.1 - Características mecânicas recomendadas para rebocos de substituição.....	9
Quadro 2.2 – Características físicas recomendadas para rebocos de substituição	10
Quadro 2.3 – Parâmetros para a classificação das argamassas de reboco.....	11
Quadro 2.4 – Classificação das argamassas em termos de resistência à compressão e absorção capilar	11
Quadro 3.1 – Ensaio dos constituintes	18
Quadro 3.2 – Ensaio das argamassas e idades de ensaio	19
Quadro 3.3 - Composições das argamassas em estudo	20
Quadro 3.4 - Composições das argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014).....	21
Quadro 3.5 - Classificação do agregado em função do módulo de finura (IPQ, 2005).....	23
Quadro 4.1 - Determinação da curva granulométrica da areia	44
Quadro 4.2 – Módulo de finura dos agregados.....	46
Quadro 4.3 – Baridade das matérias-primas.....	47
Quadro 4.4 - Massa volúmica e absorção de água dos materiais	47
Quadro 4.5 - Consistência por espalhamento	48
Quadro 4.6 - Massa volúmica seca.....	49
Quadro 4.7 - Porosidade aberta e massa volúmica aparente	50
Quadro 4.8 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade	51
Quadro 4.9 – Índice de Secagem.....	52
Quadro 4.10 - Permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de permeabilidade ao vapor de água.....	53
Quadro 4.11 - Resistência à flexão.....	55
Quadro 4.12 - Resistência à compressão	56
Quadro 4.13 - Módulo de elasticidade dinâmico.....	57
Quadro 4.14 - Resistência adesiva aos 28, 60 e 90 dias	58
Quadro 4.15 - Síntese dos resultados.....	60
Quadro 4.16 - Verificação dos requisitos para argamassa de renovação	61
Quadro 4.17 - Verificação dos requisitos das argamassas para edifícios antigos	62

ABREVIATURAS

2A_HB- Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica de Tijolo

2A_HT- Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica de Telha

2A_R- Argamassa de Cal Aérea de Referencia

4H_MB- Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica de Tijolo

4H_MT- Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica de Telha

4H_R- Argamassa de Cal Hidráulica de Referencia

AC- Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica (Tijolo e Telha) com Hidrófugo

AR- Argamassa de Cal Aérea de Referencia com Hidrófugo

CE – Comissão Europeia

CEN – Comité Europeu de Normalização

EN – Norma Europeia

HC- Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica (Tijolo e Telha) com Hidrófugo

HR- Argamassa de Cal Hidráulica de Referencia com Hidrófugo

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISO – Organização Internacional para Padronização

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

NP – Norma Portuguesa

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No sector da construção, a reabilitação assume cada vez mais importância. A reabilitação de argamassas deterioradas em revestimentos exteriores é uma das atividades mais frequentes em edifícios antigos devido ao facto de estas se encontrarem expostas às ações climáticas e ao impacto mecânico e ambiental.

Os edifícios antigos sujeitos a reabilitação têm características muito específicas que devem ser respeitadas e estudadas, de forma a realizar um trabalho preciso e cuidado. É essencial que os materiais de reparação sejam adequados para evitar situações de incompatibilidade entre argamassa de reparação e o suporte ou argamassa existente, de forma a prevenir o agravamento da degradação já existente e o aparecimento de novas patologias. Neste momento, torna-se relevante aprofundar o estudo de argamassas de revestimento adequadas à aplicação em edifícios antigos.

Atualmente, é muito importante conseguir obter um destino adequado para os resíduos resultantes da indústria cerâmica, quer do ponto de vista económico, quer do ponto de vista ambiental, uma vez que cerca de trinta por cento do produto resultante da indústria cerâmica é considerado não utilizável, e a resistência destes detritos à degradação se revela extremamente acentuada (Matias, 2008). A utilização de resíduos cerâmicos na produção de argamassas revela-se assim como uma solução possível e sustentável.

1.2 Objetivos da dissertação

Esta dissertação surge no seguimento de outros trabalhos de investigação que caracterizaram diversas argamassas com substituição de parte do agregado por resíduos cerâmicos, e tem como objetivo final a obtenção de formulações que possam ser consideradas argamassas de reabilitação de acordo com a normalização existente e que possa obter a respetiva marcação CE.

Este estudo tem como objetivo o melhoramento de formulações de argamassas de cal aérea e cal hidráulica com incorporação de resíduos cerâmicos, de modo a que estas possam ser consideradas um produto adequado para a reabilitação de edifícios, de acordo com a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013), relativa à marcação CE de argamassas.

Este trabalho pretende dar continuidade e otimizar os resultados obtidos num estudo desenvolvido anteriormente por Matias (2014). Pretendeu-se melhorar as características, nomeadamente a absorção de água por capilaridade utilizando adjuvantes na mistura.

Foram preparadas 4 argamassas de cal, sendo 2 de referência e 2 com resíduos de cerâmica em substituição de parte do volume de agregado. As argamassas de cal hidráulica foram preparadas com um traço volumétrico de 1:4 (ligante:agregado) e foi adicionado um hidrófugo. As argamassas de cal aérea foram preparadas com um traço volumétrico de 1:2 (ligante:agregado), e também com hidrófugo.

1.3 Estrutura da dissertação

Este texto encontra-se organizado em seis capítulos.

O primeiro capítulo consiste na parte introdutória do trabalho. É apresentado o enquadramento do tema, bem como os objetivos e metodologia propostos para este documento.

O segundo capítulo, dedicado ao estado da arte, encontra-se dividido em três subcapítulos. No primeiro é feita uma breve abordagem sobre argamassas e os seus constituintes. No segundo subcapítulo são abordados os revestimentos de paredes, requisitos e características que as argamassas de reboco devem ter. O último subcapítulo apresenta os estudos anteriormente efetuados sobre esta temática e que têm relevância no enquadramento do presente trabalho.

O terceiro capítulo descreve todo o trabalho experimental desenvolvido, onde se descrevem os procedimentos experimentais adotados.

O quarto capítulo apresenta todos os resultados obtidos, uma breve análise crítica dos mesmos, um paralelismo com os resultados obtidos nas argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014), a verificação dos requisitos que as argamassas deve cumprir para ser considerada uma argamassa de renovação segundo a norma NP EN 998-1:2013 e a verificação dos requisitos das argamassas de revestimento para edifícios antigos segundo Veiga e Carvalho (2002).

O quinto capítulo refere-se às conclusões. Neste ponto incluem-se considerações finais, onde é feita uma reflexão global do trabalho desenvolvido e, por fim, uma proposta de trabalhos futuros dentro desta temática.

No sexto capítulo encontram-se as referências bibliográficas, que compilam todos os elementos de pesquisa que foram consultados para levar a cabo este trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Argamassas

Uma argamassa é uma mistura homogênea que resulta da junção de um ou mais ligantes, agregados, água e por vezes adjuvantes. O seu processo de fabrico consiste na mistura dos elementos sólidos com água. As argamassas mais comuns são aplicadas como rebocos ou juntas de alvenaria.

As propriedades e as proporções dos constituintes das argamassas definem o seu comportamento, sendo essencial existir um equilíbrio entre todos os elementos. Agregado em excesso pode originar uma argamassa pouco coesa, por exemplo, e ligante em excesso pode originar uma argamassa pouco resistente e muito porosa. Em relação à quantidade água, esta deve ser suficiente para ocorrer a hidratação do ligante e para conferir uma boa trabalhabilidade à argamassa (Matias, 2008).

De seguida, encontram-se as características de cada um dos constituintes referidos anteriormente.

2.1.1 Agregado

Os agregados conferem resistência e estabilidade dimensional e têm como principais funções a diminuição da retração e da quantidade de ligante necessário, o aumento da resistência à compressão e da porosidade da argamassa (que provoca um aumento da permeabilidade ao vapor de água e maior resistência ao gelo) e, em alguns casos, a coloração do revestimento (Cavaco, 2005).

2.1.2 Ligante

O ligante assegura a coesão, preenche uma grande parte dos vazios que se formam entre os agregados e proporciona resistência à mistura. Através da adição de água gera-se uma reação química, formando-se uma pasta que, ao ganhar presa, e endurece.

Os ligantes podem ser classificados em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos. Os primeiros endurecem através da reação química entre o pó e a água e este processo dá-se tanto ao ar como dentro de água. Os ligantes aéreos, ao contrário dos anteriores, não endurecem imersos, pois necessitam do dióxido de carbono existente na atmosfera para ganharem presa.

Finalmente, os ligantes orgânicos são, por exemplo, os hidrocarbonetos e as resinas sintéticas (Rodrigues, 2004).

Os ligantes mais comuns são a cal e o cimento, sendo possível produzir diferentes argamassas em função dos mesmos: argamassas de cal (cal, areia e água), argamassas de cimento (cimento, areia e água) e argamassas bastardas, a partir da mistura de ambos os ligantes (cal, cimento, areia e água).

2.1.3 Água de amassadura

A hidratação do ligante é feita com a adição de água, como já foi referido anteriormente, que origina a aglomeração dos constituintes, formando uma pasta. A quantidade de água de amassadura é função da trabalhabilidade e da consistência pretendidas. Com o aumento quantidade de água, a resistência à compressão geralmente diminui. A adição de água em excesso pode resultar num maior volume de vazios aquando da evaporação da mesma, o que promove a retração excessiva do ligante, levando à fissuração dos revestimentos. Por outro lado, se a quantidade de água não for suficiente, não é possível obter uma amassadura homogênea (Martins, 2008).

2.1.4 Adjuvantes

A adição de adjuvantes tem como função modificar e/ou controlar determinadas propriedades das argamassas. No Quadro 2.1 listam-se alguns dos adjuvantes mais comuns utilizados e sua função em argamassas de revestimento.

Quadro 2.1 – Adjuvantes de argamassas de revestimento (Veiga, 1998)

Adjuvante	Função
Promotor de aderência	Melhoramento da aderência. Aumento da resistência à tração simples e por flexão.
Hidrófugos de massa	Obturação dos capilares, impedindo a penetração de água e a sua circulação no revestimento.
Introdutores de ar	Pequenas bolhas de ar, que promovem corte de capilaridade, melhorando a capacidade de impermeabilização do revestimento e a sua resistência ao gelo-degelo e aos sais.
Plastificantes	Aumento da trabalhabilidade da argamassa e diminuição da segregação, permitindo a redução do teor de água da amassadura.

Quadro 2.1 (cont.) – Adjuvantes de argamassas de revestimento (Veiga, 1998)

Adjuvante	Função
Retentores de água	Hidratação mais completa do revestimento, tornando-o menos sensível às condições climáticas.
Fungicidas	Impedimento da fixação de microrganismos na argamassa.
Pigmentos	Atribuição de coloração à argamassa.

2.2 Revestimentos de paredes

Os revestimentos de paredes concedem uma função estética ao edifício e contribuem para a proteção das mesmas quando sujeitas a agentes de degradação tais como: ação da água, agentes climáticos, choque/impacto, poluição atmosférica e sais solúveis contidos nos materiais, água e solo. A exposição a estes agentes pode tornar necessária a realização de obras de conservação e reabilitação dos mesmos. Para além das funções anteriormente descritas, os revestimentos ainda desempenham o papel de regularização das alvenarias e de impermeabilização, no caso de revestimentos exteriores (Veiga et al, 2004; Veiga, 2005).

Devido ao eventual valor histórico e estético dos edifícios antigos, é desejável a conservação dos revestimentos em vez da sua substituição. No entanto, se o estado de degradação for muito elevado, pode ser necessário renovar parcial ou totalmente do revestimento. Em relação à renovação parcial ou total de revestimentos existem duas abordagens:

- A primeira consiste em determinar a constituição do revestimento existente e reproduzir a argamassa antiga. Este processo poderá não ser muito preciso uma vez que em algumas argamassas eram incorporados aditivos (como por exemplo, leite, sangue de animais, gorduras animais ou vegetais, etc.) e ligantes cuja composição química foi sofrendo alterações com o passar dos anos, o que dificulta a sua identificação. Um outro fator de variabilidade está relacionado com a técnica de preparação e aplicação da argamassa. Se as técnicas atuais forem bastante distintas das utilizadas no passado, esta abordagem poderá ser inviável;

- A segunda consiste em criar uma argamassa com um comportamento semelhante à existente e adequado ao edifício. O seu aspeto deverá preservar a imagem do edifício e esta deverá ser compatível com os materiais já existentes. Para obter uma argamassa compatível com o suporte torna-se necessário identificar as funções da argamassa de revestimento e satisfazer as regras de qualidade (Veiga et al, 2004)

2.2.1. Argamassas para rebocos de edifícios antigos

As argamassas de substituição que se destinam a rebocos de edifícios antigos devem ser selecionadas de forma criteriosa, para evitar a sua rápida degradação e a introdução de eventuais danos nas alvenarias de suporte. Para tal, é necessário conhecer as funções, requisitos e as características mecânicas e físicas dos rebocos.

2.2.2. Funções e requisitos dos rebocos

As funções a desempenhar pelos rebocos são, essencialmente, as seguintes:

- i) regularização das alvenarias;
- ii) impermeabilização (no caso dos revestimentos exteriores) e proteção das paredes;
- iii) acabamento dos paramentos.

Para garantir essas funções, os requisitos mais significativos são:

- i) aderência ao suporte;
- ii) resistência à fendilhação;
- iii) capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada (no caso dos revestimentos exteriores);
- iv) capacidade de promover a expulsão do vapor de água formado no interior e da água infiltrada, por evaporação;
- v) aspeto estético;
- vi) durabilidade face às ações externas, nomeadamente às ações climáticas (no caso dos revestimentos exteriores) (Veiga, 2005).

Qualquer tipo de reboco deve cumprir estes requisitos para ser considerado funcional. No entanto, os rebocos de substituição aplicados em edifícios antigos devem também respeitar um conjunto ainda mais apertado de condições, tais como, o facto de necessitarem de ser compatíveis com os suportes que constituem as alvenarias antigas e não contribuírem para a sua degradação.

2.2.3. Características a exigir às argamassas e compatibilidade com o suporte

Perante todo o processo de reparação e recuperação dos elementos constituintes das alvenarias é necessário considerar a compatibilidade mecânica e física e analisar as características da argamassa que a condicionam.

A compatibilidade mecânica da nova argamassa com os materiais pré-existentes é condicionada pelas seguintes características:

- i) Resistência à tração e à compressão;
- ii) Módulo de elasticidade;
- iii) Aderência ao suporte;
- iv) Forças induzidas por retração restringida.

As características mecânicas da nova argamassa, tais como, resistência à flexão, à compressão e módulo de elasticidade, devem ser semelhantes às argamassas pré-existentes e sempre inferiores às do suporte. Desta forma, a distribuição de tensões manter-se-á idêntica ao original e as deformações dos materiais serão igualmente semelhantes. De modo a não comprometer a durabilidade, estas características não podem apresentar valores demasiado reduzidos.

A aderência ao suporte não pode ser excessiva, não devendo ser superior à resistência à tração do suporte. Caso contrário, não garante a capacidade de proteção e a durabilidade do revestimento, podendo contribuir para a degradação da alvenaria.

Por fim, é necessário limitar as tensões introduzidas no suporte devido às variações dimensionais do revestimento, tais como: retração, variações dimensionais de origem térmica ou devidas à humidade. (Veiga e Carvalho 2002)

Quanto à compatibilidade física, é necessário que as seguintes características estejam em consonância com as dos elementos pré-existentes:

- i) Características relacionadas com a permeabilidade à água e ao vapor de água;
- ii) Características térmicas, nomeadamente o coeficiente de dilatação térmica.

A nova argamassa deverá ter uma permeabilidade à água idêntica à das argamassas pré-existentes e superior à do suporte, de forma a evitar a degradação por infiltração de água na alvenaria antiga.

Em relação à permeabilidade ao vapor de água, tem que ser tão elevada quanto possível, para favorecer a evaporação da água infiltrada ou absorvida. A retenção da água na alvenaria, para além de originar um ambiente húmido e insalubre, contribui para a degradação da parede através da dissolução dos seus constituintes e da cristalização de sais.(Veiga e Carvalho 2002)

Na maioria dos casos, quanto menores forem o coeficiente de dilatação térmica e o módulo de elasticidade do material novo, menores serão as tensões de origem térmica, independentemente dos valores correspondentes dos materiais pré-existentes, uma vez que se minimizam as deformações e também as tensões geradas (Veiga et al, 2004)

Os Quadros 2.1 e 2.2 resumem as características físicas e mecânicas aconselhadas para os rebocos de substituição, sendo os seus principais requisitos a sua compatibilidade com as características das argamassas pré-existentes e do suporte.

Quadro 2.1 - Características mecânicas recomendadas para rebocos de substituição
(Veiga e Carvalho, 2002)

Aplicação	Características mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à retração restringida			
	R _t	R _c	E		Fr _{max} (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	0,1-0,3	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Reboco interior				ou rotura coesiva pelo reboco				
Juntas	0,4-0,8	0,6-3	3000-6000	0,1-0,5				

Rt – resistência à tração; Rc – resistência à compressão; E – módulo de elasticidade; Fr_{máx} – força máxima induzida por retração restringida; G - energia de rotura à tração; CSAF – coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda: CSAF= Rt/Fr_{máx}; CREF – coeficiente de resistência à evolução da fendilhação: CREF = G/Fr_{máx}

Quadro 2.2 – Características físicas recomendadas para rebocos de substituição
(Veiga e Carvalho, 2002)

Aplicação	Comportamento à água				
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro		
	S _D (m)	C Kg/m ² .h ^{1/2}	M (h)	S (h)	H (mv.h)
Reboco exterior	< 0,08	< 12; > 8	> 0,1	< 120	< 16 000
Reboco interior	< 0,10	-	-	< 120	-
Juntas	< 0,10	< 12; > 8	> 0,1	< 120	<16 000

SD - espessura da camada de ar de difusão equivalente; C - coeficiente de capilaridade; M - atraso na molhagem; S - período de humedecimento; H - intensidade de molhagem;

Com base no Regulamento dos Produtos da Construção da EU (2011), que estabelece determinadas condições para a comercialização dos produtos, existem dois tipos de especificações técnicas para a aplicação da marcação CE: as normas EN e as aprovações técnicas europeias.

As argamassas pré-doseadas, para serem lançadas no mercado pelos fabricantes, são alvo de um controlo interno de produção e qualidade a partir do qual se realiza a marcação CE, de modo a se fazer cumprir a NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013). A marcação CE confirma que o produto está “Conforme os Requisitos Essenciais” e permite a livre circulação e comercialização na União Europeia, garantindo segurança, saúde e qualidade para os utilizadores.

Segundo a NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013), as argamassas de uso geral (GP) não possuem características específicas. De acordo com a mesma norma, as argamassas de renovação (R) são usadas em rebocos de paredes de alvenaria, húmidas e contêm sais solúveis, que

apresentam elevada porosidade e permeabilidade ao vapor, mas que promovem a redução da ação de capilaridade.

Os Quadros 2.3 e 2.4 resumem os parâmetros adotados pela NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013) para a classificação das argamassas de reboco no estado endurecido.

Quadro 2.3 – Parâmetros para a classificação das argamassas de reboco no estado endurecido, segundo a norma NP EN 998-1

Parâmetro de ensaio	Norma de ensaio	GP	R
Massa volúmica aparente [Kg/m ³]	EN 1015-10	Intervalo de valores declarado	
Resistência à compressão [categoria]	EN 1015-11	CS I a CS IV	CS II
Aderência [N/mm ²]	EN 1015-12	≥ Valor declarado e tipo de fratura	
Absorção de água por capilaridade [categoria]	EN 1015-18	W0 a W2	≥ 0,3 Kg/m ²
Penetração de água após o ensaio de absorção de água [mm]	EN 1015-18	-	≤ 5
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água	EN 1015-19	≤ Valor declarado	≤ 15
Condutividade térmica [w/m.k]	EN 1745:2002	Valor tabelado	
Reação ao fogo [Euroclasse]	EN 13501-1	Euroclasse declarada	

R – renovação; GP - uso geral

Quadro 2.4 – Classificação das argamassas em termos de resistência à compressão e absorção capilar, de acordo com a norma NP EN 998-1

Propriedades	Categoria	Valores
Resistência à compressão	CS.I	0,4 – 2,5 N/mm ²
	CS.II	1,5 – 5,0 N/mm ²
	CS.III	3,5 – 7,5 N/mm ²
	CS.IV	> 6 N/mm ²
Absorção capilar (coeficiente de absorção capilar)	W0	Não especificado
	W1	$C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W2	$C \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

A procura pelo cumprimento destes requisitos é um bom ponto de partida para evitar escolhas desadequadas. No entanto, o respeito por estas condições não garante o sucesso das soluções encontradas, pois as particularidades de cada caso e a interações dos agentes de degradação podem ter consequências inesperadas.

2.3 Propriedades das argamassas com resíduos de cerâmica

Desde 2008 têm-se vindo a desenvolver vários estudos de caracterização de argamassas de revestimento com introdução de resíduos no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, em colaboração com o ITeCons.

Matias (2008) realizou o primeiro estudo do comportamento de argamassas de cal aérea com introdução de resíduos de tijolo, no âmbito da incorporação de resíduos em argamassas de revestimento, com o objetivo de avaliar a viabilidade de estudos futuros neste âmbito. Os resultados obtidos foram satisfatórios e, conseqüentemente, prosseguiu-se com a investigação, realizando-se diversos estudos com incorporação de resíduos de cerâmica, que serão resumidos neste capítulo.

Matias (2008) estudou a influência dos resíduos de tijolo no comportamento de argamassas de cal com substituição de parte do ligante por pó de tijolo e com substituição de parte do agregado por tijolo moído.

O estudo permitiu avaliar o desempenho deste tipo de argamassas e compará-lo com o de argamassas de referência, sem adição de resíduos, e argamassas de cimento. Para tal, foram estudadas argamassas com 10 traços volumétricos distintos: 1:1,5 e 1:3 (cal:areia), 1:3 e 1:4 (cimento:areia), 1:0,4:1,5 e 1:0,5:3 (cal:pó de tijolo:areia), 1:0,7:1 e 1:1:2 (cal: grão de tijolo:areia), 1:0,4:0,7:1 e 1:0,5:1:2 (cal:pó de tijolo:grão de tijolo:areia).

Foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas das diferentes argamassas, ensaiando os provetes à compressão, flexão, permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e módulo de elasticidade.

Analisando os resultados dos ensaios mecânicos, as argamassas de cimento destacam-se das restantes por apresentarem resistências à tração e compressão superiores e um módulo de elasticidade elevado.

Analisando os resultados relativamente à absorção de água por capilaridade, verificou-se que as argamassas de cal apresentam um comportamento menos satisfatório por terem velocidades iniciais de absorção muito elevadas.

Com este trabalho concluiu-se que as argamassas de cal com resíduos de tijolo em pó ou moídos apresentam resultados bastantes aceitáveis para as propriedades estudadas e que seria viável prosseguir com a investigação no âmbito da incorporação de resíduos em argamassas de revestimento.

Duarte (2011) caracterizou, do ponto de vista do comportamento mecânico, argamassas de cal aérea com substituição de parte do agregado por resíduos de cerâmica de barro vermelho. Foram estudadas argamassas de cal aérea com traço 1:3, nas quais parte do agregado foi substituído por resíduos de cerâmica, provenientes de tijolos, telhas e vasos. Foi também analisada uma argamassa de referência para avaliar a influência da quantidade de resíduos utilizados na mistura. As percentagens de substituição utilizadas foram de 20% e 40%, em volume. Verificou que existe uma tendência em relação às resistências à tração, à compressão e adesiva. Estas foram superiores nas argamassas com maior quantidade de resíduos cerâmicos e aumentam significativamente com a idade das argamassas. Com base nas propriedades mecânicas estudadas a argamassa que apresentou melhores resultados foi a argamassa de cal aérea com 40% de resíduos de telha por ter valores de módulo de elasticidade dinâmico reduzidos, valores de aderência ao suporte elevados e uma boa resistência à tração por flexão e à compressão.

Paralelamente ao trabalho de Duarte (2011), Ferreira (2011) avaliou o comportamento higrotérmico das mesmas argamassas. Para avaliar o comportamento face à água e ao vapor de água levou a cabo uma campanha experimental, determinando a permeabilidade ao vapor de água, a absorção de água por capilaridade, a capacidade de secagem e a porosidade aberta das argamassas. Analisando os resultados da permeabilidade ao vapor de água, a argamassa de referência foi aquela que apresentou os melhores resultados. Em relação à absorção de água por capilaridade aos 60 dias, a argamassa com 20% de resíduo de telha foi a que apresentou o melhor comportamento, tendo o coeficiente de capilaridade mais baixo. A argamassa de referência foi a que apresentou a maior absorção total de água por capilaridade. Em relação à secagem, a argamassa de referência foi a que apresentou a secagem mais rápida, com uma diferença pouco significativa das argamassas com menor percentagem de resíduo. Em relação à porosidade aberta, a argamassa de referência foi a que apresentou o valor mais baixo. No entanto, para as restantes argamassas foram obtidos valores próximos desta. Verificou-se que a argamassa de referência apresentou quase sempre os melhores valores. No entanto, os resultados das restantes argamassas, com diferentes tipos de resíduos e

composições, foram bastante próximos da primeira. Ferreira (2011) concluiu assim que as argamassas de cal aérea com um traço volumétrico de 1:3 (ligante:agregado) com incorporação de resíduos de cerâmica, em percentagem de 20% e 40 %, apresentam um bom comportamento higrotérmico.

Seguidamente, Tomás (2012) complementou os trabalhos anteriores, analisando argamassas com os mesmos constituintes e traços, mas utilizando apenas a fração grossa (entre 0,075 mm e 4,75 mm) de cada resíduo cerâmico em substituição parcial da areia (nas percentagens de 20 % e 40 % do volume do mesmo). Nos ensaios mecânicos e no ensaio de permeabilidade ao vapor de água verificou uma melhoria de resultados das argamassas com a incorporação de resíduos cerâmicos em relação à argamassa de referência. Verificou ainda que os resultados são melhores quando introduzidas menores percentagens de resíduos cerâmicos nas composições.

Paralelamente ao trabalho de Tomás (2012), Silva (2012) avaliou o comportamento mecânico e higrotérmico de argamassas de cal aérea com incorporação de resíduos de cerâmica, diferindo dos anteriores nas dimensões das partículas. Foi introduzido apenas o pó do resíduo de cerâmica (partículas com dimensão inferior a 0,075 mm) em substituição parcial de ligante (nas percentagens de 10 % e 20 % do volume do mesmo). Silva (2012) verificou, de um modo geral, que a incorporação de resíduos de cerâmica confere às argamassas melhores resultados face à argamassa de referência. Para além de avaliar o comportamento mecânico e higrotérmico de argamassas de cal aérea, Silva (2012) realizou também um inquérito que permitiu avaliar a quantidade de resíduos produzidos pelas empresas de produção de materiais de cerâmica de barro vermelho. Concluiu que as empresas produzem uma percentagem significativa de resíduos, e que a maioria das empresas desconhece a utilização dos resíduos em argamassas.

Analisando os resultados obtidos por Tomás (2012) e Silva (2012), concluiu-se que a separação dos resíduos cerâmicos em função da sua granulometria não justifica eventuais melhorias no comportamento das argamassas face ao dispêndio energético associado a separação do pó. Por este motivo, nos estudos seguintes esta separação não foi realizada.

Barbosa (2013) estudou o comportamento mecânico e higrotérmico de argamassas de cal aérea com incorporação de resíduos de cerâmica de barro vermelho. Foram estudadas argamassas de cal aérea com traço 1:2, nas quais foi substituído parte do agregado por resíduos (tijolos, telhas e vasos). Foi também estudada uma argamassa de referência para avaliar a influência da quantidade de resíduos utilizados na mistura. As percentagens de substituição utilizadas foram de 20% e 40% em volume. Analisando os resultados da

permeabilidade ao vapor de água, verificou-se que a argamassa com melhores valores de permeabilidade foi a argamassa de referência, seguida da argamassa com 20% de resíduos de telha, apesar de todas terem apresentado valores muito semelhantes. Em relação à absorção de água por capilaridade, a argamassa que apresentou o melhor resultado foi a argamassa com 20% de resíduos de vasos decorativos. A argamassa com 40% de resíduos de vasos foi a que apresentou o resultado menos satisfatório. Em relação à secagem, a argamassa com 20% de resíduos de vasos e a argamassa de referência foram as que apresentam melhores resultados, com um índice de secagem menor. Analisando os resultados dos ensaios mecânicos, verificou-se que a argamassa com resultados mais elevados no ensaio à compressão foi a argamassa com incorporação de 40% de resíduo de tijolo e no ensaio à flexão foi a argamassa com incorporação de 20% de resíduos de telha. A argamassa de referência foi a que apresentou menores valores de resistência à compressão. Com este trabalho, concluiu-se que a incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de cal aérea para a reabilitação de revestimentos de edifícios antigos pode trazer algumas vantagens, já que foram obtidos resultados satisfatórios a nível do desempenho face à água e mecânico.

Cruz (2012) iniciou uma nova vertente no âmbito das argamassas de cal com resíduos de cerâmica, e analisou argamassas de cal hidráulica natural com traço volumétrico 1:3 e 1:4 com incorporação de resíduos de cerâmicos (tijolos, telhas e vasos) com substituições parciais de 20% e 40% do volume do agregado. Os resultados foram comparados entre si e com estudos de argamassas com traço e substituições realizadas anteriormente com cal aérea. Em relação as argamassas de cal hidráulica natural verificou que apresentam um excelente comportamento mecânico e higrotérmico, quando utilizado um traço volumétrico 1:3 de ligante e areia de rio. No que diz respeito às argamassas com incorporação de resíduos da indústria cerâmica, verificou que estas têm uma resistência mecânica e módulo de elasticidade dinâmico superior à da argamassa de referência. Analisando o comportamento higrotérmico (capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e secagem), concluiu que as argamassas com resíduos de tijolo em menor proporção apresentam o comportamento mais adequado. As argamassas com proporções mais elevadas de resíduos cerâmicos podem revelar-se pouco adequadas, pois possuem períodos de secagem extensos.

Raimundo (2013) estudou argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos de mosaico cerâmico de barro vermelho ao traço de 1:3 e 1:4. As percentagens de substituição parcial do agregado utilizadas foram de 20% e 40% em volume. Os resultados foram comparados com argamassas de referência apenas de cal hidráulica natural e areia. As argamassas de traço 1:3 e com 40% de resíduo apresentaram melhores resultados nos ensaios mecânicos. As argamassas com pior comportamento higrotérmico foram as argamassas com

40% de incorporação de resíduos pois apresentam piores resultados de secagem e absorção de água por capilaridade.

Alberto (2014) analisou o comportamento mecânico e o comportamento face à presença de água de argamassas de cal hidráulica com incorporação de resíduos de cerâmica branca, nomeadamente porcelana e faiança, provenientes da produção de loiças. O traço escolhido foi de 1:3 e as percentagens de substituição foram de 20% e 40% do volume de areia. Alberto (2014) concluiu que a incorporação de resíduos de cerâmica branca em argamassas contribuiu para uma melhoria significativa das propriedades mecânicas e face à presença de água nas argamassas, com exceção na secagem e absorção de água por capilaridade. Nestes casos, a argamassa de referência apresentou melhores resultados. Concluiu que as propriedades mecânicas das argamassas melhoram com o aumento do teor em resíduos, mas não produzem resultados positivos nas características face à presença de água, com exceção da argamassa com resíduos de porcelana vidrada com 40 % de substituição.

Matias (2014) aprofundou o estudo das argamassas com resíduos de cerâmica. Numa primeira fase analisou detalhadamente e aprofundou alguns dos resultados de trabalhos de argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural NHL3.5 descritos anteriormente (Duarte (2011), Ferreira (2011), Tomás (2012), Silva (2012), Barbosa (2013)). A caracterização das argamassas consistiu na determinação das propriedades essenciais: massa volúmica, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, porosidade aberta, coeficiente de absorção de água, índice de secagem e módulo de elasticidade. Nesta análise verificou-se que a generalidade das argamassas apresenta um bom desempenho e que a incorporação de resíduos, em geral, melhora as suas propriedades mecânicas. Em relação ao comportamento face à presença de água, os resultados são menos favoráveis apesar de não ser afetado de forma muito significativa pela presença dos resíduos. Em relação às argamassas de cal aérea, verificou que as argamassas de cal aérea com traço 1:2 e incorporação de resíduo em 40 % de substituição do agregado são as que apresentam resultados mais ajustados aos requisitos recomendados para argamassas de reabilitação. Em relação às argamassas de cal hidráulica natural, as argamassas com traço 1:4 são as que apresentam os desempenhos mais adequados ao propósito pretendido. Após esta análise, na qual foram consideradas todas as vantagens e desvantagens, selecionou as argamassas com características mais favoráveis: duas argamassas de cal aérea com traço 1:2, uma de referência e uma com introdução de resíduos de telha e tijolo, e duas argamassas de cal hidráulica com traço 1:4, uma de referência e uma com introdução de resíduos de telha e tijolo, e prosseguiu com estudos mais detalhados das mesmas. Os ensaios desta fase realizaram-se a partir dos 28 dias de cura até aos 365 dias. Nesta segunda fase, foi realizada uma caracterização complementar das argamassas selecionadas previamente, que consistiu na determinação da

resistência adesiva, da coesão superficial, da porosimetria, da absorção de água sob baixa pressão, da resistência aos sulfatos e aos cloretos e da exposição a ciclos de envelhecimento. Verificou-se que as argamassas de cal hidráulica com traço 1:4 apresentam desempenhos superiores em termos mecânicos e de absorção de água sob baixa pressão, mesmo quando sujeitas a ciclos de envelhecimento. Relativamente à resistência aos cloretos estas argamassas apresentam também um comportamento bastante satisfatório. As argamassas de cal aérea com traço 1:2 e percentagens superiores de resíduo obtiveram o melhor desempenho em termos de resistências aos sais e permitiram verificar que a incorporação de resíduos melhora o desempenho das argamassas de cal no que respeita à coesão superficial. Na terceira fase foi selecionado um conjunto de argamassas para caracterização *in situ*. Foi avaliada a trabalhabilidade, a resistência adesiva, a coesão superficial e a absorção de água sob baixa pressão. Foi utilizado apenas resíduo de tijolo e os dois tipos de ligantes (cal aérea H100 e cal hidráulica natural NHL 3,5). O resíduo de cerâmica foi incorporado em argamassas de cal aérea com traço 1:2 com substituição de 40% do agregado e em argamassas de cal hidráulica natural com traço 1:4 com substituição de 30% do agregado. Foram também aplicadas as respetivas argamassas de referência, sem incorporação de resíduos. Em termos gerais, verificou-se que a introdução de resíduos nas argamassas permitiu uma melhoria da trabalhabilidade. Não foram registados sinais de degradação durante o período analisado nem alteração da coloração. Relativamente ao desempenho físico e mecânico, a argamassa de cal hidráulica natural com incorporação de resíduo apresenta resultados globais mais satisfatórios. Salienta-se que as argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com resíduos obtiveram melhores resultados face às argamassas de referência correspondentes. Genericamente, os resultados obtidos na campanha *in situ* foram coerentes com os resultados obtidos em laboratório; nalguns casos foram até mais positivos.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

Pretendeu-se, com o estudo experimental desenvolvido, determinar e avaliar as características de argamassas de cal com resíduos de cerâmica. Neste capítulo são descritos todos os ensaios realizados ao longo da campanha experimental, quer aos materiais constituintes, quer às argamassas.

Toda a campanha experimental foi realizada no ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção.

A campanha experimental foi dividida em diversas fases, descritas seguidamente. Numa fase inicial, preparou-se e caracterizou-se o material necessário para a produção das argamassas, nomeadamente os agregados de cerâmica e a areia. Os ensaios dos constituintes, propriedades e normas utilizadas encontram-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Ensaios dos constituintes

Material	Propriedades	Norma ensaio
Cal aérea Lusical H100	Baridade	NP EN 1097-3
Cal hidráulica natural NHL3,5 Secil	Baridade	NP EN 1097-3
Hidrófugo Sitren 750	(ficha técnica produto)	-
Areia siliciosa Secil	Análise granulométrica	EN 933-1
	Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3
	Massa volúmica e absorção de água	EN 1097-6
	Módulo de finura (cálculo)	NP EN 13139
Resíduos de tijolo e telha	Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3
	Análise granulométrica	EN 933-1
	Massa volúmica e absorção de água	EN 1097-6
	Módulo de finura (cálculo)	NP EN 13139

Numa segunda fase, realizaram-se os ensaios para a aferir as características de argamassas de cal: trabalhabilidade, ensaios para marcação CE do produto (requisitos da NP EN 998-1) e ensaios de caracterização complementar. Os ensaios das argamassas e idades de ensaio encontram-se no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Ensaio das argamassas e idades de ensaio

Propriedades		Procedimento	Idades de ensaio (dias)	
			HR, HC	AR, AC
Ensaio no estado fresco	Consistência por espalhamento	EN 1015-3	-	-
Ensaio para marcação CE do produto (requisitos da NP EN 998-1)	Aderência	EN 1015-12	28	60,90
	Absorção de água e penetração de água após ensaio	EN 1015-18	28	60
	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água	EN 1015-19	28	60
	Massa volúmica seca	EN 1015-10	28	60
	(Resistência à flexão)	EN 1015-11	28,60	60,90
	Resistência à compressão		28	60,90
Caracterização complementar	Módulo de elasticidade dinâmico	NP EN 14146	28	60
	Ensaio de secagem	RILEM n.º II.5	28	60
	Porosidade aberta e massa volúmica aparente	NP EN 1936	28	60

Foram preparadas 4 argamassas de cal, sendo 2 de referência e 2 com resíduos de cerâmica em substituição de parte do volume de agregado. As argamassas de cal hidráulica foram preparadas com um traço volumétrico de 1:4 (ligante:agregado) e foi adicionado um hidrófugo. As argamassas de cal aérea foram preparadas com um traço volumétrico de 1:2 (ligante:agregado), e também com hidrófugo. No Quadro 3.3, apresentam-se todas as argamassas ensaiadas e respetivas composições.

No sentido de melhorar características das argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014), apresentados no Quadro 3.4, sobretudo no que diz respeito à absorção de água por capilaridade, foi adicionado um hidrófugo. Note-se que os traços apresentados no Quadro 3.3 para as argamassas com incorporação de resíduos têm por base o trabalho de Matias (2014), tendo-se utilizado traços semelhantes. É importante referir que os ligantes e resíduos utilizados neste estudo foram os mesmos que os utilizados por Matias (2014), exceto a areia, que é diferente.

Quadro 3.3 - Composições das argamassas em estudo

Argamassa	Designação	Ligante	Traço Volumétrico (ligante:agregado)	Agregado			Adjuvante Hidrófugo Sitren 750
				Areia (%)	Resíduos Tijolo (%)	Resíduos Telha (%)	
Argamassa de Cal Hidráulica de Referencia	HR	Cal hidráulica NHL3,5	1:4	100	0	0	0,3 % da massa seca total
Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica	HC	Cal hidráulica NHL3,5	1:4	70	15	15	0,3 % da massa seca total
Argamassa de Cal Aérea de Referencia	AR	Cal aérea H100	1:2	100	0	0	0,3 % da massa seca total
Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica	AC	Cal aérea H100	1:2	60	20	20	0,3 % da massa seca total

Quadro 3.4 - Composições das argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014)

Argamassa	Designação	Ligante	Traço Volumétrico (ligante:agregado)	Agregado		
				Areia (%)	Resíduos Tijolo (%)	Resíduos Telha (%)
Argamassa de Cal Hidráulica de Referencia	4H_R	Cal hidráulica NHL3,5	1:4	100	0	0
Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica de Tijolo	4H_MB	Cal hidráulica NHL3,5	1:4	70	30	0
Argamassa de Cal Hidráulica com Resíduos de Cerâmica de Telha	4H_MT	Cal hidráulica NHL3,5	1:4	70	0	30
Argamassa de Cal Aérea de Referencia	2A_R	Cal aérea H100	1:2	100	0	0
Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica de Tijolo	2A_HB	Cal aérea H100	1:2	60	40	0
Argamassa de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica de Telha	2A_HT	Cal aérea H100	1:2	60	0	40

3.2 Caracterização das Matérias-Primas

As matérias-primas utilizadas para a produção das argamassas deste trabalho experimental foram cal aérea Luscical H100 e cal hidráulica natural NHL 3,5 Secil como ligantes, hidrófugo Sitren 750 como adjuvante, areia siliciosa, fornecida pela Secil e resíduos de tijolo e telha como agregado e água. A areia utilizada neste estudo nunca tinha sido utilizada, logo foi necessário determinar as suas propriedades. As características dos outros agregados já tinham sido determinadas em estudos anteriores, por Matias (2014).

3.2.1. Análise granulométrica por peneiração

A análise granulométrica da areia foi realizada de acordo com os procedimentos preconizados na EN 933-1 (CEN, 2012). Este ensaio consiste em separar o material em várias classes granulométricas utilizando peneiros de malha quadrada normalizados de 0,063; 0,125; 0,500; 1,00; 2,00; 4,00 [mm] (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Peneiros de malha quadrada

A análise granulométrica seguiu o procedimento que se descreve:

- A areia foi colocada em estufa a cerca de 110°C até atingir massa constante, garantindo que o agregado se encontrava completamente seco;
- A amostra seca foi colocada na coluna de peneiros, ordenados por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o peneiro de maior abertura no topo;
- Agitaram-se manualmente todos os peneiros, começando pelo de maior abertura para o de menor abertura;
- O material retido foi pesado numa balança com precisão de 0,01g, permitindo calcular as percentagens do material passado.

Determinou-se percentagem cumulativa de material passado através da expressão:

$$\text{Percentagem cumulativa do material passado} = \left(100 - \frac{R_i}{M_i}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

Sendo,

R_i - massa do material retido em cada peneiro [g]

M_i - massa inicial da amostra seca [g].

3.2.2. Módulo de finura

O módulo de finura foi determinado segundo a norma de especificação de agregados para argamassas, NP EN 13139:2005 (IPQ, 2005). Corresponde à soma das percentagens cumulativas de frações retidas, em massa, nos peneiros indicados (em mm) (IPQ, 2005). O módulo de finura, FM, foi calculado através da expressão:

$$FM = \frac{\sum[(> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0,5) + (> 0,25) + (> 0,125)]}{100} \quad (3.2)$$

O Quadro 3.5 apresenta a classificação do agregado, em função do valor obtido para o módulo de finura, segundo a NP EN 13139 (IPQ, 2005). Aos agregados grossos é atribuída a designação CF, aos agregados com gradação média MF e os agregados finos são designados por FF.

Quadro 3.5 - Classificação do agregado em função do módulo de finura (IPQ, 2005)

Módulo de Finura, FM		
CF	MF	FF
2,4 - 3,6	1,5 - 2,8	0,6 - 2,1

3.2.3. Determinação da baridade da areia

A baridade da areia foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002), seguindo o procedimento que se descreve:

- A areia foi colocada em estufa a cerca de 110°C até atingir massa constante, garantindo que o agregado se encontrava completamente seco;
- Encheu-se um recipiente, com massa de 1343,27 g (vazio e limpo) e volume de 1029,8 cm³, com areia, até transbordar;
- Removeu-se o material excedente cuidadosamente, sem compactar, com o auxílio de uma régua metálica;
- Pesou-se o recipiente cheio numa balança com resolução de 0,01g.

A baridade da areia foi calculada através da expressão:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (3.3)$$

Sendo,

ρ_b - baridade do material [g/cm^3];

m_1 - massa do recipiente vazio [g];

m_2 - massa do recipiente com material [g];

v - volume do recipiente [cm^3].

Este procedimento foi efetuado três vezes e o cálculo da baridade resultou da média dos três valores. A baridade dos restantes materiais foi determinada da mesma forma, tendo sido utilizados os resultados apresentados por Matias (2014).

3.2.4. Determinação da massa volúmica e da absorção de água dos materiais

A massa volúmica da areia foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1097-6 (CEN, 2013). Determinou-se a massa volúmica das partículas impermeáveis, das partículas saturadas com superfície seca, das partículas secas e a absorção de água após 24 horas.

Utilizou-se o método do picnómetro para partículas de dimensão entre 0,063mm e 4mm, tendo por base os resultados obtidos na análise granulométrica, e seguiu-se o procedimento que se descreve:

- A areia foi lavada com água corrente sobre o peneiro 0,063 mm, eliminando as partículas mais finas;
- Colocou-se o material retido num picnómetro que posteriormente foi totalmente cheio com água, de forma a eliminar o ar;
- O picnómetro foi colocado em banho-maria a uma temperatura de 22 ± 3 °C, durante 24h, período ao fim do qual foi pesado;
- Decantou-se o material e colocou-se num tabuleiro uniformemente distribuído, que posteriormente foi colocado em estufa com uma corrente de ar morno para garantir a evaporação da humidade superficial, e efetuou-se a pesagem do mesmo;
- Para avaliar o estado saturado com superfície seca dos agregados, introduziu-se o material num molde troncocónico e apiloou-se a superfície do molde com 25 pancadas suaves, não completando com material o assentamento deste devido às pancadas. Retirou-se, cuidadosamente, o molde. Validou-se este processo, quando o agregado se deformou após desmoldagem, não mantendo a forma troncocónica.
- Finalmente secou-se o material em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C durante 24h e registou-se o seu peso.

A massa volúmica das partículas impermeáveis, ρ_a , consiste na relação entre a massa de uma amostra seca em estufa e o volume que esta ocupa dentro de água, incluindo quaisquer poros internos, mas excluindo poros acessíveis à água.

A massa volúmica das partículas impermeáveis, ρ_a , foi determinada através da expressão:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg/m}^3] \quad (3.4)$$

A massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd} , consiste na relação entre a massa de uma amostra de agregado, incluindo a massa de água alojada nos poros acessíveis, e o volume que ocupa dentro de água, incluindo poros acessíveis pela água e poros internos.

A massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd} , foi determinada através da expressão:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg/cm}^3] \quad (3.5)$$

A massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} , consiste na relação entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume das partículas, incluindo o volume dos poros internos fechados e dos poros acessíveis a água.

A massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} , foi determinada através da expressão:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg/cm}^3] \quad (3.6)$$

A absorção de água após 24 horas, W_{24} , traduz o aumento da massa de uma amostra de agregado seco em estufa devido à penetração da água nos poros acessíveis à água.

A absorção de água após 24 horas foi determinada através da expressão:

$$W_{24} = \frac{100 \times (M_4 - M_4)}{M_4} \quad [\%] \quad (3.7)$$

Sendo,

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca ao ar [g]

M_2 - massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e água [g];

M_3 - massa do picnómetro cheio apenas com água [g];

M_4 - massa do provete seco em estufa [g].

3.3. Preparação das argamassas (EN 1015-2)

A preparação das argamassas começou pelo cálculo das dosagens dos constituintes secos, tendo em conta o traço volumétrico de cada argamassa, apresentado no Quadro 3.3. Os constituintes secos foram colocados num balde e misturados com um berbequim de vareta helicoidal. Posteriormente, foi-se adicionando água, até se verificar homogeneidade e inexistência de grumos. A quantidade de água foi definida de forma iterativa, de modo a obter uma consistência por espalhamento de $150 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

Para cada argamassa foram preparados provetes prismáticos, provetes cilíndricos e provetes de argamassa sobre tijolo cerâmico furado, para os diferentes ensaios.

Para a preparação dos provetes prismáticos utilizaram-se moldes metálicos triplos, com dimensões internas de $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ (Figura 3.2). Estes foram lubrificados com uma pequena quantidade de óleo descofrante, de forma a facilitar o processo de desmoldagem dos provetes. Numa primeira fase, os moldes foram preenchidos até meia altura, com recurso a uma colher de pedreiro, e aplicadas 20 pancadas com o pilão manual. Numa segunda fase, preencheu-se o restante volume do molde e foram aplicadas mais 20 pancadas. O material em excesso foi retirado com auxílio de uma rasoira para nivelar bem a superfície e colocaram-se os provetes em condicionamento.

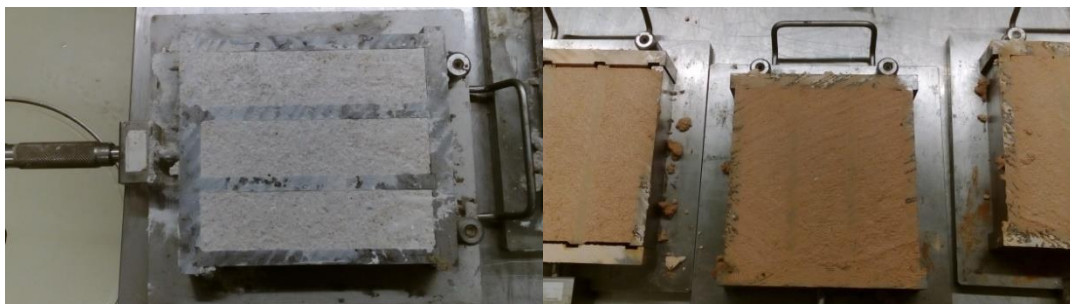


Figura 3.2 - Provetes prismático

Os provetes cilíndricos forma preparados com moldes cilíndricos com dimensões de 20 cm de diâmetro e 16 mm de espessura (Figura 3.3). Estes moldes foram totalmente preenchidos, com recurso a uma colher de pedreiro, e aplicadas 20 pancadas com o pilão manual. A superfície dos moldes foi nivelada com uma rasoira e os provetes foram, posteriormente, colocados no condicionamento.



Figura 3.3 - Moldes e provetes cilíndricos

Para a preparação dos provetes de argamassa sobre tijolo cerâmico furado (Figura 3.4) foram efetuadas aplicações de uma camada de argamassa, com cerca de 10 mm de espessura, sobre tijolo cerâmico furado, previamente humedecido.



Figura 3.4 - Provetes de argamassa sobre tijolo cerâmico furado

Nos primeiros 7 dias, todos os provetes permaneceram em cura a 20 °C e 95 % de humidade relativa, dentro de sacos de plástico devidamente vedados. Após este período, os provetes foram retirados dos sacos, desmoldados e mantidos, até à data de ensaio, a uma temperatura de 20°C ± 2°C e humidade relativa 65% ± 5%.

3.4. Ensaio sobre argamassas frescas

3.4.1. Consistência por espalhamento - EN 1015-3

A consistência de uma argamassa fresca é uma medida da sua fluidez e fornece uma indicação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão.

O ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no estado fresco foi realizado de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-3 (CEN, 2006). Este ensaio foi realizado após cada amassadura para determinar a consistência da argamassa. Segundo o disposto na norma, o espalhamento consiste no diâmetro médio de um provete deformado, após sofrer um determinado número de pancadas verticais em mesa de espalhamento (Figura 3.5).

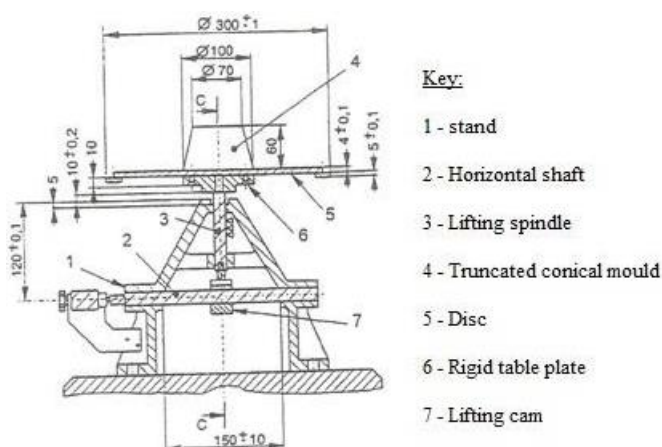


Figura 3.5 - Consistência por espalhamento: Mesa de Espalhamento (CEN,1999)

O ensaio de consistência por espalhamento seguiu o procedimento que se descreve:

- Antes de iniciar cada ensaio foi necessário garantir que a superfície da mesa de espalhamento e do molde estavam limpas;
- O molde, devidamente centrado e truncado na mesa de espalhamento, foi preenchido em duas fases. Na primeira fase, foi preenchido até meio e compactado com 10 pancadas, com um pilão normalizado. Na segunda fase, o molde foi preenchido até transbordar e novamente compactado com 10 pancadas;
- Retirou-se a argamassa em excesso no bordo superior do molde com uma rasoira e limpou-se a mesa, de modo a ficar isenta de detritos;
- Retirou-se o molde na vertical, lentamente, e rodou-se a manivela da mesa de espalhamento 15 vezes, intervaladas a 1 segundo;
- Mediu-se, com um paquímetro, o diâmetro da argamassa, em duas direções perpendiculares.

Considerou-se como valor do espalhamento a média entre esses dois valores.

Segundo a referida norma, para desvios inferiores a 10% do seu valor médio, a consistência por espalhamento é a média das medidas efetuadas. Se houver um desvio superior a 10% deve ser corrigida a quantidade de água e repetido o ensaio.

3.5. Ensaio sobre argamassas endurecidas (Ensaio para marcação CE do produto (requisitos da NP EN 998-1))

3.5.1. Aderência - EN 1015-12

Segundo Silva (2006), o ensaio de arrancamento por tração permite uma análise de uma das componentes mais importantes numa argamassa para reboco: a sua compatibilidade com o suporte.

O ensaio de arrancamento por tração foi determinado de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-12 (CEN, 2000) (Figura 3.6). A resistência adesiva é obtida determinando a tensão de tração aplicada à superfície da argamassa de reboco num suporte e necessária para se dar o destacamento da camada de argamassa. A força de rotura é aplicada através de uma pastilha colada à área de ensaio da superfície de argamassa.

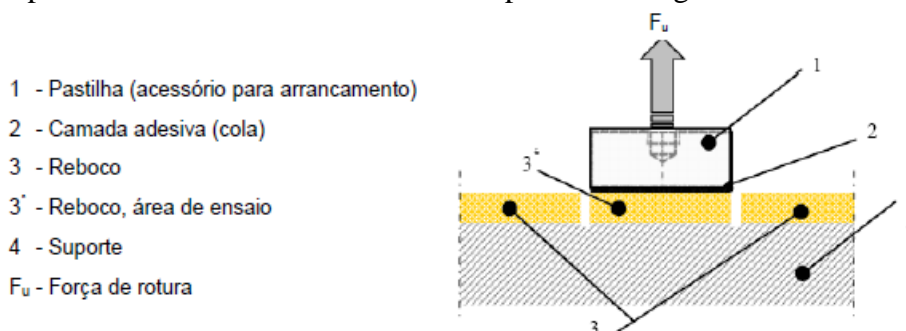


Figura 3.6 - Ensaio de arrancamento (Quintela,2006)

O ensaio de arrancamento por tração seguiu o procedimento que se descreve:

- As amostras de argamassas foram aplicadas em tijolo cerâmico furado com uma espessura de aproximadamente 10mm. As secções circulares para colagem posterior das pastilhas metálicas foram marcadas, no estado fresco, com anel circular de 50mm de diâmetro;
- As amostras foram armazenadas em sacos estanques ao ar e selados a uma temperatura de (20 ± 2) °C durante 7 dias. Após este período, foram removidos do saco e conservados à mesma temperatura e a uma humidade relativa de (65 ± 5) % até à data de ensaio;
- No final do período de cura, procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas com uma cola de elevada resistência (Figura 3.7);

- Aplicou-se uma carga de tração perpendicular à área de ensaio, com uma máquina de tração, acoplada às pastilhas metálicas, a uma taxa constante.
- A resistência adesiva foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3.8)$$

Sendo,

f_u - resistência adesiva [N/mm^2];

F_u – carga de tração [N];

A – área de teste [mm^2].



Figura 3.7 - Ensaio de arrancamento: Áreas de ensaio com pastilhas metálicas

A norma define três modos de rotura no ensaio de arrancamento: rotura tipo a, tipo b e tipo c (Figura 3.8). A rotura tipo a é designada de rotura adesiva e ocorre por perda de aderência na interface entre a argamassa e o suporte. O valor de ensaio para este modo é igual à resistência adesiva. As roturas tipo b e c são coesivas havendo rotura no seio da argamassa e no suporte respetivamente. Para estas roturas o resultado do ensaio é um limite inferior da resistência adesiva. Quando ocorre uma rotura pela cola (entre a argamassa e a pastilha) o ensaio é nulo e rejeitado. Segundo a norma devem ser realizados cinco ensaios de arrancamento por revestimento.

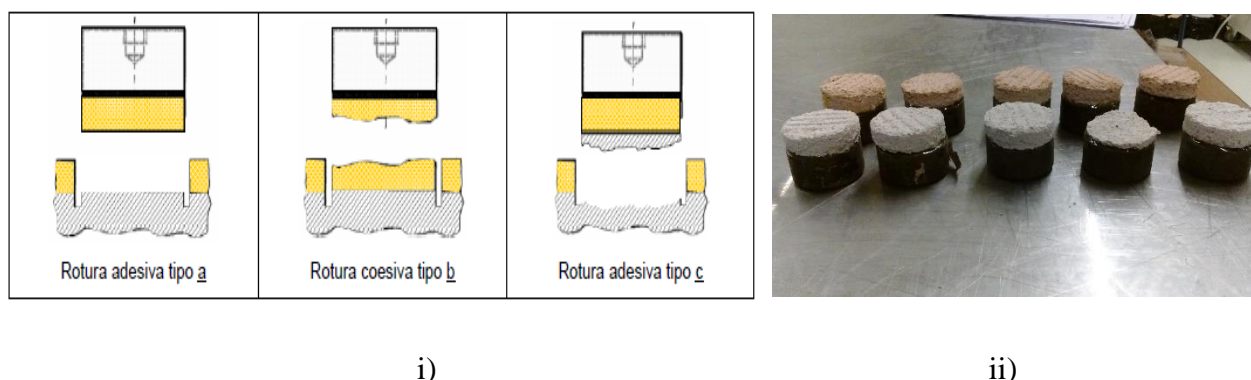


Figura 3.8 - Ensaio de arrancamento: i) Modos de Rotura (Quintela, 2006); ii) Modos de Rotura

3.5.2. Absorção de água por capilaridade-EN 1015-18

Segundo Torres (2004), os materiais utilizados na construção civil são, na sua maioria, porosos. Esta particularidade faz com que a absorção de água por capilaridade esteja relacionada com a porosidade aberta. Devido à comunicação dos poros entre si e a sua exposição à água, existe a possibilidade de fixação de humidade nos materiais, podendo ocorrer modificações do ponto vista mecânico e térmico.

Segundo Veiga (1998), a capilaridade é quantificada através do coeficiente de capilaridade, C , determinado a partir da massa de água absorvida por área de argamassa em contacto com a água, por ação de forças de sucção capilar.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi obtido segundo as indicações da norma de ensaio EN 1015-18 (CEN, 2002). Para este ensaio foi utilizada uma das metades resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão, com dimensões aproximadas de 40x40x80 [mm].

O ensaio seguiu o procedimento que se descreve:

- Colocaram-se as amostras numa estufa ventilada a uma temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente 48 horas, até se verificar uma variação de massa inferior a 0,1%;
- Após a secagem, as amostras foram colocadas num exsiccador com sílica, de forma a não absorverem humidade durante o arrefecimento;
- As faces laterais dos provetes, com áreas superiores, foram revestidas com película aderente, de forma a garantir um fluxo unidirecional da água absorvida;
- Procedeu-se à pesagem da massa seca dos provetes numa balança com resolução de 0,001g;

- Colocaram-se os provetes numa tina com água, em cima de uma malha plástica, garantindo uma altura mínima de água de 5 a 10mm acima da sua base durante todo o ensaio. A norma refere que a face que sofreu a rotura deve ser virada para baixo contra a malha, mas devido à sua irregularidade, optou-se por colocar a outra face, mais regular, em contacto com a malha, para não comprometer o ensaio (Figura 3.9). A tampa da tina manteve-se fechada, de forma a garantir um ambiente saturado no seu interior;
- A massa de cada provete foi determinada ao fim de 10min, 90 min e 24 horas numa balança com resolução de 0,001g.



Figura 3.9 - Ensaio de absorção por capilaridade

A quantidade de água absorvida por unidade de superfície, M_i , foi determinada para cada amostra através da expressão:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (3.9)$$

Sendo,

M_i – quantidade de água absorvida por unidade de superfície [kg/mm^2];

m_i – massa do provete ao fim de determinado tempo [kg];

m_0 – massa do provete seco [kg];

A – seção do provete em contacto com a água [$40 \times 40 \times 10^{-3} \text{ m}^2$].

Determinou-se o coeficiente de absorção de água por capilaridade, que expressa a velocidade de absorção de água para argamassas, através da expressão:

$$C = 0,1 \times (M_{90} - M_{10}) \quad (3.10)$$

Sendo,

C – coeficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$];

M_{90} – massa do provete aos 90 minutos após o início do ensaio [kg];

M_{10} – massa do provete aos 10 minutos após o início do ensaio [kg].

3.5.3. Permeabilidade ao vapor de água - EN 1015-19

Segundo Freitas et al (2008), a permeabilidade ao vapor de água caracteriza a capacidade dos materiais porosos serem atravessados por um fluido quando submetidos a um gradiente de pressão. Quanto maior for a permeabilidade ao vapor de água de uma argamassa, maior será a capacidade de evaporação da água infiltrada nas fachadas.

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi executado com base nos procedimentos da norma EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008), que se destina a argamassas de reboco endurecidas.

Este ensaio consiste em criar dois ambientes com a mesma temperatura, mas com diferentes pressões de vapor, para que o gradiente de pressão produzido provoque um fluxo de vapor constante do interior do conjunto tina-provete para o exterior, ou vice-versa.

Após o período de cura dos provetes circulares e a sua respetiva desmoldagem, estes foram selados lateralmente com uma pintura impermeabilizante, para que a transmissão do vapor de água se processasse de forma unidirecional (Figura 3.10). Depois da secagem do impermeabilizante colou-se uma tira de fita aderente sobre o mesmo e colocaram-se os provetes em tinas de teflon preenchidas com uma solução saturada de nitrato de potássio, até uma altura de 15mm da base dos provetes, de modo a garantir uma humidade relativa de cerca de 100 % no interior das tinas. Posteriormente foi feita a selagem entre os provetes e as tinas com silicone (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Provetes circulares

As amostras foram colocadas numa câmara climática à temperatura $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$. O fluxo de vapor de água desenvolveu-se do interior das tinas para o exterior devido à pressão no interior ser superior à do exterior.

Foram efetuadas pesagens diárias até que a variação de massa das amostras no intervalo de tempo decorrido fosse constante. Determinou-se a relação entre a variação de massa e do tempo através da expressão:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \quad (3.11)$$

Sendo,

Δm_{12} - relação entre a variação de massa e o tempo [kg/s];

m_1 - massa do conjunto provete/tina no instante t_1 [kg];

m_2 - massa do conjunto provete/tina no instante t_2 [kg];

t_1 e t_2 - tempos referentes a duas pesagens sucessivas[s].

Quando esta variação de massa, Δm_{12} , é constante este valor é assumido como o valor de fluxo de vapor de água, $\Delta G/\Delta t$.

O valor da permeância ao vapor de água é calculado através da expressão:

$$\Lambda = \frac{1}{A \Delta p / (\Delta G/\Delta t) - R_A} \quad (3.12)$$

Sendo,

Λ - permeância ao vapor de água [kg/(m².s.Pa)];

A - área do disco (provete) [m²];

Δ_p - diferença de pressão entre a água no interior e o ambiente exterior [Pa];

$\Delta G/\Delta t$ - fluxo de vapor de água [kg/s];

R_A - coeficiente de resistência ao vapor de água da caixa de ar [0.048x10⁹ Pa.m².s/kg por cada 10mm de caixa-de-ar].

Sendo,

$$\Delta_p = p_{\text{sat}} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100} \text{ [Pa]} \quad (3.13)$$

e

$$p_{\text{sat}} = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{273,3 + \theta}} \quad (3.14)$$

Sendo,

p_{sat} - pressão de saturação à temperatura do ensaio [Pa];

$\phi_1 - \phi_2$ - diferença entre as humidades relativas no interior e exterior da tina de ensaio [%];

θ - temperatura à qual decorre o ensaio [°C].

Considerando uma temperatura de ensaio de 20°C, obtém-se $p_{\text{sat}} = 2336,95$ Pa. Visto que a humidade relativa no interior da camara climática é aproximadamente 50% e 100% no interior da tina obtém-se $\Delta_p = 1009,56$ Pa.

Determinou-se a permeabilidade ao vapor de água através da expressão:

$$W_{\text{vp}} = \Lambda \times t \quad (3.15)$$

Sendo,

W_{vp} - permeabilidade ao vapor de água [kg/(m.s.Pa)];

t - espessura do provete [m].

Foi ainda determinado o valor do coeficiente de permeabilidade, μ , através da expressão:

$$\mu = \frac{1,94 \times 10^{-10}}{W_{\text{vp}}} \quad (3.16)$$

3.5.4. Massa volúmica seca - EN 1015-10

A determinação da massa volúmica seca da argamassa no estado endurecido foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-10 (CEN, 2006). A massa volúmica seca traduz a relação entre a massa seca da amostra e o seu volume e seguiu o procedimento que se descreve:

- Secou-se em estufa dos provetes até massa constante a 105°C;
- Determinou-se da massa seca com uma balança com resolução de 0,01g;
- Mediu-se os provetes com régua graduada: 40 mm x 40 mm x 160 mm.

A massa volúmica de cada provete é calculada pela expressão:

$$\rho_s = \frac{m_d}{A \times l} \text{ [g/mm}^3\text{]} \quad (3.17)$$

Sendo,

ρ_s - massa volúmica seca do provete, [g/mm³];

m_d - massa do provete seco, [g];

A - área da secção transversal do provete, [mm²];

l - comprimento do provete, [mm].

3.5.5. Resistência à tração flexão - EN 1015-11

A resistência à tração por flexão traduz a tensão máxima suportada por um provete de argamassa simplesmente apoiado. A resistência à tração por flexão foi obtida segundo as indicações da norma de ensaio EN 1015-11 (CEN, 2006).

O ensaio consistiu em posicionar os provetes na máquina de ensaios universal, da marca Instron, modelo 5884, colocando-os sobre os cilindros de apoio com o seu eixo longitudinal perpendicular a estes. Em seguida, aplicou-se uma carga crescente concentrada a meio vão, até se verificar a rotura (Figura 3.11). Uma das metades dos provetes resultantes foram aproveitadas para o ensaio de resistência à compressão e os topos intactos resultantes deste para o ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente. Foi utilizada uma célula de carga de 10 kN.

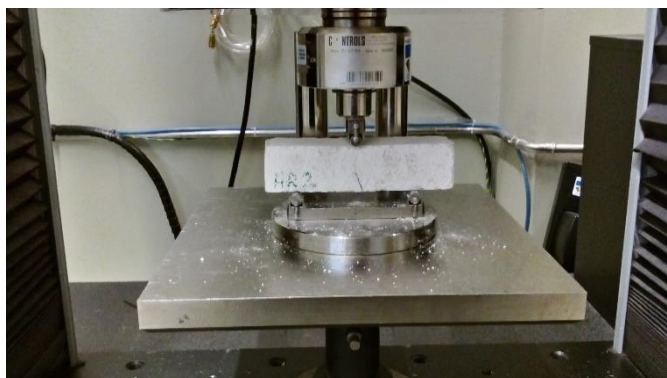


Figura 3.11 - Ensaio de resistência à tração por flexão

Determinou-se a resistência à flexão através da expressão:

$$R_f = 1.5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (3.18)$$

Sendo,

R_f – resistência à flexão [N/mm^2];

F – carga máxima aplicada [N];

l – distância entre os eixos de apoio do provete [100 mm];

b – largura do provete [40 mm];

d – espessura do provete [40 mm].

3.5.6. Resistência à compressão - EN 1015-11

A resistência à compressão corresponde à tensão máxima a que o material resiste quando aplicada uma carga distribuída numa secção conhecida. A resistência à compressão foi obtida segundo as indicações da norma de ensaio EN 1015-11 (CEN, 2006). O ensaio consistiu em posicionar os provetes na máquina de ensaios universal, da marca Instron, modelo 5884, colocando-os sobre um apoio metálico de modo a que a superfície da rotura do ensaio de resistência à flexão estivesse fora do apoio metálico. Em seguida aplicou-se uma carga a taxa constante, sujeitando os provetes a um esforço de compressão, até atingirem a rotura (Figura 3.12). Foi utilizada uma célula de carga de 10 kN.



Figura 3.12 – Ensaio de resistência à compressão

Determinou-se a resistência à compressão através da expressão:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.19)$$

Sendo,

R_c – resistência à compressão [N/mm^2];

F – carga máxima aplicada [N];

A_c – área de carga [1600 mm^2]

3.6. Caracterização complementar

3.6.1. Módulo de elasticidade dinâmico - NP EN 14146

Segundo Silva e Campiteli (2006), o módulo de elasticidade está relacionado com o comportamento elástico do provete e fornece informações a respeito da deformabilidade e da rigidez de uma argamassa. Representa a sua capacidade de deformação sob a ação de tensões associadas a cargas e variações higrótérmicas. Esta propriedade é importante por estar associada a patologias de revestimentos de argamassa como a fissuração ou fendilhação.

Segundo Cavaco (2005), para uma argamassa de revestimento garantir uma boa resistência à fendilhação sem introduzir tensões elevadas no suporte deverá apresentar uma reduzida retração e um módulo de elasticidade baixo.

O módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental) foi obtido segundo as indicações da norma de ensaio NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006). Apesar de esta norma ser utilizada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico de pedras naturais, foi adaptado para os provetes de argamassas.

A primeira adaptação foi a redução do número de provetes: em vez de se ensaiar seis provetes, como refere a norma, foram ensaiados três provetes, admitindo que o grupo de três provetes representa um conjunto suficientemente homogêneo. A segunda alteração foi a utilização de dois apoios que a norma indica para a vibração em flexão visto que um suporte prismático único seria instável para a realização do ensaio (Figura 3.12). Os suportes utilizados foram prismas metálicos de secção triangular com comprimento superior à largura dos provetes a ensaiar.

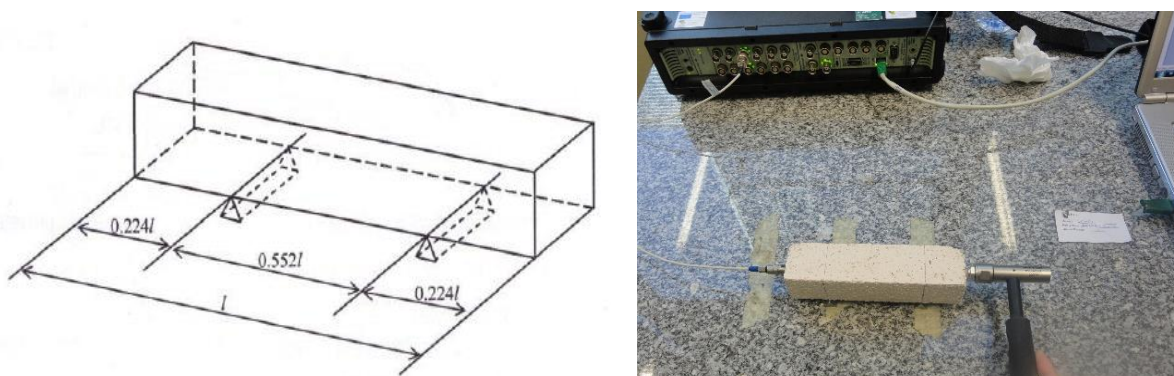


Figura 3.12 – Módulo de elasticidade dinâmico: i) Suporte para a medição em da vibração em flexão; ii) Determinação do módulo de elasticidade dinâmico de um provete

O ensaio consiste em colocar um acelerómetro numa extremidade do provete e na extremidade oposta provocar uma excitação através de um martelo de impacto. A excitação gera um sinal, medido através de um sistema analisador, PulseTM modelo 3560-C da marca "Bruel & Kjaer", que regista a aceleração em função da frequência longitudinal. A frequência de ressonância longitudinal fundamental, Fl , corresponde ao pico do gráfico obtido. Este procedimento foi repetido três vezes para cada provete sendo o valor final da frequência longitudinal a média dos três valores. Através da frequência de ressonância fundamental longitudinal, Fl , determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, EdL , através da expressão:

$$EdL = 4 \times 10^{-6} \times l^2 \times Fl^2 \times \rho \times T \text{ [Mpa]} \quad (3.20)$$

Sendo,

l - comprimento do provete, [mm];

ρ - massa volúmica do provete, [g/mm^3];

Fl - frequência de ressonância fundamental longitudinal, [Hz];

T - coeficiente de correção

A massa volúmica de cada provete foi determinada por cubicagem, com o auxílio de uma régua graduada para determinar as dimensões, e uma balança com uma resolução de 0,01g para determinar a massa do provete seco, m_d . A massa volúmica de cada provete é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{m_d}{A \times l} \text{ [g/mm}^3\text{]} \quad (3.21)$$

Sendo,

ρ - massa volúmica do provete, [g/mm³];

m_d - massa do provete seco, [g];

A - área da secção transversal do provete, [mm²];

l - comprimento do provete, [mm].

3.6.2. Ensaio de secagem

O objetivo do presente ensaio baseia-se na avaliação dos índices de secagem das argamassas. Foram ensaiadas as amostras utilizadas na determinação da porosidade aberta, visto que já estavam saturadas. A secagem não se processou de forma unidirecional mas sim através das faces laterais dos mesmos e pelo seu topo superior. Durante o ensaio, as amostras foram colocadas numa câmara climática, nas condições de 20 °C ± 2°C e 50 % ± 5% HR, após determinação da massa saturada. Foi determinada a massa das amostras, com uma balança com resolução de 0,01 g, nas primeiras 6 horas, em intervalos de 1 hora, e, posteriormente, em intervalos de 24 horas, até se verificar massa constante, ou um aumento de massa devido à absorção da humidade presente no ambiente envolvente.

Determinou-se o índice de secagem, I_s , que mostra a capacidade de secagem das argamassas, ou seja, quanto menor for o valor de I_s , maior será a capacidade de secagem.

Determinou-se o índice de secagem através da expressão:

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{\max} \times t_f} \quad (3.22)$$

Sendo,

t_i - tempo de ensaio no instante i [h];

Q_i - quantidade de água no interior do provete no instante i [%];

Q_{max} - quantidade de água no interior do provete no instante inicial [%];

t_f - tempo final do ensaio [h].

Sendo:

$$Q_i = \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (3.23)$$

Sendo,

m_i – massa do provete no instante inicial [g];

m_{seca} – massa do provete seco [g].

3.6.3. Porosidade aberta e massa volúmica aparente-NP EN 1936

A porosidade aberta é determinada pelo quociente entre o volume de poros abertos e o volume aparente do provete e é avaliada em forma percentual.

Segundo Freitas et al (2008), o conceito de porosidade aberta é a quantidade de poros que estão acessíveis à água pela fronteira com o exterior e que comunicam entre si possibilitando a circulação de fluídos no seu interior. Um material que apresente porosidade aberta elevada é de fácil embebição, enquanto um material com elevada porosidade fechada, cujos poros não comunicam entre si, apresenta-se como uma barreira hídrica (Figura 3.13).

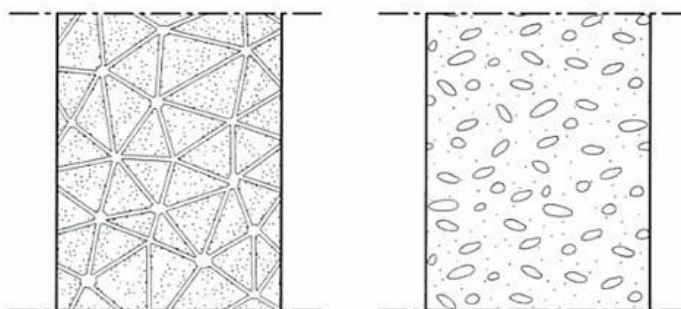


Figura 3.13 – Distinção entre um material com porosidade aberta e um material com porosidade fechada respetivamente (Freitas et al, 2008)

O ensaio de determinação da porosidade aberta foi realizado de acordo com os procedimentos preconizados na norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008). Visto que a referida norma se destina

ao ensaio de pedra natural, foram feitas pequenas alterações no procedimento com o intuito de se poderem ensaiar as argamassas de cal. Foram utilizados, para cada argamassa, os topos dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Amostras para determinação da porosidade aberta

O ensaio de porosidade aberta seguiu o procedimento que se descreve:

- Os provetes ensaiados foram previamente limpos com um pincel e identificados, retirando cuidadosamente o material que se desagregava devido à sua fragilidade.
- As amostras foram colocadas numa estufa ventilada até se verificar uma variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens consecutivas. Depois de secos, os provetes foram colocados num exsiccador até atingirem a temperatura ambiente. As amostras foram pesadas numa balança com resolução de 0,001g, determinando-se a massa seca de cada uma, m_d .
- As amostras foram colocadas num tabuleiro com água, completamente imersos, até atingirem a saturação. Segundo a referida norma as amostras deveriam ser colocadas num recipiente de vácuo imerso e sujeitos a um abaixamento de pressão de modo a eliminar o ar nos poros. Este procedimento não foi realizado devido à fragilidade dos provetes. As amostras foram pesadas numa balança com resolução de 0,01g, determinando-se a massa saturada de cada uma, m_s .
- Realizou-se a pesagem hidrostática das amostras. A balança onde foi efetuada cada pesagem contém um cesto acoplado que se imerge num recipiente preenchido de água (Figura 3.15). Cada provete foi colocado no cesto imerso e, após a balança estabilizar, registou-se a massa do provete imerso, m_h .



Figura 3.15 - Pesagem hidrostática

O cálculo da porosidade aberta, ρ_0 , é calculada pela expressão:

$$\rho_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \quad (3.24)$$

Sendo,

ρ_0 – porosidade aberta [%];

m_d – massa do provete seco [g];

m_s – massa do provete saturado [g];

m_h – massa do provete imerso em água [g].

Determinou-se ainda o valor da massa volúmica aparente, ρ_b , através da expressão:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (3.25)$$

Sendo,

ρ_b – massa volúmica aparente [kg/m^3];

ρ_{rh} – massa volúmica aparente da água, à temperatura de ensaio, 20°C, [998 kg/m^3].

4. RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são apresentados todos os resultados obtidos dos ensaios descritos anteriormente. Pretende-se analisar os resultados das argamassas de cal de referência (AR, HR) e compará-los com os das argamassas que contêm resíduos de cerâmica vermelha (AC, HC). Além disso, procura-se fazer um paralelismo com os resultados obtidos das argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014).

4.2 Caracterização das Matérias-Primas

4.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica da areia foi realizada de acordo com os procedimentos preconizados na EN 933-1 (CEN, 2012), tendo sido obtidos os resultados apresentados no Quadro 4.1 e na Figura 4.1 que incluem resultados determinados em estudos anteriores.

Quadro 4.1 - Determinação da curva granulométrica da areia

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa de material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
4	0.2761	0.13	99.87
2	8.8565	4.10	95.78
1	64.0562	29.63	66.14
0.5	110.3760	51.06	15.08
0.25	30.8617	14.28	0.80
0.125	0.8625	0.40	0.40
0.063	0.1135	0.05	0.35
P (<0,063)	0.0760	-	-

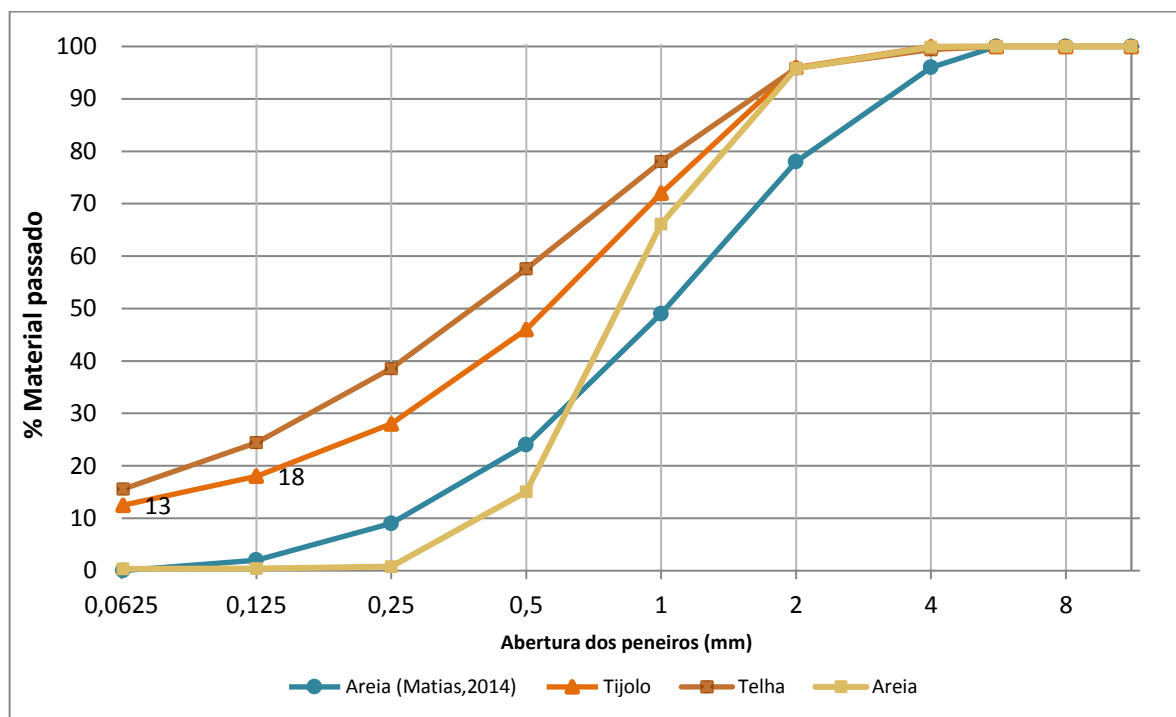


Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia

Pela análise da curva granulométrica é possível verificar que a areia utilizada possui uma granulometria com poucas partículas finas ($<0,25$ mm). A dimensão máxima do agregado corresponde a 4 mm. Os resíduos apresentam cerca de 10 % de material correspondente aos finos que passam no peneiro n.º 200 (abertura de 0,063 mm), inexistente no caso da areia utilizada no presente estudo. A areia utilizada no presente estudo praticamente não tem partículas com dimensão inferior a 0,25mm. Em termos de distribuição granulométrica é possível observar que a areia utilizada anteriormente por Matias (2014) em relação a deste estudo apresenta uma distribuição mais contínua e com mais finos.

4.2.2. Módulo de finura

O módulo de finura foi determinado segundo a norma de especificação de agregados para argamassas, NP EN 13139:2005 (IPQ, 2005, tendo sido obtidos os resultados apresentados no Quadro 4.2 e na Figura 4.2 que incluem resultados determinados em estudos anteriores.

Quadro 4.2 – Módulo de finura dos agregados

Agregado	Módulo de Finura FM
Areia (Matias,2014)	3.42
Areia	3.22
Telha	2.06
Tijolo	2.40

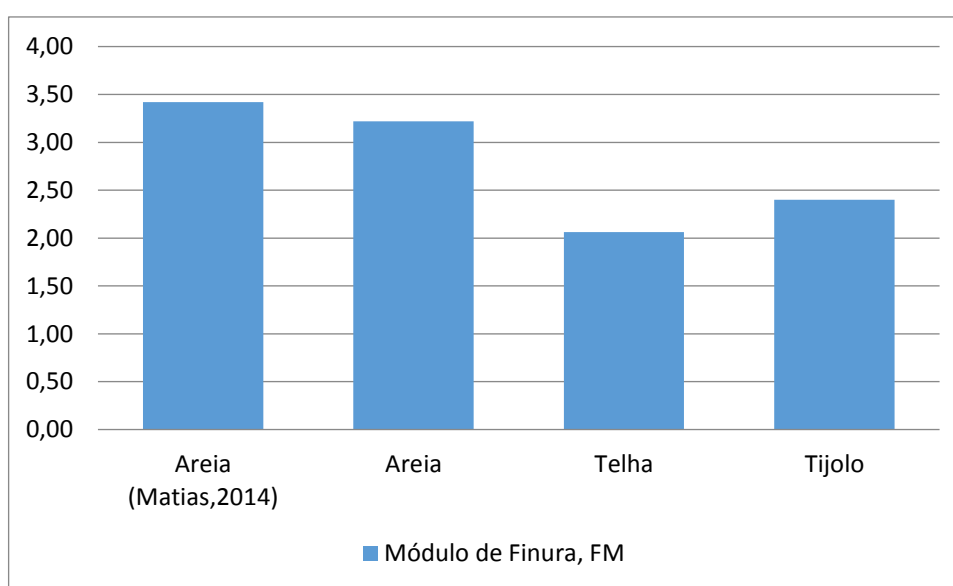


Figura 4.2 - Módulo de finura dos agregados

Em termos de classificação do módulo de finura, as areias e os resíduos de tijolo inserem-se no grupo CF, correspondente a agregado com grãos mais grosseiros. Os resíduos de telha inserem-se no grupo MF.

4.2.3. Baridade dos materiais

A baridade dos materiais foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002), tendo sido obtidos os resultados apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Baridade das matérias-primas

Matéria - Prima	Baridade (g/cm³)
Areia	1.440
Resíduo tijolo	1.097
Resíduo telha	1.172
Cal Aérea Lusical H100	0.361
Cal Hidráulica Natural Secil NHL 3,5	0.812

Os resultados deste ensaio mostram que a areia é a matéria com um maior valor de baridade, enquanto que a cal aérea apresenta o menor valor. Quanto menor for a baridade, menor será a massa necessária para preencher um determinado volume. Podemos então concluir que o uso de resíduos como substituto do agregado tornará as argamassas mais leves.

4.2.4. Massa volúmica e absorção de água dos materiais

A massa volúmica da areia foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1097-6 (CEN, 2013) e permitiu obter os resultados apresentados no Quadro 4.4 e Figura 4.3.

Quadro 4.4 - Massa volúmica e absorção de água dos materiais

	Areia	Resíduos Tijolo	Resíduos Telha
ρ_a - Massa volúmica das partículas impermeáveis (Mg/m ³)	2.60	2.67	2.64
ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (Mg/m ³)	2.58	2.22	2.34
ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m ³)	2.57	1.95	2.15
W ₂₄ - Absorção de água após 24 horas (%)	0.39	13.91	11.32

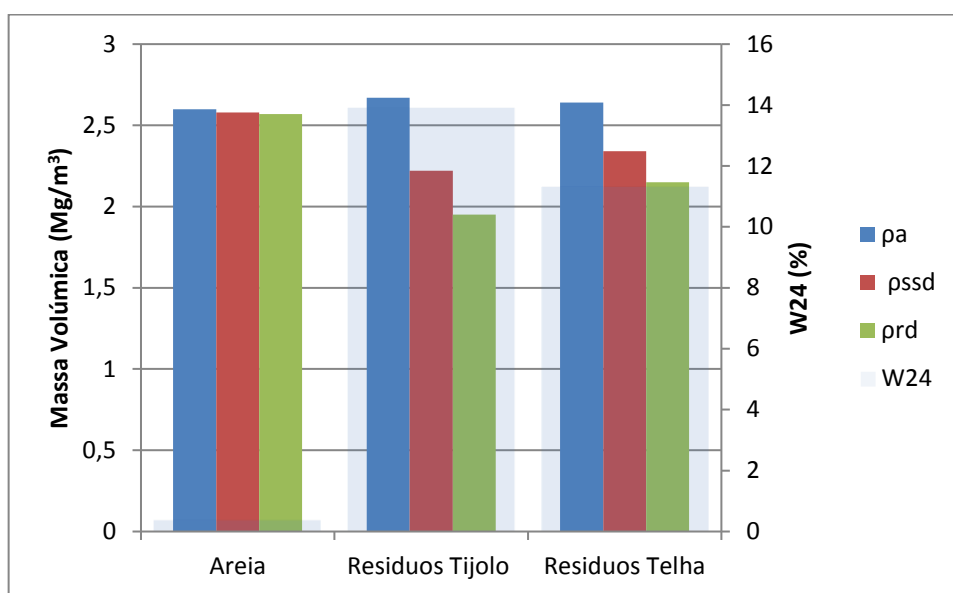


Figura 4.3- Massas volúmica e absorção de água dos materiais

Verificou-se que os valores obtidos para as massas volúmicas da areia e dos resíduos apresentam a mesma ordem de grandeza. Em termos de absorção de água após 24 horas de imersão, as diferenças são bastante evidentes: a areia de rio tem uma absorção de água praticamente inexistente, enquanto os resíduos apresentam absorções mais elevadas.

4.3. Ensaio sobre argamassas frescas

4.3.1. Consistência por espalhamento

A consistência por espalhamento das argamassas foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-3 (CEN, 2006) e permitiu obter os resultados apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Consistência por espalhamento

Argamassa	Espalhamento (mm)
HR	194.93
HC	187.23
AR	191.08
AC	189.15

Como se pode verificar no quadro acima, os valores de espalhamento para cada argamassa são ligeiramente superiores aos valores de referência de 150 ± 15 mm. No entanto, verificou-se ser o valor mais adequado para garantir a trabalhabilidade das diferentes composições.

4.4. Ensaio sobre argamassas endurecidas

4.4.1. Massa volúmica seca

A determinação da massa volúmica seca das argamassas no estado endurecido foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-10 (CEN, 2006). Os resultados das argamassas de cal hidráulica obtidos aos 28 dias e as argamassas de cal aérea obtidos aos 60 dias são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Massa volúmica seca

Argamassa	Massa volúmica seca (kg/m³)
HR	1549
HC	1539
AR	1423
AC	1379

Tanto neste estudo como o realizado por Matias (2014) a análise dos resultados obtidos permitiu verificar que a incorporação de resíduos cerâmicos é vantajosa visto que a massa volúmica é reduzida. Na figura 4.4 apresentam-se as massas volúmicas obtidas em ambos os estudos.

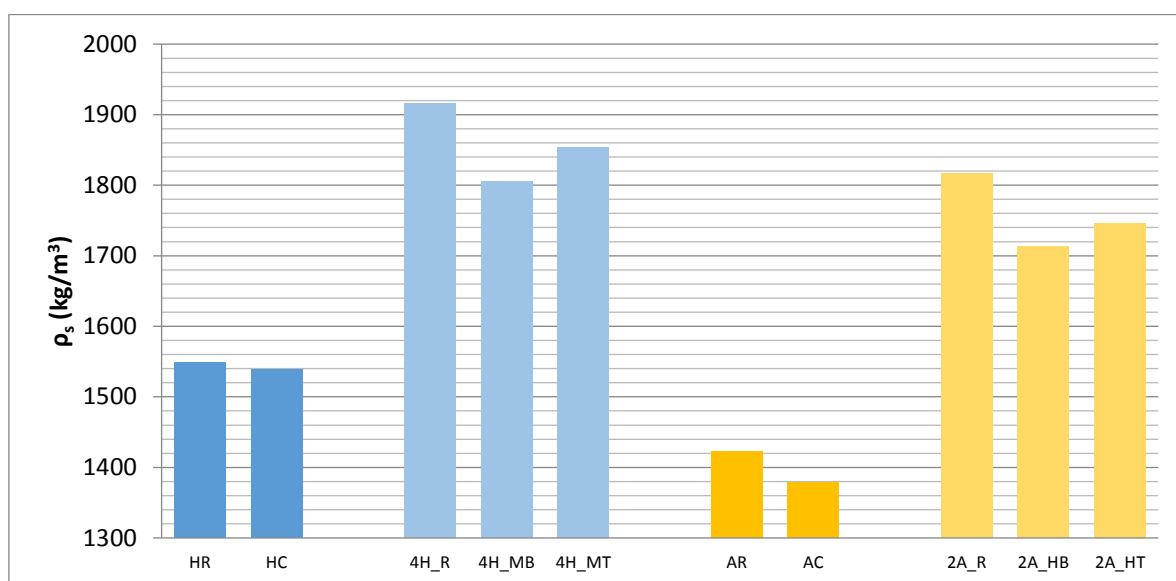


Figura 4.4 – Massa volúmica seca aos 28 e 60 dias

4.4.2. Porosidade aberta e massa volúmica aparente

A porosidade aberta das argamassas foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008) e permitiu obter os resultados apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Argamassa	Porosidade Aberta (%)	Massa Volúmica (kg/m ³)
HR	3.4	1564
HC	4.3	1513
AR	3.1	1559
AC	3.9	1425

Observando os valores obtidos para a porosidade aberta verifica-se que a introdução de resíduos cerâmicos (HC, AC) leva ao aumento da porosidade aberta. Em termos de massa volúmica aparente, a incorporação de resíduos cerâmicos leva a uma diminuição do seu valor, como era expectável.

Matias (2014) obteve tendências semelhantes às descritas anteriormente, no entanto verifica-se, tal como expectável, uma diminuição significativa de porosidade aberta com a adição do

hidrófugo nas argamassas neste estudo (HR, HC, AR, AC), como se pode verificar na figura 4.5.

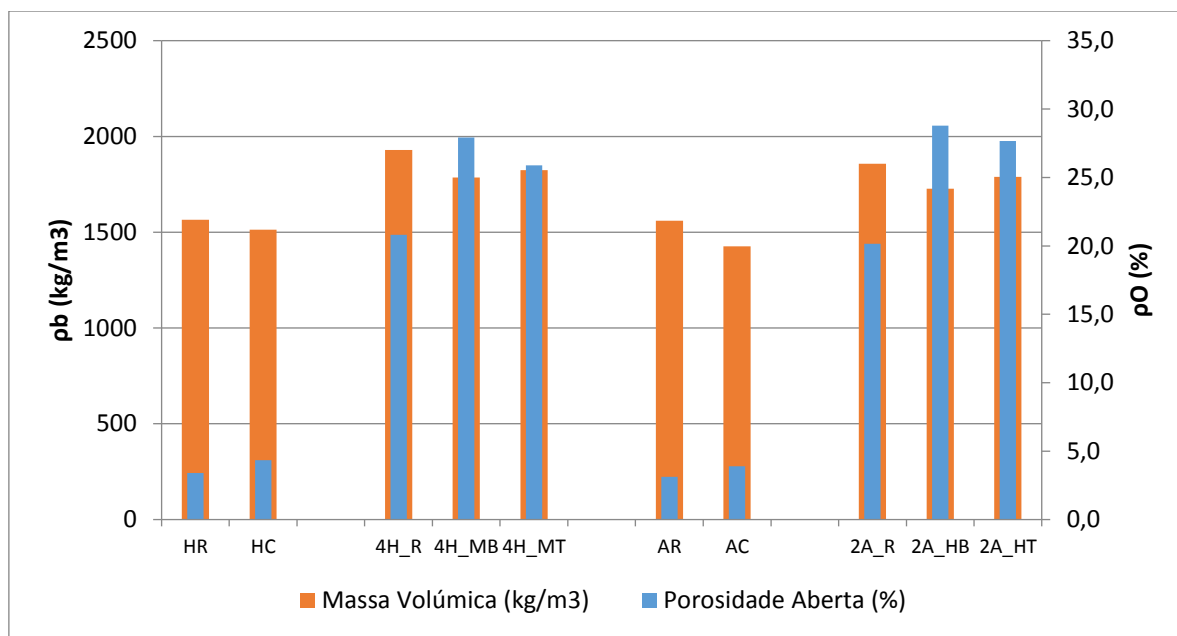


Figura 4.5 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 e 60 dias

4.4.3 Absorção de água por capilaridade

O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi determinado de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1015-18 (CEN, 2002), tendo sido obtidos resultados apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Argamassa	Coeficiente de absorção de água (kg/(m ² .min ^{0,5}))
HR	0.26
HC	0.36
AR	0.43
AC	0.80

Como se pode observar, os valores de coeficiente de absorção de água por capilaridade são superiores para as argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos, sendo esta diferença mais relevante no caso das argamassas de cal aérea.

No entanto, a absorção de água das argamassas foi bastante reduzida nas argamassas ensaiadas em relação a argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014), principalmente devido a adição do hidrófugo, como se pode verificar na Figura 4.6.

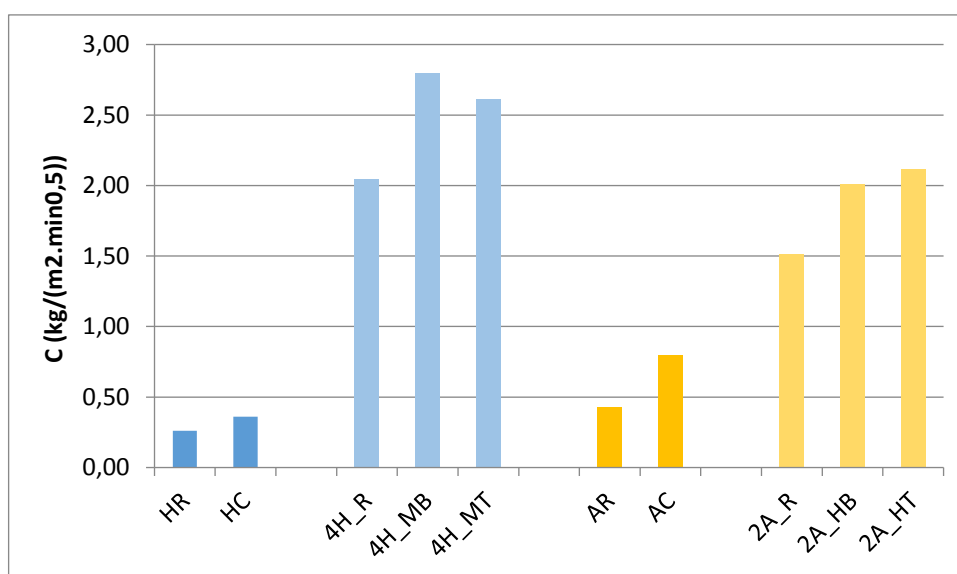


Figura 4.6 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

4.4.4. Ensaio de secagem

No Quadro 4.9 estão registados os valores do índice de secagem para as diferentes argamassas. Verifica-se que as argamassas de referência têm uma maior capacidade de secagem, pois apresentam o menor valor de IS.

Quadro 4.9 – Índice de Secagem

Argamassa	IS
HR	0.07
HC	0.10
AR	0.06
AC	0.10

No estudo levado a cabo por Matias (2014), observou-se a mesma tendência. É possível observar uma diminuição significativa do índice de secagem nas argamassas deste estudo (HR, HC, AR, AC) em relação às argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014), como se pode verificar na Figura 4.7.

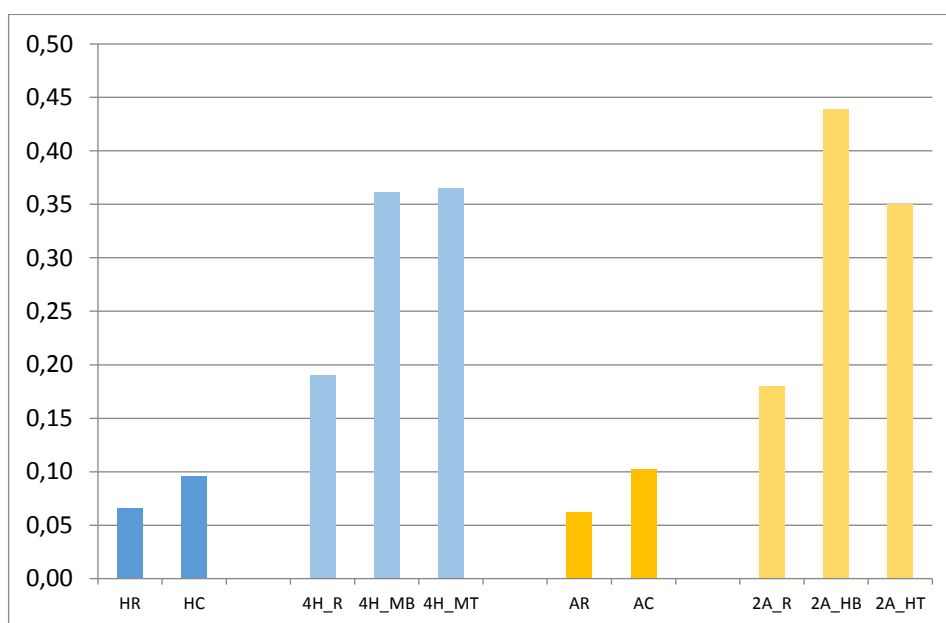


Figura 4.7 – Índice de Secagem

4.4.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Argamassa	W_{vp} ($\times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa))	μ
HR	3.18	6.10
HC	2.38	8.16
AR	3.59	5.40
AC	3.01	6.44

A análise dos resultados obtidos permite verificar que a incorporação de resíduos em argamassas de cal leva a uma ligeira redução da permeabilidade ao vapor de água, possivelmente devido à maior percentagem de finos associados à substituição do agregado por resíduos de cerâmica.

Matias (2014) retirou a mesma conclusão. No entanto, verifica-se um aumento da permeabilidade ao vapor de água nas argamassas neste estudo (HR, HC, AR, AC), como se pode verificar na Figura 4.8. Este aumento poderá também dever-se ao facto de a areia utilizada neste estudo conter menos finos do que a areia utilizada por Matias (2104), havendo um deficiente preenchimento dos vazios das partículas de maiores dimensões pelas partículas de menores dimensões.

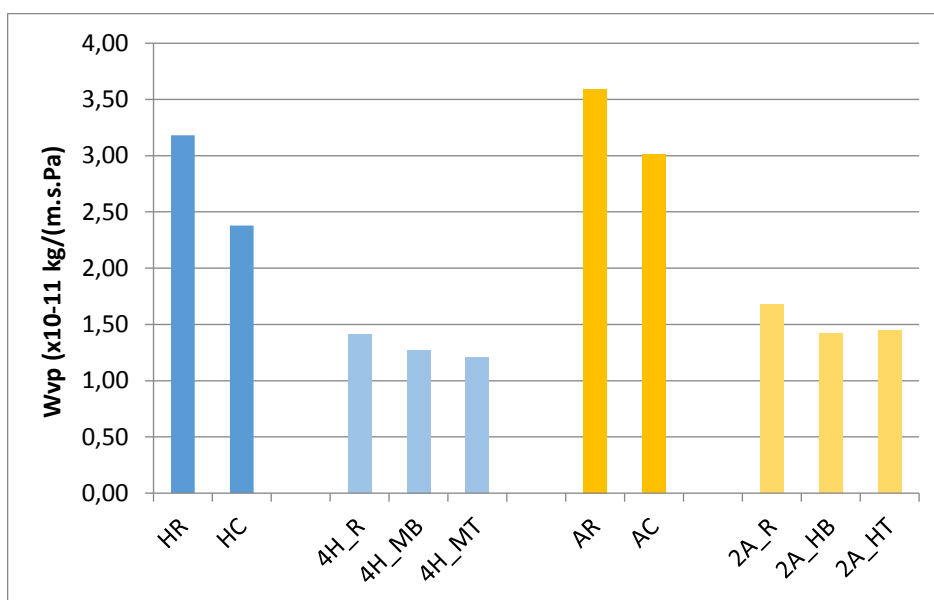


Figura 4.8 - Permeabilidade ao vapor de água

4.4.6. Resistência à flexão

A resistência à tração por flexão foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1015-11 (CEN, 2006), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 - Resistência à flexão

Argamassa	Rf (Mpa) 28 dias	Rf (Mpa) 60 dias	Rf (Mpa) 90 dias
HR	0.15	0.12	-
HC	0.19	0.16	-
AR	-	0.14	0.14
AC	-	0.31	0.30

Dos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão, verifica-se que as argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica apresentam valores ligeiramente superiores de resistência à flexão em relação às argamassas de referência. Verifica-se ainda que os valores de resistência nas argamassas de cal hidráulica diminuem ligeiramente com o avançar do tempo de cura, enquanto as argamassas de cal aérea mantêm-se constantes.

No estudo levado a cabo por Matias (2014) observou-se a mesma tendência, mas com aumentos mais pronunciados em relação as argamassas de referência, como se pode verificar na Figura 4.9. Os valores de resistência à tração por flexão das argamassas de cal hidráulica deste estudo (HR e HC) são próximos do valor da argamassa de referência (4H_R), estudado por Matias (2014). No entanto, são bastante inferiores aos das argamassas com incorporação de resíduos (4H_MB e 4H_MT) estudados por Matias (2014). Em relação às argamassas de cal aérea obteve-se resultados mais semelhantes aos de Matias (2014).

Os valores da resistência à tração por flexão nas argamassas estudadas por Matias (2014) são superiores, possivelmente devido ao facto de a areia utilizada possuir uma melhor distribuição granulométrica e uma maior quantidade de finos, o que originou uma argamassa com poros de menores dimensões e, por isso, com maiores resistências mecânicas.

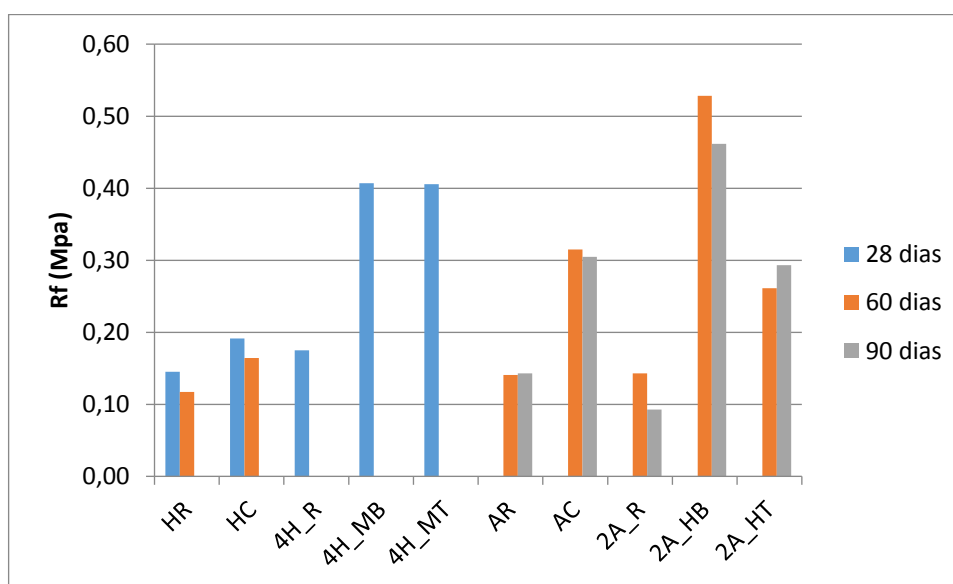


Figura 4.9 - Resistência à flexão aos 28, 60 e 90 dias

4.4.7. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN 1015-11 (CEN, 2006), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Resistência à compressão

Argamassa	Rc (Mpa) 28 dias	Rc (Mpa) 60 dias	Rc (Mpa) 90 dias
HR	0.22	-	-
HC	0.51	-	-
AR	-	0.19	0.23
AC	-	0.61	0.71

A análise dos resultados obtidos permite verificar que a incorporação de resíduos em argamassas de cal leva a um aumento significativo de resistência à compressão. Verifica-se que as argamassas de cal aérea apresentam uma tendência de aumento da resistência à compressão ao longo do período de cura, como seria expectável.

Matias (2014) retirou a mesma conclusão com os resultados apresentados na Figura 4.10, mas obteve aumentos mais pronunciados em relação as argamassas de referência.

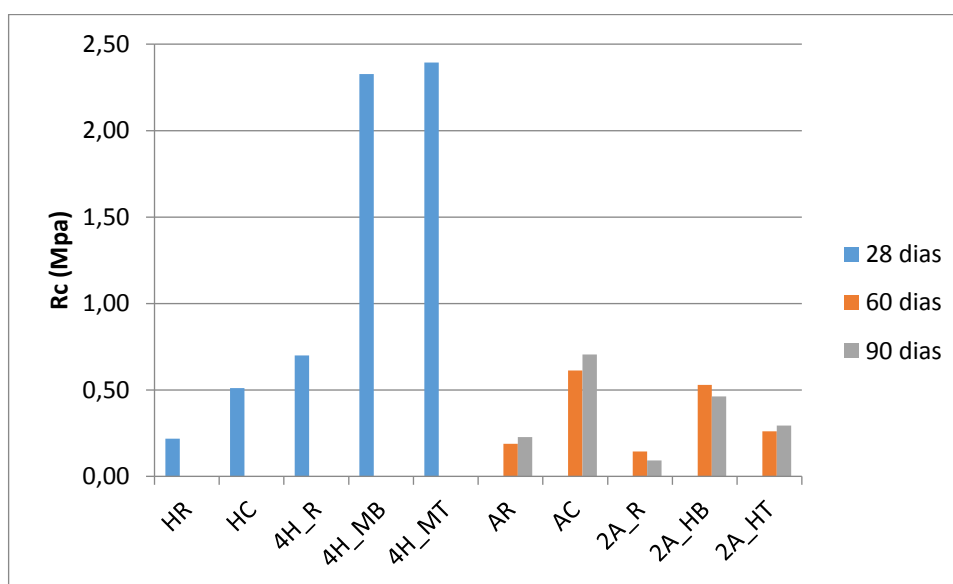


Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias

Em relação às argamassas de cal hidráulica deste estudo (HR, HC), os valores de resistência à compressão são bastante inferiores face aos estudados anteriormente por Matias (2014) (4H_R, 4H_MB e 4H_MT). Através da análise das argamassas de cal hidráulica de referência, HR, deste estudo, e 4H_R, do estudo de levado a cabo por Matias (2014), é possível observar que a adição do hidrófugo tem um impacto negativo, podendo interferir com o processo de hidratação da cal hidráulica. Verifica-se novamente a influência de uma melhor distribuição granulométrica e uma maior percentagem de finos na areia utilizada por Matias (2014), que deu origem, eventualmente, a valores de resistência à compressão superiores.

4.4.8. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido segundo as indicações da norma de ensaio NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.13.

Quadro 4.13 - Módulo de elasticidade dinâmico

Argamassa	EdL (MPa)
HR	807
HC	875
AR	652
AC	1186

A análise dos resultados obtidos permite verificar que a incorporação de resíduos em argamassas de cal leva a um aumento módulo de elasticidade dinâmico, possivelmente devido ao aumento de partículas finas, sendo este mais pronunciado nas argamassas de cal aérea.

Matias (2014) observou o mesmo comportamento, como se pode verificar na Figura 4.11 mas com aumentos mais pronunciados em relação as argamassas de referência. Comparando os resultados deste estudo com o estudo anterior de Matias (2014) verifica-se novamente a vantagem de utilizar uma areia com uma melhor distribuição granulométrica.

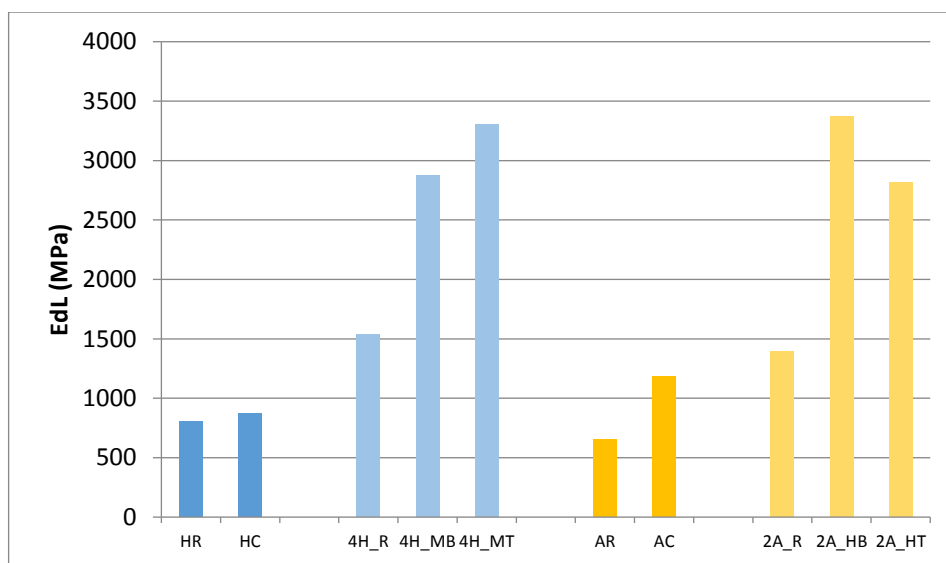


Figura 4.11 - Módulo de elasticidade dinâmico

4.4.9. Resistência adesiva

O ensaio de arrancamento por tração foi determinado de acordo com os procedimentos preconizados na EN 1015-12 (CEN, 2000), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Resistência adesiva aos 28, 60 e 90 dias

Argamassa	f_u (Mpa) 28 dias	f_u (Mpa) 60 dias	f_u (Mpa) 90 dias
HR	0.063	-	-
HC	0.045	-	-
AR	-	0.004	0
AC	-	0.014	0.032

Os resultados obtidos não revelam uma tendência clara em relação a incorporação de resíduos de cerâmica nas argamassas de cal. De um modo geral, resistência adesiva das argamassas de cal hidráulica diminuiu com a incorporação de resíduos, enquanto que a resistência das argamassas de cal aérea aumentou com a incorporação de resíduos. É de salientar que a argamassa de cal aérea de referência (AR) já se encontrava destacada do suporte aos 90 dias. Contudo, os valores obtidos são muito reduzidos e apresentam variabilidades muito elevadas, pelo que se considera que o ensaio não foi conclusivo.

A forma de rotura, para todas as amostras, foi do tipo a, designada de rotura adesiva, que ocorre por perda de aderência na interface entre o suporte e a argamassa. Apenas um dos provetes apresentou uma rotura do tipo b, coesiva, com rotura na argamassa.

Os resultados obtidos por Matias (2014) também não revelam uma tendência clara em relação a incorporação de resíduos de cerâmica, como se pode verificar na Figura 4.12.

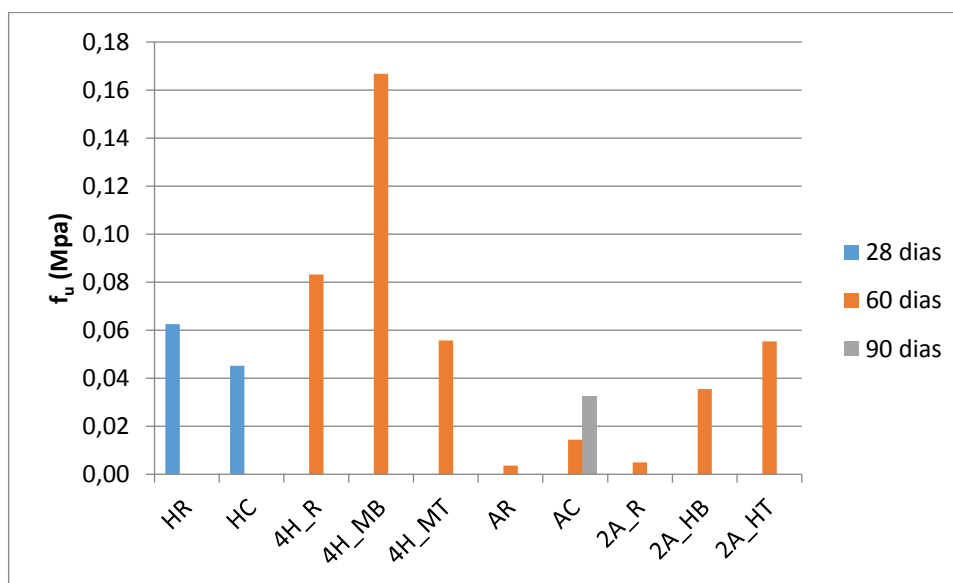


Figura 4.12 - Resistência adesiva aos 28, 60 e 90 dias

4.4.10. Análise dos resultados

Neste subcapítulo pretende-se fazer uma síntese dos resultados obtidos para as quatro argamassas estudadas (Quadro 4.15), verificar o cumprimento dos requisitos que as argamassas devem cumprir para serem consideradas argamassas de renovação, segundo a norma NP EN 998-1:2013 (Quadro 4.16), e verificar o ajuste aos requisitos das argamassas de revestimento para edifícios antigos, segundo Veiga e Carvalho (2002) (Quadro 4.17).

Quadro 4.15 - Síntese dos resultados

Propriedades		Argamassas			
		HR	HC	AR	AC
Ensaio no estado fresco					
Consistência por espalhamento (EN 1015-3)	(mm)	194.93	187.23	191.08	189.15
Ensaio para argamassas endurecidas (requisitos da NP EN 998-1)					
Aderência (EN 1015-12)	fu (Mpa)	0.063	0.045	0.004	0.014
Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18)	C (kg/(m ² .min ^{0,5}))	0.3	0.4	0.4	0.8
	Mi (kg/m ²)	0.4	0.6	0.7	1.2
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (EN 1015-19)	μ	6.10	8.16	5.40	6.44
Massa volúmica seca (EN 1015-10)	ρs (kg/m ³)	1549	1539	1423	1379
Resistência à flexão (EN 1015-11)	Rf (Mpa)	0.15	0.19	0.14	0.31
Resistência à compressão (EN 1015-11)	Rc (Mpa)	0.22	0.51	0.23	0.71
Caracterização complementar					
Módulo de elasticidade dinâmico (NP EN 14146)	EdL (Mpa)	807	875	652	1186
Ensaio de secagem (RILEM n.º II.5)	IS	0.07	0.1	0.06	0.1
Porosidade aberta e massa volúmica aparente (NP EN 1936)	ρo (%)	3.4	4.3	3.1	3.9

Quadro 4.16 - Verificação dos requisitos para argamassa de renovação segundo a norma NP EN 998-1:2013

Parâmetro de ensaio	Requisito para argamassa endurecida	HR	HC	AR	AC
Massa volúmica seca (EN 1015-10)	Gama declarada de valores	-	-	-	-
Resistência à compressão (EN 1015-11)	Categoria CS II (1.5 a 5.0 MPa)	Não	Não	Não	Não
Aderência (EN 1015-12)	Gama declarada de valores	-	-	-	-
Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18)	$M_i \geq 0.3 \text{ kg/m}^3$	Sim	Sim	Sim	Sim
Penetração de água após ensaio de absorção de água (EN 1015-18)	$\leq 5 \text{ mm}$	Sim	Sim	Sim	Sim
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (EN 1015-19)	$\mu \leq 15$	Sim	Sim	Sim	Sim

Analisando o quadro anterior, as argamassas com incorporação de resíduos, HC e AC, cumprem os requisitos essenciais para ser consideradas argamassas de renovação, exceto no que respeita à resistência à compressão. No que se refere a este parâmetro, no entanto, cumprem os requisitos para argamassa de uso geral para rebocos exteriores/interiores (GP), visto que o valor de resistência à compressão é inferior, classe CS I (0,4 MPa a 2,5 MPa). Este parâmetro não atinge os valores desejados provavelmente devido ao facto de a areia não possuir uma granulometria adequada, conforme já referido anteriormente.

Quadro 4.17 - Verificação dos requisitos das argamassas para edifícios antigos segundo Veiga e Carvalho (2002)

Parâmetro de ensaio	Requisito para argamassa endurecida	HR	HC	AR	AC
Resistência à flexão (EN 1015-11)	0.2-0.7 MPa	Não	Sim	Não	Sim
Resistência à compressão (EN 1015-11)	0.4-2.5 MPa	Não	Sim	Não	Sim
Aderência (EN 1015-12)	0.1-0.3 MPa	Não	Não	Não	Não
Módulo de elasticidade dinâmico (NP EN 14146)	2000-5000 MPa	Não	Não	Não	Não
Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18)	1-1.5 (kg/(m ² .min ^{0,5}))	Não	Não	Não	Não

Analisando os valores recomendados por Veiga e Carvalho (2002) para argamassas de reabilitação de edifícios antigos, as argamassas com incorporação de resíduos, HC e AC, cumprem os valores de resistência a flexão e à compressão. No entanto, nenhuma das argamassas estudadas verifica os intervalos relativos à aderência e ao módulo de elasticidade. A absorção de água por capilaridade de todas as argamassas é muito inferior ao intervalo definido, possivelmente devido a adição do hidrófugo.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo o melhoramento de formulações de argamassas de cal aérea e cal hidráulica com incorporação de resíduos cerâmicos, de modo a que estas possam ser consideradas um produto adequado para a reabilitação de edifícios, de acordo com a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013), relativa à marcação CE de argamassas. Para caracterizar o comportamento mecânico e o comportamento face à presença de água das argamassas de cal com incorporação de resíduos foram preparadas amostras de argamassas com resíduos de cerâmica, em várias dosagens, e argamassas sem a incorporação de resíduos cerâmicos. Foram preparadas quatro argamassas diferentes, duas com resíduos na sua composição, HC e AC, e outras duas sem resíduos, HR e AR, e os valores obtidos para as diferentes composições foram comparados de modo a compreender a influência da presença dos resíduos de cerâmica e as consequências da adição de um hidrófugo.

Tendo em conta a bibliografia apresentada, verifica-se que este tema tem sido desenvolvido por diversos autores. O presente trabalho surgiu como o seguimento de trabalhos já desenvolvidos anteriormente, no âmbito de argamassas de cal com incorporação de resíduos cerâmicos, principalmente o de Matias (2014). Neste estudo pretendeu-se melhorar o comportamento face à presença de água das argamassas estudadas anteriormente por Matias (2014), através da adição de um hidrófugo, que foi utilizado em todas as argamassas estudadas.

Os procedimentos da campanha experimental para a determinação das características de argamassas de cal no estado fresco e dos ensaios para marcação CE do produto, requisitos da NP EN 998-1, foram baseados nas normas europeias EN 1015, *Methods of test for mortar for masonry*. Para além dos ensaios definidos pela norma de produto, foram realizados ensaios de caracterização complementar como o módulo de elasticidade dinâmico, o ensaio de secagem, e a determinação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente.

As características e parâmetros obtidos foram comparados com outros estudos precedentes, nomeadamente Veiga e Carvalho (2002) e Matias (2014), de forma a identificar algum tipo de relação e avaliar a influência dos vários constituintes.

Conclui-se que os objetivos desta dissertação foram atingidos com êxito, pois foi possível caracterizar as argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica, contribuindo assim para o melhor conhecimento sobre a incorporação desses resíduos em argamassas.

Analisando os resultados obtidos as argamassas com incorporação de resíduos, HC e AC, cumprem os requisitos essenciais para ser consideradas uma argamassa de renovação, exceto no que respeita à resistência à compressão. No entanto, estas cumprem os requisitos para argamassa de uso geral para rebocos exteriores/interiores (GP), visto que o valor de resistência à compressão obtido pertence classe CS I (0,4 MPa a 2,5 MPa).

Analisando os requisitos das argamassas de reabilitação estabelecidos por Veiga e Carvalho (2002), as argamassas com incorporação de resíduos, HC e AC, cumprem o intervalo de valores definido para a resistência a flexão e à compressão. No entanto, nenhuma das argamassas estudadas cumpre os intervalos definidos para a aderência e o módulo de elasticidade. A absorção de água por capilaridade, para todas as argamassas, é muito inferior ao intervalo sugerido, o que poderá ser atribuído à adição do hidrófugo.

Comparando o comportamento higrotérmico das argamassas de cal deste estudo com as argamassas anteriormente estudadas por Matias (2014), foram obtidas algumas melhorias associadas à adição do hidrófugo. No entanto, as resistências mecânicas das argamassas de cal hidráulica sofreram uma redução significativa, muito provavelmente devido a distribuição granulométrica da areia utilizada. A adição de hidrófugo poderá, por um lado, alterar a estrutura porosa das argamassas, condicionando também a resistência mecânica e, por outro lado, no caso das argamassas de cal hidráulica, condicionar o processo de hidratação que garante a sua resistência mecânica.

Face a todos os resultados obtidos, verifica-se que os resíduos de cerâmica, quando incorporados em substituição do agregado, em argamassas de cal, melhoram algumas das suas propriedades. Contudo, os valores obtidos para alguns parâmetros analisados não são ainda os ideais. O recurso a outro tipo de aditivos poderá melhorar estas propriedades. Os desempenhos obtidos para todas as argamassas com adição de hidrófugo foram satisfatórios quanto ao comportamento face à presença de água, quando comparadas com as argamassas sem o aditivo, tendo-se verificado, no entanto, que a redução da sua percentagem de incorporação poderá ser vantajosa.

O trabalho desenvolvido permitiu confirmar as vantagens da incorporação resíduos de cerâmica em argamassas de cal enquanto substitutos de uma percentagem do agregado e, simultaneamente, da adição de hidrófugo.

Relativamente a trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de estudos com o mesmo tipo de hidrófugo, mas numa percentagem inferior à utilizada neste estudo, no sentido de, eventualmente, melhorar as suas propriedades mecânicas. Alternativamente a esta diminuição

de hidrófugo, poderá ser avaliada a introdução de outros adjuvantes como promotores de aderência aumentando a aderência e resistência mecânica. Outra recomendação seria utilizar uma areia com uma granulometria mais adequada.

Perante os atuais requisitos do sector da construção, seria também importante realizar ensaios de condutibilidade térmica, reação ao fogo e durabilidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberto, H. (2014) " Argamassas de cal com incorporação de resíduos de cerâmica branca: estudo do seu comportamento", Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Barbosa, T. (2013) "Comportamento de Argamassas de Cal Aérea ao Traço 1:2 com Incorporação de Resíduos Cerâmicos," Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Cavaco, L. (2005). "Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

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

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

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

CEN (2006) "Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar". EN 1015-11, CEN, Brussels.

CEN (2006) "Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar". EN 1015-10 CEN, Brussels.

CEN (2012) "Tests for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method". EN 998-1, CEN, Brussels.

CEN (2013) "Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 6: Determination of particle density and water absorption" EN 1097-6:2013, CEN, Brussels.

Cruz, A. (2012) “Argamassas de Cal Hidráulica Natural com Incorporação de Resíduos Cerâmicos” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Duarte, T. (2011) “Comportamento Mecânico de Argamassas de Cal com Resíduos Cerâmicos” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Ferreira, T. (2011) “Análise do Comportamento Higrotérmico de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos Cerâmicos,” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Freitas, V., Torres, I., Guimarães, A. (2008). "Humidade Ascensional". FEUP Edições. 1ª Edição. Porto

IPQ (2000). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise Granulométrica – Método de Peneiração”. NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

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

IPQ (2006). “Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)”. NP EN 14146, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ. (2008). “Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas”. NP EN 1015-19 Instituto Português da Qualidade, Lisboa

IPQ. (2008). NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica, Portugal: IPQ.

Martins, A. (2008). "Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Matias, G. (2008). "A influência de resíduos de tijolo no comportamento de argamassas de cal". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

Matias, G. (2014) "Argamassas de reabilitação com incorporação de resíduos de cerâmica", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

Quintela, M. (2006) - " Durabilidade de revestimentos exteriores de parede em reboco monocamada". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Raimundo, A. (2013) "Argamassas de Cal Hidráulica Natural com Incorporação de Resíduos de Mosaico de Barro Vermelho," Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Rodrigues, M. (2004) "Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas – contribuição para o estudo da influência dos ligantes". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa

Silva, H. (2012) "Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduo de Cerâmica em Granulometria Fina" Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Silva, J. (2006); "Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias", Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Silva, N. e Campiteli, V. (2006). "Módulo de Elasticidade Dinâmico de Argamassa de Revestimento". 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Tomás, A. (2012) "Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica em Substituição de Parte do Agregado" Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Torres, I. (2004). “Humidade ascensional em paredes de construções históricas”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

Veiga, M. e Carvalho, F (2002) “Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar”. LNEC, Cadernos de Edifícios

Veiga, M; Viegas, J.; Pinto, A. ; Sousa, H. ; Faria, J. (2004) “Construção 2004-Repensar a Construção A Envoltente Dos edifícios” Acção de formação sobre revestimentos exteriores de paredes. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Veiga, M. (1998). "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes– contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Veiga, M. (2005) “Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. Seminário Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”, LNEC, Lisboa