



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

# **Comportamento de Argamassas de Cal Aérea ao Traço 1:2 com Incorporação de Resíduos Cerâmicos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

**Autor**

**Teresa Filipa Biscaia de Andrade Barbosa**

**Orientadoras**

**Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres**

**Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2013**

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas, direta ou indiretamente, a quem quero agradecer por contribuírem, de certa forma, para o fim de uma etapa muito importante da minha vida.

Em primeiro lugar agradeço às minhas orientadoras, a Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e a Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, pelo apoio, disponibilidade e colaboração, assim como por todos os conhecimentos transmitidos.

Agradeço à Engenheira Gina Matias, técnica superior do ITeCons, por todo o apoio, simpatia, disponibilidade e paciência que demonstrou ao longo do desenvolvimento de todos os trabalhos experimentais e na própria elaboração da dissertação.

No desenvolvimento deste trabalho, tive a oportunidade de trabalhar no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) da Universidade de Coimbra, onde conheci pessoas que contribuíram para um ambiente de trabalho bastante motivador às quais agradeço por toda a simpatia e hospitalidade. Agradeço também ao Professor Doutor Tadeu, que disponibilizou estas instalações para a realização dos ensaios.

Aproveito para agradecer a todos os meus amigos que sempre me acompanharam, e que contribuíram para os melhores momentos do meu percurso académico.

Agradeço ao Hugo a paciência, presença e compreensão, que sempre demonstrou.

Por fim, mas sem dúvida não menos importante, quero agradecer à minha família que esteve sempre presente, pelo apoio incondicional, e um especial obrigada à minha mãe e à minha irmã, pelos sacrifícios suportados, pelo incentivo e pela presença, especialmente nos momentos mais difíceis. Deve-se a vocês a pessoa que sou hoje.

A todos reitero a minha profunda gratidão.

## RESUMO

Os revestimentos antigos são, regra geral, constituídos por argamassas de cal aérea. Estas argamassas foram as mais utilizadas em Portugal, em construções até meados do século XX, altura a partir da qual foram substituídas pelas argamassas de cimento Portland. Este abandono progressivo da utilização da argamassa de cal aérea levou à perda de conhecimentos relativos ao seu fabrico e aplicação. Este facto tornou-se de grande importância quando se denotou uma incompatibilidade entre a alvenaria antiga e as argamassas de cimento. Estas apresentam uma elevada rigidez e resistência, reduzida permeabilidade ao vapor de água e libertação de sais solúveis, comportamentos muito diferentes dos rebocos originais e das próprias paredes de edifícios antigos.

Por outro lado, as argamassas à base de cal aérea, apresentam uma boa compatibilidade com os suportes antigos, pois têm características mais semelhantes às argamassas antigas. Mas atualmente, mesmo em edifícios antigos, muitas vezes estas argamassas não são utilizadas devido aos seus longos tempos de presa e endurecimento, e reduzida resistência mecânica inicial.

Este trabalho surgiu assim, com o intuito de melhorar os comportamentos mecânicos e face à água de argamassas de cal e, simultaneamente, de desenvolver argamassas mais sustentáveis. Para tal, incorporaram-se resíduos da indústria cerâmica numa argamassa de cal e fez-se uma análise comparativa relativamente à argamassa de referência, sem adição de resíduo cerâmico. Realizaram-se ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistências mecânicas, de permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, secagem e de porosidade aberta e massa volúmica.

## ABSTRACT

The old renderings are generally composed of air lime mortar. These mortars were mostly used in construction until the mid-twentieth century, when they were replaced by Portland cement mortars. This abandonment of the use of air lime mortar led to the loss of knowledge related to their manufacture and application. This fact becomes of relative importance when denoted a mismatch between the old masonry and cement mortars. These have a high stiffness and strength, low permeability to water vapour and the release of soluble salts, very different behaviour of the renders of old buildings.

Moreover, lime-based mortars present good compatibility with older brackets, because they are the most similar to mortars. Currently these mortars are not so often used due to its long setting times and reduced mechanical strength and hardening stages.

It was with the intent of improving the mechanical and hydrothermal behaviour of these mortars that this work has started, and also with the aim of contribute to the development of more sustainable mortars. Ceramic industry wastes were incorporated in a air lime mortar formulation and a comparative analysis was made with the reference mortar, without adding ceramic waste. Assays were performed to determine the module of dynamic elasticity, mechanical strength, permeability to water vapor, water absorption by capillary action, drying and open porosity and density.

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivo e metodologia.....	2
1.3 Organização do texto.....	2
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Origem das Argamassas.....	4
2.2 Argamassas de reabilitação em edifícios antigos.....	5
2.3.1 Funções das argamassas de revestimento.....	7
2.3.2 Fatores condicionantes da qualidade de uma argamassa.....	7
2.3.3 Propriedades das argamassas de revestimento.....	8
2.4 Argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica.....	10
2.5 Constituintes das argamassas de reabilitação.....	13
2.5.1 Considerações gerais.....	13
2.5.2 Ligantes.....	14
2.5.3 Agregados.....	16
2.5.4 Água de amassadura.....	18
2.5.5 Pozolanas.....	18
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	20
3.1 Descrição dos materiais utilizados e dos procedimentos experimentais.....	20
3.1.1 Matéria-Prima.....	20
3.1.1.1 Análise granulométrica dos materiais.....	21
3.1.1.2 Baridade dos materiais.....	22
3.1.2 Preparação das argamassas.....	22
3.1.2.1 Preparação da mistura.....	23
3.1.2.2 Preparação dos provetes.....	24
3.1.3 Ensaio sobre argamassas frescas.....	25
3.1.3.1 Ensaio de consistência por espalhamento.....	25
3.1.4 Ensaio sobre argamassas endurecidas.....	27
3.1.3.1 Permeabilidade ao vapor de água.....	27
3.1.3.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	32
3.1.3.3 Ensaio de resistência à tração por flexão e à compressão.....	34
3.1.3.4 Determinação da absorção de água por capilaridade.....	36
3.1.3.5. Ensaio de secagem.....	41
3.1.3.6 Ensaio de porosidade aberta.....	44
3.2 Discussão dos resultados.....	46
3.2.1 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	46

---

3.2.2 Ensaio da resistência à tração por flexão e resistência à compressão .....	47
3.2.3 Permeabilidade ao vapor de água .....	49
3.2.4 Absorção de água por capilaridade.....	50
3.2.5 Ensaio de secagem.....	50
3.2.6 Porosidade aberta.....	51
3.2.7 Análise global dos resultados .....	52
4 CONCLUSÕES .....	58
4.1 Conclusões gerais .....	58
4.2 Desenvolvimentos futuros .....	59
5 BIBLIOGRAFIA .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – O Ciclo da Cal (Epitácio et al, 2012) .....	15
Figura 3.1 – Processo de moagem dos resíduos da indústria cerâmica .....	20
Figura 3.2 – Moinho de maxilas.....	21
Figura 3.3 – Curvas geométricas dos agregados utilizados (Duarte, 2011) .....	21
Figura 3.4 – Processo de elaboração das argamassas desde as pesagens até à amassadura das misturas .....	24
Figura 3.5 – Nivelamento da superfície de um provete prismático com auxílio de uma rasoira .....	24
Figura 3.6 – Compactação da argamassa com auxílio de um pilão .....	25
Figura 3.7 – Primeira camada compactada.....	26
Figura 3.8 – Processo de retirada do molde e aplicação de 15 pancadas .....	26
Figura 3.9 – Impermeabilização da parte lateral do provete com uma camada de borracha líquida.....	28
Figura 3.10 – Preparação da parafina (painel à esquerda) para selagem da tina de ensaio (painel direito) .....	29
Figura 3.11 – Posição do suporte para medição da vibração em flexão.....	32
Figura 3.12 – Ensaio de resistência à flexão .....	34
Figura 3.13 – Provetes resultantes do ensaio à flexão .....	35
Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão.....	35
Figura 3.15 – Provetes selados lateralmente com papel celofane .....	36
Figura 3.16 – Pesagem dos provetes .....	37
Figura 3.17 – Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias.....	39
Figura 3.18 – Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias, nos primeiros 60 minutos de ensaio .....	39
Figura 3.19 – Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias.....	40
Figura 3.20 – Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias, nos primeiros 60 minutos do ensaio.....	40
Figura 3.21 – Câmara climática.....	42
Figura 3.22 – Curvas de secagem média das argamassas ao fim de 60 dias .....	43
Figura 3.23 – Curvas de secagem média das argamassas ao fim de 120 dias .....	43
Figura 3.24 – Módulo de elasticidade aos 60 e 120 dias, com a massa volúmica determinada através da medição de volume por cubicagem .....	47

---

Figura 3.25 – Módulo de elasticidade aos 60 e 120 dias, com a massa volúmica determinada através da medição de volume por imersão.....	47
Figura 3.26 – Resistência à flexão aos 60 e 120 dias .....	48
Figura 3.27 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias .....	48
Figura 3.28 – Permeabilidade ao vapor de água aos 60 e 120 dias .....	49
Figura 3.29 – Coeficiente de capilaridade aos 60 e 120 dias.....	50
Figura 3.30 – Índice de secagem aos 60 e 120 dias.....	51
Figura 3.31 – Porosidade aberta aos 60 e 120 dias.....	51
Figura 3.32 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração, aos 120 dias ..	52
Figura 3.33 – Resistência à compressão e resistência à tração por flexão, aos 120 dias .....	53
Figura 3.34 – Relação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade, aos 120 dias.....	53
Figura 3.35 – Relação entre a porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água, aos 120 dias.....	54
Figura 3.36 – Relação entre o coeficiente de capilaridade e o índice de secagem, aos 120 dias.....	54
Figura 3.37 – Relação entre o índice de secagem e a porosidade aberta, aos 120 dias.....	55

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades físicas e mecânicas das argamassas antigas (Matias, 2008) .....	7
Quadro 3.1- Determinação da baridade dos materiais (Duarte, 2011) .....	22
Quadro 3.2 – Designação, percentagem de resíduos e traços volumétricos. ....	23
Quadro 3.3- Ensaio de consistência por espalhamento .....	27
Quadro 3.4 – Permeabilidade ao vapor de água aos 60 dias .....	31
Quadro 3.5 – Permeabilidade ao vapor de água aos 120 dias .....	31
Quadro 3.6 – Módulo de elasticidade .....	34
Quadro 3.7 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 60 dias .....	41
Quadro 3.8 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 120 dias .....	41
Quadro 3.9 – Índices de secagem para os 60 e 120 dias, e respectivos desvios padrão. ....	44
Quadro 3.10 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 60 dias. ....	46
Quadro 3.11 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 120 dias.....	46
Quadro 3.12 – Síntese dos resultados obtidos aos 60 dias .....	56
Quadro 3.13 – Síntese dos resultados obtidos aos 120 dias .....	57

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Desde há várias décadas, que se tem assistido a um crescente interesse na investigação de materiais compatíveis para conservação e restauração de edificações antigas, com o intuito de evitar intervenções radicais, perdas e danos às valiosas estruturas patrimoniais.

A cal aérea foi um dos materiais mais importantes na construção e preservação das alvenarias tradicionais ao longo de centenas de anos. Porém, o desaparecimento progressivo dos meios tradicionais de produção desse material e de mão-de-obra com conhecimento e habilidade técnica, assim como o aparecimento do cimento Portland, contribuiu para que a cal fosse sendo substituída por este material. A cal constitui um material compatível e historicamente confiável mas, mesmo com os avanços técnicos realizados nos últimos anos, o seu uso é ainda limitado devido à falta de conhecimento técnico e à perda de antigos pedreiros que detinham o conhecimento do seu processamento e uso.

Vários estudos indicam que a utilização de argamassas de cimento é desaconselhada e, por vezes, mesmo inapropriada para certo tipo de trabalhos ou intervenções, especialmente intervenções de conservação e reabilitação. Este facto deve-se sobretudo a incompatibilidades com outros materiais, nomeadamente físicas e o elevado teor de sais. Desta forma, surge a necessidade de recorrer a argamassas à base de cal aérea, que tinham já provas dadas ao longo do tempo. No entanto, devido ao facto da utilização de argamassas de cal ter sido praticamente abandonada com o surgimento das argamassas de cimento, perdeu-se também uma grande parte do conhecimento relativo a características, formulações e desempenho.

Têm sido elaborados, nos últimos anos, inúmeros trabalhos de investigação com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre este tipo de argamassas, numa tentativa de recuperar o uso de argamassas à base de cal aérea. Esta prática é relativa não só ao estudo de argamassas de cal, mas também em relação ao estudo da influência da incorporação de alguns materiais pozolânicos nestas argamassas, fruto da necessidade que se verifica hoje de responder às mais variadas exigências. Uma dessas necessidades resulta do facto de estas argamassas apresentarem dificuldades de endurecimento em locais de fraco contacto com o dióxido de carbono, presente na atmosfera ou em ambientes muito húmidos (Tiago, 2011).

A utilização de pozolanas, naturais ou artificiais, vem desde a antiguidade romana. Estas não reagem isoladamente mas em contacto com o hidróxido de cálcio dos ligantes. Entre as pozolanas artificiais, destacam-se os resíduos cerâmicos encontrados nos revestimentos romanos mais antigos. Estudos indicam que a incorporação deste material em argamassas de cal aérea permite a obtenção de uma argamassa hidráulica, com bom comportamento físico e mecânico (Matias, 2008).

Para além das vantagens já referidas, a reutilização de resíduos industriais contribui para uma diminuição do consumo de recursos naturais, tornando estas argamassas mais sustentáveis.

## **1.2 Objetivo e metodologia**

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento, mecânico e face à água, de argamassas de cal aérea, com incorporação de resíduos de cerâmica de barro vermelho, contribuindo para um maior conhecimento das características deste tipo de argamassas e da viabilidade da sua utilização.

Os resíduos utilizados são resultantes da produção de tijolo, telha e vasos, previamente moídos de forma a adquirirem uma granulometria entre o pó e a granulometria da areia, e estes são utilizados substituindo parcialmente a areia.

Este estudo pretende dar continuidade a trabalhos da mesma área, e desta forma contribuir para o desenvolvimento de argamassas de revestimento para a reabilitação de edifícios, nomeadamente de edifícios antigos com os quais sejam compatíveis, de modo a incentivar a utilização destes produtos no futuro.

## **1.3 Organização do texto**

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução à matéria em estudo e na definição dos objetivos propostos.

O segundo capítulo diz respeito ao estado da arte, que por sua vez está dividido em sete subcapítulos. O primeiro pretende descrever a origem e evolução das argamassas de cal. O segundo subcapítulo diz respeito aos estudos realizados no âmbito da incorporação de pozolanas em argamassas de cal. No terceiro subcapítulo é abordada a questão das argamassas de cimento não serem indicadas em revestimentos antigos. Os restantes subcapítulos são descritas as funções das argamassas de revestimento, seus fatores condicionantes, propriedades e constituintes.

Segue-se o terceiro capítulo que resume todo o trabalho experimental desenvolvido. Neste capítulo, estão descritos os procedimentos experimentais, resultados obtidos ao longo dos ensaios realizados e análise crítica dos resultados.

No quarto capítulo segue-se a conclusão retirada da elaboração deste trabalho e são apresentadas propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros. Por fim o quinto capítulo diz respeito à bibliografia utilizada para a elaboração da presente dissertação.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Origem das Argamassas

Há mais de 10000 anos, surgiram as primeiras argamassas, na localidade de *Yftah 'el*, Galileia, hoje estado de Israel. A cal e o gesso aparecem mais tarde, entre 8000 e 7000 anos a C., em *Eynan*, Jericó, nas construções e nas cabeças de estátuas votivas modeladas, e em *Çatal Hüyük*, Turquia, como reboco de paredes [Alvarez et al]

Vários povos da antiguidade, tal como egípcios, chineses, etruscos, fenícios, gregos, incas e romanos, fabricavam cal gorda e utilizavam-na como ligante na consolidação das alvenarias ou na elaboração de rebocos pintados com cores naturais.

Os egípcios utilizaram o barro argiloso do Nilo (para argamassas dos adobes), o gesso e, por fim a cal, em monumentos como as Pirâmides. Neste tipo de climas secos, o gesso comporta-se de maneira bastante satisfatória.

Atribui-se aos Gregos o emprego da cal, proveniente da calcinação dos calcários. A cal aérea foi utilizada por estes povos, que primeiro a misturavam com a areia e mais tarde a combinaram com a chamada pedra de Santorin, que é uma pozolana.

O uso de pozolanas em argamassas vem do tempo da Roma antiga, com a junção antes da cozedura da cal no forno, obtendo, com este processo, argamassas mais duradouras. Este processo estimulava a mistura obtida, concedendo-lhe melhores propriedades. No entanto, a maioria das argamassas romanas utilizavam unicamente cal como ligante. Já nas obras públicas e no Império, os romanos utilizaram uma argamassa em que havia junção de material pozolânico. Os materiais pozolânicos combinavam-se com a cal não carbonatada, hidróxido de cálcio, para formar compostos estáveis, nomeadamente silicatos de cálcio.

Quando se introduz água numa mistura de pozolanas e cal viva, a cal viva não carbonatada (CaO) reage com a água formando hidróxido de cálcio, que por sua vez vai reagir com a alumina, sílica e cálcio, presentes nas pozolanas, formando silicatos de cálcio. Os silicatos de cálcio, devido à sua estabilidade, permitem uma maior resistência mecânica da argamassa e uma redução da porosidade.

A introdução de pozolanas nas argamassas, permitiu a execução de construções de outro porte na arquitetura romana, como as abóbadas e arcos abobadados, feitos com a ajuda de moldes

---

---

em madeira, aquedutos, arcos triunfais, pontes, basílicas, teatros, mercados, templos e palácios.

Nos séculos V, VI e VII, com a queda do Império Romano e a falta de poder económico, a qualidade das argamassas decresceu visto que a cal, por ser o elemento mais caro, é introduzida em menor percentagem. No século VIII, o gesso foi introduzido na Europa pelos árabes, trazendo desta forma à Península Ibérica, importantes modificações em matéria de argamassas, já que os árabes eram possuidores de uma elevada técnica construtiva.

As argamassas peninsulares do século VIII denominavam-se *trabadillos*, uma mistura de cal, gesso, areia calcária e aditivos, que era utilizada em juntas, estuques, rebocos, decoração.

Assim, desde a antiguidade até ao século XIX, os materiais usados em construção de paredes eram mais deformáveis e porosos do que atualmente. Eram-lhes exigidas grandes espessuras de forma a assegurar as capacidades de resistência e de proteção aos agentes atmosféricos. As paredes permitiam desta forma, a entrada e saída de água com facilidade.

Atualmente, as argamassas mais utilizadas são as argamassas de cimento, que surgiram entre o século XVIII e XIX com a necessidade de se construir em zonas marítimas e fluviais, o que levou à procura de aglomerantes capazes de endurecerem debaixo de água [Alvarez et al]. Em 1756, John Smeaton investigou as causas do endurecimento das argamassas hidráulicas, que naquela época eram exclusivamente formadas por cal e pozolana. Smeaton chegou a uma mistura de cal com um pouco de gesso e pozolana de origem italiana, verificando-se que a melhor cal era proveniente dos calcários argilosos e tenros (não puros).

A indústria cimenteira instalou-se em Portugal no século XIX. O cimento Portland passou a ser usado na reabilitação da maioria dos rebocos, como ligante hidráulico das argamassas. O uso deste ligante facilitava a organização do estaleiro tradicional, ao evitar a armazenagem de outros ligantes, e abreviando o tempo de presa do reboco, visto que as argamassas anteriormente utilizadas apresentavam tempos de presa mais elevados. Esta alteração considerou-se bastante vantajosa em termos de prazos de execução das obras, encurtando-os. No entanto, esta argamassa trouxe alguns inconvenientes, por vezes graves, aos rebocos, tornando-os mais fissuráveis [Veiga, 2003], impermeáveis ao vapor, geradores de maiores tensões nos suportes, entre outros inconvenientes.

## **2.2 Argamassas de reabilitação em edifícios antigos**

As argamassas de cimento apresentam uma estrutura física muito fechada, impedindo a passagem de humidade do interior para o exterior, e retendo a água no suporte, em vez de

---

facilitar a sua evaporação. As argamassas de reabilitação devem por um lado permitir a respiração da parede, dando passagem ao vapor de água, pelo que é importante a utilização de ligantes com estruturas relativamente abertas e agregados com curvas granulométricas criteriosamente escolhidas. Por outro lado, estas argamassas devem impedir a passagem de águas pluviais para que os sulfatos e o cálcio presentes nos rebocos antigos não sejam dissolvidos pela água em circulação no interior da parede e arrastados para a interface, contribuindo para o destacamento do reboco.

As argamassas de cimento possuem resistências mecânicas muito elevadas e por esta razão, não é recomendável o uso destas argamassas como argamassas de reabilitação, pois o material de reparação não deve ser mais resistente mecanicamente que o material a reparar, de forma a evitar a introdução de tensões num suporte normalmente fraco. Para além disso, os cimentos contêm sais solúveis, como o sulfato de potássio, que podem causar estragos em antigas alvenarias de pedra. Estes sais são transportados para o interior das paredes, onde se cristalizam, impedindo os fenómenos posteriores de carbonatação.

As argamassas aéreas permitem, de forma exemplar, uma fácil respiração do suporte, e ganham resistência ao longo do tempo por ação do dióxido de carbono. Todavia, são as que sofrem maior retração no processo de secagem e indicam alguma fragilidade mecânica, tornando-as por isso, soluções de curta durabilidade, principalmente quando expostas à chuva e, ainda mais ao gelo, pois faz entardecer o endurecimento do reboco. Esta situação acontece devido ao preenchimento dos poros pelas águas das chuvas, o que provoca a dissolução do hidróxido de cálcio, não se realizando carbonatação.

A incorporação de material pozolânico em argamassas de cal pode corrigir esta situação, originando argamassas com características bastante diferentes na medida em que aumenta a sua resistência à flexão e compressão. Para além disso, as argamassas com pozolanas apresentam um coeficiente de capilaridade superior às argamassas de cal mas inferior absorção às 24 horas. Em relação ao tempo de secagem, é esperado que seja inferior ao de uma argamassa de cal. O módulo de elasticidade desta nova argamassa surge com a mesma ordem de grandeza ou menor do que o módulo de elasticidade da argamassa de cal aérea. Outras influências resultantes da adição de pozolanas em argamassa de cal são: a dotação de maior durabilidade, adequado comportamento face à água, a aplicação de camadas de reboco com maior espessura e a aplicação em meios húmidos ou debaixo de água assim como em locais de difícil acesso do dióxido de carbono.

Quadro 2.1 – Propriedades físicas e mecânicas das argamassas antigas (Matias, 2008, com base em Faria, 2004 e Velosa, 2006)

Argamassa	Traço	Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	Dimensão Média dos Poros (µm)	Superfície Específica (m <sup>2</sup> /g)	Porosidade (%)	Resistência à tração (Mpa)
Argamassa de cal (cal aérea em pó)	1:4 - 1:1	1,5 - 1,8	0,8 - 3,3	1,3 - 3,3	30-45	<0,35
Argamassa de cal e cimento Portland	1:2 - 1:1	1,8 - 1,9	0,03 - 6,5	1,7 - 10,6	20-43	0,6 - 0,7
Argamassa de cal hidráulica	1:4 - 1:1	1,7 - 2,1	0,1 - 3,5	2,5 - 13,5	18-40	0,35 - 0,55
Argamassa com pozolanas naturais	1:5 - 1:1	1,6 - 1,9	0,1 - 3,5	3 - 14	30-42	>0,6
Argamassa com pozolanas artificiais	1:4 - 1:2	1,5 - 1,9	0,1 - 0,8	3,5 - 9	30-40	>0,55
Argamassa de cal viva extinta em areia	1:4 - 1:2	1,7 - 1,9	0,3 - 0,8	2,5 - 4,7	20-30	0,85 - 1,5

## 2.3 Argamassas de revestimento

### 2.3.1 Funções das argamassas de revestimento

As argamassas de revestimento apresentam um conjunto importante de funções a seguir enunciadas:

- ✓ Proteger as alvenarias da ação direta dos agentes agressores;
- ✓ Auxílio no cumprimento de funções tais como isolamento termo-acústico e estanquidade à água e aos gases;
- ✓ Regularizar a superfície das alvenarias, servindo de base regular e adequada a outros revestimentos constituintes do acabamento final;
- ✓ Contribuir para a estética da fachada.

### 2.3.2 Fatores condicionantes da qualidade de uma argamassa

A composição granulométrica da areia, constituinte da argamassa, condiciona a qualidade da mesma. Uma composição uniforme traduz-se num maior volume de vazios, menor compactidade e maior resistência; por outro lado, uma composição não uniforme resulta num menor volume de vazios, maior compactidade e maior resistência mecânica. Quanto à sua natureza, quanto maior a dureza, maior a resistência mecânica.

---

A dosagem do ligante, relação entre os ligantes e o agregado, também influencia na resistência mecânica, tempo de presa e na estabilidade volumétrica de uma argamassa. A quantidade de água influencia a trabalhabilidade e a resistência mecânica.

### **2.3.3 Propriedades das argamassas de revestimento**

#### **Impermeabilidade à água**

A capacidade de uma argamassa impedir a entrada de água no substrato, sob uma certa pressão, é função da compactidade, e esta é função do volume de vazios existentes. Quanto menor for o volume de vazios, maior será a compactidade e a impermeabilidade, sendo que o inverso não é necessariamente verdadeiro pois depende das fissuras existentes na argamassa. Esta propriedade é também função do tipo de ligante, traço e espessura da camada do revestimento.

#### **Permeabilidade ao vapor de água**

A permeabilidade ao vapor de água é uma característica que depende da porosidade da estrutura e do tipo de ligante. Em argamassas de cal, esta propriedade torna-se importante pois possibilita a secagem das paredes quando existem infiltrações acidentais de água nas paredes, evitando desta forma a humidade de condensação no interior dos edifícios.

As argamassas de cimento são mais compactas e com menor volume de vazios logo, possuem menor permeabilidade ao vapor de água que as de cais.

#### **Capilaridade**

Pode-se definir capilaridade como a capacidade que uma argamassa tem, de absorver água no estado líquido, de forma natural (ascensional, por exemplo). Permite-nos quantificar a impermeabilidade, que aumenta ou diminui consoante a capilaridade for menor ou maior, respetivamente.

#### **Capacidade de absorver deformações (deformabilidade)**

As argamassas devem possuir a capacidade de absorver deformações intrínsecas (retrações e expansões térmicas) e deformação da base de suporte, sem apresentar fissurações visíveis.

Esta propriedade relaciona-se intrinsecamente com a flexibilidade, enquanto relação entre a força que atua sobre uma determinada área de um corpo e a deformação unitária que esta alcança.

Nas argamassas de cal ou gesso, as ligações internas e as tensões podem ser dissipadas na forma de microfissuras. Nas argamassas, cujo ligante é o cimento com maior limite de

resistência, as tensões vão-se acumulando e a rutura dá-se sob a forma de fissuras, eventualmente, visíveis.

### **Tempo de presa**

Uma outra característica das argamassas de revestimento é o tempo de presa, que pode ser definido como o tempo necessário à cristalização de um produto hidrófilo, ou endurecimento do produto. Esta presa dá-se através da reação do ligante com a água.

### **Resistência Mecânica**

A força máxima que uma argamassa endurecida consegue suportar, sem desagregação ou deformações plásticas visíveis, dá-nos a sua resistência mecânica. A resistência depende do tipo de agregados (areia e ligante), e da quantidade de água e ligante, assim como a relação entre eles, aumentando com a redução da proporção de agregado. A técnica de execução da argamassa também influencia a sua resistência mecânica.

A resistência mecânica de uma argamassa de cal e areia é pequena, 0,4 a 2,5 MPa à compressão e 0,2 e 0,7 MPa à flexão (Veiga, 3003). As resistências à tração e compressão são condicionadas pelas características do ligante e do agregado e pelas técnicas de execução (Matias, 2008).

### **Retração da argamassa**

A retração da argamassa está relacionada com a redução do volume da argamassa, durante o seu processo de endurecimento. Dá-se devido a reações de hidratação e carbonatação, perda de água por evaporação ou perda progressiva do calor da hidratação, após ter existido uma subida rápida inicial da temperatura, pelas características exotérmicas da reação. Pode causar formação de fissuras. Estas fissuras podem ser prejudiciais, comprometendo a estanquidade do revestimento à água.

### **Trabalhabilidade**

A trabalhabilidade pode ser definida como a facilidade de se trabalhar, ou manusear a argamassa. Em argamassas de revestimento, este conceito também inclui a capacidade de proporcionar uma boa aderência ao substrato e facilidade de acabamento superficial. Aumenta com o aumento da quantidade de água, o que resulta numa diminuição da resistência mecânica.

Esta propriedade não pode ser quantificada, mas sim avaliada através de um ensaio de espalhamento.

### **Propriedades de superfície**

A textura e porosidades superficiais estão relacionadas com a estética, assim como com a compatibilização da argamassa com a pintura, ou outro tipo de revestimento.

Esta textura depende da granulometria da argamassa, do teor dos inertes e da técnica de execução do revestimento.

### **Aderência ao suporte**

A aderência entre uma argamassa e o suporte processa-se devido à penetração da calda da argamassa (calda de amassadura com partículas finas de ligante) e da própria argamassa nos poros e entre as rugosidades do suporte. No interior destes poros e rugosidades ocorre a cristalização dos produtos de hidratação do ligante presente na argamassa. Desta forma, o suporte deve ter alguma porosidade e rugosidade, de modo a permitir uma boa aderência das argamassas.

Esta propriedade permite à camada de revestimento, resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com a base e depende das características da argamassa, nomeadamente da granulometria e teor de finos dos agregados, da natureza e qualidade do ligante e da relação água/ligante [Matias, 2008].

## **2.4 Argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica**

A origem do nome pozolanas é relacionada por vários autores com a região de Pozzuoli, que se situa na região de Nápoles, perto do monte Vesúvio, onde existe uma rocha vulcânica com propriedades pozolânicas.

Uma das primeiras referências históricas que existe acerca da utilização de pozolanas em argamassas foi escrita por Marcus Vitruvius Pollo, arquitecto romano [Pontes, 2011], com base em Maciel, 2007]. Vitruvius faz referência na sua obra aos tipos de materiais usados na altura, incluindo os pozolânicos, à sua origem, arenosos ou vulcânicos por exemplo, e às suas propriedades. Este autor verificou também que estes materiais apareciam em sítios onde existiam fumarolas, fontes de calor e que apresentavam um cheiro intenso a enxofre, nas bases dos vulcões. Desta forma relacionou-se a presença de pozolanas ou material pozolânico com o calor. Uma das obras de referência ao uso de pozolanas e cal aérea misturadas com tufo vulcânico como agregado, conferindo à estrutura um peso menor, é a cúpula do Panteão em Roma.

Durante a idade média não houve evoluções tanto no estudo como nos melhoramentos dos materiais utilizados. Mais tarde, no século XVIII, John Smeaton no ano de 1756 descobriu a cal hidráulica, obtida da calcinação de um calcário margoso. O seu trabalho evidenciou que a

---

qualidade da cal para obras hidráulicas estava relacionada com o teor de argila [Coutinho, 1958]. Em 1812, Louis Vicat estudou a relação entre o teor de argila e a cal a cozer, de forma a dar origem a uma cal hidráulica de melhor qualidade. Em 1824, Joseph Aspdin, inventa o cimento Portland. Este material era considerado de grande durabilidade, o que fez com que se deixasse de usar os ligantes mais antigos, nomeadamente as cais e cais com pozolanas [Coutinho, 1958].

Com a consciência da incompatibilidade das argamassas de cimento face a suportes antigos, o interesse do uso das pozolanas renasceu através da sua possibilidade de serem utilizadas como adição em argamassas de cal aérea. Estas argamassas, como será explicado mais à frente, têm um grande potencial nomeadamente em termos de reabilitação de edifícios antigos. Visto que na maioria dos edifícios antigos o tipo de ligante utilizado é de origem aérea, as argamassas de reabilitação com uma base de cal aérea e com incorporação de pozolanas surgem como uma possibilidade de, mantendo o mesmo tipo de materiais ao nível arquitetónico, conseguir resultados que assegurem uma maior proteção e compatibilidade com as paredes e revestimentos antigos.

Em Portugal, já foram elaborados vários estudos acerca da utilização de material pozolânico produzido a partir da matéria-prima para a cerâmica de barro vermelho, mas também resultante de resíduos de telhas antigas, com ligantes aéreos. Faria [Faria, 2004], estudou a incorporação de diversas pozolanas em argamassas de cal aérea, com uma proporção volumétrica de 1:2 de cal aérea e componente pozolânico, relativamente ao agregado, a areia de rio. Verificou que as características dependem muito do material pozolânico utilizado nas argamassas assim como do tipo de tratamento térmico a que as pozolanas artificiais são submetidas. O comportamento também difere com a proporção entre cal aérea e o material pozolânico, com o traço utilizado e com o ambiente de cura a que as argamassas são sujeitas. No entanto conclui que, de um modo geral, a introdução de componentes pozolânicos confere vantagens bastante significativas relativamente à grande maioria das características dessas argamassas.

Velosa [Velosa 2006], também analisou as argamassas de cal com pozolanas cerâmicas para revestimento de paredes antigas. O seu estudo englobou uma pesquisa bibliográfica, recolha, análise e ensaio de argamassas provenientes de várias épocas, locais e tipos de edifícios. Houve assim, um estudo prévio, de forma a chegar às composições ideais, e avaliar a influência de diferentes condicionamentos.

Matias [Matias, 2008] analisou a influência de cerâmica de barro vermelho no comportamento físico e mecânico das argamassas de cal, e comparou o seu desempenho com as argamassas

---

tradicionais de cal e areia, e de cimento e areia. Concluiu que a utilização de resíduos de tijolo traz vantagens a nível económico e ambiental mas também a nível técnico.

Veiga et al. (2008) estudaram a incorporação de agregados reciclados cerâmicos em argamassas de cimento, com diferentes quantidades e granulometrias de desperdício de barro vermelho. No seu trabalho, efetuaram uma análise experimental que foi dividida em 3 etapas. A primeira etapa consistiu numa incorporação de 5 e 10% de finos cerâmicos mantendo o traço de 1:4, verificando-se um melhoramento das resistências mecânicas e uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade. Na segunda etapa fez-se a substituição de 10% de cimento por finos reciclados, desta vez para um traço de 1:5 e de 1:6, afetando negativamente a resistência à tração por flexão compressão e aderência aquando da redução do teor de cimento, apresentando, no entanto, valores aceitáveis para argamassas de reboco. Por fim, na terceira etapa fez-se uma substituição de 20, 50 e 100% de areia por resíduos cerâmicos, todas com traço de 1:4, obtendo-se para a substituição total da areia, valores pouco aceitáveis, para uma argamassa de revestimento, piorando a maior parte das características analisadas face à argamassa convencional. O contrário verificou-se para a substituição de 20 e de 50% de areia, que apresentaram resultados melhores do que os da argamassa de referência. Em todas as etapas utilizaram uma argamassa de referência com traço de 1:4.

Duarte (2011) analisou o comportamento mecânico das argamassas de cal aérea com incorporação de 20 e 40% de resíduos de cerâmica, em substituição do agregado, ao traço volumétrico 1:3. Este autor determinou o módulo de elasticidade dinâmico, a resistência à tração por flexão e à compressão, a aderência entre argamassa de reboco e suporte, tendo verificado que as argamassas de cal com resíduos cerâmicos apresentavam melhores resistências mecânicas quando comparadas com uma argamassa sem a incorporação desses resíduos.

Paralelamente a este trabalho, Ferreira (2011) avaliou o comportamento físico face à água e ao vapor de água das mesmas argamassas. Para tal, levou a cabo uma campanha experimental para determinação da permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, secagem e porosidade aberta de provetes de argamassas com diferentes tipos de resíduos e composições, e constatou que apesar da argamassa de referência ter apresentado quase sempre os melhores valores, os resultados das restantes argamassas não se afastavam muito desta.

Silva (2012), avaliou o comportamento mecânico e higrotérmico de argamassas de cal aérea com incorporação de resíduos de cerâmica, apenas de granulometria fina, como substituinte de 20 e 40% do ligante, ao traço volumétrico 1:3. Os resultados permitiram ao autor verificar que a incorporação de resíduos de cerâmica confere à argamassa melhores resultados face à argamassa de referência. Para além deste estudo, Silva (2012) realizou um inquérito que

avaliou a quantidade de resíduos produzidos pelas empresas de produção de materiais de cerâmica de barro vermelho, e a sensibilidade destas empresas para o processo de incorporação destes resíduos em argamassas. Concluiu que as empresas produzem uma percentagem significativa de resíduos, e que a maioria das empresas desconhece a utilização dos resíduos em argamassas.

Tomás (2012) estudou a influência da incorporação de resíduos de cerâmica, utilizados apenas em granulometria grossa e em substituição de 20 e 40% do agregado, no comportamento mecânico e face à água de argamassas de cal aérea. Os resultados permitiram verificar uma melhoria nos ensaios mecânicos e no ensaio de permeabilidade ao vapor de água, relativamente à argamassa de referência, e que com incorporação da menor percentagem de resíduo, se obtém melhores resultados.

## **2.5 Constituintes das argamassas de reabilitação**

### **2.5.1 Considerações gerais**

As argamassas são constituídas essencialmente por agregados, ligantes, água, e outros materiais que podem influenciar o comportamento das mesmas.

As principais razões do uso de agregados em argamassas relacionam-se com a estabilidade dimensional e a resistência elevada que proporcionam à mistura, com a vantagem de serem inertes e não hidratarem e, por esta razão, não apresentam alterações dimensionais durante e depois da aplicação.

O objetivo da adição de ligantes é garantir a coesão do conjunto e preencher os vazios existentes entre os agregados, através das ligações formadas com os agregados nas interfaces. Este é um parâmetro crítico pois existe um rácio considerado “ótimo”. Se a adição de ligante for exagerada, haverá demasiada contração do ligante durante a secagem da argamassa, o que poderá levar à fissuração da argamassa, por outro lado, se o ligante não existir em quantidade suficiente, haverá demasiada porosidade, o que vai enfraquecer a argamassa.

Assim, a proporção ideal será aquela que utiliza o volume exato de ligante para preencher os vazios entre os agregados, com um mínimo de líquido que garanta a hidratação do ligante e uma boa trabalhabilidade (geralmente 20-25% de água relativamente à massa do ligante), pois a água evapora na secagem deixando, ela própria, vazios na argamassa, além de promover a retração.

Este rácio depende da forma, granulometria e compactação dos agregados, do tipo de ligante e da maneira como este preenche os vazios, e do tipo de aplicação da argamassa. Para

argamassas de restauro é conveniente a preparação de rácios idênticos aos da argamassa original, para que as propriedades mecânicas sejam semelhantes [Marques, 2005].

### 2.5.2 Ligantes

Podemos definir ligantes como produtos que têm a capacidade de aglomerar materiais inertes, sendo empregues na construção para ligar ou aglomerar os materiais, geralmente pétreos, recobri-los com reboco ou para formar pastas, mais ou menos plásticas, chamadas argamassas ou betões, que permitem ser moldadas convenientemente, adquirindo, depois de endurecidas, o estado sólido.

Os ligantes podem ser classificados em aéreos ou não hidratados, hidráulicos e hidrocarbonados. Os ligantes hidráulicos endurecem adquirindo forma pétreo, tanto ao ar como na água. Incluem-se neste grupo as cais hidráulicas, os cimentos e as pozolanas quando misturadas com cais. Os ligantes hidrocarbonados são líquidos, mais ou menos viscosos, que endurecem por esfriamento ou evaporação dos seus dissolventes, como o alcatrão, asfalto e o betume asfáltico. Os ligantes aéreos endurecem apenas ao ar, originando argamassas não resistentes à água, tais como o barro, o gesso, anidrites e a cal aérea, tratada nesta dissertação. Estes ligantes são utilizados maioritariamente em revestimentos e decoração de interiores.

#### Cal aérea

A cal aérea provém da cozedura dos calcários puros, a cerca de 900°C, constituídos sobretudo por CaCO<sub>3</sub>, contendo um teor de impurezas, maioritariamente argila, inferior a 5%. As cais aéreas dividem-se em gordas e magras, consoante o nível de impurezas. As cais aéreas gordas derivam de calcários quase puros, com teores de impurezas inferiores a 1%. As cais aéreas magras são acinzentadas e contêm teores de impurezas entre 1 e 5% [Coutinho, 1988].

Chamam-se gordas às primeiras devido às suas propriedades plásticas, pois trata-se de cais facilmente trabalháveis e bastante macias. As cais magras não são tão fáceis de trabalhar nem tao macias. No entanto, a reação de presa é a mesma para ambas [Coutinho, 2002].

A calcinação da pedra calcária efetua-se através da sua decomposição em óxidos de cálcio e anidridos carbónicos, e pode ser representado através da seguinte equação:



A reação de calcinação é endotérmica. O produto desta calcinação, a cal viva, é composto, maioritariamente, por óxidos de cálcio, é poroso e com formatos idênticos aos dos grãos da rocha original. A cal viva é de cor branca, com grande avidez pela água, sendo comercializada

em pedra ou moída. A manipulação da cal viva é perigosa porque liberta grande quantidade de calor e, portanto, pode queimar.

A cal viva não é diretamente utilizada na construção. O óxido de cálcio é hidratado, transformando-se em hidróxido. A esta reação dá-se o nome de extinção. O hidróxido resultante denomina-se cal apagada, quando a hidratação se realiza no local do emprego do material, ou cal hidratada, quando a extinção se processa na fábrica.

A extinção da cal viva pode-se fazer por imersão, aspersão, fusão, em autoclaves e espontânea. Esta reação é exotérmica e traduz-se da seguinte forma:



A cal apagada, resultante desta operação, quando misturada com água e areia, em proporções apropriadas, origina argamassas com consistências mais ou menos plásticas. Estas endurecem por recombinação do hidróxido com o dióxido de carbono, presente na atmosfera, reconstituindo o carbonato original, cujos cristais ligam de maneira permanente os grãos de agregado utilizado, como se verifica através da seguinte equação:

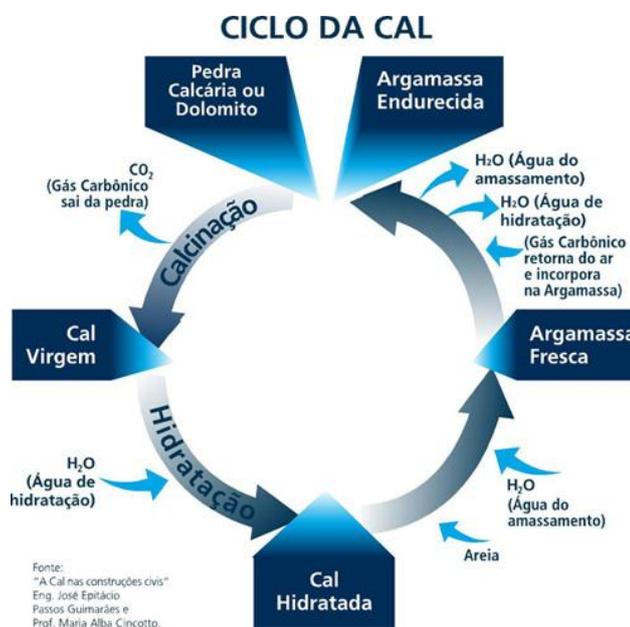


Figura 2.1 - O Ciclo da Cal (Eptácio et al, 2012).

O processo de endurecimento é lento e exige uma certa porosidade que permita, de um lado, a evaporação da água em excesso e, de outro, a penetração do dióxido de carbono do ar atmosférico. Este mecanismo de endurecimento, que depende do ar atmosférico, explica o nome dado a este ligante, cal aérea. No caso de o endurecimento ser feito por ação da água, o ligante toma o nome de cal hidráulica [Alvaraz et al].

A cal aérea tem o grave problema de fraca resistência mecânica e sensibilidade à água no estado líquido, embora o seu comportamento salubre em atmosferas saturadas de vapor, o torne indicado para rebocos ou pinturas de interiores. Por outro lado, é mais económico que o cimento e confere maior trabalhabilidade, logo maior rendimento. A contração por secagem é reduzida, minimizando a fissuração, o que resulta num aumento da aderência dos suportes. Este ligante funciona como equilibrador higroscópico (absorve o excesso de humidade e desenvolve-a quando o ambiente se torna seco).

### 2.5.3 Agregados

Os agregados são materiais sólidos aglutinantes. São usados para fazer betões e argamassas, dado serem mais baratos do que a maioria dos ligantes, diminuindo o custo de obra. Para além disso, contribuem para uma diminuição das retrações dado que os inertes não diminuem de volume. Podem ser classificados quanto às dimensões das partículas constituintes, em agregados finos, areias, ou agregados grossos, britas e godos; quanto à origem, sedimentares, eruptivos ou metamórficos; quanto ao modo de obtenção, britados artificialmente, britas e areias, ou naturais, godos e areias; quanto à baridade, leve, normal ou pesado.

Os agregados naturais são constituídos por partículas arredondadas e lisas, e os agregados gerados pelo esmagamento de rochas são angulosos, o que produz argamassas com melhor empacotamento entre partículas, logo menor porosidade e maior resistência mecânica, melhor trabalhabilidade e capacidade de retenção de água. Estas características são também melhoradas se a distribuição dos tamanhos das partículas for alargada. Assim, os espaços entre partículas de maior dimensão são preenchidos com partículas mais pequenas [Smith, 1993].

A resistência a ciclos gelo-degelo e de cristalização de sais aumenta com a diminuição da porosidade, mantendo um certo número de poros com um diâmetro largo ( $> 2 \mu\text{m}$ ), visto que poros muito pequenos implicam maiores pressões em condições de tensão mecânica [Elert et al, 2003].

Com a diminuição da porosidade, ocorrem fenómenos que levam a uma redução da resistência mecânica pois impede a carbonatação em argamassas à base de cal e, por outro

---

lado, podem surgir tensões localizadas devido ao tamanho reduzido dos poros. Desta forma, conclui-se que uma porosidade reduzida é favorável, desde que não seja quase nula.

Os agregados mais utilizados nas argamassas de construção civil são a areia e o cascalho. As areias naturais são resultantes da desintegração ou da abrasão de rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas, e normalmente passam quase inteiramente no crivo de 4,5 mm. Os agregados utilizados em argamassas de construção civil apresentam maioritariamente partículas entre os 0,150 e 0,250 mm.

O cascalho natural é um agregado grosseiro que resulta da desintegração ou da abrasão do mesmo tipo de rochas, devendo ficar retido quase inteiramente no crivo de 4,5 mm. Este tipo de agregado encontra-se nas argamassas em percentagens muito pequenas [Velho, 1998].

A areia e o cascalho são constituídos predominantemente por quartzo que é um mineral frequente na maioria das rochas granulares, e pela sua dureza, durabilidade e insolubilidade é um componente desejável nos agregados finos. Existem outros componentes minerais e não minerais, em menor percentagem, como calcite, micas, feldspatos, minerais argilosos e matéria orgânica, que podem diminuir a qualidade do agregado. Também é frequente encontrarmos agregados de areias calcárias em argamassas, resultantes do esmagamento da rocha calcária, ou de misturas de areias siliciosas e calcárias.

A areia e o cascalho são obtidos através da escavação de depósitos continentais; da dragagem de depósitos subaquáticos em rios, lagos e plataformas marinhas; da exploração das pedreiras, através de esmagamento da rocha em britadeiras.

Os resíduos de tijolos ou de cerâmica, que provêm do esmagamento de peças de cerâmica podem também ser considerados como agregados. Têm sido explorados outros tipos de agregados para uso em argamassas e em betão, tais como resíduos da indústria extrativa mineira ou cerâmica, escórias de alto-forno, betão reciclado e agregados de baixa ou elevada densidade, de forma a representarem uma boa alternativa em termos económicos ou para atingir algumas propriedades em particular, como menor peso ou características térmicas especiais. Até mesmo o uso de plásticos e resíduos domésticos como agregados está a ser bastante estudado, com a finalidade de reduzir a poluição e reutilizar resíduos. Neste trabalho vamos usar para além da areia, resíduos de cerâmica que podem comportar-se como agregado ou como ligante, que nos permite obter uma argamassa com um comportamento hidráulico, como já referido anteriormente.

Os agregados mais utilizados em argamassas são agregados de baixa densidade. São utilizados em argamassas de reboco em situações que se pretende garantir uma baixa densidade, que é conseguida pela sua estrutura de elevada porosidade.

Os agregados naturais usados na construção civil são caracterizados por baixo custo e alto peso e, por isso, existe uma tendência a explorar a zona de extração mais próxima. Isto reflete-se em tendências de uso de agregados que variam entre zonas do país. Portugal é um país onde os depósitos de areias são relativamente abundantes, em especial nas Bacias Terciárias do Tejo e do Sado, no entanto, a enorme distância a que ficam dos mercados consumidores limita um pouco o seu interesse económico.

#### **2.5.4 Água de amassadura**

A água de amassadura não deve conter impurezas tais como materiais em suspensão, sais dissolvidos e matéria orgânica, em quantidades prejudiciais. A norma NP EN 206, e norma ISO, indicam os limites máximos de impurezas a observar na água de amassadura. Estas normas fazem referência a valores de elementos químicos como cloretos, sulfatos, álcalis e outras substâncias contidas na água e em todos os componentes [Marques, 2005].

A quantidade de água utilizada na produção das argamassas influencia a sua consistência, assim como o seu processo de endurecimento, a aderência ao suporte, as características no estado endurecido e a qualidade final dos revestimentos [Cavaco, 2005].

O tempo de endurecimento também é condicionado pela temperatura da água. Quando a temperatura da água é superior a 30°C, o processo de endurecimento é acelerado. Caso a temperatura seja inferior a 7°C, processo é retardado.

O volume de água de amassadura deve poder garantir a consistência necessária para que a argamassa possa ser devidamente aplicada, dado que quantidade de água adicionada está relacionada diretamente com a consistência da argamassa, dando origem a uma argamassa com maior ou menor fluidez.

#### **2.5.5 Pozolanas**

As pozolanas são materiais siliciosos ou silio-aluminosos que por si só não endurecem debaixo de água, mas quando divididos e na presença de humidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas vulgares formando compostos com propriedades cimentícias. A norma NP 4220 [IPQ, 2010] especifica a sua aplicação em argamassas e betões. Quando aplicadas em cais aéreas, fazem com que estas adquiram propriedades hidráulicas. A cura passa a ocorrer não só por carbonatação, mas também por hidratação. Esta

aplicação também vai acelerar o endurecimento e aumentar a resistência mecânica e durabilidade destas argamassas.

Estes materiais podem ser divididos em dois grandes grupos, naturais e artificiais. As pozolanas naturais encontram-se na natureza e são provenientes do rápido arrefecimento de produtos de erupções vulcânicas ou sob a forma de terra diatomácea. As pozolanas artificiais resultam de processos de queima a temperaturas específicas de materiais naturais.

Dentro das pozolanas naturais, temos as pozolanas de origem vulcânica, provenientes de lavas ácidas, porosas de baixa densidade, claras e mais reativas, ou de lavas básicas, compactas e escuras, e temos as pozolanas de origem sedimentar, resultantes da fossilização das conchas siliciosas de organismos unicelulares que são usualmente designados por diatomas.

As pozolanas utilizadas neste trabalho fazem parte do grupo das pozolanas artificiais. Estes materiais argilosos são cozidos a temperaturas muito específicas, entre os 750°C, no caso dos metacaulinos e os 2000°C, no caso das Sílicas de fumo.

### 3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O trabalho experimental desenrolou-se na continuidade dos estudos anteriormente desenvolvidos por Duarte (2011), Ferreira (2011), Tomás (2012) e Silva (2012).

#### 3.1 Descrição dos materiais utilizados e dos procedimentos experimentais

Neste capítulo serão descritos os procedimentos experimentais que levaram à análise da argamassa em estudo (argamassa de cal com incorporação de resíduos de cerâmica).

##### 3.1.1 Matéria-Prima

Na atividade experimental deste trabalho, utilizou-se como agregado uma areia do rio, que já se encontrava em laboratório, sem detritos. Como ligante utilizou-se uma cal aérea nacional produzida pela LUSICAL. Os resíduos de cerâmica foram recolhidos em indústrias da região de Coimbra, produtoras de telhas, tijolos e vasos, e utilizados como substituinte parcial do agregado. A Figura 3.1 ilustra o processo de preparação e moagem destes resíduos.



Figura 3.1- Processo de moagem dos resíduos da indústria cerâmica.

Estes resíduos foram previamente esmagados manualmente e depois moídos num moinho de maxilas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Moinho de maxilas.

As informações relativas à análise granulométrica e baridade dos materiais, foram retiradas de Ferreira (2011) e Duarte (2011).

#### 3.1.1.1 Análise granulométrica dos materiais

A análise granulométrica dos materiais foi feita de acordo com a norma NP EN 933-1-2000 (IPQ, 2000). Segundo Duarte (2011), as curvas granulométricas podem ser traçadas como indicado na Figura 3.3.

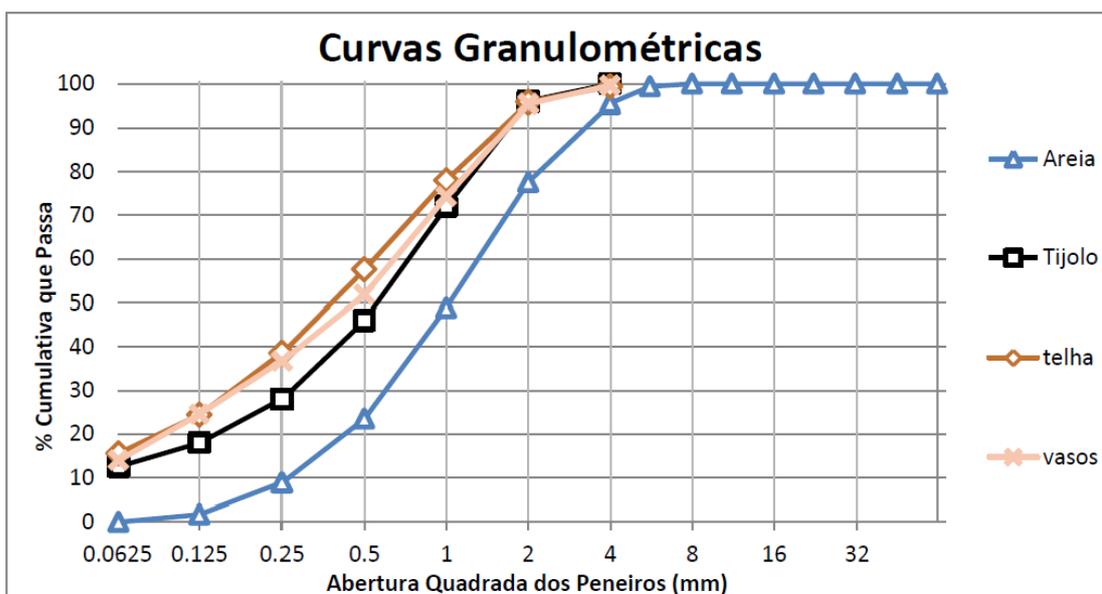


Figura 3.3- Curvas geométricas dos agregados utilizados (Duarte, 2011).

Através do gráfico (Figura 3.3) é possível constatar que os agregados cerâmicos apresentam curvas granulométricas semelhantes entre si, e maiores percentagens de finos em relação à areia.

### 3.1.1.2 Baridade dos materiais

A baridade dos materiais foi determinada com base na norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002).

Segundo esta norma, a baridade pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (3.1)$$

Onde,

$m_1$  é a massa do recipiente vazio, em gramas;

$m_2$  é a massa do recipiente e do provete elementar, em gramas;

$V$  é a capacidade do recipiente, em  $\text{cm}^3$ .

Através desta expressão foi então possível calcular a baridade todas as matérias-primas, que se encontram registadas no quadro seguinte:

Quadro 3.1- Determinação da baridade dos materiais (Duarte, 2011)

Material	$m_2$			$\rho_b$ elementar [g/cm <sup>2</sup> ]			$\rho_b$ [g/cm <sup>2</sup> ]
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	
Tijolo	2472,00	2468,84	2477,47	1,098	1,095	1,103	1,10
Telha	2550,25	2548,72	2550,68	1,174	1,172	1,174	1,17
Vaso	2917,82	2930,57	2933,27	0,985	0,996	0,993	0,99
Areia	2917,82	2930,57	2933,27	1,531	1,544	1,546	1,54
Cal	1715,21	1715,21	1713,51	0,362	0,362	0,360	0,36

Como se pode observar no Quadro 3.1, os materiais cerâmicos apresentam uma baridade inferior à da areia. Por outro lado, a cal é o material com menor valor de baridade.

### 3.1.2 Preparação das argamassas

Para esta análise experimental, as argamassas foram preparadas com um traço volumétrico de 1:2 de cal aérea e agregado. Como referência, utilizou-se uma argamassa apenas de cal e areia. As restantes argamassas foram preparadas substituindo 20 ou 40% do volume de areia, por cada um dos três resíduos cerâmicos.

A nomenclatura utilizada para cada uma das argamassas foi feita da seguinte forma: utilizou-se a letra “L” de *low* para as argamassas com menor percentagem de resíduo (20%), e a letra “H” de *high* para elevada percentagem (40%); seguidamente colocou-se a inicial de cada resíduo, “T” de *tile* (telha), “P” de *pot* (vasos) e “B” de *brick* (tijolo). Para além destas, na argamassa de referência utilizou-se o termo “Ref” de *reference*. O Quadro 3.2 apresentado abaixo, mostra as argamassas utilizadas com a respetiva designação, traço volumétrico e percentagens de resíduos.

Quadro 3.2 – Designação, percentagem de resíduos e traços volumétricos.

Argamassa	Designação	Percentagem do resíduo cerâmico	Traço volumétrico	Traço Ponderal
Argamassa de Referência	Ref	0%	1:2	1:8,5
Argamassa com resíduo de tijolo	LB	20%	1:1,6:0,4	1:1,2:6,8
	HB	40%	1.1,2:0,8	1:2,4:5,1
Argamassa com resíduo de telha	LT	20%	1:1,6:0,4	1:1,3:6,8
	HT	40%	1.1,2:0,8	1:2,6:5,1
Argamassa com resíduo de vasos	LP	20%	1:1,6:0,4	1:1,1:6,8
	HP	40%	1.1,2:0,8	1:2,2:5,1

As argamassas foram preparadas tendo em conta a realização de todos os ensaios previstos para as mesmas. As misturas foram realizadas recorrendo a uma misturadora com uma cuba de 5 litros de capacidade. Foram realizados ensaios às argamassas frescas e depois de endurecidas, com um período de cura de 60 e 120 dias.

### 3.1.2.1 Preparação da mistura

Antes da preparação das misturas passou-se a areia pelo peneiro de 4 mm de abertura, de forma a eliminar os grãos de maiores dimensões que pudessem causar danos na pá da misturadora. De seguida pesaram-se as quantidades de areia, cal aérea e resíduos de cerâmica numa balança de precisão de 0,01g, e mediu-se a quantidade de água para cada argamassa, de modo a obter uma trabalhabilidade adequada. A água foi adicionada com a mistura na cuba, durante os primeiros 15 segundos de amassadura. Este processo de amassadura durou 2 minutos e 30 segundos. Seguidamente desligou-se a misturadora, e procedeu-se à limpeza manual no material acumulado na parte superior da cuba. Voltou-se a ligar a misturadora, até o processo de amassadura completar 3 minutos. A Figura 3.4 ilustra este processo, desde a mistura seca das matérias-primas até à amassadura da mesma.



Figura 3.4 – Processo de elaboração das argamassas desde as pesagens até à amassadura das misturas

Após a amassadura das misturas, realizaram-se os ensaios de consistência por espalhamento de cada argamassa, descrito mais à frente.

### 3.1.2.2 Preparação dos provetes

Foram utilizados moldes prismáticos com 160x40x40 [mm] e circulares, com cerca de 106 mm de diâmetro interno e 15 mm de altura.

Os moldes prismáticos foram lubrificados com uma pequena quantidade de óleo descofrante, de forma a facilitar o processo de desmoldagem dos provetes. Procedeu-se então ao preenchimento do molde, numa primeira fase com argamassa até metade da sua altura, seguido da compactação mecânica da mistura com 20 pancadas. Numa segunda fase preencheu-se o restante do molde e procedeu-se novamente à compactação com mais 20 pancadas. O material em excesso foi retirado com auxílio de uma rasoira metálica, para nivelar bem a superfície (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Nivelamento da superfície de um provete prismático com auxílio de uma rasoira.

À semelhança dos moldes prismáticos, também os moldes circulares foram lubrificados e preenchidos, com auxílio de uma espátula metálica. Posteriormente foram compactados com um pilão, tendo sido aplicadas 10 pancadas manualmente (Figura 3.6), e rasados com a rasoira metálica.



Figura 3.6 - Compactação da argamassa com auxílio de um pilão.

Por fim, os provetes foram colocados em condições de humidade e temperatura controladas. Nos primeiros 5 dias foram colocados dentro de sacos de plástico e sujeitos a cerca de  $95 \pm 5\%$  de humidade relativa e  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura. Após os 5 dias, os provetes ficaram mais dois dias nos moldes, numa câmara climática, sujeitos à mesma temperatura e a uma humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ . Ao fim destes 7 dias, os provetes foram desmoldados e mantidos a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  até à data de ensaio, na câmara climática.

Note-se que se fizeram três provetes de cada mistura para cada molde tanto para os ensaios aos 60 dias como para aos 120 dias.

### 3.1.3 Ensaio sobre argamassas frescas

O ensaio realizado sobre argamassas frescas foi o ensaio de consistência por espalhamento, com base na norma EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 (CEN, 1999).

#### 3.1.3.1 Ensaio de consistência por espalhamento

Segundo a norma EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 (CEN, 1999), a consistência por espalhamento é uma medida da fluidez e/ou humidade de uma argamassa, e dá-nos a deformação de uma argamassa fresca quando submetida a um determinado tipo de tensão.

Antes de cada ensaio, a superfície da mesa de espalhamento foi limpa, de forma a não influenciar as medições. Centrou-se o molde na mesa, e introduziu-se a argamassa em duas camadas, tendo sido cada camada compactada com 10 curtas pancadas (Figura 3.7), com o auxílio de um pilão normalizado, de forma a assegurar o enchimento completo do molde. Durante este procedimento, o molde esteve firmemente seguro com uma mão.



Figura 3.7- Primeira camada compactada.

Retirou-se o excesso de argamassa, e limpou-se e secou-se a área à volta do molde. Após aproximadamente 15 segundos, retirou-se o molde lentamente e na vertical e foram aplicadas 15 rotações, de forma a gerar pancadas com uma frequência de aproximadamente uma por segundo (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Processo de retirada do molde e aplicação de 15 pancadas.

O espalhamento foi obtido através da medida dos diâmetros em duas direções perpendiculares entre si. Todas as argamassas foram preparadas de modo a que a consistência obtida fosse semelhante entre estas. Apontou-se, por isso, para um espalhamento da ordem dos 150 mm,

admitindo variações até 15 mm. O Quadro 3.3 indica os valores obtidos através do ensaio de consistência por espalhamento.

Quadro 3.3- Ensaio de consistência por espalhamento

Argamassa	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>médio</sub> (mm)	D.P.
Ref	166,65	162,88	164,77	2,67
LB	151,25	153,53	152,39	1,61
HB	165,3	163,2	164,25	1,48
LT	163,55	162,72	163,14	0,59
HT	147,92	148,44	148,18	0,37
LP	152,66	145,81	149,24	4,84
HP	154,43	157,73	156,08	1,41

### 3.1.4 Ensaio sobre argamassas endurecidas

Os ensaios sobre argamassas endurecidas foram realizados aos 60 dias e aos 120 dias. Os provetes foram mantidos, como já foi referido anteriormente, em condições de cura com humidade relativa e temperatura controladas.

#### 3.1.3.1 Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio foi realizado com base na norma EN ISO 12572:2001. Segundo esta norma, a permeabilidade traduz a quantidade de vapor de água difundida através do provete da argamassa, por unidade de tempo e espessura, quando este é sujeito a uma diferença de pressão de vapor entre as duas faces.

Neste ensaio foram utilizados os provetes circulares. Foram preparados 3 provetes de cada mistura, tanto para os ensaios aos 60 dias como para os ensaios aos 120 dias. Os provetes foram mantidos numa câmara climática a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ . Determinou-se o diâmetro segundo duas direções e a espessura em 4 pontos distintos, recorrendo a um paquímetro digital com uma precisão de 0,01 mm. Os valores finais do diâmetro e da espessura foram obtidos através do valor médio das medições.

Respeitando a norma, a área exposta foi superior a  $0,005 \text{ m}^2$ . Por outro lado, a norma recomenda a utilização de 5 provetes, para uma área de exposição inferior a  $0,02 \text{ m}^2$ , o que não foi respeitado devido à falta de tinas suficientes para a realização deste ensaio. A espessura utilizada para os provetes não representa uma espessura real, de aplicação em

revestimentos, mas a reprodução em provetes iriam gerar peças muito frágeis e difíceis de ensaiar.

Escolheu-se das opções indicadas na norma EN ISO 12572:2001, aquela que se considerou mais indicada. O ensaio adotado foi o ensaio da “Tina Húmida”, pois é o que mais se aproxima de uma situação real. Neste ensaio foram criados dois ambientes distintos, com humidades relativas e pressões parciais de vapor diferentes, de forma a gerar um fluxo de vapor de água constante, do interior (mais húmido) para o exterior da tina (mais seco).

Os provetes foram revestidos lateralmente com uma camada de borracha líquida, Rubson LR2000 da marca Siesta, funcionando como camada impermeabilizante, como ilustra a Figura 3.9.



Figura 3.9 – Impermeabilização da parte lateral do provete com uma camada de borracha líquida.

Passadas 12 horas de secagem deste revestimento, colocou-se fita adesiva em torno da camada impermeabilizante. Adicionou-se água destilada até uma altura de 15 mm do topo de cada tina, com o objetivo de simular uma humidade relativa próxima dos 100%. Por fim, colocou-se fita adesiva entre o provete e a tina, e cobriu-se com parafina (Figura 3.10), para que a difusão de vapor se dê exclusivamente através da superfície da amostra.

Os provetes foram mantidos numa câmara climática, a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa de 50%. Foram feitas pesagens diariamente até que a relação entre a variação da massa e o período decorrido se tornasse constante (que traduz um fluxo do vapor de água constante), durante cinco medições sucessivas. Segundo a norma, este fluxo é constante quando a sua variação for inferior a 5% do valor médio de variação. Para tal, foi necessário o cálculo da taxa de variação da massa através da expressão 3.2.

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \text{ [kg/s]} \quad (3.2)$$

Onde,

$\Delta m_{12}$  é a variação de massa no intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$

$m_1$  é a massa do conjunto, no instante  $t_1$ , em kg;

$m_2$  é a massa do conjunto, no instante  $t_2$ , em kg;

$t_1$  e  $t_2$  são os tempos relativos a duas pesagens consecutivas, em s.



Figura 3.10 – Preparação da parafina (à esquerda) para selagem da tina de ensaio (à direita).

Quando esta variação de massa se torna constante assume a designação de  $G$  [kg/s], fluxo de difusão do vapor de água. A partir deste valor é possível determinar o valor da densidade de fluxo de difusão de vapor,  $g$ .

$$g = \frac{G}{A} \text{ [kg.m}^2\text{/s]} \quad (3.3)$$

Onde,

$A$  é a área exposta (média aritmética entre a superfície livre superior e inferior) do provete, em  $m^2$ .

A permeância ao vapor de água,  $W$ , é dada por:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} \text{ [kg/(m}^2\text{.s.Pa)]} \quad (3.4)$$

com

$$\Delta p_v = p_{sat} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100} \text{ [Pa]} \quad (3.5)$$

e

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{17,269\theta}{237,8+\theta}} \text{ para } \theta > 0^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

Onde,

$p_{sat}$  é a pressão de saturação à temperatura do ensaio, em Pa;

$\phi_1 - \phi_2$  é diferença entre as humidade relativas no interior e no exterior da tina do ensaio, que neste caso foi de 100% e 50% respectivamente;

$\theta$  é a temperatura à qual decorre o ensaio, para o caso em estudo 22°C.

Assim, para o nosso caso, a pressão de saturação obtida foi de 2642 Pa, e o valor de  $\Delta p_v$  de 1321,2 Pa.

A permeabilidade ao vapor de água,  $\delta$ , é dada por:

$$\delta = W \cdot d \text{ [kg/m.s.Pa]} \quad (3.7)$$

Onde,

$d$  é a espessura do provete [m].

O fator de resistência à difusão de vapor de água é definido pela equação:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \text{ [-]} \quad (3.8)$$

Onde,

$\delta_a$  é o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/(m.s.Pa)];

$\delta$  é a permeabilidade ao vapor de água do material [kg/(m.s.Pa)].

Com base a ficha de ensaio referenciada, considerou-se o valor de  $1,95 \times 10^{-10}$  [kg/(m.s.Pa)] para  $\delta_a$ .

A espessura da camada de ar equivalente,  $s_d$ , que pode ser definida como a espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de vapor de água que a argamassa de espessura  $d$  foi calculada pela expressão 3.9.

$$s_d = \mu \times d \quad [m] \quad (3.9)$$

De seguida serão apresentados os valores obtidos relativos a este ensaio. Pode-se observar nos Quadros 3.4 e 3.5, que os valores de  $\delta$ , permeabilidade ao vapor de água, são bastante próximos entre si sendo todos da mesma ordem de grandeza. No entanto, nota-se uma diminuição da permeabilidade com o aumento de resíduo cerâmico.

#### Ensaio aos 60 dias

Quadro 3.4 – Permeabilidade ao vapor de água aos 60 dias.

Argamassa	$\delta$ ( $\times 10^{-11}$ )		$\mu$		$s_d$	
	(kg/(m.s.Pa))	D.P.		D.P.	(m)	D.P.
LB	1,32	0,04	14,829	0,448	0,252	0,005
HB	1,25	0,08	15,591	0,951	0,259	0,015
LT	1,46	0,09	13,411	0,793	0,225	0,012
HT	1,27	0,05	15,337	0,557	0,253	0,010
LP	1,48	0,04	13,155	0,386	0,224	0,005
HP	1,48	0,07	12,649	0,057	0,218	0,002
Ref	1,48	0,01	13,196	0,114	0,219	0,004

$\delta$  - permeabilidade ao vapor de água;  $\mu$  - factor de resistência ao vapor de água;  $s_d$  - espessura da camada de ar equivalente; D.P.- desvio padrão

#### Ensaio aos 120 dias

Quadro 3.5 – Permeabilidade ao vapor de água aos 120 dias.

Argamassa	$\delta$ ( $\times 10^{-11}$ )		$\mu$		$s_d$	
	(kg/(m.s.Pa))	D.P.	(-)	D.P.	(m)	D.P.
LB	1,37	0,07	14,281	0,772	0,243	0,017
HB	1,22	0,06	16,035	0,785	0,266	0,011
LT	1,46	0,10	13,433	0,927	0,226	0,017
HT	1,25	0,07	15,633	0,835	0,258	0,015
LP	1,45	0,13	13,525	1,164	0,230	0,015
HP	1,44	0,03	12,960	0,224	0,224	0,002
Ref	1,48	0,07	13,187	0,677	0,218	0,008

$\delta$  - permeabilidade ao vapor de água;  $\mu$  - fator de resistência à difusão de vapor de água;  $s_d$  - espessura da camada de ar equivalente; D.P.- desvio padrão

### 3.1.3.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com o comportamento elástico do provete e fornece informações sobre a deformabilidade da argamassa. Segundo Silva e Campiteli (2006), esta propriedade mecânica é importante pois pode estar relacionada com patologias de revestimentos de argamassa como com a fissuração.

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado com base na norma NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006). Apesar de esta norma ser utilizada na determinação do módulo de elasticidade dinâmico de pedras naturais, adaptou-se o seu procedimento ao ensaio dos provetes de argamassas. Esta adaptação consistiu na redução do número de provetes utilizados, de seis para três, admitindo que representam um conjunto suficientemente homogêneo para a realização do ensaio, já que os provetes foram todos realizados de igual forma. Foi considerada, também, uma localização distinta dos apoios dos provetes. Optou-se por apoiar os provetes de forma igual à indicada na norma para a medição de vibração em flexão para pedras naturais, e que se encontra representada na Figura 3.11.

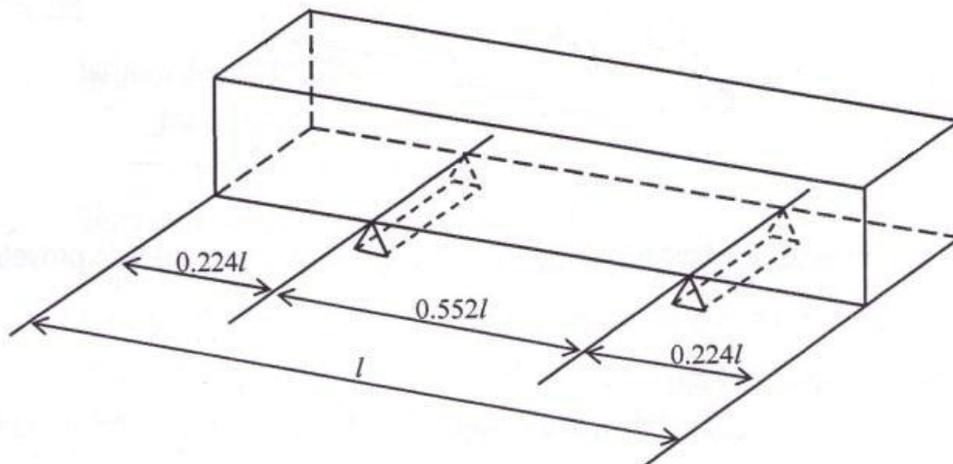


Figura 3.11 – Posição do suporte para medição da vibração em flexão.

O acelerómetro foi colocado numa extremidade do provete, e na outra extremidade, foi provocada uma vibração, utilizando um martelo de impacto. A excitação foi medida pelo analisador de sinal, e reproduzida num gráfico, função da aceleração e da frequência. O espectro que resultou desta função, permitiu analisar a frequência de ressonância fundamental,  $F_L$ , dos provetes. O valor de  $F_L$  resulta da média de três valores obtidos da realização de três medições idênticas consecutivas a  $\pm 60$  Hz da frequência de ressonância fundamental.

O módulo de elasticidade dinâmico longitudinal foi calculado a partir da frequência fundamental em vibração longitudinal  $F_L$ , e é dado pela seguinte equação:

$$Ed_L = 4 \times 10^{-6} \times l^2 \times F_L^2 \times \rho \times T \quad (3.10)$$

T é um fator de correção que depende de  $i$  e  $\nu$  e que é dado pela fórmula:

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \times \nu^2 \times i^2}{l^2} \quad (3.11)$$

Onde:

$l$  é o comprimento em mm

$\rho$  é a massa volúmica do provete, em  $g/mm^3$ ;

$i$  é o raio de giração da secção do provete em mm;

$I$  é o momento de inércia do provete, em  $mm^4$ ;

$A$  é a área da secção transversal do provete, em  $mm^2$ ;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson.

A massa volúmica foi determinada por dois processos, cubicagem e imersão. Na medição por cubicagem, foi determinado o volume do provete, através do produto da sua altura pela sua largura e comprimento. A massa volúmica calculou-se aplicando a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m_d}{A \times l} \quad [g/mm^3] \quad (3.12)$$

Onde:

$m_d$  é a massa do provete seco, em g.

A determinação da massa volúmica por imersão foi feita mediante uma pesagem hidrostática (3.1.3.6). Este valor de  $\rho$  é calculado através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_w \quad [g/mm^3] \quad (3.13)$$

Onde:

$m_s$  é a massa do provete saturado, em g;

$\rho_w$  é a massa volúmica da água, em  $g/mm^3$ .

$m_h$  é a massa do provete imerso em água (medição hidrostática), em g;

No quadro seguinte apresentam-se os resultados relativos a este ensaio.

Quadro 3.6 – Módulo de elasticidade

Provete	Edl (MPa)	
	60 dias	120 dias
LB	2057,68	1523,33
HB	3412,33	3044,86
LT	1455,23	1530,99
HT	2844,67	1622,26
LP	1588,99	450,63
HP	2635,85	1622,26
Ref	942,91	916,62

### 3.1.3.3 Ensaio de resistência à tração por flexão e à compressão

Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999). Para o ensaio da resistência à tração por flexão, foram utilizados três provetes de cada argamassa.

A resistência à tração por flexão foi determinada aplicando uma carga no provete apoiado em dois pontos, até atingir a rotura (Figura 3.12).

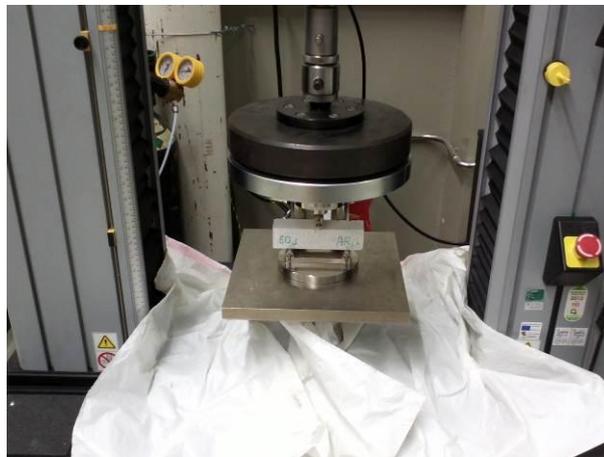


Figura 3.12 – Ensaio de resistência à flexão.

A expressão utilizada para o cálculo da resistência à flexão foi:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad [N/mm^2] \quad (3.14)$$

Onde:

$R_f$  é a resistência à flexão [N/mm<sup>2</sup>];

$F$  é a carga máxima aplicada [N];  
 $l$  é a distância entre os eixos de apoio do provete [mm];  
 $b$  é a largura do provete [mm];  
 $d$  é a espessura do provete [mm].

Para o ensaio à compressão foi utilizada uma das metades de cada provete que resultou do ensaio anterior (Figura 3.13), sendo que a outra parte foi utilizada para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem.



Figura 3.13 – Provete resultantes do ensaio à flexão.

A resistência à compressão foi obtida aplicando uma carga de compressão a uma das metades do provete (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão.

O acessório utilizado no ensaio foi cuidadosamente limpo entre ensaios, de modo a remover quaisquer resíduos de argamassa resultantes dos mesmos.

A resistência à compressão foi calculada através da expressão seguinte:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.15)$$

Onde:

$R_c$  é a resistência à compressão [N/mm<sup>2</sup>];

$F$  é a carga máxima aplicada [N];

$A_c$  é a área de carga [mm<sup>2</sup>].

Os topos intactos dos provetes, resultantes deste último ensaio foram utilizados para a realização do ensaio de porosidade aberta.

#### 3.1.3.4 Determinação da absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado com base nas normas EN 1015-18 2002 (CEN, 2002) e EN 15801:2009 (CEN, 2009), e teve como objetivo a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Este coeficiente é determinado a partir da massa de água absorvida por área de argamassa em contacto com a água, por ação de forças de sucção capilar.

Os provetes utilizados foram os provetes resultantes do ensaio à flexão. Os provetes foram colocados numa estufa ventilada a 70°C durante 48 horas, até a sua massa se tornar constante. De seguida os provetes foram colocados num exsiccador para arrefecerem em condições ambientais secas, evitando assim a absorção da humidade existente no laboratório. Posteriormente selaram-se as faces laterais com papel celofane (Figura 3.15), com o objetivo de proporcionar uma evaporação unidirecional.



Figura 3.15 – Provetes selados lateralmente com papel celofane.

Pesaram-se os provetes numa balança com precisão de 0,01g e colocaram-se numa tina, com tampa, de forma a garantir, um ambiente saturado no seu interior. Os provetes foram colocados sobre uma estrutura, em malha perfurada de plástico, de forma a garantir que a base dos provetes teria toda a sua área em contacto com a água, que foi colocada até uma altura de 2 mm acima do suporte. Esta medida foi verificada periodicamente, ao longo do ensaio, para garantir um nível de água constante.

Os provetes foram colocados com a face do corte resultante do ensaio à flexão voltada para cima. Como a absorção de água ocorre de uma forma muito rápida, fizeram-se pesagens aos 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos (Figura 3.17). Após estas pesagens seguiram-se pesagens de 24 em 24 horas a partir da primeira pesagem, até a massa se tornar constante (variação de massa em 24 horas inferior a 1%). Todos os provetes atingiram a saturação ao fim de 48 horas.

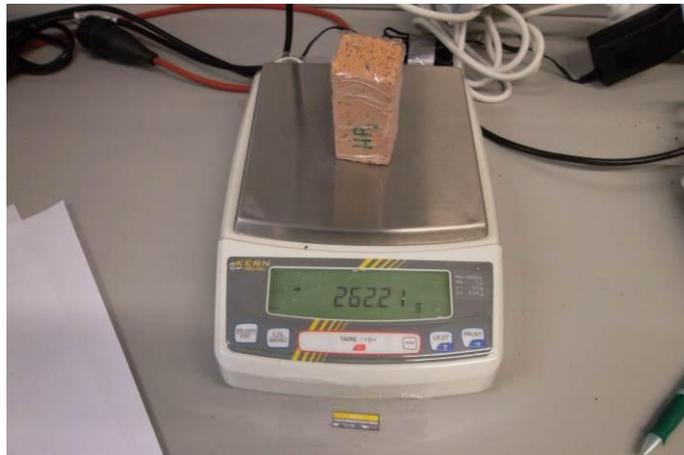


Figura 3.16 – Pesagem dos provetes.

A quantidade de água absorvida por unidade de superfície por cada provete foi calculada através da seguinte expressão:

$$m = \frac{m_i - m_0}{s} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.16)$$

Onde,

$m_i$  é a massa do meio provete ao fim de um determinado tempo  $t_i$ , em kg;

$m_0$  é a massa do meio provete seco, no início do ensaio, em kg;

$S$  é a secção do provete em contacto com a água (40 mm x 40 mm), em  $\text{mm}^2$ .

O coeficiente de absorção de água representa a velocidade de absorção de água do material e, de acordo com a norma EN 1015-18 (CEN, 2002) resulta da seguinte expressão:

$$C = 0,1 \times (M_{90min} - M_{10min}) [kg/(m^2 \cdot min^{0,5})] \quad (3.17)$$

Onde,

M90min é a massa do provete após 90 minutos de imersão, em g;

M10min é a massa do provete após 10 minutos de imersão, em g.

Segundo a norma EN 15801 (CEN 2009), este coeficiente é calculado pela regressão linear do gráfico da variação de massa por m<sup>2</sup> versus a raiz quadrada do tempo, usando pelo menos cinco pontos sucessivos alinhados.

Determinou-se o coeficiente de capilaridade, de acordo com as normas EN 1015-18 (CEN, 2002), válida apenas para argamassas cimentícias, e EN 15801 (CEN, 2009). Verificou-se que para a primeira, a reta que dá a inclinação do troço correspondente ao intervalo entre os 10 e os 90 minutos de imersão, apanha parte inicial e a parte da zona assintótica. A norma EN 15801 (CEN, 2009) recomenda fazer testes preliminares para determinar os intervalos de tempo a considerar. Esta informação já vinha de trabalhos anteriores, pelo que se consideraram os tempos de medição já referidos anteriormente, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos. Com pesagens mais frequentes foi possível a obtenção de uma curva de absorção bastante mais detalhada na zona em que o ritmo de absorção se altera.

O coeficiente de absorção capilar, representado graficamente, é dado pela inclinação do troço inicial que resulta do gráfico que traduz a curva de absorção capilar. Esta curva exprime a variação de massa por área de contacto em kg/m<sup>2</sup>, em relação à raiz quadrada do tempo decorrido, *i*, em min<sup>0,5</sup>.

Na Figura 3.17 pode verificar-se que o valor assintótico da argamassa de referência é bastante inferior ao das argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica. Verificou-se também que a argamassa com 40% de resíduos de tijolo é a que apresenta maior absorção capilar.

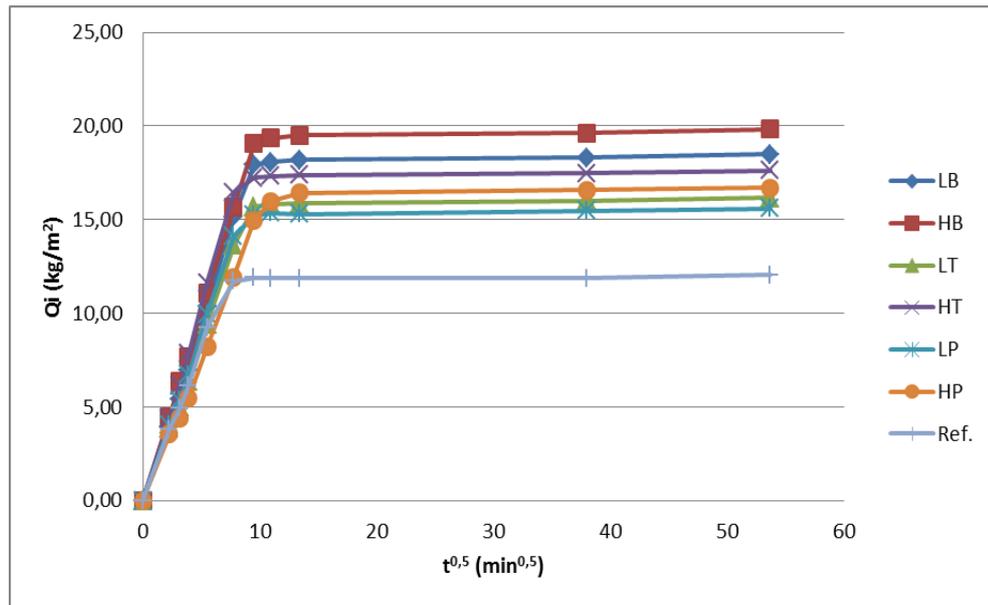


Figura 3.17 - Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias.

Observa-se, através da Figura 3.18, que os coeficientes de capilaridade são muito semelhantes entre si e que a argamassa que apresenta maior valor é a argamassa com 40% de resíduos de telhas.

Já aos 120 dias, verificou-se que a velocidade de absorção de água por capilaridade é maior para a argamassa com 40% de resíduos de vasos.

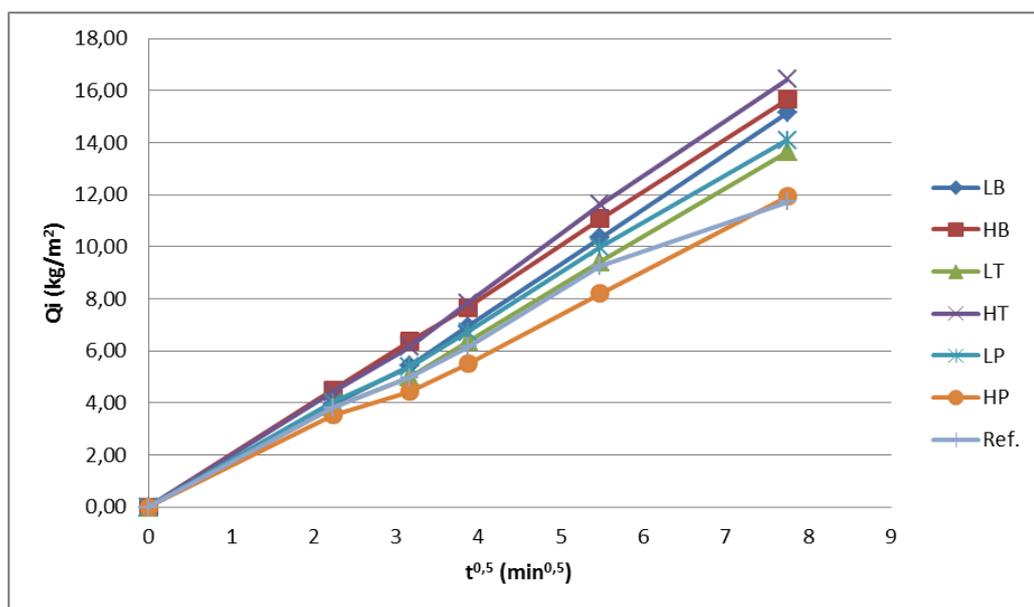


Figura 3.18 - Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias, nos primeiros 60 minutos de ensaio.

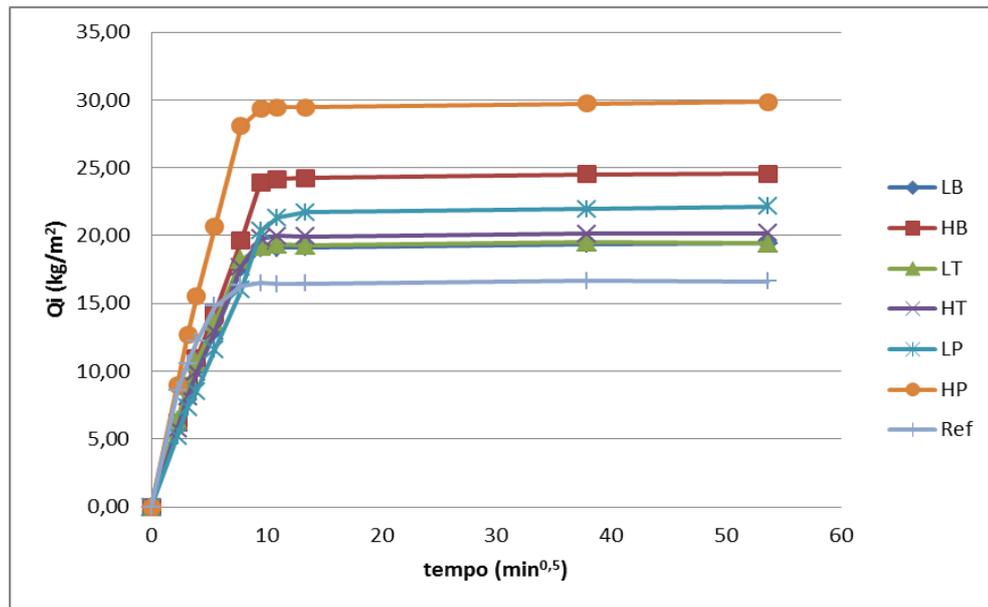


Figura 3.19 - Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias.

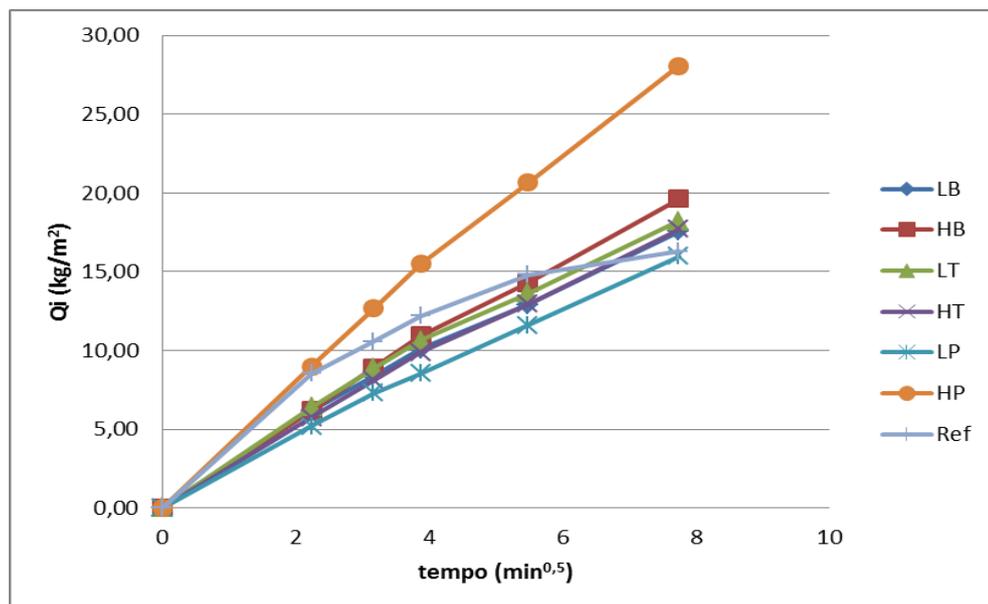


Figura 3.20 - Representação gráfica das curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias, nos primeiros 60 minutos do ensaio.

Através da Figura 3.20 foi possível verificar que a argamassa que apresentou maior coeficiente de capilaridade aos 120 dias foi a argamassa com 40% de resíduos de vasos.

O valor assintótico representa a quantidade total de água absorvida em relação à área de contacto com a água que, graficamente corresponde ao valor da variação da massa relativamente à massa inicial, após ter atingido massa constante.

Os valores dos coeficientes de absorção capilar calculados pela norma EN 15801 (2009), mais indicada para este tipo de argamassas, estão registados nos Quadros 3.6 e 3.7.

Quadro 3.7 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 60 dias

Argamassa	CC kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		V. Ass. (kg/m <sup>2</sup> )	
	EN 15801 (2009)	D.P.	A. Gráfica	D.P.
LB	1,96	0,03	18,34	0,98
HB	2,02	0,04	19,48	0,31
LT	1,44	0,07	16,02	0,83
HT	2,18	0,05	17,50	0,33
LP	1,82	0,14	16,16	2,35
HP	1,54	0,06	16,57	1,93
Ref	1,69	0,01	11,93	0,26

CC - coeficiente de capilaridade; V. Ass. - valor assintótico; A. Gráfica - Assintota gráfica

Quadro 3.8 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 120 dias

Argamassa	CC kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		V. Ass. (kg/m <sup>2</sup> )	
	EN 15801 (2009)	D.P.	A. Gráfica	D.P.
LB	2,27	0,04	19,33	0,74
HB	2,53	0,01	24,28	0,52
LT	2,35	0,13	19,40	0,62
HT	2,28	0,09	20,09	0,98
LP	2,06	0,05	21,93	2,03
HP	3,62	0,08	29,68	0,15
Ref	2,10	0,02	16,57	0,12

CC - coeficiente de capilaridade; V. Ass. - valor assintótico; A. Gráfica - Assintota gráfica

### 3.1.3.5. Ensaio de secagem

Após a saturação dos provetes resultantes do ensaio de absorção por capilaridade, foi realizado o ensaio de secagem, com base no trabalho de Ferreira (2011), que por sua vez foi realizado com base no trabalho de Martins (2010) e na RILEM. Retirou-se o papel celofane que selava as faces laterais dos provetes, ocorrendo assim uma secagem bidireccional, pois

uma secagem unidirecional seria bastante demorada para este tipo de argamassas. Os provetes foram mantidos numa câmara climática, com uma temperatura de  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de  $(50 \pm 5)\%$ , durante todo o período de secagem (Figura 3.22). Foram realizadas pesagens, numa balança de precisão 0,01 g, com o intuito de avaliar a quantidade de água evaporada. Estas pesagens foram realizadas de hora a hora nas primeiras 6 horas, e seguiram-se pesagens de 24 em 24 horas a partir do início da realização do ensaio, até que a massa dos provetes se tornasse constante (variação de massa em 24 horas inferior a 1%), ou começasse a aumentar devido à absorção da humidade presente no ambiente envolvente.



Figura 3.21 – Câmara climática

Os resultados deste ensaio são apresentados através da curva de secagem, que traduz a variação do teor de água no tempo, e o índice de secagem, que permite avaliar a rapidez de secagem das argamassas que aumenta com a diminuição do valor do índice.

O primeiro parâmetro, o teor de água, é definido por:

$$W_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.18)$$

Onde,

$m_t$  é a massa do meio provete no instante  $t$ , em g;

$m_0$  é a massa do meio provete seco em estufa, em g.

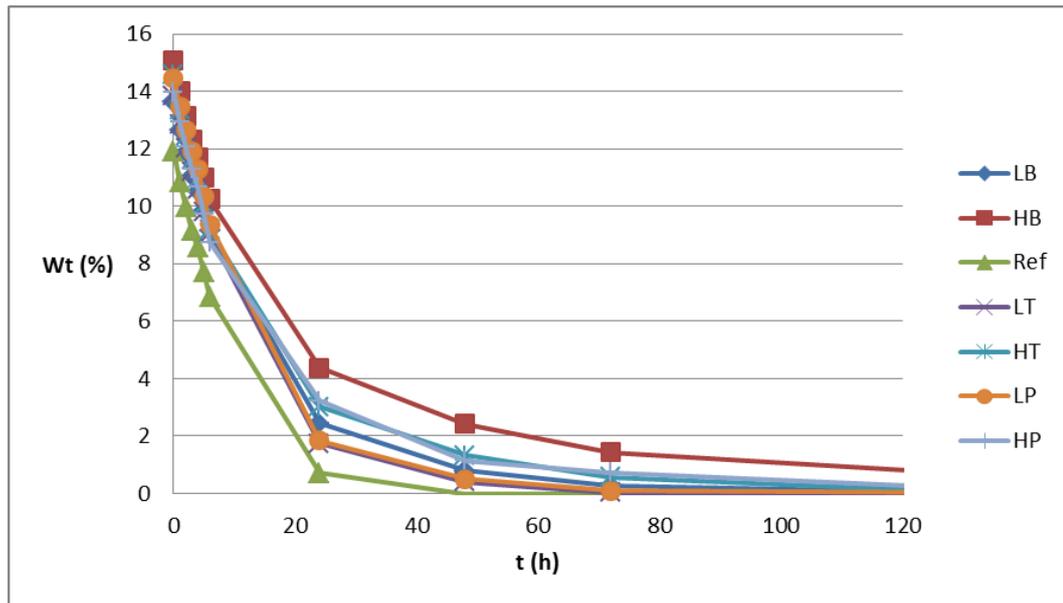


Figura 3.22 - Curvas de secagem média das argamassas ao fim de 60 dias.

A argamassa com 20% de vasos (LP) e a argamassa com 20% de telha apresentaram maior velocidade de secagem, visto a sua curva de secagem ter uma inclinação maior, embora as curvas serem muito semelhantes entre todas as argamassas.

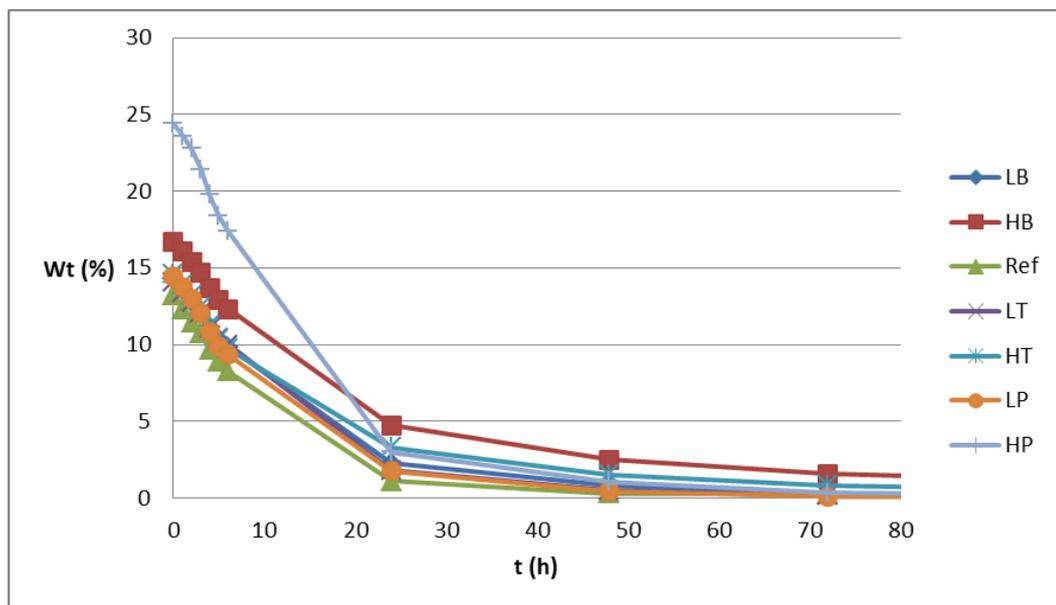


Figura 3.23 - Curvas de secagem média das argamassas ao fim de 120 dias.

Observou-se que, para um tempo de cura de 120 dias, a velocidade de secagem é semelhante para as argamassas com resíduos de cerâmica, e que para a argamassa de referência, a velocidade de secagem é consideravelmente superior.

O índice de secagem foi determinado através da expressão simplificada seguinte:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{max} \times t_f} \quad (3.19)$$

Onde,

$t_i$  é o tempo de ensaio  $i$ , em horas;

$t_f$  é o tempo final do ensaio, em horas;

$Q_i$  é a quantidade de água no interior do provete no instante  $i$ , em % relativamente à massa seca;

$Q_{max}$  é a quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca.

No quadro seguinte estão apresentados os valores relativos ao índice de secagem para as argamassas ensaiadas aos 60 e aos 120 dias. Quanto maior for este índice, mais lenta é a secagem.

Quadro 3.9 – Índices de secagem para os 60 e 120 dias, e respectivos desvios padrão.

Argamassa	Índice de Secagem			
	60 dias	D.P.	120 dias	D.P.
LB	0,14	0,01	0,10	0,00
HB	0,22	0,01	0,17	0,00
LT	0,12	0,01	0,09	0,00
HT	0,15	0,02	0,13	0,00
LP	0,12	0,01	0,08	0,00
HP	0,16	0,02	0,09	0,00
Ref	0,09	0,00	0,08	0,00

### 3.1.3.6 Ensaio de porosidade aberta

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008), segundo a qual, a massa volúmica aparente e a porosidade aberta são determinadas com base na absorção de água sob vácuo e na pesagem dos provetes imersos. O campo de aplicação desta norma são as pedras naturais, por isso ao aplica-la a provetes de argamassas de cal, aos topos resultantes do ensaio de resistência à compressão, devido à sua fragilidade e para não se correr o risco de ficarem excessivamente danificados, houve necessidade de se proceder a adaptações. Assim, o procedimento adotado foi o de saturar os provetes através do mergulho dos mesmos num recipiente com água.

Os provetes foram mantidos numa estufa a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$ , até atingirem massa constante e colocados num exsiccador para arrefecerem em condições ambientais secas. Pesaram-se todos os provetes e colocaram-se num tabuleiro com água que cobria a totalidade dos mesmos. Os provetes foram mantidos no tabuleiro até ficarem completamente saturados (verificando-se a saturação com pesagens sucessivas até massa constante). De seguida, efetuou-se uma pesagem hidrostática para cada um deles. Após essa pesagem retirou-se o provete do recipiente de pesagem, limpou-se a água em excesso e pesou-se novamente o provete numa balança de precisão 0,01g.

A massa volúmica aparente (em quilogramas por metro cubico) é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente e é dada pela seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.20)$$

Onde,

$m_d$  é a massa do provete seco, em g;

$m_s$  é a massa do provete saturado, em g;

$m_h$  é a massa do provete imerso em água, em g.

$\rho_{rh}$  é a massa volúmica da água, à temperatura de ensaio, em  $\text{kg/m}^3$ .

A porosidade aberta é a razão (sob a forma percentual) entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete e é dada pela seguinte equação:

$$p_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.21)$$

Onde,

$m_d$  é a massa do provete seco, em g;

$m_s$  é a massa do provete saturado, em g;

$m_h$  é a massa do provete imerso em água, em g.

Nos quadros seguintes estão apresentados os valores médios relativos à massa volúmica aparente e porosidade aberta para um tempo de cura de 60 e 120 dias, de três provetes de cada argamassa, resultantes dos ensaios à compressão.

Quadro 3.10 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 60 dias.

Provete	$m_d$ [g]	$m_s$ [g]	$m_h$ [g]	$\rho_b$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	D.P. $\rho_b$	$p_0$ %	D.P. $p_0$
Ref	68,30	75,70	39,06	1856,45	18,45	20	0,71
LB	62,68	70,22	36,91	1847,17	69,19	25	0,63
HB	62,41	70,58	36,99	1725,78	6,69	29	0,24
LT	79,82	90,56	47,34	1825,58	28,04	22	1,07
HT	84,78	97,16	49,60	1787,41	67,10	28	1,12
LP	83,36	96,47	48,97	1778,52	7,54	25	0,98
HP	88,40	103,11	52,00	1753,35	13,86	26	0,23

Quadro 3.11 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 120 dias.

Provete	$m_d$ [g]	$m_s$ [g]	$m_h$ [g]	$\rho_b$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	D.P. $\rho_b$	$p_0$ %	D.P. $p_0$
Ref	87,83	97,77	49,46	1815,06	23,43	21	0,99
LB	84,62	95,31	48,14	1755,07	18,48	27	1,26
HB	82,96	94,59	47,74333	1680,05	7,97	31	0,27
LT	86,41	99,41	50,29	1782,60	6,46	25	0,88
HT	89,60	104,02	52,36	1737,67	2,03	27	0,61
LP	89,38	104,41	52,35	1772,75	13,44	25	0,72
HP	85,87	101,52	50,513	1506,71	14,18	37	0,84

## 3.2 Discussão dos resultados

### 3.2.1 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade longitudinal aos 60 e 120 dias encontram-se registados nas Figuras 3.28 e 3.29.

Segundo Veiga (2003), os valores para rebocos exteriores de edifícios antigos podem variar entre 1000 e 2000 MPa, no entanto, existem valores tabelados que variam entre os 2000 MPa e os 5000 MPa.

Analisando as Figuras 3.30 e 3.31, verifica-se que as argamassas com maior percentagem de resíduos de cerâmica apresentam maiores valores de módulo de elasticidade. Verifica-se uma diferença acentuada dos valores do módulo de elasticidade analisado aos 60 dias e aos 120 dias.

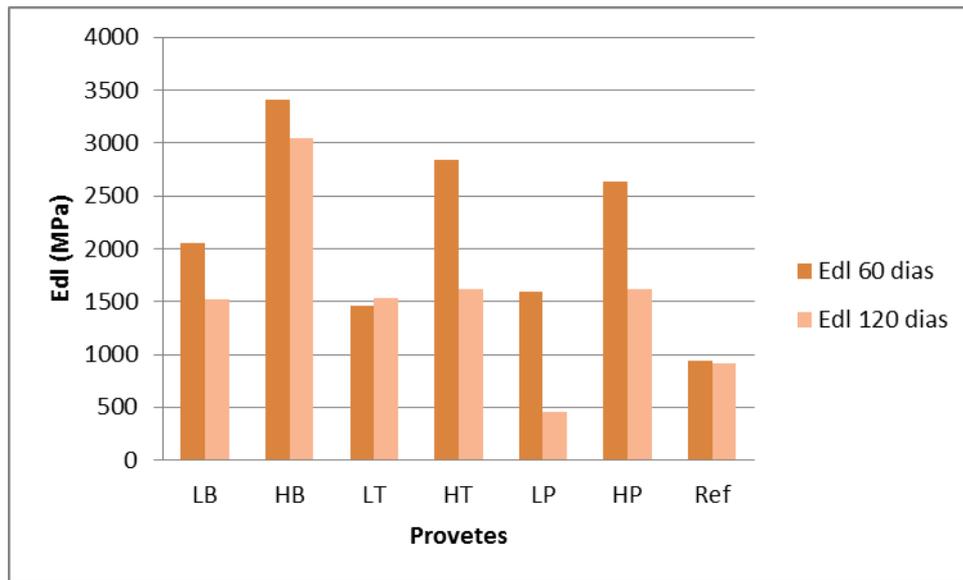


Figura 3.24 - Módulo de elasticidade aos 60 e 120 dias, com a massa volúmica determinada através da medição de volume por cubicagem.

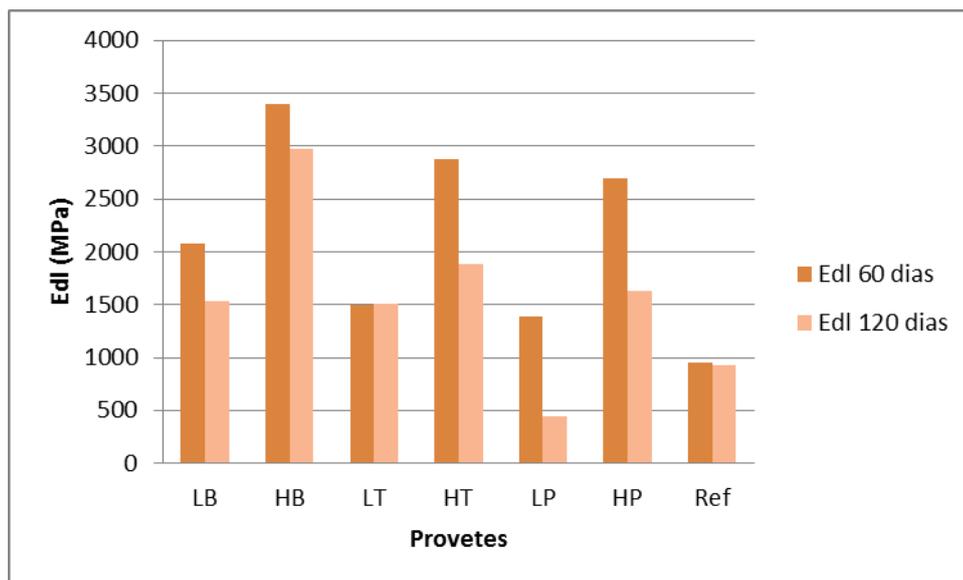


Figura 3.25 Módulo de elasticidade aos 60 e 120 dias, com a massa volúmica determinada através da medição de volume por imersão.

De notar que alguns resultados poderão ter sido afetados pela existência de vazios nos provetes, já que o procedimento de ensaio adotado é bastante sensível à homogeneidade dos materiais.

### 3.2.2 Ensaio da resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à flexão aos 60 dias e 120 dias podem ser observados na Figura 3.32.

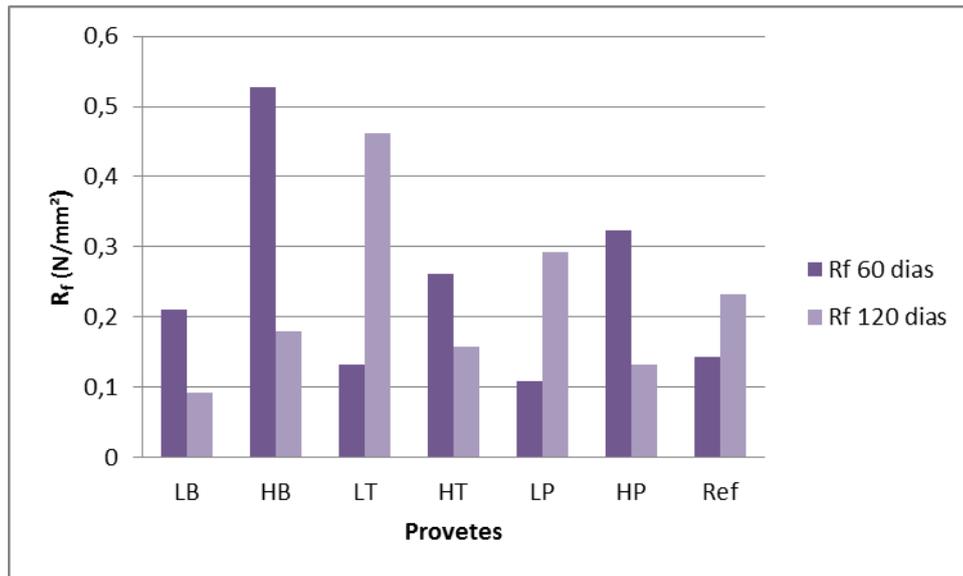


Figura 3.26 - Resistência à flexão aos 60 e 120 dias.

De acordo com Veiga (2003), as argamassas de reboco para edifícios antigos aos 90 dias de idade, devem ter valores de resistência à flexão a variar entre 0,2 e 0,7 MPa. Tendo em conta estes valores, verifica-se que a argamassa com melhor comportamento à flexão aos 120 dias é a argamassa com incorporação de 20% de resíduos de telha, LT. A argamassa com 20% de resíduos de vasos também apresenta valores razoáveis de resistência à flexão, seguida da argamassa de referência. As restantes argamassas apresentam valores aos 120 dias de cura, inferiores ao intervalo referido anteriormente.

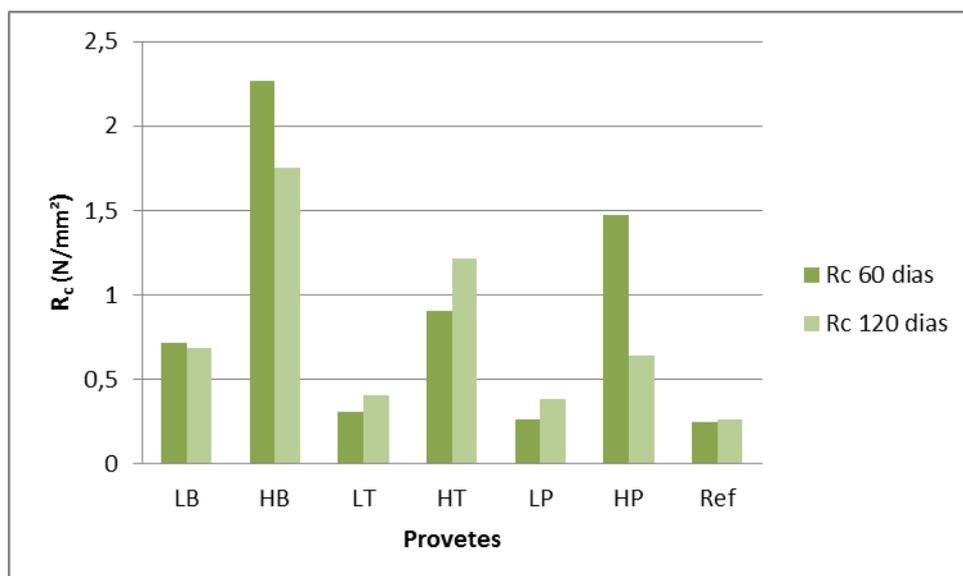


Figura 3.27 - Resistência à compressão aos 60 e 120 dias.

Relativamente à resistência à compressão, segundo Veiga (2003), estes valores devem variar entre 0,4 e 2,5 MPa.

Analisando a Figura 3.33, e consultando o Quadro 3.7, é possível constatar que a argamassa de referência tanto aos 60 dias como aos 120 dias, assim como as argamassas com 20% de resíduos de telha, LT, e com 20% de resíduos de vasos, LP, com um tempo de cura de 60 dias, não verificam a resistência mínima à compressão de 0,4 MPa. Por outro lado, aos 120 dias, todas as argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica apresentam valores que se enquadram no intervalo referido anteriormente. Verifica-se um aumento da resistência à compressão com o aumento da percentagem de resíduo cerâmico. À semelhança da resistência à flexão, também na resistência à compressão a argamassa com 40% de resíduo de tijolo, HB, é a que apresenta maior valor.

### 3.2.3 Permeabilidade ao vapor de água

Através dos valores da permeabilidade ao vapor de água aos 60 e 120 dias, é possível constatar que estes valores são muito semelhantes entre si, com uma ligeira tendência a diminuir com o tempo de cura, com exceção da argamassa com 20% de resíduos de tijolo, LB. Também é possível verificar que, excluindo a argamassa com 40% de resíduos de vasos com 60 dias de cura, quanto maior é a percentagem de resíduo, menor a permeabilidade.

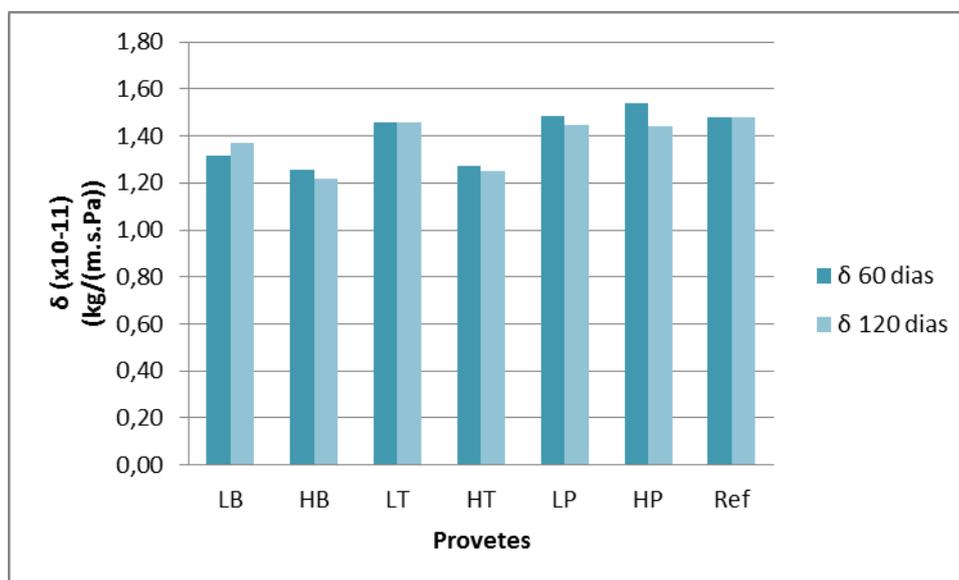


Figura 3.28 - Permeabilidade ao vapor de água aos 60 e 120 dias.

De acordo com Matias (2008), o valor da permeabilidade ao vapor de água de uma argamassa de cimento com traço 1:3 aos 60 dias é de 1,08 [(x10<sup>-11</sup>) kg/(m.s.Pa)]. Desta forma é possível verificar que as argamassas de cal apresentam uma maior permeabilidade ao vapor de água relativamente às argamassas de cimento. Analisando a Figura 3.24, verifica-se que, em geral, a incorporação de resíduos de cerâmica faz diminuir este valor.

### 3.2.4 Absorção de água por capilaridade

Na Figura seguinte apresenta-se o valor do coeficiente de capilaridade de cada argamassa para os 60 e 120 dias, calculado com base na norma EN 15801 (CEN, 2009), visto ser a mais indicada para este tipo de argamassas. Quanto menor for este parâmetro, à partida, melhor será o comportamento da argamassa face ao contacto com a água.

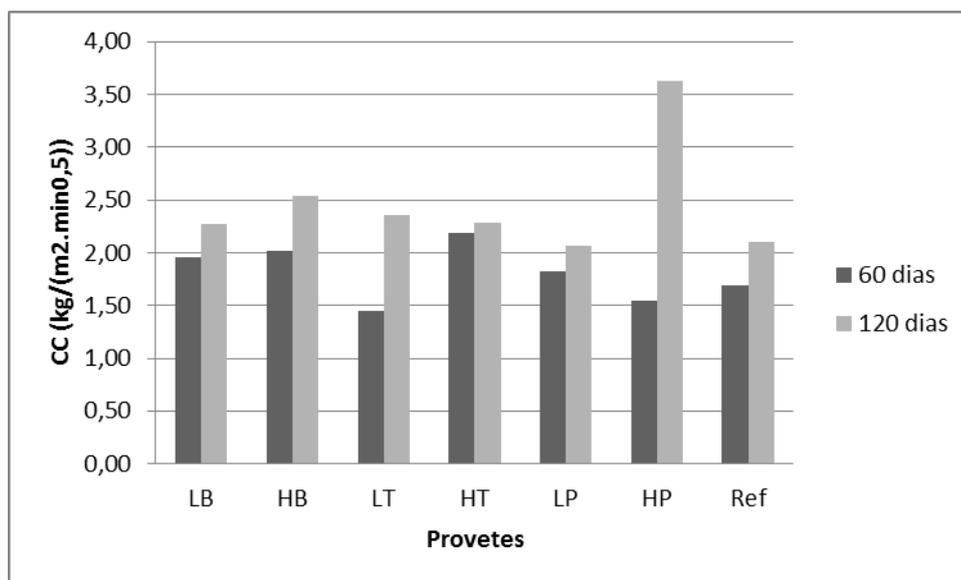


Figura 3.29 - Coeficiente de capilaridade aos 60 e 120 dias.

É então possível constatar que, o coeficiente de capilaridade é tanto maior quanto maior for o tempo de cura. Verifica-se também que a argamassa com 40% de resíduos de vasos, HP, apresenta um coeficiente de capilaridade aos 60 dias bastante dispar relativamente aos restantes argamassas. Em relação à percentagem de resíduos, em geral há um aumento deste parâmetro com o aumento desta percentagem. Segundo Veiga (2008), as argamassas de substituição devem apresentar um coeficiente de capilaridade entre 1 e 1,5 [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ ] aos 90 dias. Desta forma, as únicas argamassas que cumprem este requisito são a argamassa com 20% de resíduos de telha, LT, e a argamassa com 40% de resíduos de vasos, HP, com 60 dias de cura, que, com o decorrer do tempo distanciam-se dos valores referenciados.

### 3.2.5 Ensaio de secagem

Ao analisar a Figura 3.26, verifica-se que o índice de secagem é muito semelhante entre tempos de cura, mas diminuindo nas argamassas com tempo de cura de 120 dias. A argamassa com incorporação de 40% de resíduos de tijolo HB é a que apresenta maior índice de secagem. Por outro lado as argamassas que apresentam menor índice de secagem são as argamassas com incorporação de resíduos de vasos, LP e HP e a argamassa com incorporação de 20% de resíduos de telha. Estas argamassas estão no entanto muito próximas da argamassa de referência e, como tal, os resíduos de vaso e a baixa percentagem de resíduos de telha não apresentam grande influência neste parâmetro.

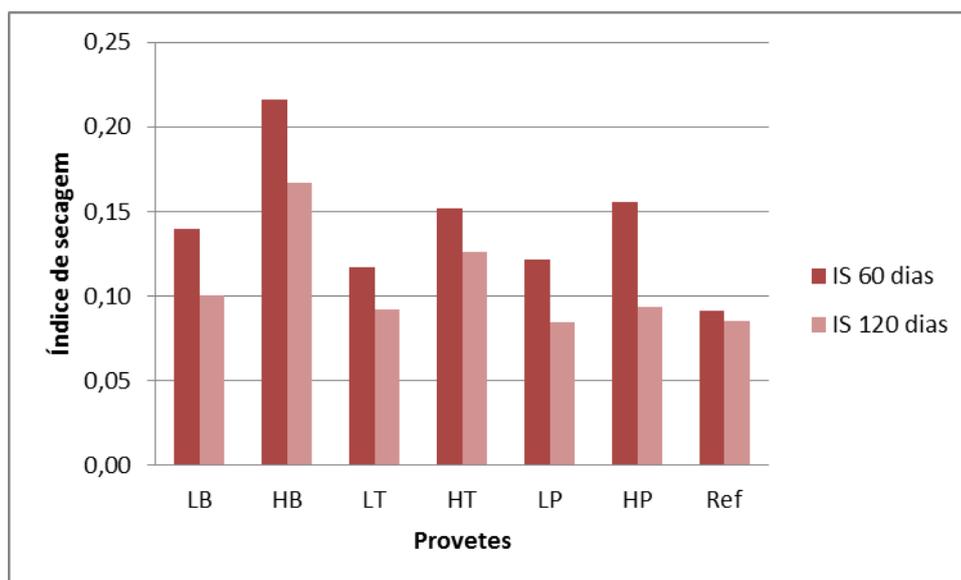


Figura 2.30 - Índice de secagem aos 60 e 120 dias.

Uma argamassa deve possuir um baixo índice de secagem, pois desta forma a secagem dá-se de forma mais rápida. Assim, as argamassas com melhor comportamento relativamente a este parâmetro são as argamassas LP e de referência, aos 120 dias.

### 3.2.6 Porosidade aberta

Na figura seguinte apresentam-se os valores da porosidade aberta das diferentes argamassas aos 60 e 120 dias de cura.

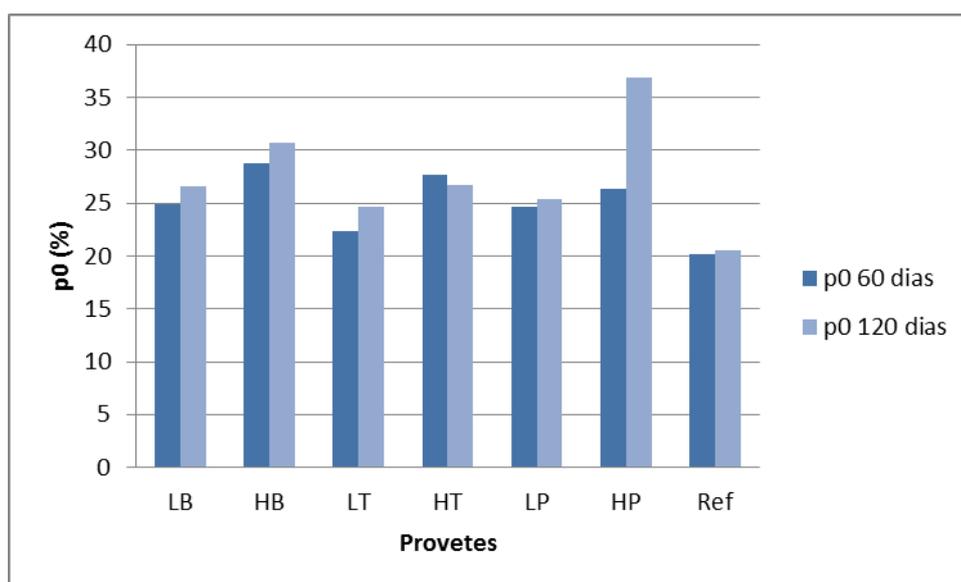


Figura 3.31 - Porosidade aberta aos 60 e 120 dias.

Constata-se que quanto maior é a percentagem de resíduos de cerâmica, maior é a porosidade aberta. Desta forma pode-se concluir-se que a incorporação de resíduos de cerâmica nas argamassas aumenta a porosidade das mesmas. É também possível verificar que, à exceção da argamassa com 40% de resíduo de telha, HT, a porosidade aberta tem tendência a aumentar com o tempo de cura.

### 3.2.7 Análise global dos resultados

Segundo Tomás (2012) (com base em Veiga, 1998), a tendência para a fendilhação será tanto menor quanto mais reduzida for a retração e menor for a relação módulo de elasticidade/resistência à tração. Assim, pretende-se ter argamassas com o menor valor deste quociente.

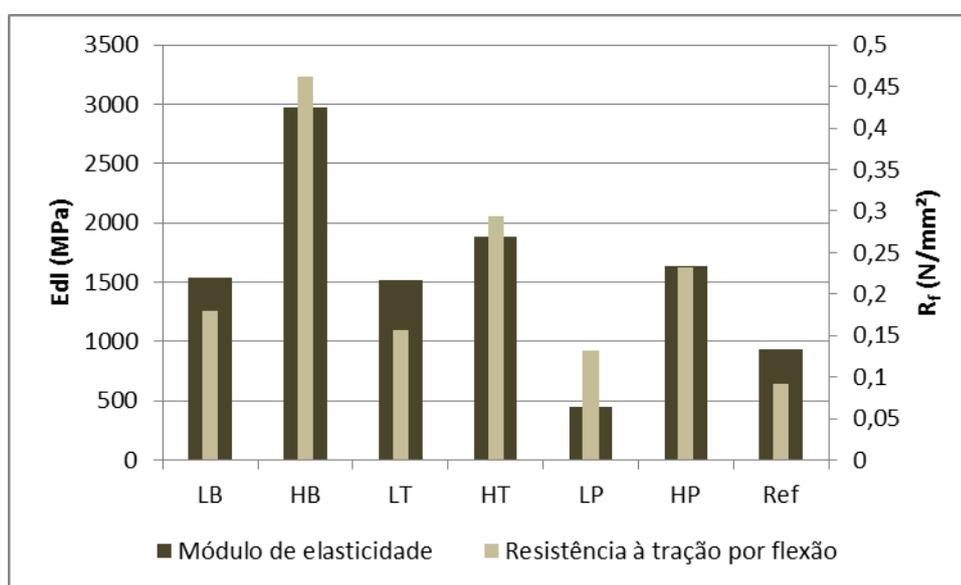


Figura 3.32 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração, aos 120 dias.

Sabendo que, quanto maior a diferença entre os gráficos para uma mesma argamassa, maior será a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração, da Figura 3.32, conclui-se que as argamassas mais suscetíveis à fendilhação são a LP e LT, e que, por outro lado a argamassa HP é a que apresenta melhores resultados.

A partir da Figura 3.33 é possível verificar que as resistências à tração por flexão e à compressão não estão diretamente relacionadas, visto que a primeira, à exceção da argamassa com incorporação de resíduos de telha, diminui com o aumento de resíduo cerâmico, enquanto que para a resistência à compressão verifica-se o contrário.

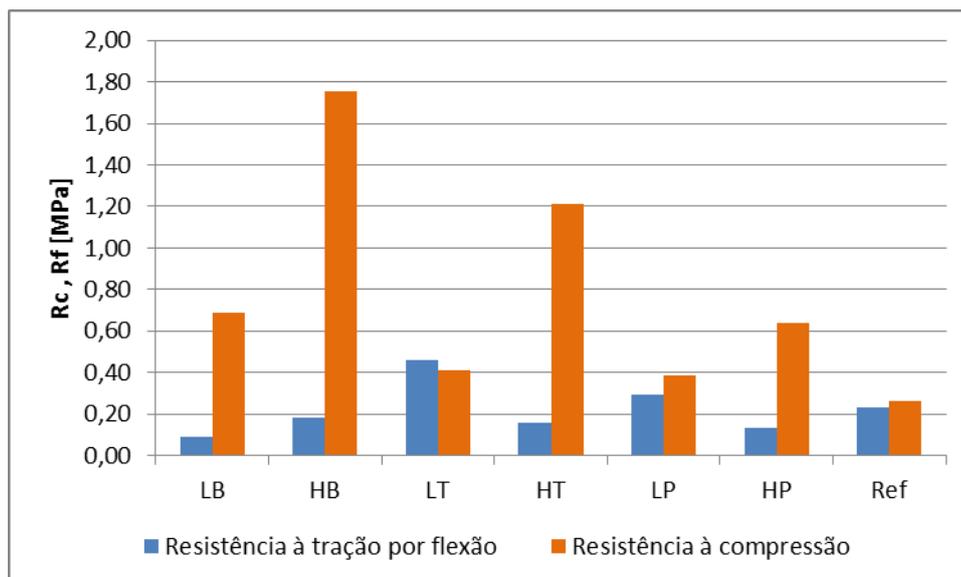


Figura 3.33 - Resistência à compressão e resistência à tração por flexão aos 120 dias.

Através da Figura 3.34, é possível verificar que, à exceção das argamassas com incorporação de resíduos de telha, existe uma relação de proporcionalidade entre os valores de porosidade aberta e do coeficiente de capilaridade e que, em geral, quanto maior a quantidade de resíduos cerâmicos, menor é a porosidade e consequentemente o coeficiente de capilaridade. Este facto deve-se a ambos os conceitos estarem interligados.

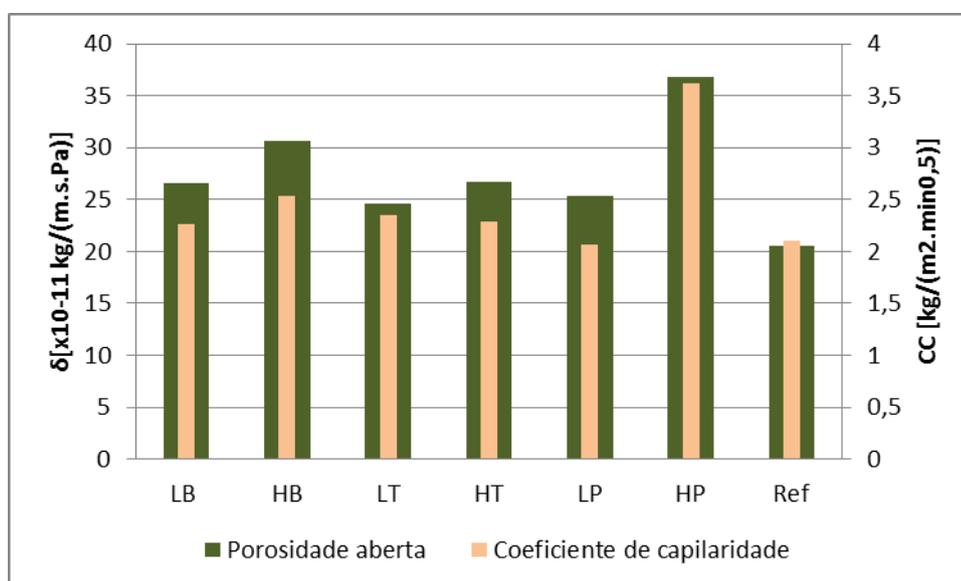


Figura 3.34 – Relação entre a porosidade aberta e o coeficiente de capilaridade, aos 120 dias.

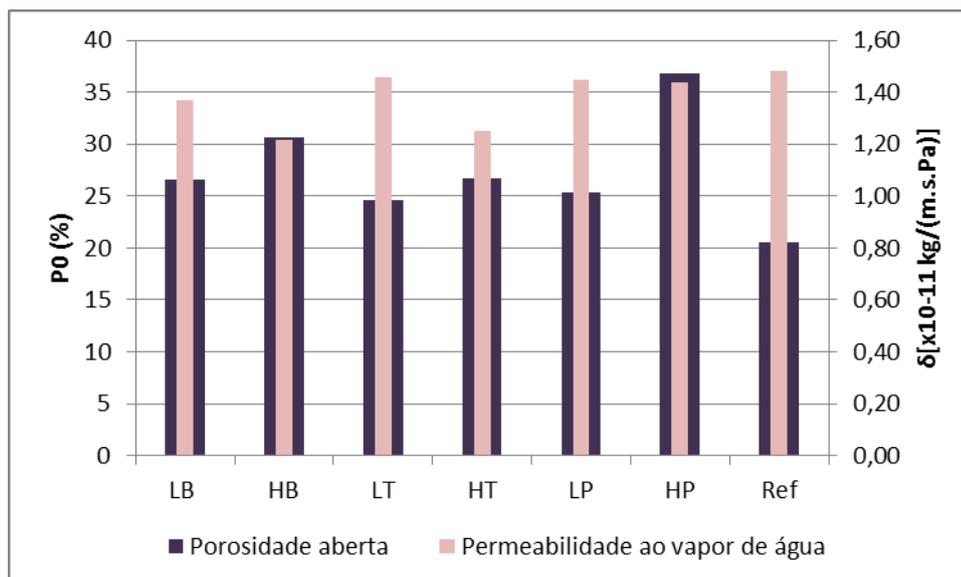


Figura 3.35 – Relação entre a porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água, aos 120 dias.

Da Figura 3.35 conclui-se que, a porosidade aberta varia de forma inversa à permeabilidade ao vapor de água, ou seja quanto maior a percentagem de resíduo cerâmico, maior a porosidade e menor a permeabilidade ao vapor de água.

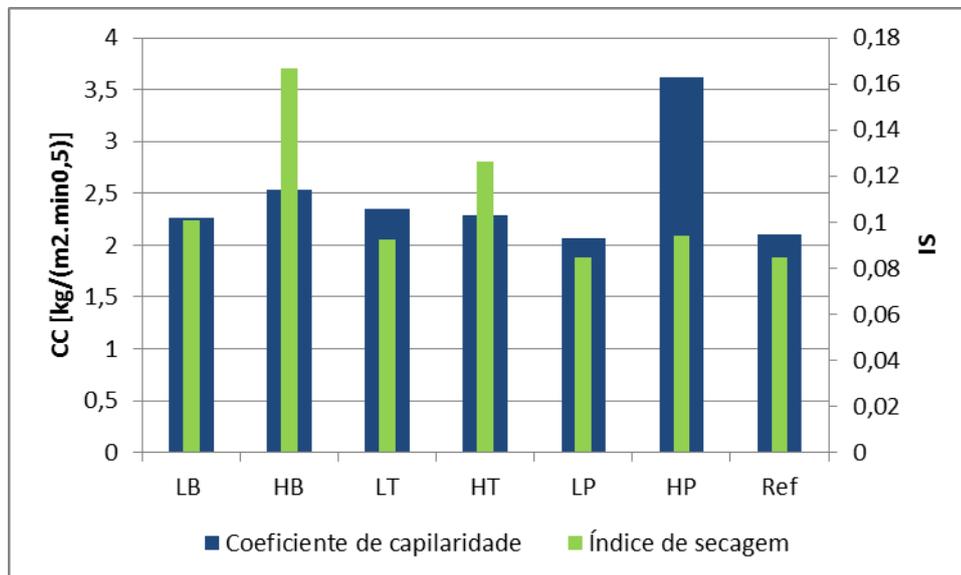


Figura 3.36 – Relação entre o coeficiente de capilaridade e o índice de secagem, aos 120 dias.

Na Figura 3.36 é possível observar que a absorção capilar e o índice de secagem estão interligados, visto que, em geral, quanto maior a percentagem de resíduo cerâmico, maior o coeficiente de capilaridade e o índice de secagem. Como interessam baixos índices de secagem e baixos coeficientes de capilaridade, a incorporação de resíduos cerâmicos, à exceção da

argamassa com 20 % de resíduos de vasos que apresenta valores semelhantes à da argamassa de referência, afeta de forma negativa estas características.

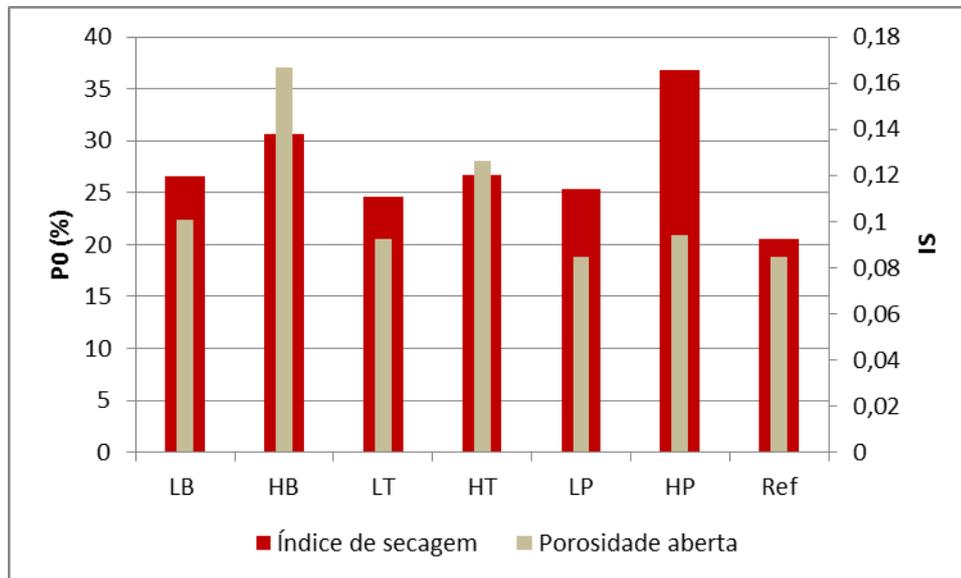


Figura 3.37 – Relação entre o índice de secagem e a porosidade aberta, aos 120 dias.

Á semelhança do que acontece com o coeficiente de capilaridade, também o índice de secagem indicia estar diretamente relacionado com a porosidade aberta, visto que quanto maior a percentagem de resíduos de cerâmica, maior o índice de secagem e maior a porosidade aberta.

Quadro 3.12 – Síntese dos resultados obtidos aos 60 dias.

Argamassa	Traço Volumétrico	Arg. Fresca	Argamassa endurecida								
		d <sub>médio</sub> (mm)	$\delta$ ( $\times 10^{-11}$ ) [kg/(m.s.Pa)]	CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	VA (kg/m <sup>2</sup> )	IS (-)	P <sub>0</sub> (%)	Edl (MPa)		R <sub>f</sub> (Mpa)	R <sub>c</sub> (Mpa)
								Cubicagem (Mpa)	Imersão (Mpa)		
Ref	1:2	164,77	1,32	1,96	18,34	0,14	24,9	2057,68	2083,16	0,21	0,71
LB	1:1,6:0,4	152,39	1,25	2,02	19,48	0,22	28,78	3412,33	3398,20	0,53	2,27
HB	1:1,2:0,8	164,25	1,46	1,44	16,02	0,12	22,38	1455,23	1493,77	0,13	0,30
LT	1:1,6:0,4	163,14	1,27	2,18	17,50	0,15	27,66	2844,67	2879,91	0,26	0,91
HT	1:1,2:0,8	148,18	1,48	1,82	15,46	0,12	24,59	1588,99	1381,54	0,11	0,26
LP	1:1,6:0,4	149,24	1,54	1,54	16,57	0,16	26,36	2635,85	2697,82	0,32	1,47
HP	1:1,2:0,8	156,08	1,48	1,69	11,93	0,09	20,16	942,91	950,02	0,14	0,25

Ref – Reference; LB – Low Brick; HB – High Brick; LT – Low Tile; HT – High Tile; LP – Low Pot; HP – High Pot; d<sub>médio</sub> – Espalhamento;  $\delta$  – Permeabilidade ao vapor de água; CC – Coeficiente de capilaridade; VA – Valor assintótico; IS – Índice de secagem; P<sub>0</sub> – Porosidade aberta; Edl – Módulo de elasticidade dinâmico; R<sub>f</sub> – Resistência à flexão; R<sub>c</sub> – Resistência à compressão.

Quadro 3.13 – Síntese dos resultados obtidos aos 120 dias.

Argamassa	Traço Volumétrico	Arg. Fresca	Argamassa endurecida								
		d <sub>médio</sub> (mm)	$\delta$ ( $\times 10^{-11}$ ) [kg/(m.s.Pa)]	CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	VA (kg/m <sup>2</sup> )	IS (-)	P <sub>0</sub> (%)	Edl (MPa)		R <sub>f</sub> (Mpa)	R <sub>c</sub> (Mpa)
								Cubicagem (Mpa)	Imersão (Mpa)		
Ref	1:2	164,77	1,37	2,27	19,33	0,10	26,52	1523,33	1536,46	0,09	0,69
LB	1:1,6:0,4	152,39	1,22	2,53	24,28	0,17	30,70	3044,86	2976,74	0,18	1,76
HB	1:1,2:0,8	164,25	1,46	2,35	19,40	0,09	24,66	1530,99	1514,10	0,46	0,41
LT	1:1,6:0,4	163,14	1,25	2,28	20,09	0,13	26,66	1622,26	1880,11	0,16	1,21
HT	1:1,2:0,8	148,18	1,45	2,06	21,93	0,08	25,38	450,63	445,74	0,29	0,39
LP	1:1,6:0,4	149,24	1,44	3,62	29,68	0,09	36,82	1622,26	1630,48	0,13	0,64
HP	1:1,2:0,8	156,08	1,48	2,10	16,57	0,08	20,56	916,62	930,03	0,23	0,27

Ref – *Reference*; LB – *Low Brick*; HB – *High Brick*; LT – *Low Tile*; HT – *High Tile*; LP – *Low Pot*; HP – *High Pot*; d<sub>médio</sub> – Espalhamento ;  $\delta$  – Permeabilidade ao vapor de água; CC – Coeficiente de capilaridade; VA – Valor assintótico; IS – Índice de secagem; P<sub>0</sub> – Porosidade aberta; Edl – Módulo de elasticidade dinâmico; R<sub>f</sub> – Resistência à flexão; R<sub>c</sub> – Resistência à compressão.

## 4 CONCLUSÕES

### 4.1 Conclusões gerais

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a reatividade pozolânica dos resíduos da indústria cerâmica, tijolo, telha e vasos.

Foram utilizados resíduos cerâmicos disponíveis no mercado. Numa primeira fase da campanha experimental, selecionaram-se os resíduos a utilizar. Efetuou-se a moagem manual, seguida da moagem mecânica. A análise granulométrica e de baridade dos materiais utilizados já tinha sido feita por Ferreira (2011) e Duarte (2011), tendo-se verificado que a granulometria dos materiais cerâmicos era muito semelhante e, em comparação com a areia, apresentava maior percentagem de finos. Relativamente à baridade, os resíduos cerâmicos moídos apresentavam todos, um valor inferior ao da areia. Todos os agregados utilizados apresentavam baridade superior à do ligante.

Com este trabalho constatou-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, apresentando resultados a nível do desempenho face à água e mecânico, bastante satisfatórios.

Analisando de uma forma geral os resultados obtidos dos ensaios realizados, verifica-se que, a argamassa que com melhores valores de permeabilidade ao vapor de água foi a argamassa de referência seguida da argamassa com 20% de resíduos de telha, LT, apesar de todas terem apresentado valores muito semelhantes. Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, a argamassa que apresentou menor valor de coeficiente de capilaridade, logo melhor resultado, foi a argamassa com 20% de resíduos de vasos, LP. A argamassa com 40% de resíduos de vasos, HP foi a que apresentou o pior resultado. Por outro lado, as argamassas LP e de referência foram as que apresentaram melhores resultados no ensaio de secagem tendo verificado um índice de secagem menor.

Em relação aos ensaios mecânicos, é possível afirmar que a argamassa que apresentou 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.

Verificou-se, com este estudo, que, controlando a quantidade ou tipo de resíduo cerâmico, será possível formular argamassas com diferentes propriedades, em função da finalidade.

Para além da melhoria de algumas funções das argamassas, a incorporação de resíduos de cerâmica nas argamassas constitui uma mais-valia na área da sustentabilidade. Ao longo deste trabalho, foi possível verificar que existem vários estudos feitos nesta área, onde foram analisadas argamassas com diferentes traços, resíduos e granulometrias. No entanto há ainda áreas por explorar.

A reutilização dos resíduos industriais é um passo importante, a seguir nos dias de hoje. Por esta razão, considera-se importante o estudo de argamassas com incorporação de resíduos de construção e demolição. Esta utilização constitui uma vantagem não só a nível ambiental como a nível económico.

#### **4.2 Desenvolvimentos futuros**

Visto ter-se verificado um aumento ou diminuição significativos de algumas propriedades com o tempo de cura, poderá considerar-se necessário o estudo destas argamassas com tempos de cura superiores aos 120 dias estudados.

Um dos grandes problemas de incompatibilidade das argamassas de cimento ser devido à libertação de sais solúveis na presença de uma alvenaria de pedra. Embora esse não seja o caso presente, muitas vezes as argamassas de reabilitação são aplicadas em meios contaminados por sais, pelo que torna-se importante avaliar a resistência aos sais de argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica, como complemento dos estudos já efectuados.

---

## 5 BIBLIOGRAFIA

Alvarez, J; Sequeira, C; Costa, M. (2005). “Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas”. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção. Lisboa.

Botelho, P. (2003). Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: comportamento em termos de aderência e durabilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Lisboa. IST/UTL.

Cavaco, L. (2005). Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Lisboa. IST/UTL.

CEN (1999). “Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (1999,2004,2006). “Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)”. EN 1015-3:1999, A1:2004, A2:2006, European Committee for Standardization, 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, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2001a). “Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance”. EN 12664:2001, CEN, Brussels.

CEN (2001b). “Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties”. EN ISO 12572:2001, CEN, Brussels.

CEN (2002a). “Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”. EN 1015-18:2002, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2002b). “Methods of test for mortar for masonry – Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars”. EN 1015-19:2002, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2009). “Conservation of cultural property – Test methods - Determination of water absorption by capillarity”. EN 15801:2009, CEN, Brussels.

CEN (2012). “Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method” EN 998-1:2010, CEN, Brussels.

Coutinho, A. (1958) Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos, Memória 136. Lisboa, LNEC.

Coutinho, J. (2002). “Ciências de Materiais – Ligantes e agregados”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Dorrego, F; Luxán, M.; Sotolongo, R. (1998). “Los trabadillos: Origen, utilización y técnicas de preparación”. 2º Congreso Nacional de Historia de la Construcción. U. Coruña, CEHOPU. Corunha, Espanha.

Duarte, T. (2011). “Comportamento mecânico de argamassas de cal com resíduos cerâmicos”. Tese de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Elert, K.; Cultrone, G.; Rodriguez Navarro, C.; Sebastián Pardo, E. (2003) “Durability of bricks used in conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure”, Journal of Cultural Heritage. Disponível em: <<http://hera.ugr.es/doi/15059030.pdf>>

Epitácio, E. J.; Guimarães, P.; Cincotto, P. Dogoberto Barcelos SA. 2012.

Faria, P. (2004). “Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – contribuição para o estudo da influência dos ligantes”. Tese de Doutoramento da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2008). “Comparative evaluation of aerial lime mortars for architectural conservation”. J. Cultural Heritage.

Faria, J.; Torgal, F. & Jalali, S. (2011). “Desenvolvimento de Argamassas para a Reabilitação de Edifícios Antigos”. Número 39, Parte 2 – Comportamento à água. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Guimarães.

Faria, P. (2012). “Argamassas Sustentáveis”. 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

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. Coimbra.

Gaspar, S. (2011). “Análise da interface entre elementos de parede e camadas de revestimento”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa

Gibbons, P. (1997) “Pozzolans for Lime Mortars”. *The Conservation and Repair of Ecclesiastical Buildings*. Disponível em: <<http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/lime-pozzolans.htm>>

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

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, IPQ, Caparica.

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

Marques, S. (2005). “Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro. Aveiro.

Matias, G. (2008). “A influência de Resíduos de Tijolo no Comportamento de Argamassas de Cal”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil Da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Matias, G; Torres, I; Faria, P. (2010). “Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico”. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção. Lisboa.

---

Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S. (2005). “Composite materials in ancient structures”. *Cement and Concrete Composites*.

Pontes, J. (2011). “Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões”. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa

Rojas, G. (2002) “Artes de la cal”. Instituto Español de Arquitectura, Universidad de Alcalá.

Santos, S. (2005). “Degradação do betão por reacções alcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães.

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 Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Smith, M.R.; Collis (1993). “Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes”. Geological Society. England.

Sims, I.; Brown, B. (1998). “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 16 – Concrete Aggregates, 4th Ed, Butterworth Heinemann. England.

Tiago, J. (2011). “Argamassas de cal aérea com incorporação de cinzas de casca de arroz”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

Tomás, A. (2012). “Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos Cerâmicos em Substituição de Parte do Agregado”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil Da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Veiga, M. R. e Carvalho, F. (2002). “Argamassas de Reboco para paredes de edifícios antigos: Requisitos e características a respeitar”. Caderno de edifícios nº2, LNEC, Lisboa..

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

Veiga, M. et al. (2008). “Características Mecânicas de Argamassas com Incorporação de Agregados Reciclados Cerâmicos”. APAET - Mecânica Experimental. Vol. 15, 13-22.

Velho, J.; Gomes, C.; Romariz, C. (1998). “Minerais Industriais”, Universidade de Aveiro. Portugal.

Velosa, A. (2006). “Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas”. Tese de Doutoramento, Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Aveiro.