



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

Argamassas de Cal Hidráulica Natural com Incorporação de Resíduos de Mosaico de Barro Vermelho

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

Autor

Ana Margarida Moreira Raimundo

Orientador

Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

Professor Doutor António José Barreto Tadeu

Colaboração Institucional



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

Coimbra, Setembro, 2013

Agradecimentos

Agradeço o incondicional e inestimável apoio que os meus orientadores, Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e Professor Doutor António José Barreto Tadeu disponibilizaram ao longo da realização deste trabalho.

Ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção da Universidade de Coimbra, ITeCons, e a todas as empresas que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

À Eng.^a Gina Matias pela disponibilidade e incansável apoio prestado, bem como aos restantes colaboradores do ITeCons que privaram comigo durante estes meses de trabalho.

Agradeço igualmente ao Eng.^o Freddy Trindade, Eng.^a Ana Santos, Eng.^o Nelson Marques e Sra. D. Olinda por terem sido fundamentais à realização deste estudo.

Aos meus amigos por todo o carinho e apoio característicos de uma forte amizade.

Ao meus pais e avó pela confiança e amor.

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projeto "EXPL/ECM-COM/0928/2012"

Resumo

Os revestimentos exteriores conferem a proteção do suporte, formando uma barreira às ações externas. Assim, devem possuir características fundamentais para um bom desempenho, com propriedades mecânicas e higrotérmicas adequadas.

Na antiguidade, a incorporação de resíduos cerâmicos de barro vermelho em argamassas de cal teve como objetivo a melhoria das propriedades mecânicas, físicas e químicas das argamassas. Portanto, os edifícios hoje considerados como antigos apresentavam argamassas com formulações e matérias-primas diferentes das mais correntes atualmente.

A questão da compatibilização é um dos principais fatores a considerar na reabilitação de revestimentos de edifícios antigos. O revestimento de substituição deve ser compatível com o suporte e com as argamassas antigas, para ser tão durável quanto possível. Assim, deverão ser utilizadas argamassas com aparência e constituição o mais semelhante possível das originais.

A introdução de resíduos cerâmicos para além de conferir vantagens técnicas às argamassas, confere também a valorização económica e ambiental desses resíduos, promovendo o conceito de sustentabilidade. Assim a reabilitação e a sustentabilidade podem criar uma forte ligação.

Neste trabalho, pretende-se analisar a influência de resíduos de mosaico de barro vermelho incorporados em argamassas de cal hidráulica natural (NHL 3,5) e areia com traços volumétricos de 1:3 e 1:4. A incorporação dos resíduos será feita em granulometria dispersa, com substituições parciais de 20% e 40% do volume de agregado. Os resultados serão comparados com argamassas apenas de cal hidráulica natural e areia, denominadas argamassas de referência. As argamassas serão ensaiadas aos 28 dias e 60 dias, a propriedades mecânicas e higrotérmicas.

Verificou-se que as argamassas com incorporação de resíduos possuem melhores resultados aos ensaios mecânicos e higrotérmicos, com exceção da secagem e da absorção de água por capilaridade.

Abstract

The external wall coatings provide protection of support, forming a barrier to external actions. So, it should have fundamental characteristics for a good performance, with mechanical and hygrothermal properties appropriate.

In antiquity, the incorporation of waste ceramic red clay in lime mortars aims the improvement of mechanical, physical and chemical properties of mortars. Therefore, the buildings now considered old, presented mortar with formulations and raw materials different than the most current these days.

The issue of compatibility is one of the major factors to consider in the rehabilitation of old buildings wall coatings. The replacement coating must be compatible with the support and with the older mortars to be as durable as possible. It should therefore be used mortars with the appearance and constitution as similar as possible to the original.

The introduction of ceramic waste besides giving technical advantages to mortars, also provide economic and environmental valorization of such waste, promoting the concept of sustainability. Thus the rehabilitation and sustainability can create a strong connection.

In this work, it was intended to analyze the influence of waste quarry of red clay incorporated in natural hydraulic lime mortars (NHL 3.5) and sand with volumetric traces of 1:3 and 1:4. The incorporation of residues was made in dispersed granulometry, with partial substitution of 20% and 40% volume of aggregate. The results were compared with mortars only of natural hydraulic lime and sand, called reference mortars. The mortars were assayed at 28 days and 60 days, to mechanical and hygrothermal properties.

Was verified that mortars with incorporation of waste had better results to hygrothermal and mechanical tests, except for drying and water absorption by capillarity.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	viii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado do Conhecimento	4
2.1 História e evolução das argamassas.....	4
2.2 Princípios essenciais de qualidade dos rebocos.....	8
2.3 Argamassas de revestimento para edifícios antigos.....	10
2.4 Argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos.....	13
2.4.1 Introdução.....	13
2.4.2 Resíduos cerâmicos.....	15
2.5 Constituintes das argamassas	17
2.5.1 Introdução.....	17
2.5.2 Agregados.....	17
2.5.3 Ligantes	18
2.5.3.1 Introdução.....	18
2.5.3.2 Cal.....	19
2.5.3.3 Cal hidráulica natural	21
2.5.4 Água de amassadura	22
2.5.5 Aditivos.....	23
2.5.5.1 Introdução.....	23
2.5.5.2 Componentes pozolânicos	23

2.5.5.3	Cerâmica de barro vermelho como subproduto industrial moído	24
3	Análise Experimental	25
3.1	Análise de viabilidade	25
3.2	Caracterização das matérias-primas	26
3.2.1	Análise granulométrica pelo método de peneiração	27
3.2.2	Determinação da baridade	29
3.2.3	Determinação da massa volúmica e da absorção de água	31
3.3	Execução dos provetes de argamassa	33
3.3.1	Caracterização das argamassas frescas	35
3.3.1.1	Ensaio de consistência por espalhamento	35
3.3.2	Moldagem dos provetes	37
3.4	Ensaio sobre argamassas endurecidas	37
3.4.1	Ensaio mecânicos	38
3.4.1.1	Módulo de elasticidade dinâmico	38
3.4.1.2	Resistência à tração por flexão	42
3.4.1.3	Resistência à compressão	43
3.4.2	Ensaio higrotérmicos	45
3.4.2.1	Porosidade aberta	45
3.4.2.2	Absorção de água por capilaridade	48
3.4.2.3	Secagem	52
3.4.2.4	Permeabilidade ao vapor de água	55
3.5	Análise global de resultados	59
3.6	Comparação de resultados	63
4	Conclusão	65
5	Referências Bibliográficas	67

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Ciclo da Cal (Cavaco, 2005).....	20
Figura 3.1 - Resíduo cerâmico partido (a) para introduzir no moinho (b) e após moagem e peneiração (c).....	27
Figura 3.2 - Peneiros utilizados.....	28
Figura 3.3 - Caracterização granulométrica da areia e do resíduo.....	29
Figura 3.4 - Baridade do resíduo: (a) enchimento; (b) remoção do excesso; (c) pesagem.....	30
Figura 3.5- Massa volúmica e absorção de água dos agregados: (a) picnómetro com provete e água; (b) banho-maria em tina metálica; (c) pesagem do picnómetro após 24±0,5h em banho-maria; (d) pesagem do picnómetro totalmente cheio de água; (e) pormenor do cone troncocónico e pilão; (f) apiloamento.....	32
Figura 3.6 - Execução das argamassas: (a) cal hidráulica e areia; (b) cal hidráulica, areia e resíduo de mosaico; (c) mistura homogénea e manual dos sólidos; (d) misturadora mecânica.....	34
Figura 3.7 - Ensaio de consistência por espalhamento: (a) colocação da argamassa no molde metálico; (b) pancadas uniformes com pilão; (c) remoção do excesso; (d) pormenor do sistema-molde, pilão, mesa e manivela.....	36
Figura 3.8 - Moldagem dos provetes: (a) pormenor moldes circulares; (b) pormenor molde metálico e pilão; (c) compactação da argamassa; (d) remoção do excesso.....	37
Figura 3.9 - Módulo de elasticidade dinâmico: (a) pormenor do transdutor recetor; (b) pormenor do transdutor emissor.....	39
Figura 3.10 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e 60 dias, obtido por massa volúmica determinada por cubicagem.....	41
Figura 3.11 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e 60 dias, obtido por massa volúmica determinada por imersão.....	41
Figura 3.12 - Ensaio de resistência à tração por flexão.....	42
Figura 3.13 - Resistência à tração por flexão aos 28 dias e 60 dias.....	43

Figura 3.14 - Ensaio de resistência à compressão.....	44
Figura 3.15 - Resistência à compressão aos 28 dias e 60 dias.....	45
Figura 3.16 - Distinção entre material de porosidade aberta e material de porosidade fechada, respectivamente (Freitas et al, 2008).....	46
Figura 3.17 - Ensaio de porosidade e massa volúmica: (a) imersão total dos provetes; (b) pesagem dos provetes imersos; (c) pesagem dos provetes saturados.....	47
Figura 3.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) pormenor de provetes revestidos lateralmente; (b) balança, régua e cronómetro; (c) tina metálica com tampa; (d) provetes na tina com água.....	49
Figura 3.19 -Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo, aos 28 dias.....	51
Figura 3.20 - Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo, aos 60 dias.....	51
Figura 3.21 - Pormenor de provetes na câmara climática.....	53
Figura 3.22 - Evolução do teor em água ao longo do tempo, aos 28 dias.....	54
Figura 3.23 - Evolução do teor em água ao longo do tempo, aos 60 dias.....	55
Figura 3.24 - Permeabilidade ao vapor de água: (a) revestimento com borracha; (b) pormenor de isolamento fita-parafina; (c) provetes em câmara climática.....	56
Figura 3.25 - Relação $EdL-Rt$	60
Figura 3.26 - Relação $Po-C$	60
Figura 3.27- Relação $Rc-Rt$	61
Figura 3.28 - Relação Porosidade aberta-Permeabilidade ao vapor de água.....	61
Figura 3.29- Relação índice de secagem-Coef. de absorção de água por capilaridade.....	62
Figura 3.30 - Relação Índice de secagem-porosidade aberta.....	62

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição para edifícios antigos (Santos e Veiga, 2012).....	12
Quadro 2.2 - Requisitos estabelecidos para as características do comportamento à água e ao clima das argamassas de substituição para edifícios antigos (Santos e Veiga, 2012).....	12
Quadro 3.1 - Baridade das matérias-primas.....	30
Quadro 3.2 - Massa volúmica e absorção de água.....	33
Quadro 3.3 - Caracterização das argamassas em estudo.....	33
Quadro 3.4 - Ensaio de consistência por espalhamento: espalhamento e relação água/ligante.....	36
Quadro 3.5 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 28 dias e 60 dias.....	47
Quadro 3.6 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade.....	51
Quadro 3.7 - Índice de secagem e desvio padrão.....	54
Quadro 3.8 - Permeabilidade ao vapor de água, fatores de resistência ao vapor de água, espessuras de camada de ar, respetivos desvio padrão, aos 28 dias e 6 dias.....	58

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O desenvolvimento sustentável é hoje considerado como prioridade na maioria dos países desenvolvidos ou em vias de desenvolvimento, apesar de cada um deles ter uma perspectiva diferente, assentando em diversos pilares como o social, ambiental e económico. Da íntima relação entre estes pilares, enfatiza-se o aproveitamento de resíduos, a contribuição para eficiência económica e emprego e os padrões e níveis de consumo (Stevens, 2005)..

Entre 2005 e 2011 os edifícios para habitação familiar licenciados para construções novas diminuíram, verificando-se uma crescente importância na reabilitação do edificado, o que poderá dever-se à saturação do mercado e à crise económica. De facto, em 2011 cerca de 25% das obras concluídas corresponderam a reabilitações do edificado e existiam, em Portugal, 20 Sociedades de Reabilitação Urbana. Neste contexto, entende-se reabilitação do edificado como obras de alteração, ampliação e reconstrução (INE, I.P., 2012).

A sustentabilidade e reabilitação podem criar uma forte simbiose, já que pode e deve existir uma gestão de resíduos na reabilitação. O Decreto-Lei nº 73/2011 de 17 de Junho, relativo à prevenção, produção e gestão de resíduos, prevê, entre vários aspetos, a fomentação da reutilização e reciclagem de resíduos de modo à sua valorização com vantagens para agentes económicos e utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas. Assim, a gestão adequada de resíduos pode contribuir para um melhoramento do sector ambiental e económico, fomentando o conceito de sustentabilidade, com indispensável participação de todos os intervenientes na cadeia, desde Administração Pública, agentes económicos e cidadãos, enquanto consumidores e produtores de resíduos. A reabilitação pode beneficiar de reutilização e reciclagem de resíduos, estando dispostos no Artigo 3º do DL 73/2001, os conceitos de "‘Reutilização’ qualquer operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos", "‘Reciclagem’ qualquer operação de valorização, incluindo o reprocessamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento" e "‘Resíduos’ quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer". Este benefício poderá ocorrer a nível estético

do edificado a reabilitar, bem como a nível histórico, técnico e económico (DL nº73/2011, 2011; APA, I.P., 2013).

Uma das possibilidades de reciclagem de resíduos usada na reabilitação, é a utilização de argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho. A incorporação de resíduos cerâmicos de barro vermelho, tanto em granulometria fina como em grosseira, em argamassas de cal, observa-se em edifícios antigos (Matias et al, 2010), sendo que o Império Romano foi o precursor na utilização de argamassas com barro moído (Alvarez et al, 2005). Também a cal, tanto hidráulica como hidratada, foi bastante utilizada em Portugal até ao início do século XIX aquando da instalação da indústria cimenteira e por conseguinte do cimento Portland, que passou a ser usado na maioria dos rebocos (Alvarez et al, 2005).

O recurso a este tipo de resíduos cerâmicos, permite também uma melhoria a nível ambiental no que diz respeito à diminuição de extração de areia e rocha quando usados em granulometria grosseira e uma diminuição de consumo de energia no fabrico de ligante quando usados em granulometria fina. De facto, quando em granulometria grosseira, os resíduos podem desempenhar função de agregado e, quando em granulometria fina, de ligante (Matias et al, 2010).

1.2 Objetivos e metodologia

Esta dissertação insere-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. O seu objetivo é o estudo das propriedades mecânicas e higrotérmicas de argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho. Este estudo está na continuação de dissertações realizadas por outros mestrandos de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e insere-se num projeto de investigação intitulado "Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação". Tais dissertações foram efetuadas com outro tipo de resíduos de barro vermelho, como tijolo, telha e vaso, bem como com outro tipo de areia, tendo sido utilizada cal aérea e cal hidráulica natural. Estes estudos, visam contribuir para um eventual produto de reabilitação associado a aproveitamento plausível de resíduos de barro vermelho.

A incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho permitirá o estudo da sua influência em argamassas de cal hidráulica natural, tendo como base a sua comparação com argamassas apenas de cal hidráulica natural e areia, denominada "argamassa de referência". Serão analisadas argamassas de cal hidráulica natural e areia com traços volumétricos de 1:3 e 1:4. Esta incorporação de resíduos irá fazer-se em granulometria dispersa, após moagem. Assim, as partículas finas poderão desempenhar funções de pozolana e partículas de maior

dimensão de agregado. A substituição de areia por este resíduo será efetuada nas proporções de 20% e 40%. As argamassas serão analisadas aos 28 e 60 dias, com base nos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta, massa volúmica, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração por flexão e compressão.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação organiza-se em quatro capítulos.

O primeiro capítulo consiste na parte introdutória, sendo composto pelo enquadramento do tema, objetivos, metodologia e estrutura de apresentação do presente trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se o estado do conhecimento, sendo analisados cinco subcapítulos. O primeiro subcapítulo apresenta a história e evolução das argamassas, como enquadramento à importância deste estudo. No segundo capítulo são descritas regras de qualidade que os rebocos devem possuir de forma a desempenharem eficazmente as suas funções. No terceiro subcapítulo referem-se aspetos relativos à reabilitação de revestimentos, nomeadamente opções de intervenção, soluções de composições, bem como algumas considerações a ter para argamassas de substituição. O quarto subcapítulo refere alguns estudos efetuados sobre argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos, abordando a origem, problemática e aproveitamento dos resíduos cerâmicos. No quinto subcapítulo são mencionados os constituintes das argamassas, referentes às argamassas em estudo.

O terceiro capítulo descreve a parte experimental, dividindo-se em seis subcapítulos. O primeiro subcapítulo é referente à análise de viabilidade da utilização deste resíduo em estudo (mosaico de barro vermelho). No segundo subcapítulo efetua-se a caracterização das matérias-primas, sendo o terceiro subcapítulo referente à formulação das argamassas e execução dos provetes. No quarto subcapítulo apresentam-se e descrevem-se todos os ensaios laboratoriais realizados e seus resultados com breve análise crítica. O quinto subcapítulo é referente à discussão dos resultados finais, sendo feita uma análise global. Finalmente, no sexto subcapítulo efetua-se a comparação dos resultados deste desenvolvimento experimental com os resultados obtidos em outra dissertação de mestrado, em que foram utilizados resíduos de tijolo, vaso e telha incorporados em argamassas de cal hidráulica natural.

No quarto capítulo apresentam-se as conclusões finais, críticas e abordagem a trabalhos futuros.

2 Estado do Conhecimento

Devido a estudos elaborados por diversos autores, atualmente, há um amplo conhecimento da história, evolução e aspetos fundamentais deveras importante para a reabilitação e consequentes argamassas de revestimento para edifícios antigos. Também se têm desenvolvido diversos estudos de argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos.

2.1 História e evolução das argamassas

Desde os tempos mais remotos, que o homem tem necessidade de se isolar em espaços, com vista ao seu bem-estar e defesa. Assim, inicia-se uma evolução do processo construtivo a nível de elevação de paredes e seu revestimento, tanto interior como exterior. Os processos construtivos, variaram dependendo das matérias-primas existentes, pois em áreas com pedra utilizavam-se alvenarias de pedra e em países quentes e com pouco recurso a madeira utilizavam-se lamas argilosas. Os adobes, blocos de lama secos ao sol, apesar de terem sido prática corrente no passado, conhecendo-se exemplos datados de 6500 AC em Israel e Chipre, ainda hoje são usados em muitas zonas do mundo devido a serem um material de simples aplicação e económico. A evolução dos adobes, conferida por utilização de moldes e assim uniformização de volume e forma, permitiu à alvenaria ter uma melhor consistência. Devido aos adobes serem pouco permeáveis às águas pluviais, começaram-se a usar lamas argilosas, por vezes com incorporação de pequena percentagem de areia, como revestimento. A cozedura de tijolos veio como evolução da secagem dos blocos ao sol, havendo registo de tijolos cozidos de 3500 AC. Este tipo de processo permitiu uma melhoria na impermeabilização, sendo que a sua qualidade dependia do tipo e finura da argila bem como da temperatura de cozedura e arrefecimento. De facto, a cozedura tinha que ser lenta já que não se conseguiam temperaturas de cozedura próximas dos 1000 °C. Obviamente, o processo de cozedura evoluiu de modo a se atingirem temperaturas mais elevadas, recorrendo a combustíveis com maior poder calorífico e fornos mais elaborados (Alvarez, 2007).

As primeiras argamassas conhecidas têm mais de 10 000 anos de existência, localizando-se no atual estado de Israel. Datando de 8 000-7 000 AC, há presença de cal e gesso nas construções em Jericó e gesso como reboco na Turquia. Na Índia, verifica-se a utilização de uma argamassa hidráulica datada de século II AC. Do mesmo período e numa região próxima, encontra-se uma argamassa constituída por cal, areia, pó de tijolo, açúcar e resina natural. Mas foi nas obras hidráulicas, como aquedutos, cisternas e portos, que os Gregos foram notáveis no uso de pozolanas naturais na produção de argamassas. De facto, em 1500 AC na

ilha de Santorini, ocorreu uma das maiores erupções vulcânicas de sempre, com produção de pozolanas naturais de grande qualidade. Mais tarde, devido à atividade do Vesúvio, em Pozuoli abundavam pozolanas. Foi neste local, onde os Gregos se tinham instalado, que as pozolanas começaram a ter mais estatuto, devendo a sua designação ao nome desta localidade. Estas pozolanas foram usadas nas suas obras hidráulicas devido a estes conhecerem as suas propriedades. Os Gregos também utilizaram pedra pomes, como pozolana de baixa densidade, sendo um dos exemplos mais notáveis uma cisterna datada de 500 AC. Esta contém argamassas de agregados siliciosos e calcários com curvas granulométricas diferentes, contendo como ligantes cal e terras vulcânicas. Estas argamassas revelam excelentes resistências mecânicas, baixa porosidade e elevada flexibilidade. Pode-se afirmar que os Gregos foram expeditos na utilização de argamassas hidráulicas devido ao conhecimento das suas propriedades inibidoras à passagem de água. Também por volta do século IV AC, uma tribo árabe controlou a rota de comércio entre a Arábia e Síria, desenvolvendo Petra e usando sistemas hidráulicos, à base de argamassas hidráulicas, para conservação de água em cisternas e canais para sua distribuição, ainda hoje visíveis. Esta argamassa hidráulica, à prova de água, foi desenvolvida com sílica de elevada finura, existente em grandes depósitos no deserto, e cal viva queimada em pequenos fornos. Assim, vários cientistas têm analisado algumas argamassas hidráulicas datadas de antes de Cristo por terem propriedades excepcionais quando comparadas com os cimentos Portland atuais. Esta excelência é motivada pelas características das pozolanas de Santorini, usadas como ligantes, obtendo boas características de resistência física e química (Alvarez, 2007).

Os Romanos usaram na sua construção os conhecimentos da elevada resistência das argamassas hidráulicas, com a introdução de pozolanas naturais ou artificiais. A junção de pozolanas antes do cozimento da cal originou argamassas mais duradoiras. Devido às exigências da sociedade e postura religiosa, ocorreram modificações nos processos construtivos e tecnológicos. Tais alterações evidenciam-se no uso de fundações retangulares de maior dimensão, feitas de mistura de cascalho e ligante hidráulico; na introdução do arco e consequente diminuição de elementos verticais de suporte como as colunas e no uso de argamassas de material pozolânico e cal. De facto, as construções contemplando apenas cal como ligante, executadas na Roma popular, eram mais frágeis que as construções públicas e do Império que empregavam estas argamassas mais elaboradas contendo cal e pozolanas. Assim, os Romanos construíram edifícios de grande porte, com grandes espaços e vãos interiores, devido às propriedades de elevada resistência mecânica e redução da porosidade das argamassas de revestimento utilizadas. Tais características devem-se à estabilidade dos silicatos de cálcio, que provêm das pozolanas, que contêm alumina, sílica e cálcio, quando em contacto com o hidróxido de cálcio, sendo este proveniente da reação química da cal não carbonatada com água. Mas os Romanos utilizavam outros aditivos para melhorar as características das argamassas, conhecendo-se atualmente mais de 240 aditivos orgânicos.

Salientam-se os aditivos usados para melhorar a aderência das argamassas (caseínas e algumas colas naturais), para repelir a água (sebo de boi e cera de abelhas), como introdutores de ar (cerveja e urina -ureia-) e para retardar entrada de água nos rebocos (ovos e borras de azeite). Também a elevada qualidade das argamassas romanas se deviam à introdução de produtos além da cal apagada, como areia vulcânica ativa, pozolana artificial obtida de telha de barro moída e argila caolítica calcinada a cerca de 800 °C. As argamassas poderiam assim ter várias composições, destacando-se a argamassa mais genérica, à base de cal misturada com areia e pozolana, ou pedaços de tijolo ou turfa; argamassa de cal com pedaços de tijolo e a argamassa preferencialmente utilizada em trabalhos marítimos contendo um tipo de areia, argila caolítica, que se caracterizava pela enorme dureza. Pode-se então afirmar que os Romanos conseguiram melhorar as argamassas à base de cal, com a introdução de aluminatos e silicatos reativos oriundos das pozolanas e do pó de telha, desenvolvendo notáveis obras em portos, aquedutos, canais de irrigação, banhos públicos, esgotos, pavimentos, pontes, teatros, mercados, templos e palácios muitos deles existentes atualmente. De facto, verifica-se que a fabricação de cal e sua utilização como ligante na consolidação de alvenarias e elaboração de rebocos, era familiar à maior parte dos povos da antiguidade, como por exemplo, chineses, egípcios, etruscos, fenícios, gregos, incas e romanos (Alvarez, 2007; Alvarez et al, 2005).

Devido a problemas económicos que resultaram do fim do Império Romano, a cal começou a ser integrada em menor percentagem, por ser o elemento mais caro, traduzindo-se em argamassas de pior qualidade. Surgiram assim argamassas com mais areia e argila, que se prolongaram pela Idade Média, verificando-se a sua utilização em catedrais europeias importantes. Porém, foram descobertas grandes extensões de turfa na Alemanha, que foram procuradas pelos Holandeses durante o século XVII. Estes moíam-nas obtendo produtos do tipo das pozolanas, utilizando-os em argamassas para construções portuárias. Mais tarde, foram importados para a Grã-Bretanha, tornando-se as novas pozolanas da época. Nos séculos V, VI e VII as argamassas de cal eram mais fracas que as romanas. No século VIII o gesso é introduzido pelos árabes na Europa. Estes, eram detentores de elevada técnica construtiva, trazendo assim importantes modificações a nível de argamassas. O gesso passou a ser bastante usado na Europa, sendo por vezes misturado com uma espécie de cola de modo a formular-se um material semelhante ao estuque. As argamassas do século VIII na Península Ibérica eram constituídas por gesso, cal viva, areia calcária e aditivos, como gorduras de animais, ceras e resinas. Estas argamassas eram usadas para juntas, estuques e rebocos tanto interiores como exteriores, indicando o conhecimento, por parte dos árabes, do processo de hidrofugação do gesso, impedindo que os sulfatos se dissolvessem com a água. Assim, é possível afirmar que desde a antiguidade até ao século XIX, os materiais usados na constituição das paredes acumulavam a função de resistência e de proteção aos agentes atmosféricos e eram mais deformáveis e porosos do que atualmente, exigindo grandes espessuras e permitindo a entrada de água para o interior e facilitando a sua saída (Alvarez et al, 2005).

No ano de 1812, descobre-se que a cozedura de calcários siliciosos provoca a dissolução da sílica dos ácidos e a sua combinação com a cal, concedendo-lhe propriedades hidráulicas. Esta descoberta iria ser estudada com rigor, compreendendo-se o mecanismo que leva ao endurecimento da cal com pozolanas e do cimento. Tal avanço denota-se bastante importante, já que no século XVIII a Inglaterra, sendo a primeira potência mundial, desenvolvia-se economicamente pela circulação marítima e assim necessitava de melhorar as suas instalações portuárias com base em argamassas hidráulicas. Estas argamassas tinham que ter a capacidade de endurecer debaixo de água e após estudos verificou-se que a presença de argila no calcário proporcionava uma melhoria do produto, após a sua calcinação. De facto, em 1826 perto de Paris, nasce a primeira fábrica de cal hidráulica artificial, sendo o seu êxito comercial limitado devido à sua fabricação de argila e calcário ser mais cara que a fabricação a partir de calcários margosos. Contudo, utilizando fornos mais sofisticados que podiam atingir os 1000°C, melhorando-se os níveis de hidraulicidade, o fabrico de cal hidráulica sofreu uma melhoria. Em 1825, Inglaterra, verifica-se um enorme desenvolvimento no fabrico de cimento, cuja formulação foi patenteada. Tal formulação apenas se devia a um novo processo de aquecimento dos fornos, que permitia temperaturas mais altas e assim obter uma zona de clinquerização. No entanto, em 1853, França, foi patenteado um novo produto, um cimento hidráulico artificial análogo ao inglês. Tal cimento consiste numa homogeneização da matéria-prima que é moída, em moinhos verticais, e adicionada a água de modo a se obter uma pasta plástica. Assim, o cimento Portland artificial de exclusivo fabrico inglês, passa também a ser fabricado em França. O seu acréscimo de fabrico, as suas características e aumento de vendas de betão, causaram um decréscimo do mercado de cal hidráulica (Alvarez et al, 2005).

No início do século XIX ocorreu a instalação da indústria cimenteira em Portugal. O cimento Portland passou a ser usado na maioria dos rebocos de enchimento e acabamento, como ligante hidráulico, substituindo na maioria das obras a cal hidráulica e cal hidratada. Assim, o cimento Portland passa a ser utilizado como único ligante hidráulico das argamassas. Com o uso deste produto, evita-se o armazenamento em estaleiro de outros ligantes e diminui-se o tempo de presa, abreviando-se o prazo da obra. Relativamente aos agregados, estes continuaram a ser saibros ou areias amarelas, contendo por vezes elevadas percentagens de argila. Contudo, o uso de um único ligante hidráulico, cimento Portland, originou algumas desvantagens, como a fissuração. Tal deve-se ao facto de as argilas apresentarem estrutura lamelar com pequenas partículas de grande superfície específica, que em contacto com a água formam uma película que constitui barreira à boa cristalização dos componentes hidratados de cimento. Também o fenómeno de fissuração se deve ao facto de a arte de misturar saibros em quantidade adequada se ir perdendo, criando argamassas mais rígidas, com resistências mecânicas muito elevadas e de trabalhabilidade reduzida, causando retração do reboco. O uso

de areia de rio como agregado reduz a possibilidade de fendilhação, mas piora a trabalhabilidade. Assim, o uso de apenas um ligante hidráulico e de um único agregado, não contribui favoravelmente para a qualidade das argamassas. De notar que frequentemente é adotado um traço com exagerada percentagem de cimento, conduzindo a uma retração bastante acentuada e conseqüente fissuração. Devido a exigências de qualidade e de rapidez de execução, entre 1950 e 1960 na Europa Central e Estados Unidos, verificou-se o surgimento de uma nova indústria, a das argamassas formuladas em fábrica, secas e prontas a aplicar. Esta nova indústria desenvolveu uma vasta gama de produtos com maior grau de especialização (Alvarez et al, 2005).

2.2 Princípios essenciais de qualidade dos rebocos

As funções fundamentais dos rebocos são a regularização das imperfeições dos toscos, possibilitando a uniformização da superfície, o acabamento dos paramentos e a proteção das alvenarias, formando uma barreira às ações externas. Relativamente aos rebocos exteriores, uma das funções mais significativas é a impermeabilização das fachadas, permitindo estanquidade ao conjunto tosco-revestimento. Esta função revela-se bastante importante na degradação dos edifícios a nível de gastos nas reparações, na durabilidade das alvenarias e elementos estruturais. De facto, o humedecimento-secagem e penetração de água além de favorecer a degradação dos elementos construtivos afeta a condutibilidade térmica provocando o aumento de consumo energético e o aparecimento de condensações (Veiga, 1998).

Para os rebocos exteriores desempenharem eficazmente as suas funções, devem satisfazer algumas regras de qualidade, tais como trabalhabilidade, resistência à fendilhação, capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada, permeabilidade ao vapor de água, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com suporte, estética e durabilidade (Veiga, 1998).

Relativamente à trabalhabilidade, esta deve ser adequada de modo a permitir uma fácil aplicação, possibilitando uma boa aderência, compacidade e bom rendimento. Esta pode ser melhorada com o aumento do teor de finos das areias utilizadas, aumento do teor de ligante e aumento da quantidade de água de amassadura, mas que podem ter conseqüências gravosas em outros aspetos. Assim, é preferível aperfeiçoar a trabalhabilidade com o uso de uma mistura de cal ou da incorporação de adjuvantes como plastificantes e introdutores de ar (Veiga, 1998).

A resistência à fendilhação depende da capacidade da argamassa resistir a tensões de tração introduzidas pela restrição de retração, conferidas principalmente pela aderência a um suporte

relativamente rígido e pela intensidade dessas tensões. A tendência para fendilhação por retração é tanto maior quanto mais elevada for a retração e a relação módulo de elasticidade-resistência à tração. A retração pode ser evitada usando cimentos diferentes do Portland, bem como usando cal como ligante, adjuvantes nomeadamente introdutores de ar e retentores de água, aditivos designadamente resinas, inertes leves e fibras ou redes. A qualidade das argamassas à fendilhação pode ser melhorada através de uma boa aderência ao suporte possibilitando uma eficiente distribuição de tensões e a uma retenção de água elevada permitindo uma diminuição de dessecação prematura das argamassas. Também o modo e condições de aplicação das argamassas, características e deformações do suporte e grau de exposição a agentes atmosféricos por parte do revestimento, influenciam a fendilhação (Veiga, 1998).

A capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada deve-se à capacidade de resistir à penetração, até ao suporte, da água proveniente do exterior, bem como à capacidade de permitir a sua eliminação rápida por secagem. As argamassas e alvenarias são materiais de porosidade aberta, permitindo assim a permeabilidade e capilaridade, dependendo das dimensões dos poros, capilares e pressão de água. Para uma boa capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada, deveria aliar-se uma permeabilidade à água e capilaridade reduzidas a uma elevada permeabilidade ao vapor de água, verificando-se nos rebocos tradicionais uma menor permeabilidade à água associada a uma baixa permeabilidade ao vapor de água (Veiga, 1998).

Relativamente à permeabilidade ao vapor de água, esta deve ser elevada no reboco e na pintura aplicada sobre este. Esta propriedade é importante porque dela depende a capacidade de evaporação da água infiltrada através de fendas ou zonas particulares nomeadamente remates e vão, bem como da água absorvida pelo reboco e da água utilizada na execução de alvenarias e rebocos, logo que as condições atmosféricas o possibilitem. De facto, as condições higrotérmicas são influenciadas pela permeabilidade ao vapor de água, já que devido à ocupação dos espaços interiores, há libertação de vapor de água, que em determinadas condições dá origem a condensações. Por ensaios realizados, outros fatores como a tinta, traço da argamassa, tipo de ligante, areia utilizada e tipo de cura influenciam a permeabilidade ao vapor de água, parecendo concluir-se que argamassas com alto teor de cimento e argamassas com areia muito argilosa são menos permeáveis ao vapor de água (Veiga, 1998).

A boa aderência ao suporte é indispensável para a função de impermeabilização do revestimento e influencia a sua resistência à fendilhação, condicionando a durabilidade. A aderência das argamassas tradicionais deve-se à penetração capilar da água da amassadura nos poros do suporte. Esta migração arrasta os elementos mais finos da argamassa, sendo a

aderência tanto melhor quanto mais eficazmente se criar uma pasta capaz de penetrar facilmente nos poros da alvenaria e conseqüente endurecimento rápido. Assim, a aderência é maior com o aumento do teor de cimento e com a sua finura bem como com areias mais argilosas. Contudo, a aderência ao suporte também é influenciada pela natureza do suporte e sua preparação. A capacidade de absorção do suporte não deve ser excessiva nem demasiado baixa, já que pode dessecar facilmente o revestimento impedindo assim a hidratação dos seus constituintes e pode impedir o mecanismo de penetração da pasta nos poros da alvenaria, respetivamente. Para melhorar a capacidade de aderência pode recorrer-se à aplicação de primários, ao processo de picar o suporte de modo a aumentar a rugosidade, já que os suportes rugosos permitem uma melhor ligação mecânica que os lisos, ou ao humedecimento prévio evitando uma absorção muito rápida da água da argamassa (Veiga, 1998).

Relativamente à resistência aos choques, os revestimentos de ligantes minerais aplicados sobre suportes de alvenaria de tijolo, blocos de betão de inertes correntes e de pedra, asseguram à partida valores razoáveis de resistência. Contudo, quando os revestimentos de pouca espessura, geralmente de ligante misto ou hidráulico com adjuvantes, são aplicados sobre suportes de pouca resistência aos choques, nomeadamente suportes isolantes, a resistência aos choques diminui. Tal pode ser minorado com a aplicação de redes metálicas, de fibra de vidro ou materiais sintéticos ou fibras dispersas na massa (Veiga, 1998).

O aspeto estético tem cada vez mais influência na qualidade de vida das populações sendo considerado como parte de poluição urbana. Assim, o revestimento exterior com fendilhação generalizada mesmo que muito fina ou fendas localizadas é esteticamente penalizador, bem como com mancha brancas originadas por eflorescências, com falta de homogeneização visual entre juntas e tijolos ou blocos e com escorrimentos de água das chuvas que arrasta a sujidade da poluição atmosférica. Também a rugosidade, tipo de acabamento e textura do revestimento têm que respeitar a harmonia da idade e estilo do edificado bem como a inserção no conjunto urbanístico (Veiga, 1998).

A durabilidade do revestimento reflete-se no aspeto estético. Esta está relacionada com fendilhação, penetração de água por capilaridade, perda de aderência e ataque de sais entre outras (Veiga, 1998).

2.3 Argamassas de revestimento para edifícios antigos

A reabilitação de edifícios antigos engloba diversos fatores. Diferentes épocas e diferentes locais de construção implicam diferentes conhecimentos e técnicas, meios existentes na época e no local em que foram construídos e diferentes materiais e hábitos socioculturais (Couto e Couto, 2007).

Os revestimentos exteriores estando expostos, ao longo de anos ou até séculos, a diversos agentes como climatéricos, mecânicos e ambientais, apresentam expectavelmente sinais de degradação. Esta assume-se de elevada importância já que os revestimentos exteriores têm como função a proteção dos suportes face à ação da água, dos agentes climáticos, mecânicos (choque e erosão) e químicos (da poluição atmosférica e sais solúveis contidos na água dos materiais e solo). A durabilidade dos revestimentos é distinta caso seja um revestimento à base de cal e um revestimento à base de cimento, sendo a esperança de vida útil entre 150 a 200 anos e 10 a 20 anos, respetivamente (Fröschl, 1998).

A intervenção de reabilitação de um revestimento é um processo holístico, iniciando com um correto diagnóstico das suas patologias, conhecendo as suas formas de manifestação e possíveis causas. As argamassas de reabilitação, de substituição parcial ou integral de revestimento, devem ser tão duráveis quanto possíveis bem como compatíveis com as argamassas antigas e suporte, para evitar danos diretos ou indiretos nos materiais que têm de proteger. Devem igualmente acautelar a importância do aspeto estético de modo a não desvirtuar os traços e autenticidade histórica e patrimonial. A solução adotada também deverá ser económica, eficaz e de fácil execução.

Segundo Veiga (2003a), destacam-se quatro grandes opções de intervenção sobre um revestimento degradado sendo elas, da mais à menos desejável, a conservação do revestimento antigo com recurso a operações de manutenção e de reparação pontual, através de limpeza, tratamento com biocidas, colmatação de fendas, etc.; a consolidação do revestimento existente, sendo uma opção de elevados custos e apenas viável quando aplicada a revestimentos com valor histórico ou artístico ou devido a raridade da técnica e material; a substituição parcial do revestimento, através do recurso a revestimentos semelhantes aos antigos e substituição integral do revestimento quando as anomalias são de elevada severidade.

A formulação da composição de uma argamassa de revestimento é um processo iterativo sendo, segundo Veiga (2003), constituído por diversos passos. São eles a determinação da constituição aproximada da argamassa existente bem como das suas características físicas e mecânicas; formulação de uma argamassa semelhante em termos de aparência e constituição; realização de ensaios para verificação de requisitos; correções da formulação de modo a se obterem características semelhantes; realização de painéis experimentais em obra e proceder a correções da formulação experimentada se necessário. Este processo pode ter necessidade de ser reduzido caso a reabilitação seja de menor interesse histórico ou patrimonial ou caso escasseie tempo, material ou orçamento.

Estudos de argamassas antigas e de argamassas de cal preparadas em laboratório, possibilitaram definir exigências de compatibilidade gerais para argamassas de revestimento da maioria das paredes de alvenaria irregular nacionais, segundo Santos e Veiga (2012). Tais requisitos, apresentados no Quadro 2.1 e Quadro 2.2, são válidos para os casos em que não é possível caracterizar completamente os materiais de suporte e as argamassas existentes.

Quadro 2.1 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de substituição para edifícios antigos (Santos e Veiga, 2012)

Argamassa	Características Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à retração restringida			
	Rt	Rc	E		F _{máx} (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,20 - 0,70	0,40 - 2,50	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Reboco interior								
Juntas	0,40 - 0,80	0,60 - 3,00	3000 - 6000	0,1 - 0,5 ou rotura coesiva pela junta				

Rt-Resistência à tração por flexão; Rc-Resistência à compressão; E-Módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância; F_{máx}-Força máxima induzida por retração restringida; G-Energia de rotura à tração; CSAF-Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda; CREF-Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação

Quadro 2.2 - Requisitos estabelecidos para as características do comportamento à água e ao clima das argamassas de substituição para edifícios antigos (Santos e Veiga, 2012)

Argamassa	Ensaio clássico		Ensaio com o humidímetro			Envelhecimento artificial acelerado
	SD (m)	C (Kg/m ² .min ^{1/2})	M (h)	S (h)	H (mv.h)	
Reboco exterior	< 0,08	1 - 1,5	> 0,1	< 120	< 16 000	Médio: degradação moderada nos ciclos água/gelo
Reboco interior	< 0,10	-	-		-	
Juntas		1 - 1,5	> 0,1		< 16 000	

SD-Espessura da camada de ar de difusão equivalente; C-Coeficiente de capilaridade; M-Atraso na molhagem; S-Período de humedecimento; H-Intensidade de molhagem

As argamassas cimentícias usadas atualmente nas construções, apesar de terem a vantagens como a fácil preparação, aplicação e rápida secagem, não devem ser aplicadas como argamassas de reabilitação em edifícios antigos. Isto porque em vez de promoverem a

prevenção e estagnação da degradação, irão acentuá-la (Fröschl, 1998). Esta degradação irá ocorrer devido à grande retração do cimento Portland, bem como à elevada presença de alcális que em contacto com água originam sais solúveis. Estes sais são transportados para o interior da alvenaria, expandindo e assim contribuindo para a degradação das paredes e revestimentos. Igualmente, segundo Cavaco (2005), este tipo de argamassas são menos porosas, promovendo maior capacidade de impermeabilização ao vapor de água e assim não permitirem a evaporação de água presente no paramento. Tal retenção de água poderá originar diversas patologias como a condução de água até ao paramento interior podendo danificá-lo, o aumento da condutibilidade térmica da parede, o aumento de condensações, o aparecimento de fungos e a dissolução de sais.

2.4 Argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos

2.4.1 Introdução

Na antiguidade incorporaram-se resíduos cerâmicos nas argamassas, por estes conferirem características hidráulicas devido à elevada pozolanicidade. Estas argamassas têm a característica de ganharem presa com a presença de água e de possuírem melhores características mecânicas. Tal conhecimento revela-se importante para formulação de argamassas de reabilitação, bem como para o aproveitamento racional de resíduos de modo a privilegiar o ambiente e a economia, promovendo a sustentabilidade. Devido à necessidade de adquirir conhecimentos sobre argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos, têm-se desenvolvido inúmeros estudos.

A caracterização de tijolo utilizado como agregado em rebocos e argamassas históricas de cal e tijolo, efetuada por Böke et al (2006), teve como estudo a recolha de amostras de reboco de tijolo e cal, uma amostra de reboco de uma cúpula e amostras de tijolos utilizados na construção da cúpula. Tais amostras provinham de três edifícios de banho Otomanos, datados de século XIV e XV na Turquia, e continham tijolo ou resíduos de tijolo. Com base nos resultados, os autores concluíram que os resíduos de tijolo utilizados nas argamassas possuíam boa pozolanicidade, contrariamente aos tijolos utilizados na construção da cúpula, que testemunharam ter baixa pozolanicidade e composições químicas e mineralógicas diferentes dos tijolos utilizados nas argamassas. Assim, concluíram que os tijolos utilizados na construção da cúpula e na incorporação do reboco de tijolo e cal, não eram os mesmos. Portanto, o fabrico de rebocos e argamassas hidráulicas tinham que ter como base a escolha intencional de tijolos com características pozolânicas.

O estudo sobre a caracterização das argamassas romanas de Conímbriga, efetuado por Velosa et al (2007), baseou-se em amostras recolhidas em diferentes locais das ruínas de Conímbriga.

Os autores concluíram que todas as amostras possuíam areia de quartzo como agregado e cal como ligante. Depararam-se com partículas cerâmicas moídas, provavelmente introduzidas com o intuito de criar reações pozolânicas entre as partículas mais finas e a cal e com partículas cerâmicas de maiores dimensões que introduziriam ar de modo a permitirem um processo de carbonatação mais eficiente. Encontraram também alguns grãos de calcite que sugere uma cozedura da matéria-prima a baixas temperaturas e verificaram que os resíduos foram homogeneizados antes da cozedura.

Estudo relativos à incorporação de resíduos cerâmicos em granulometria fina funcionando como pozolanas e em granulometria extensa substituindo parte do agregado, têm sido efetuados de modo a averiguar o comportamento higrotérmico e mecânico das argamassas.

A análise do comportamento de argamassas de cal viva micronizada, com adição de resíduos de tijolo em granulometria fina, como pozolanas, e em granulometria extensa, como agregado, mencionada por Matias et al (2010), pretendeu comparar o desempenho deste tipo de argamassas com argamassas de referência, mais tradicionais de cal e areia e de cimento e areia. Determinaram-se também as propriedades mecânicas bem como a permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por capilaridade. Concluiu-se que em quantidades adequadas de cal e areia, com pó e/ou grão de tijolo, as argamassas podem ter desempenho favorável como argamassas de revestimento de substituição.

As argamassas, de cal aérea e cal hidráulica, contendo resíduos de tijolo, vaso e telha de barro vermelho, foram comparadas com argamassas de referência (sem resíduos). O traço volumétrico estudado foi de 1:3, de cal e agregado. Fazendo substituição de agregado por resíduos nas proporções de 20% e 40% e usando cal aérea como ligante, Ferreira (2011) concluiu que em relação ao comportamento higrotérmico, as argamassas com incorporação deste tipo de resíduos têm desempenho global bastante satisfatório para reabilitação de revestimentos de edifícios antigos. Duarte (2011) concluiu resultados análogos em relação ao comportamento mecânico das mesmas argamassas. Tomás (2012) conclui que há melhorias em relação ao comportamento mecânico e à permeabilidade ao vapor de água com incorporação deste tipo de resíduos. Cruz (2012), analisando argamassas nas mesmas condições mas com cal hidráulica natural (NHL3,5), conclui que as argamassas com incorporação destes resíduos possuem comportamento higrotérmico mais adequado. Relativamente à incorporação de resíduos cerâmicos em granulometria fina em argamassas de cal aérea, ao traço volumétrico 1:3 de cal e agregado e substituindo o ligante por resíduos em 10% e 20%, Silva (2012) concluiu que esta incorporação é uma solução satisfatória quando comparada com argamassas de referência.

Em argamassas de cimento, a utilização de resíduos cerâmicos como substituinte de agregado pode ser eficiente já que, segundo Binici (2006), há uma diminuição do desgaste e aumento da resistência à compressão das argamassas.

Relativamente a argamassas de cimento e areia com incorporação de resíduos cerâmicos de barro vermelho, nas vertentes de redução do teor de cimento, incorporação de finos e substituição de percentagem de areia, estas podem resultar em argamassas de igual ou melhor desempenho aquando comparados com argamassas sem resíduos (Veiga et al, 2012).

O comportamento de argilas cozidas utilizadas como agregados pozolânicos em argamassas de intervenção, obteve resultados positivos para argilas cozidas entre 500 e 700°C, segundo Akkurt et al (2006). De modo análogo, Baronio e Binda (1997), concluíram que os tijolos italianos atuais não são aconselháveis como agregados ou pozolanas em argamassas, devido a serem cozidos a temperaturas elevadas ou por possuírem pouca argila e outros materiais na sua constituição. Concluíram igualmente que a temperatura e duração da cozedura dos tijolos devem ser cuidadosamente escolhidas, como função dos minerais constituintes das argilas.

2.4.2 Resíduos cerâmicos

Em Portugal, o sector da construção é aquele que, em termos quantitativos, mais resíduos produz destinados a aterro. Estes resíduos são denominados de resíduos de construção e demolição, RCD, e são uma problemática atual já que maioritariamente são encaminhados para aterro sem que haja uma valorização dos mesmos. Os materiais cerâmicos e betão, fragmentados e misturados, são os RCD produzidos em maiores quantidades. Estes correspondem a cerca de 50% do peso total dos RCD e provêm tanto da construção como da demolição. Quando se analisa a quantidade produzida apenas na demolição, a percentagem tende a aumentar (Silva, 2010).

Os materiais cerâmicos devido a requererem pouca manutenção, possuírem elevada durabilidade e terem potencial para a reciclagem ou reutilização, podem ser considerados como materiais sustentáveis. De entre os materiais cerâmicos que resultam de demolição de edifícios, salientam-se os azulejos, porcelanas, telhas e tijolos. Os tijolos são os materiais com maior percentagem, já que a alvenaria de tijolo representa cerca de 50% da quantidade de material utilizado na construção (Silva, 2010).

O processo de demolição, até há pouco tempo, era considerado como um processo pouco técnico, em que apenas a rapidez de execução era tida em conta. Este tipo de demolição, apontada como demolição tradicional, resultava em resíduos de materiais variados e misturados, em que a separação era árdua e morosa, não possibilitando uma separação

eficiente para o aproveitamento de resíduos, conduzindo a um encaminhamento para aterro. Os resíduos de demolição são muito distintos quanto à sua constituição e quantidade, já que dependem da época, local e finalidade do edificado, o que os caracteriza como tendo grande heterogeneidade (Silva, 2010).

A demolição seletiva, também denominada por desconstrução, consiste numa separação preliminar dos diferentes materiais com potencial a serem reaproveitados, antes da demolição da estrutura principal do edificado. Esta seleção deve ser realizada com base nas características de cada material. Deve ser efetuada de forma controlada, criteriosa, segura, eficiente e de modo a que sejam evitadas emissões de poeiras, vibrações e ruídos. Para tal, deve ser utilizada mão-de-obra qualificada bem como instrumentos manuais, tornando o processo moroso, o que torna uma solução pouco adotada pela maioria das empresas devido a acarretar maiores custos quando em comparação com a demolição tradicional. Contudo, é a jusante deste processo que se devem considerar ganhos económicos, nomeadamente na elevada qualidade dos materiais a reutilizar ou a reciclar e assim na redução de matérias-primas consumidas, na redução dos trabalhos de seleção na estação de reciclagem, e, quando para aterro, no transporte e deposição destes (Silva, 2010).

Segundo o Decreto-Lei nº73/2011 de 17 de Junho, "prevê-se a aprovação de programas de prevenção e estabelecem-se metas de reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos, a cumprir até 2020". Este também define uma hierarquia de resíduos, referente às opções de prevenção e gestão de resíduos. Do mais desejável para o menos desejável, a hierarquia assenta na "prevenção e redução; preparação para a reutilização; reciclagem; outros tipos de valorização e eliminação".

Os resíduos cerâmicos de barro vermelho incorporados em argamassas podem ser considerados como produtos reciclados. A reciclagem, terceira prioridade hierárquica, consiste na recuperação de matérias e seu processamento com a finalidade de criar um novo produto de mercado. Este poderá ter ou não a mesma aplicação do resíduo que lhe deu origem. Contudo, um material podendo ter elevado potencial de reciclagem, pode não ser apropriado para tal se o seu reprocessamento envolver gastos energéticos e emissão de poluentes mais elevados do que a produção do produto original. Também se torna relevante a existência de mercado capaz de absorver os produtos reciclados (Silva, 2010). Assim, os resíduos cerâmicos ao serem moídos para a sua incorporação em argamassas, produzem menores gastos de energia e poluentes que a produção do produto original, tornando o seu reprocessamento viável. Contudo, ainda não há mercado suficiente para a absorção deste material como agente incorporado em argamassas, devido a desconhecimento dos agentes económicos e ainda se estarem a desenvolver estudos de viabilidade em argamassas, especialmente de reabilitação, como é o caso deste trabalho de dissertação.

2.5 Constituintes das argamassas

2.5.1 Introdução

Uma argamassa, mistura manual ou mecânica de cor uniforme, é constituída por agregados, ligante e água de amassadura, devendo esta ser adicionada após mistura dos sólidos. Podem ser introduzidos adjuvantes e aditivos de modo a promover características específicas às argamassas.

2.5.2 Agregados

Os agregados são utilizados com o objetivo de diminuir a retração da argamassa, diminuir a quantidade de ligante, aumentar a resistência à compressão, atribuir determinada coloração ao revestimento e aumentar a porosidade. O aumento da porosidade influencia o aumento da permeabilidade ao vapor de água, o aumento da resistência ao gelo e promove o favorecimento do processo de carbonatação (Cavaco, 2005).

Os agregados podem ser classificados, quanto à sua dimensão, em grossos ou finos. Os agregados finos são os utilizados em argamassas, cuja finalidade é a de conferir resistência ao conjunto e estabilidade dimensional. Consideram-se agregados finos, todas as partículas com dimensões inferiores a 4 mm, sendo que as areias utilizadas em argamassas apresentam dimensão máxima de 4,75 mm (Silva, 2012).

A granulometria, forma e origem das partículas são características do agregado que influenciam as propriedades das argamassas. Relativamente à granulometria, esta deve ser extensa e bem equilibrada, já que as partículas de maiores dimensões fornecem maior resistência à argamassa e as de menores dimensões reduzem o índice de vazios da argamassa ao serem introduzidas nos espaços vazios existentes entre as restantes partículas, devendo existir cerca de 15% de elementos finos. Assim, a necessidade de ligante diminui e consequentemente o fenómeno de retração também, mantendo a compacidade e trabalhabilidade da argamassa (Tomás, 2012; Penas, 2008). Uma areia compacta deverá ter entre 33% e 35% de vazios, segundo Cavaco (2005). Quanto à forma da partícula, quanto mais angulosa maior será a sua resistência mecânica e compacidade da argamassa, devido à menor percentagem de vazios conduzindo a menor quantidade de água de amassadura e menor quantidade de ligante, sendo a trabalhabilidade da argamassa melhor quanto mais arredondada esta for (Cavaco, 2005; Penas, 2008). A origem da areia mais utilizada em Portugal, pode ser classificada de natural, geralmente de natureza siliciosa e proveniente de

rio ou de areeiro ou fabricada por britagem de material extraído de pedreiras, normalmente de natureza calcária (Penas, 2008).

Tomás (2012), mencionando diversos autores, refere que as areias devem ser praticamente isentas de cloretos, sulfatos, matérias argilosas, terrosas, limosas e pulverulentas. Assim, antes da utilização das areias, estas devem ser limpas e lavadas, podendo-se utilizar um peneiro de malha não superior a 2mm de modo a separar partículas indesejadas como madeira e pequenas raízes. A limpeza do agregado torna-se fundamental para a aderência entre as partículas das areias e material aglomerante.

Relativamente a agregados reciclados, estes apresentam características (forma, dimensão e composição) responsáveis por influenciar o comportamento de argamassas onde são incorporados. Devido a poderem contribuir favoravelmente nas características das argamassas e também promoverem uma reciclagem de materiais, contribuindo para uma vantagem ambiental e económica, estes têm sido amplamente estudados. Como exemplo destes materiais podem-se enumerar os resíduos de demolição de betão e de alvenarias, resíduos de indústria mineira, agregados de baixa densidade ou agregados leves e resíduos da indústria cerâmica de barro vermelho (Silva 2012).

2.5.3 Ligantes

2.5.3.1 Introdução

Numa argamassa, o ligante tem como função reagir quimicamente com os outros constituintes, sendo a substância mais reativa da mistura (Tomás 2012). Este, promove a aglutinação entre os vários constituintes, o que concede coesão e resistência às argamassas (Penas, 2008).

Os ligantes podem ser orgânicos, sintéticos e minerais. Os ligantes orgânicos são produtos de origem mineral, como por exemplo resinas, gomas vegetais, colas, óleos e ceras. Os ligantes sintéticos são polímeros naturais alterados ou não pelo Homem, como resinas epoxídicas, poliuretanos e silicones. Como ligantes minerais, estes podem ser artificiais e naturais, sendo os artificiais cimentos e cais hidráulicas artificiais. Os naturais podem não necessitar de transformação como as argilas ou necessitar de cozedura como o gesso, cais aéreas e hidráulicas e cimentos naturais (Cavaco 2005).

Para obter uma argamassa compacta, é necessário que a quantidade de ligante preencha o volume de vazios deixado pelos agregados. Esta é dependente da granulometria, distribuição e forma das partículas bem como da finura do ligante. O excesso de ligante pode conduzir a

maior retração e conseqüentemente a maior tendência para a fendilhação. A sua insuficiência conduz a baixa trabalhabilidade, exigindo maior quantidade de água de amassadura, tendo tendência para obter um revestimento menos compacto e menos resistente (Penas, 2008).

Neste trabalho será utilizada cal hidráulica natural (NHL 3,5), ligante de origem mineral natural com necessidade de cozedura.

2.5.3.2 Cal

As definições, especificações, critérios e avaliação de conformidade, bem como métodos de ensaio das cais de construção, encontram-se definidas nas normas NP EN 459-1:2011, NP EN 459-2:2011 e NP EN 459-3:2011 (IPQ, 2011a; IPQ, 2011b; IPQ, 2011c).

A cal provém de um processo de cozedura de matérias-primas com elevada percentagem de carbonato de cálcio (CaCO_3), geralmente rochas calcárias, conchas e rochas dolomíticas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Tomás, 2012; Faria-Rodrigues, 2004).

Quando estas matérias-primas são expostas a temperaturas de cozedura na ordem dos 900°C , o carbonato de cálcio (CaCO_3) decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) e em dióxido de carbono (CO_2) que é libertado. Esta reação denomina-se de Calcinação (Tomás, 2012).

O óxido de cálcio (CaO) originário do processo de Calcinação é comumente denominado por cal viva devido a ser altamente reativo quando em contacto com água. Portanto, convém que ocorra o processo de extinção da cal viva, através de imersão ou aspersão por água (H_2O). Tal reação origina hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e energia libertada na forma de calor, podendo atingir temperaturas de 300°C . Esta reação, denominada por Hidratação ou Extinção da cal viva, é altamente exotérmica e expansiva (Tomás, 2012).

Dependendo da quantidade de água utilizada na extinção da cal viva, a cal devidamente apagada encontra-se na forma pulverulenta ou pastosa, estando capaz de ser utilizada em obra. Após a sua aplicação, inicia-se o processo de presa, que consiste numa reação química entre o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. Esta reação origina carbonato de cálcio (CaCO_3) e libertação de água (H_2O). Este processo é relativamente lento, já que a presa inicia-se 24h após a amassadura prolongando-se durante cerca de 6 meses, denomina-se por Carbonatação. O endurecimento da cal ocorre com consumo de dióxido de carbono, anulando a sua libertação ocorrida durante a sua preparação (Tomás, 2012).

As reações sofridas pela cal podem ser traduzidas, segundo diversos autores nomeadamente Cavaco (2005), como o Ciclo da Cal, representado na Figura 2.1.

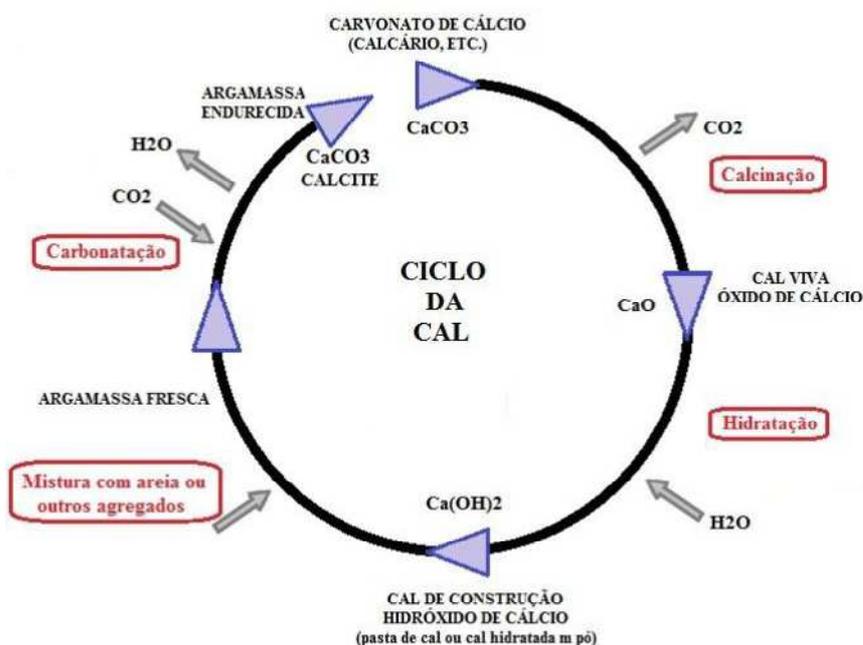


Figura 2.2 - Ciclo da Cal (Cavaco, 2005)

Contudo, o processo acima descrito é exclusivo para quando a matéria-prima é o calcário puro. O calcário, dependendo das suas características químicas, pode ser classificado como calcário puro (mais de 95% de carbonato de cálcio), originando cal aérea; calcário margoso (teor de argila entre 5% e 20% ou entre 8% e 20%, dependendo dos autores), originando cal hidráulica e como marga calcária (teor de argila entre 20% e 40%) originando cimento natural (Tomás, 2012; Miranda, 2009).

A cal aérea, relativamente aos ligantes hidráulicos como cimento Portland e cals hidráulicas não naturais, apresenta algumas vantagens fornecidas às argamassas como maior plasticidade, deformabilidade, trabalhabilidade, aderência, compatibilidade com o suporte e isenção de sais. No entanto, as resistências mecânicas e durabilidade (que nem sempre ocorre) são inferiores. Como desvantagens, também se podem referir a maior permeabilidade à água e ao vapor de água (que podem não ser consideradas desvantagens em alguns edifícios antigos), maior tempo de aplicação (técnicas de amassadura e de aplicação) e maior tempo de secagem (Tomás, 2012). Esta cal além de não ganhar presa nem endurecer em contacto com água, torna-se mais solúvel em água salgada, não podendo portanto ser utilizada em obras hidráulicas e marítimas (Miranda, 2009).

2.5.3.3 Cal hidráulica natural

A cal hidráulica, segundo NP EN 459-1:2001, pode ser estabelecida como cal hidráulica natural (NHL), cal formulada (FL) e cal hidráulica (HL). A cal hidráulica natural é classificada em NHL 2, NHL 3,5 e NHL 5, de acordo com a sua resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias de idade, segundo NP EN 459-2:2011 (IPQ, 2011a; IPQ, 2011b).

Portugal é um dos poucos países do mundo a fabricar cal hidráulica natural, sendo produzidas as cais NHL 3,5 e NHL 5 (Faria et al, 2012).

A cal hidráulica natural provém da cozedura de rochas calcárias argilosas (teor de argila entre 5% e 20% ou entre 8% e 20%, dependendo dos autores), a uma temperatura aproximadamente de 1200°C. A cal hidráulica artificial é obtida por cozedura de pedra calcária adicionando percentagem pretendida de argila (Penas, 2008; Miranda, 2009).

A cal hidráulica, ao contrário da cal aérea, ganha presa em contacto com a água e ar. Tal deve-se ao facto da cal hidráulica ser constituída por silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$), que em contacto com água (H_2O) ou ar endurecem. Também possui, pelo menos 3% , de óxido de cálcio (CaO) que continua livre e que vai endurecer por Carbonatação.

O processo de cozedura da cal hidráulica decorre em três fases, dependendo da temperatura. Dos 500 a 700°C ocorre a desidratação da argila, decompondo-se em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e ocorrendo libertação de água (H_2O); aos 850°C o calcário (CaCO_3) decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) libertando-se dióxido de carbono (CO_2) e de 1000°C a 1200°C ocorre a reação química da sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com o óxido de cálcio (CaO), originando silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$). De notar, que se a percentagem de argila e temperatura de cozedura (até 1500°C) forem maiores, a reação química é mais completa, ou seja, a quantidade de silicatos e aluminatos de cálcio aumenta, diminuindo a quantidade de óxido de cálcio livre. No extremo, as reações serão semelhantes às ocorridas no processo de fabrico do cimento (Penas, 2008; Miranda, 2009).

Após o processo de cozedura, a cal deve ser extinta através da adição de água estritamente necessária para a sua hidratação. A sua finura depende da extinção da cal viva e não da moagem, fator que distingue a cal hidráulica do cimento Portland (Miranda, 2009).

Como resultado da extinção, obtém-se pó e grappiers. Os grappiers são grãos com características de cimento, sendo separados e moídos de forma a serem adicionados ao pó, de modo a se formar a cal hidráulica capaz de ser utilizada (Miranda, 2009).

O endurecimento da cal hidráulica estabelece-se por duas reações. A primeira reação compreende a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, tanto na água como no ar. A segunda reação é a recarbonatação da cal apagada, apenas no ar e em presença do dióxido de carbono (Miranda, 2009).

A cal hidráulica tem aplicações idênticas às do cimento, mas que não exijam elevadas resistências mecânicas. Como exemplos destacam-se os rebocos de argamassas tradicionais, as argamassas para elevação de alvenarias, como matéria-prima na fabricação de argamassas pré-doseadas e nos enchimentos e acabamentos. Também é utilizada como ligante em argamassas de reabilitação, já que tendo presa hidráulica possibilita adequadas características mecânicas. A presa aérea concede propriedades físico-químicas que possibilitam a compatibilização com suportes antigos (Miranda, 2009).

As argamassas de cal hidráulica possuem diversas vantagens como a libertação lenta de água evitando retrações iniciais, serem mais compactas impedindo infiltrações, terem boa trabalhabilidade e tornarem-se mais dúcteis permitindo acompanhar as deformações do suporte (Miranda, 2009).

Nas argamassas de cal hidráulica, verifica-se uma elevada velocidade de absorção de água nos instantes iniciais. Isto deve-se a serem bastante porosas e conduz a um coeficiente de capilaridade elevado. Geralmente, a velocidade de absorção de água inicial e a quantidade de água absorvida por capilaridade vão melhorando ao longo da idade (Penas, 2008).

2.5.4 Água de amassadura

A água de amassadura permite a hidratação do ligante, possibilitando a aglomeração dos constituintes, dando origem a uma pasta. A quantidade de água a adicionar não deve ser excessiva, já que poderá originar um maior volume de vazios quando ocorre a sua evaporação, resultante da cura do material, promovendo uma retração acentuada. Caso a quantidade de água de amassadura seja insuficiente, corre-se o risco de obter uma mistura pouco homogênea, o que não é aconselhável em termos de qualidade final do produto. Portanto, esta deverá ser adicionada em quantidades necessárias para hidratar o ligante, quando ocorrem reações de hidratação e também de modo a permitir uma adequada trabalhabilidade e consistência da argamassa, tendo sempre em consideração que a resistência à compressão diminui geralmente com a porosidade e com o aumento de água (Ferreira 2011).

A água deve ser, tanto quanto possível, límpida, incolor, isenta de impurezas, tais como sais nocivos que provoquem patologias a longo prazo e de matéria orgânica que pode ser responsável pela baixa de resistência mecânica da argamassa (Ferreira, 2011).

2.5.5 Aditivos

2.5.5.1 Introdução

Como aditivos podemos enumerar fibras, cargas leves e pozolanas (Veiga, 1998).

Neste trabalho apenas será utilizada cerâmica moída (mosaico de barro vermelho), que é uma pozolana de natureza artificial.

2.5.5.2 Componentes pozolânicos

As pozolanas, naturais ou artificiais, são substâncias que reagem com hidróxido de cálcio na presença de água, originando um material aglomerante de propriedades hidráulicas (Penas, 2008; Miranda, 2009). As definições, requisitos e verificação da conformidade, estão descritas na norma NP 4220:2010 (IPQ, 2010a).

As pozolanas são de composição siliciosa ou silico-aluminosa, sendo a reação com o hidróxido de cálcio definida como reatividade pozolânica. Para que esta ocorra, a sílica e a alumina não se devem encontrar em elevado grau de cristalinidade (Grilo, 2013).

A natureza das pozolanas pode ser natural ou artificial. As naturais são de origem sedimentar ou majoritariamente de origem vulcânica (resultante de lava meteorizada). As artificiais são produzidas por tratamento térmico e moagem de materiais naturais como argilas e algumas rochas siliciosas (como o metacaulino), provenientes de cinzas da queima de produtos vegetais (como cinzas de casca de arroz), resultantes de subprodutos industriais moídos (como alguma cerâmica) ou oriundas dos processos de queima de combustíveis (Grilo, 2013).

Segundo Faria et al (2012), há reconhecidas melhorias técnicas (durabilidade), ambientais e económicas. Relativamente a melhorias ambientais e económicas, estas devem-se à substituição parcial do ligante por pozolanas. Tal, promove uma diminuição do dióxido de carbono emitido aquando do fabrico do ligante, bem como uma diminuição dos encargos de produção de argamassas devido às pozolanas serem mais económicas que os ligantes hidráulicos (Grilo, 2013). Quando se utilizam pozolanas artificiais, os ganhos ambientais refletem-se também na não deposição em aterro de resíduos.

A adição de pozolanas pode melhorar algumas características das argamassas como maior compacidade, melhor trabalhabilidade e segundo alguns autores, menor retração. Contudo, como efeitos negativos podem-se enumerar o aumento do tempo de presa e de secagem, tendo consequências económicas desvantajosas (Veiga, 1998).

2.5.5.3 Cerâmica de barro vermelho como subproduto industrial moído

Desde os tempos mais remotos que resíduos de barro vermelho são incorporados nas argamassas.

Tomás (2012), mencionando Figueiredo (1993), refere que os materiais cerâmicos de argila são geralmente denominados de materiais de cerâmica vermelha, devido a serem constituídos por óxido de ferro, o que torna o material de coloração vermelha. No entanto, existem outros materiais com cores diferentes da vermelha, não sendo sempre esta dominação a mais correta. De entre os materiais de argila distinguem-se os materiais porosos como o tijolo, telha, alguns ladrilhos e vasos e os materiais vidrados como alguns ladrilhos e alguns vasos. A argila é constituída maioritariamente por sílica e alumina e quando sujeita a elevadas temperaturas dá origem a um material frágil, de baixa ductilidade, bom isolante térmico e com grande estabilidade química. As argilas são classificadas dependendo da sua origem e constituição, sendo as mais comuns as ilites, caulinites e montmorilites (Ferreira, 2011).

Faria-Rodrigues (2004), referindo Baronio e Binda (1997; 1988), menciona que vários minerais argilosos sujeitos a temperaturas de cozedura entre os 600°C e 900°C e moídos com finura idêntica à do cimento, apresentam atividade pozolânica. O barro vermelho, quando cozido a temperaturas inferiores a 900°C possui boas propriedades pozolânicas. Contudo, nem todo o barro vermelho se torna pozolânico quando moído (na finura do cimento) e cozido nesta gama de temperaturas.

A atual produção industrial de cerâmica de barro vermelho recorre a temperaturas de cozedura entre os 900°C e os 1200°C, ou seja, a temperaturas superiores às estimáveis para a obtenção de características pozolânicas. Cada mistura de argilas, para os diferentes produtos (telha, vaso, ladrilho, tijolo), tem a sua temperatura e período de cozedura ótimos de modo a criar produtos finais fortes e duráveis (Faria-Rodrigues, 2004).

3 Análise Experimental

3.1 Análise de viabilidade

Para o presente estudo procedeu-se à recolha de mosaicos de barro vermelho não vidrados. Para tal, foram contactadas empresas fabricantes de mosaicos de cerâmica, mas apenas uma empresa com fabrico em barro vermelho, já que é a única a nível nacional em produção ativa, fabricando pelo processo de monocozedura. As restantes empresas contactadas eram fabricantes de mosaicos de cerâmica de pasta branca.

A empresa seleccionada, de modo a conhecer qual o enquadramento e interesse por este tema, promoveu uma reunião, tendo concedido gentilmente uma visita à produção de ladrilhos, e cedido resíduos de mosaico de barro vermelho não vidrado bem como informação em resposta a um inquérito.

Relativamente ao inquérito, a empresa respondeu apenas a algumas questões, servindo estas para um estudo de viabilidade sobre a incorporação deste tipo de resíduos em argamassas. Este permitiu avaliar a quantidade de resíduos produzidos e qual a sensibilidade para o aproveitamento dos seus resíduos quando incorporados em argamassas. Apresenta-se, seguidamente, a informação cedida pela empresa:

A empresa fabrica mosaicos de barro vermelho sem vidrado, com vidrado mate e vidrado brilhante, sendo os mosaicos sem vidrado uma produção recente.

A pasta usada no fabrico provém de fornecedores externos. A temperatura de cozedura, adotada pela empresa, é de 1135 °C, sendo verificada e controlada pela mesma.

Durante a produção surgem resíduos cerâmicos na forma de cacos crus e cacos cozidos, quantificando-se cerca 3,4% e 2,8%, respectivamente, face ao produto produzido. A empresa produz aproximadamente 700 ton/ano de resíduos de mosaico de barro vermelho. Relativamente ao seu tratamento, a empresa efetua valorização interna dos cacos crus e encaminha os cacos cozidos para um operador final licenciado, tendo o tratamento custos para a empresa.

Sobre a utilização de resíduos cerâmicos incorporados em argamassas de cal, possibilitando melhoria de propriedades, a empresa revelou desconhecimento. Contudo, afirmou que a

incorporação em argamassas tem vantagens a nível ambiental e económico, não sabendo se tem desvantagens.

Conclui-se, com base nas respostas, que a temperatura de cozedura utilizada pela empresa é superior à gama de temperaturas estimável para a obtenção de características pozolânicas. Porém, mesmo que a temperatura fosse compreendida entre os valores estimáveis, a composição da mistura poderia não resultar em produtos pozolânicos.

Relativamente ao aproveitamento de resíduos conclui-se que a empresa, produzindo 700 ton/ano de resíduos, revela consciência ambiental encaminhando os cacos cozidos para operador final, nomeadamente para a utilização dos resíduos como tout venant evitando o encaminhando para aterro, bem como consciência económica devido aos cacos cruz serem valorizados internamente. Estes resíduos são de baixa percentagem face ao produto produzido. De facto, a empresa reforça esta consciência ao afirmar que as argamassas com incorporação deste tipo de resíduos têm vantagens a nível ambiental e económico. Assim, verifica-se que a empresa tem perceção do conceito de sustentabilidade a estes dois níveis, apesar de desconhecer que a incorporação destes resíduos em argamassas pode melhorar as propriedades destas.

Devido à quase inexistência de produção nacional de ladrilho cerâmico de barro vermelho com conseqüente produção de resíduos em pequena escala, comparando com cerâmica branca, conclui-se que apesar da consciência de sustentabilidade, o fabrico de argamassas com este tipo de resíduos seria de pequena dimensão.

3.2 Caracterização das matérias-primas

Todo o trabalho experimental foi realizado no ITeCons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção.

Para a realização deste trabalho experimental usou-se areia e mosaico de barro vermelho não vidrado moído como agregados, cal hidráulica natural 3,5 (NHL 3,5) como ligante e água.

A cal hidráulica natural 3,5 encontrava-se em laboratório, selada e protegida da humidade, de forma a conservar as suas propriedades. Esta é certificada segundo NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011a), sendo da marca SECIL e comercializada ensacada em pó.

Relativamente à areia, esta encontrava-se armazenada em laboratório, não apresentando impurezas que pudessem influenciar os resultados. Para a sua utilização neste trabalho,

procedeu-se a peneiração manual com recurso a um peneiro de abertura de 4mm, de modo a serem eliminadas as partículas de maior dimensão.

Os mosaicos de barro vermelho, tendo sido disponibilizados intactos, foram partidos manualmente até adquirirem dimensões adequadas (Figura 3.1(a)) para serem introduzidos no aparelho de moagem. Este aparelho, moinho de maxilas (Figura 3.1(b)), foi utilizado com um crivo de 10mm, de modo a se obter uma granulometria pretendida para este agregado. Após a moagem, este resíduo foi peneirado manualmente, tendo sido rejeitado o material retido de dimensões superiores a 4mm (Figura 3.1(c)). O material passado neste peneiro foi o utilizado para todas as atividades laboratoriais seguidamente apresentadas.

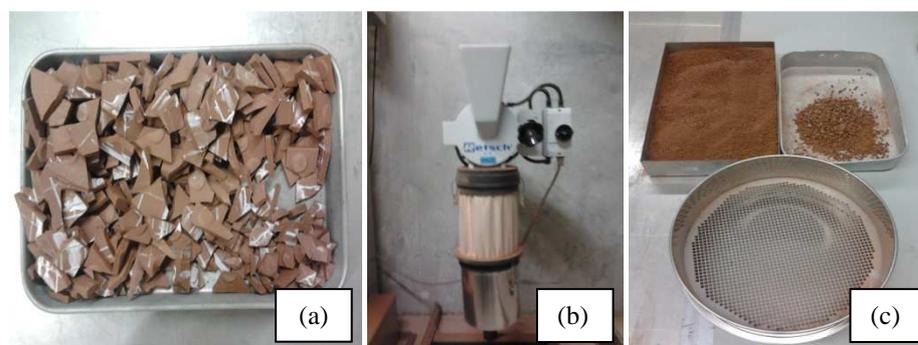


Figura 3.1 - Resíduo cerâmico partido (a) para introduzir no moinho (b) e após moagem e peneiração (c)

Relativamente à peneiração da areia e do resíduo de mosaico, rejeitou-se o material retido no peneiro de 4mm. Tal, deve-se ao facto de em argamassas antigas se encontrarem agregados de granulometria compreendida entre os 0mm e os 4mm (Santos e Veiga, 2012) e de forma a homogeneizar as amostras.

3.2.1 Análise granulométrica pelo método de peneiração

A análise granulométrica da areia já tinha sido previamente executada em laboratório com base na norma EN 933-1:2012 (CEN, 2012). A análise granulométrica do resíduo foi desenvolvida com base na mesma norma e com peneiração manual.

Com a análise granulométrica caracterizou-se a distribuição, em termos quantitativos, de cada uma das frações dimensionais do material. Para tal, passou-se o material por peneiros com abertura de dimensão decrescente (Figura 3.2), tendo-se determinado a massa retida em cada um deles. Durante a peneiração, acautelou-se que não existiria perda de material, decorrendo a peneiração em cada fração até se verificar que a massa retida não se alteraria mais do que

1%. Posteriormente, pesou-se o material retido em cada peneiro e no fundo, numa balança de precisão de 0,01 g, registando as suas massas. Finalmente, determinou-se a percentagem cumulativa da massa original, tendo sido traçada a curva granulométrica. Os peneiros utilizados possuem malha de abertura de 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm e 0,063mm, respectivamente de abertura maior para menor e são da série ISO 3310.



Figura 3.2 - Peneiros utilizados

A caracterização granulométrica dos agregados, areia e resíduo, apresenta-se na Figura 3.3, tendo sido obtida com recurso à seguinte equação:

$$\text{Percentagem cumulativa do material passado} = 100 - \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Sendo, R_i - massa do material retido em cada peneiro, em Kg;

M_1 - massa seca do provete de ensaio, em Kg.

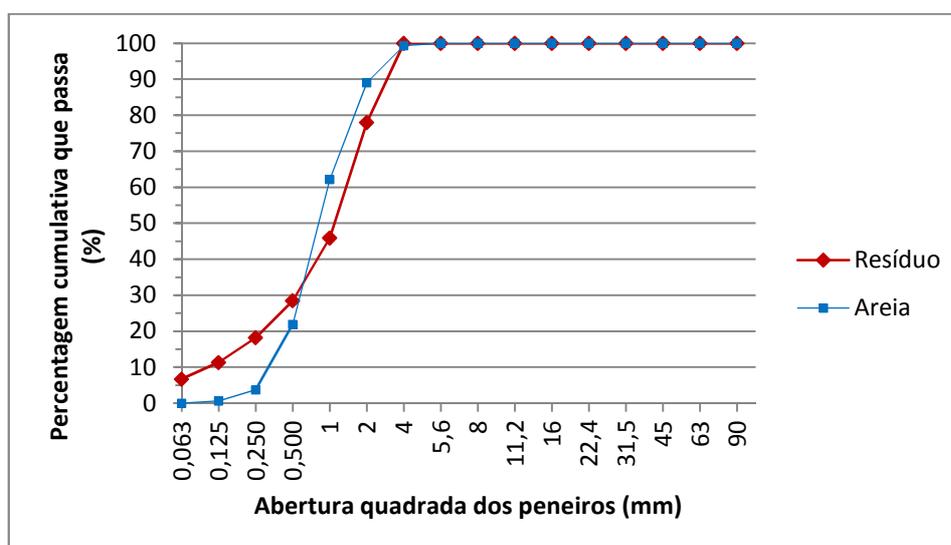


Figura 3.3 - Caracterização granulométrica da areia e do resíduo

Como se verifica, as curvas não são semelhantes, cruzando-se. Para comparação destes dois agregados, podemos verificar que a areia possui menos material fino do que o resíduo. O resíduo cerâmico apresenta 6,73% de material com dimensão inferior a 0,063mm, ou seja, material considerado fino que poderá ter propriedades pozolânicas. Tais factos vão refletir-se na granulometria da mistura, quando se substituir a areia por percentagem de resíduo, já que a mistura vai possuir mais finos que a "argamassa de referência".

3.2.2 Determinação da baridade

Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 1097-3: 2002 (IPQ, 2002). O procedimento foi apenas realizado para o resíduo, devido à baridade da areia ter sido previamente determinada em laboratório e da cal hidráulica natural 3,5 ter sido efetuada por Cruz (2012).

Para a determinação da baridade do resíduo, utilizou-se um recipiente com massa de 1343,27 g (vazio, seco e limpo) e volume de 1029,8 cm³, ou seja, 1,0298 L. Encheu-se o recipiente, deixando-se cair o material de uma altura fixa acima do bordo superior do recipiente, ou seja, com a pá apoiada no bordo superior, de modo a que a compactação por queda livre fosse constante (Figura 3.4(a)). Este processo foi lento e preciso de modo a evitar-se a libertação de pó fino constituinte do resíduo moído. Removeu-se o material excedente, tendo cuidado para não compactar nenhuma parte da superfície (Figura 3.4(b)). Seguidamente, pesou-se o conjunto recipiente com resíduo, numa balança de precisão de 0,01 g, registando-se a massa (Figura 3.4(c)). Este processo repetiu-se duas vezes, perfazendo um total de três medições. De notar que a baridade resulta da média dos três ensaios.

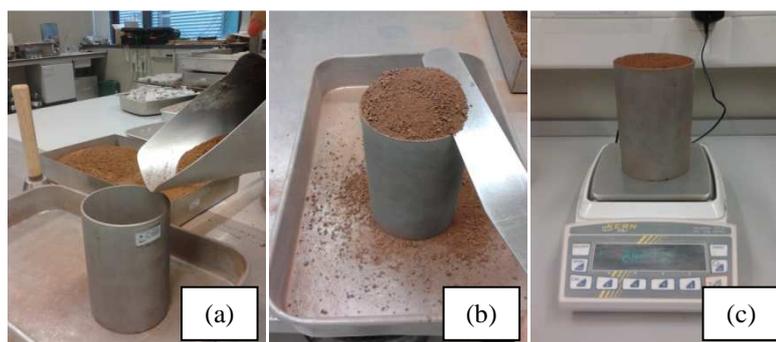


Figura 3.4 - Baridade do resíduo: (a) enchimento; (b) remoção do excesso; (c) pesagem

Os valores da baridade da areia, resíduo e cal apresentam-se no Quadro 3.1 e foram obtidos de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.2)$$

Sendo, ρ_b - baridade, em Mg/m³;

m_2 - massa do recipiente e do provete elementar, em Kg;

m_1 - massa do recipiente vazio, em Kg;

V - capacidade do recipiente, em litros.

Quadro 3.1 - Baridade das matérias-primas

Tipo de material	Baridade (g/cm ³)			Baridade média (g/cm ³)
	1 ^a pesagem	2 ^a pesagem	3 ^a pesagem	
Areia	-	-	-	1,47
Cal Hidráulica Natural (NHL 3,5)	-	-	-	0,81
Resíduo de Mosaico	1,40	1,43	1,44	1,42

Para um determinado volume, quanto menor for a baridade de um material, menor será a massa necessária para preencher esse volume. Como se pode verificar a areia tem maior baridade, embora a sua baridade e a do resíduo não sejam muito diferentes. Portanto, sendo a cal hidráulica natural a matéria-prima com menor baridade, conclui-se que esta terá o maior rendimento.

3.2.3 Determinação da massa volúmica e da absorção de água

Este ensaio foi efetuado com base na norma NP EN 1097-6:2003/A1:2010 (IPQ, 2010b) e efetuado para a areia e resíduo. Devido às partículas terem dimensões entre 0,063mm e 4mm, foi utilizado o método do picnómetro para partículas entre estas dimensões.

Lavou-se o material, em água corrente e cuidadosamente, sobre o peneiro de 0,063mm de forma a remover as partículas mais finas, ensaiando-se o material retido. Colocou-se o material num picnómetro. Posteriormente, imergiu-se totalmente o provete com água, eliminando o ar ocluído por rotação e agitação cuidadosa, colocando-se a tampa (Figura 3.5(a)). Imergiu-se o picnómetro, em banho-maria, com temperatura de 22 ± 3 °C (Figura 3.5(b)). Após $24 \pm 0,5$ h, retirou-se e pesou-se o picnómetro, eliminando-se novamente o ar ocluído e secando-se a sua superfície exterior antes da pesagem (Figura 3.5(c)). Decantou-se o picnómetro e esvaziou-se o material para um tabuleiro, espalhando-se em camada uniforme. Encheu-se o picnómetro totalmente com água a temperatura igual à anterior, tapando-se com tampa. Pesou-se o picnómetro, secando previamente a sua superfície exterior (Figura 3.5(d)). Expôs-se o material a uma leve corrente de ar morno, para evaporação da humidade superficial, remexendo-se em intervalos de tempo frequentes de modo a assegurar uma secagem uniforme. Avaliou-se o estado da superfície seca, com recurso a molde troncocónico e pilão (Figura 3.5(e)). Apiloou-se levemente a superfície com 25 pancadas, recorrendo apenas à massa do pilão para tal, não completando o enchimento do molde após o apiloamento (Figura 3.5(f)). Retirou-se, cuidadosamente, o molde. Validou-se este processo, quando o agregado se deformou após desmoldagem, não mantendo a forma troncocónica. Seguidamente, pesou-se o material saturado de superfície seca. Finalmente, pesou-se o material, previamente seco em estufa, a temperatura de 110 ± 5 °C durante, pelo menos, 24 horas. Para este ensaio, todas as pesagens foram efetuadas com recurso a balança de precisão de 0,01g.

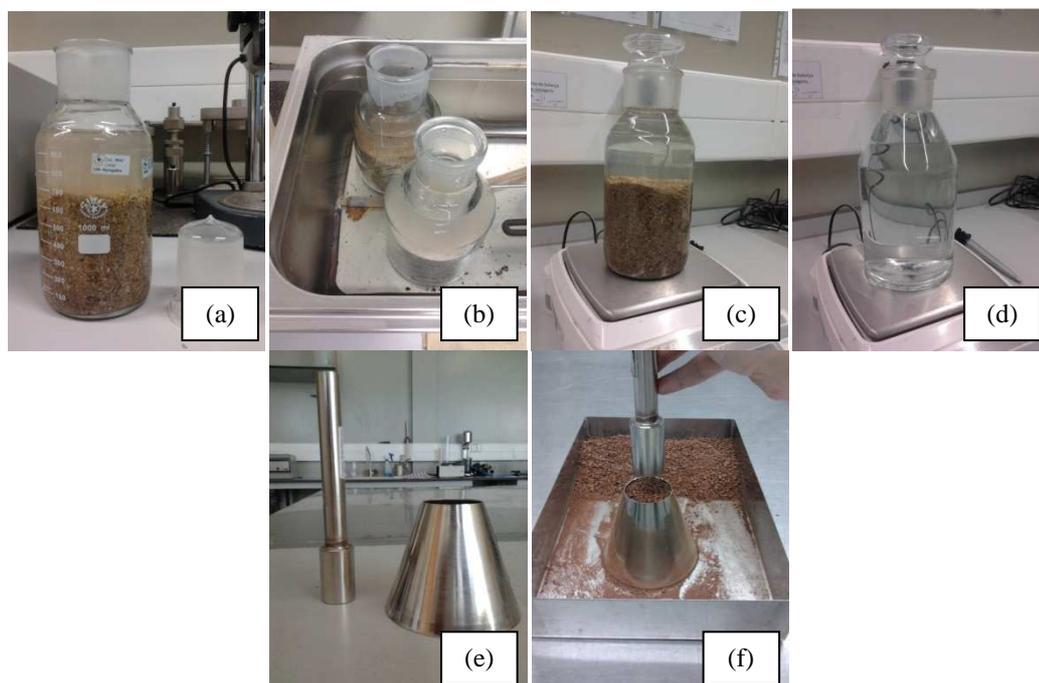


Figura 3.5- Massa volúmica e absorção de água dos agregados: (a) picnómetro com provete e água; (b) banho-maria em tina metálica; (c) pesagem do picnómetro após $24 \pm 0,5$ h em banho-maria; (d) pesagem do picnómetro totalmente cheio de água; (e) pormenor do cone troncocónico e pilão; (f) apiloamento

Os cálculos dos resultados, apresentados no Quadro 3.2, foram determinados com recurso às seguintes expressões:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (3.3)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.4)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.5)$$

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.6)$$

Sendo, ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas, em Kg/m^3 ;

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa, em Kg/m^3 ;

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, em Kg/m^3 ;

WA_{24} - absorção de água, em percentagem da massa seca, após imersão durante 24h;

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura registada na altura de M_2 , em Kg/m^3 ;

- M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em g;
 M_2 - massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e água, em g;
 M_3 - massa do picnómetro apenas cheio de água, em g;
 M_4 - massa no ar do provete seco em estufa, em g;

Quadro 3.2 - Massa volúmica e absorção de água

Tipo de material	M2 (g)	M3 (g)	M1 (g)	M4 (g)	ρ_w (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	ρ_{rd} (Kg/m ³)	ρ_{ssd} (Kg/m ³)	WA24 (%)
Areia	2372,78	1780,92	1058,71	1056,24	997,8 (T=21,98 °C)	2269,51	2257,51	2262,78	0,234
Resíduo de Mosaico	2340,5	1781,03	941,87	941,33	998,4 (T=19 °C)	2461,17	2457,70	2459,11	0,057

Verifica-se que as massas volúmicas do resíduo são as mais elevadas, o que leva a concluir que este é mais pesado que a areia, apesar de ambos serem considerados como agregados de massa volúmica normal, ou seja, materiais nem leves nem pesados (2000 Kg/m³ a 3000 Kg/m³) (Coutinho, 2012). Conclui-se que o resíduo absorve menos água que a areia, tendo maior massa volúmica de partículas impermeáveis, de partículas secas em estufa e de partículas saturadas com superfície seca.

3.3 Execução dos provetes de argamassa

Prepararam-se seis argamassas constituídas por cal hidráulica natural e areia, sendo que três ao traço volumétrico 1:3 e outras três ao traço volumétrico 1:4. Para ambos os traços, foi realizada uma argamassa sem resíduo, designada por "argamassa de referência", R. As restantes argamassas foram executadas substituindo 20% e 40% do volume de areia por volume idêntico de resíduo de mosaico, Q, denominadas por percentagem baixa L e alta H, respectivamente. Com base nos valores da baridade, determinaram-se as massas dos materiais correspondentes aos traços volumétricos das argamassas. No Quadro 3.3, apresenta-se a caracterização das argamassas em estudo.

Quadro 3.3 - Caracterização das argamassas em estudo

Designação	Composição	Percentagem de resíduo de mosaico	Traço volumétrico
3R	cah : ar	0	1 : 3
3LQ	cah : ar : mos	20	1 : 2,4 : 0,6
3HQ	cah : ar : mos	40	1 : 1,8 : 1,2
4R	cah : ar	0	1 : 4
4LQ	cah : ar : mos	20	1 : 3,2 : 0,8
4HQ	cah : ar : mos	40	1 : 2,4 : 1,6

R-Reference; LQ-Low Quarry; HQ-High Quarry; cah-cal hidráulica; ar-areia; mos-mosaico

Relativamente à preparação das argamassas, todos os constituintes sólidos foram pesados numa balança de precisão de 0,01 g, de acordo com os traços volumétricos referenciados no quadro anterior, bem como com a necessidade indispensável para a preparação dos provetes e com a capacidade da cuba (Figura 3.6(a) e (b)). Estes foram misturados manualmente com auxílio de uma pá, até se obter homogeneidade (Figura 3.6(c)). Seguidamente, colocou-se a mistura na cuba da misturadora mecânica (Figura 3.6(d)), de forma cuidadosa para não ocorrer perda de material (pó fino). Com a máquina ligada, introduziu-se a água nos primeiros 15 segundos da amassadura, de forma cuidadosa. Decorridos 2 minutos e 30 segundos, parou-se a máquina para se retirar a argamassa que se encontrava nas laterais da cuba e fora do alcance da pá misturadora, juntando-se à restante de forma a promover uma amassadura homogénea de todos os elementos. Reiniciou-se a amassadura mecânica e decorridos 30 segundos parou-se a misturadora. Este procedimento foi realizado com recurso a um cronómetro.

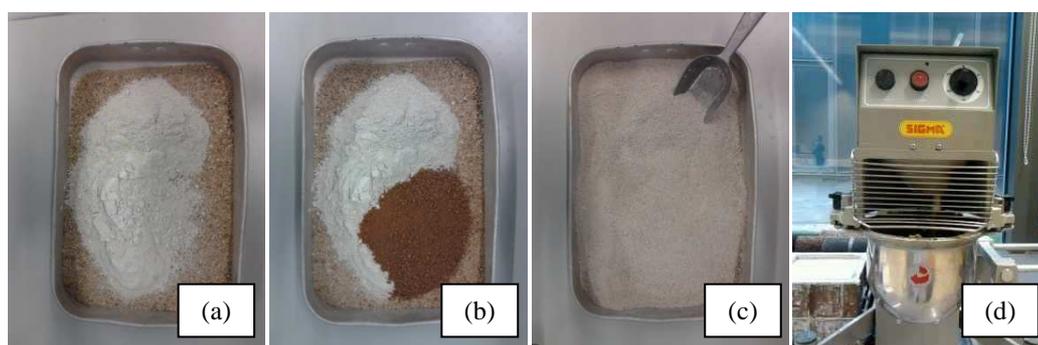


Figura 3.6 - Execução das argamassas: (a) cal hidráulica e areia; (b) cal hidráulica, areia e resíduo de mosaico; (c) mistura homogénea e manual dos sólidos; (d) misturadora mecânica

Executaram-se diversos provetes para a realização dos diferentes ensaios. Executaram-se 18 provetes circulares, em moldes de PVC, para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de forma a serem ensaiados três provetes de cada composição. Também se executaram 36 provetes prismáticos de dimensões 160x40x40 mm, em moldes metálicos triplos, para determinação das restantes características face à água e para as características mecânicas. Com os provetes prismáticos, foram realizados ensaios com 18 provetes aos 28 dias e com os restantes 18 provetes aos 60 dias, de modo a serem ensaiados três provetes de cada composição, devido aos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão serem destrutivos.

3.3.1 Caracterização das argamassas frescas

3.3.1.1 Ensaio de consistência por espalhamento

A consistência da argamassa, pode de algum modo avaliar a trabalhabilidade da mesma. Tal fator é importante, já que as argamassas de revestimento devem ser de fácil aplicabilidade, possibilitando uma boa aderência, compacidade e bom rendimento, conforme enunciado na secção 2.2.

A determinação da consistência, foi realizada de acordo com a norma EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 (CEN, 2006). Esta refere que a consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez ou grau de molhagem de uma determinada argamassa, fornecendo indicação sobre a deformabilidade desta quando submetida a determinado tipo de tensão e é dada pelo diâmetro médio da argamassa no estado fresco.

Colocou-se o molde metálico, centrado, na mesa de espalhamento. Após a preparação da argamassa, encheu-se o molde metálico com auxílio de uma espátula, (Figura 3.7(a)). Tal processo foi executado por duas fases, segurando firmemente o molde para este não se deslocar da marca circular gravada na mesa, que tem a finalidade de centrar o molde. Inicialmente, encheu-se o molde até, aproximadamente, meia altura. Incidiram-se 10 pancadas com um pilão, de forma uniforme por toda a superfície da argamassa, para permitir um enchimento também ele uniforme. Seguidamente, preencheu-se o molde até transbordar a abertura superior deste, dando novamente 10 pancadas de modo uniforme (Figura 3.7(b)). Retirou-se o excesso de argamassa com auxílio de uma rasoira (Figura 3.7(c)). Limpou-se a mesa circular, para esta estar isenta de detritos de argamassa que transbordaram pelo processo anterior, de forma a não dificultar o espalhamento. Retirou-se, cuidadosamente, o molde metálico. Rodou-se a manivela do aparelho, de forma a se darem 15 pancadas normalizadas, intervaladas de 1 segundo, para permitir o espalhamento da argamassa sobre a mesa do sistema de ensaio (Figura 3.7(d)). Mediu-se o diâmetro do material espalhado, em duas

direções perpendiculares entre si, com auxílio de um paquímetro, sendo o diâmetro do espalhamento a média dos dois valores. Realizou-se este procedimento para as seis argamassas, lavando e secando todos os utensílios entre as utilizações.

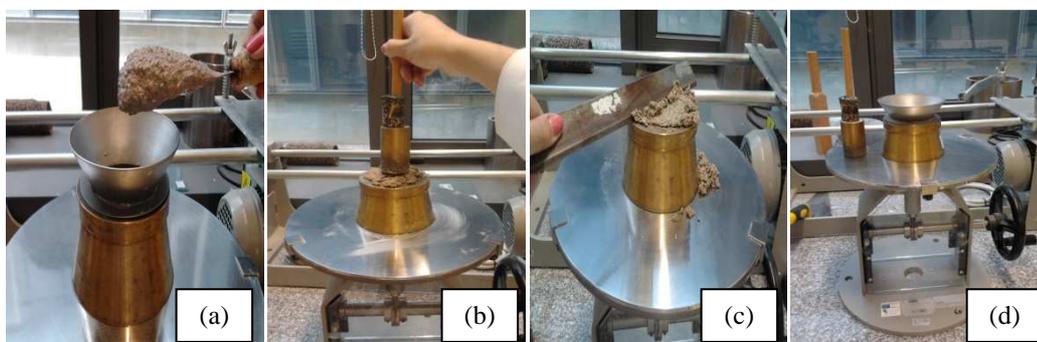


Figura 3.7 - Ensaio de consistência por espalhamento: (a) colocação da argamassa no molde metálico; (b) pancadas uniformes com pilão; (c) remoção do excesso; (d) pormenor do sistema-molde, pilão, mesa e manivela

Segundo a norma, os dois valores do diâmetro não se devem desviar mais de 10% do seu valor médio. Caso contrário, deve-se proceder a correção da quantidade de água, repetindo todo o procedimento anterior. Considerou-se, como valores de referência, o espalhamento de 150 ± 15 mm, ou seja, intervalos de espalhamento entre 135 mm e 165 mm. De facto, em algumas misturas, 3LQ e 3HQ, verificou-se que o espalhamento ultrapassava este limite, tendo-se procedido a ajustes nas quantidades de sólidos, mas mantendo o traço volumétrico. Os ajustes foram sucessivos até se atingir um espalhamento admissível, Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Ensaio de consistência por espalhamento: espalhamento e relação água/ligante

Designação	Espalhamento (mm)	Relação água/ligante
3R	163,03	0,913
3LQ	167,56	0,868
3HQ	165,84	0,956
4R	160,97	1,141
4LQ	146,57	1,098
4HQ	140,62	1,141

Verifica-se que após os ajustes, as misturas referidas anteriormente continuam com espalhamento ligeiramente superior ao limite máximo. Contudo, admitiu-se que estes eram admissíveis. Tais ajustes podem relacionar-se com a massa volúmica do resíduo, já que não absorve tanta água como a areia, condicionando a mistura.

3.3.2 Moldagem dos provetes

Para os moldes circulares, revestiu-se uma tábua com plástico e fixaram-se os moldes de PVC, com silicone (Figura 3.8(a)). Aplicou-se óleo desmoldante no interior dos moldes, não excessivamente, para facilitar a desmoldagem. Encheu-se, cada molde, até ao topo com auxílio de uma espátula. Incidiram-se 10 pancadas com um pilão, de modo uniforme em toda a superfície da argamassa para assegurar a compactação dos mesmos. Rasou-se a superfície dos moldes para nivelar e homogeneizar a mesma, com recurso a uma rasoira e em movimentos de serra. Executaram-se três moldes para cada mistura.

Procedeu-se à montagem dos moldes metálicos prismáticos e aplicou-se, igualmente, óleo desmoldante (Figura 3.8(b)). Encheu-se cada molde até, aproximadamente, meia altura com auxílio de uma espátula. Compactou-se a argamassa com recurso a um pilão, dando-se 25 pancadas de forma uniforme em toda a superfície de modo a assegurar a compactação (Figura 3.8(c)). Preencheu-se o molde até ao topo, dando novamente 25 pancadas de modo uniforme. Retirou-se o excesso de argamassa com recurso a uma rasoira e em movimentos de serra, de modo a nivelar e homogeneizar a superfície (Figura 3.8(d)). Foram executados dois moldes triplos para cada mistura, perfazendo um total de seis provetes de modo a serem ensaiados três provetes aos 28 dias e 60 dias.

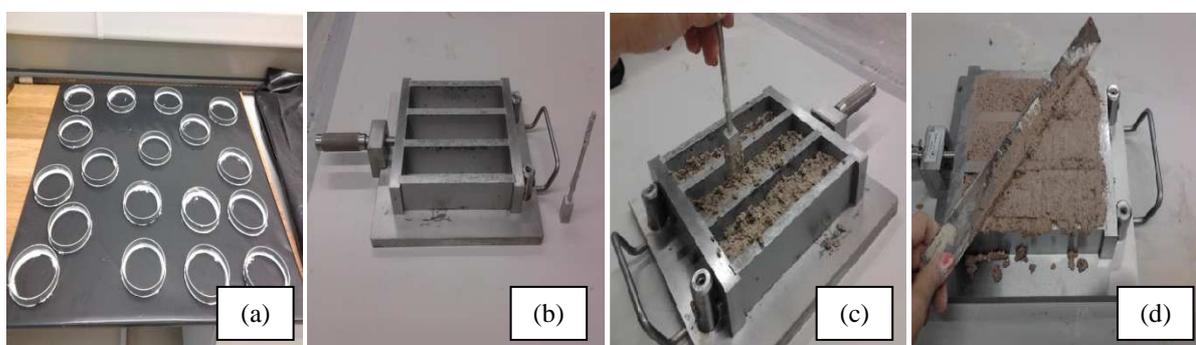


Figura 3.8 - Moldagem dos provetes: (a) pormenor moldes circulares; (b) pormenor molde metálico e pilão; (c) compactação da argamassa; (d) remoção do excesso

3.4 Ensaio sobre argamassas endurecidas

Para realizar os ensaios sobre as argamassas endurecidas, os moldes foram condicionados numa câmara climática, em condições de temperatura e humidade controladas. Devido às argamassas possuírem textura frágil, considerou-se que estas deveriam ter as mesmas condições de temperatura e humidade relativa que argamassas com mais de 50% de cal aérea.

Assim, após a moldagem dos provetes, as argamassas estiveram condicionadas cinco dias a 20 ± 2 °C de temperatura e dentro de sacos de plástico de forma a simular $95 \pm 5\%$ de humidade relativa. Nos dois dias seguintes, os provetes estiveram nas mesmas condições, mas sem os moldes. Até à data dos ensaios, 28 dias e 60 dias, os provetes estiveram em condições de temperatura de 20 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa.

3.4.1 Ensaios mecânicos

3.4.1.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 14146: 2006 (IPQ, 2006), que refere métodos de ensaio para pedra natural. Esta foi adotada para o ensaio dos provetes de argamassa, recorrendo aos provetes prismáticos. Contudo, apesar da norma referir o ensaio de pelo menos seis provetes, foram ensaiados apenas três provetes de cada mistura, devido a estes se considerarem representativos de um lote homogéneo. Tal consideração deve-se ao facto da preparação dos provetes ter sido controlada de forma igual para todos, contrariamente à formação da pedra natural. Apenas foi realizada a medição do modo de vibração longitudinal, tendo sido utilizados os dois suportes, localizados a $0,224 \ell$ das extremidades do provete, referentes à medição da vibração em flexão. Esta alteração deve-se aos provetes demonstrarem instabilidade durante o ensaio quando apoiados em apenas um suporte, localizado a meio do comprimento do provete, como refere a norma para a vibração longitudinal. Duarte (2011) refere que a diferença de valores de módulo de elasticidade não é muito significativa com a referida alteração de apoios e sua localização.

O princípio do ensaio consiste em provocar instabilidade num dos topos do provete, que se vai propagando ao longo deste na forma de onda de vibração. As frequências de vibração serão medidas no topo oposto do provete e registadas em software adequado.

Colocou-se o provete sobre os dois suportes prismáticos de seção triangular, em metal rígido, de comprimento ligeiramente superior à largura dos provetes e localizados a aproximadamente $0,224 \ell$ das extremidades do provete. Colocou-se, numa das faces do provete, o transdutor recetor, utilizando-se um pouco de massa consistente de forma a promover adesão entre as superfícies do provete e transdutor (Figura 3.9(a)). Incidiram-se, na face oposta, ligeiras pancadas de forma constante e contínua, com recurso ao transdutor emissor (martelo de impacto), até o provete entrar em ressonância (Figura 3.9(b)). Adquiriram-se os dados com um multi-analisador Pulse TM e com software apropriado. Para cada provete realizaram-se três medições, com o cuidado de os valores obtidos não variarem mais de ± 60 Hz entre si, sendo a frequência de ressonância fundamental em vibração

longitudinal, F_L , resultante da média desses três valores. Realizou-se este procedimento numa bancada isolada de vibrações exteriores de modo a viabilizar as medições.

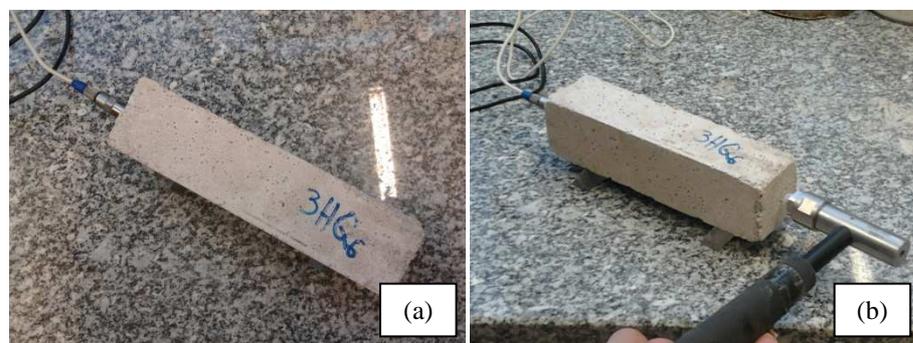


Figura 3.9 - Módulo de elasticidade dinâmico: (a) pormenor do transdutor recetor; (b) pormenor do transdutor emissor

Os resultados de frequência são obtidos em função da aceleração, assim, os valores de ressonância registados correspondem à energia máxima registada pelo recetor, ou seja, à frequência de ressonância fundamental dos provetes. Com recurso ao valor de frequência de ressonância fundamental em vibração longitudinal, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal através da seguinte fórmula:

$$Ed_L = 4 \times 10^{-6} \times \ell^2 \times F_L^2 \times \rho \times T \quad (3.7)$$

Sendo, Ed_L - módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, em MPa;

ℓ - comprimento do provete, em mm (160mm);

F_L - frequência de ressonância fundamental longitudinal, em Hz;

ρ - massa volúmica do provete, em Kg/m³;

T - coeficiente de correção; admite-se 1, já que os provetes em estudo designam-se de "provetes preferenciais" devido a ℓ ser igual a 4b, em que b é a largura do provete com valor de 40mm (4 x 40mm = 160mm).

A determinação da massa volúmica do provete pode ser realizada por dois processos, sendo um deles por cubicagem, que é baseado nas dimensões do provete ensaiado e determinado pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m_d}{\ell \times A} \quad (3.8)$$

Sendo, ρ - massa volúmica do provete, em Kg/m³;

- m_d - massa do provete seco, em Kg;
 ℓ - comprimento do provete, em m (0,16m);
A - área da seção transversal do provete, em m² (0,04m x 0,04m = 1,60x10⁻³).

O outro processo utilizado para a determinação da massa volúmica do provete, foi por imersão, consistindo em medições da massa do provete quando este está seco, saturado e imerso em água. Assim, calculou-se para cada provete, o valor da massa volúmica aparente através da equação:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (3.9)$$

Sendo, ρ_b - massa volúmica aparente do provete, em Kg/m³;

- m_d - massa do provete seco, em Kg;
 m_s - massa do provete saturado, em Kg;
 m_h - massa do provete imerso em água, em Kg;
 ρ_{rh} - massa volúmica real da água, em Kg/m³.

Para este ensaio, os provetes utilizados foram os mesmos aos 28 dias e 60 dias. Tal, deve-se a alguns provetes se encontrarem com pequenas fissuras, devido à sua fragilidade e resultantes da desmoldagem, que poderiam condicionar os resultados. Devido à fragilidade e exposição dos provetes a pancadas num dos topos, estes foram libertando partículas, nos ensaios dos 28 dias e dos 60 dias, alterando as suas dimensões. Assim, os resultados por imersão correspondem a uma evolução mais fidedigna, devido à determinação da massa volúmica por imersão ser mais exata já não depende das características geométricas. Os resultados apresentam-se na Figura 3.10 e Figura 3.11.

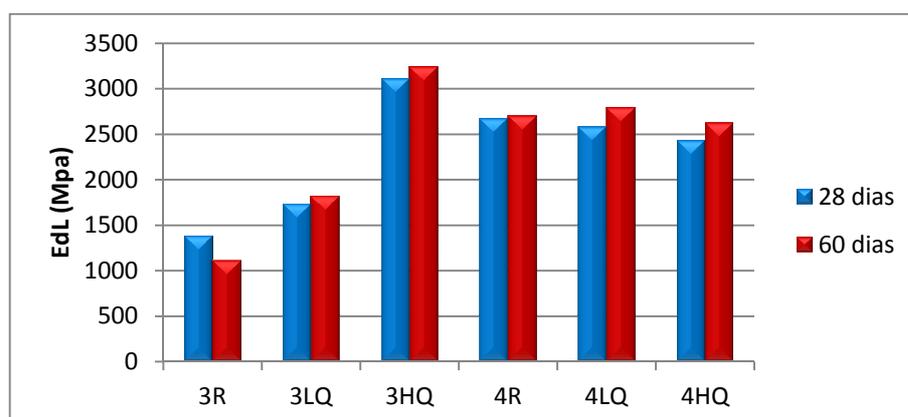


Figura 3.10 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e 60 dias, obtido por massa volúmica determinada por cubicagem

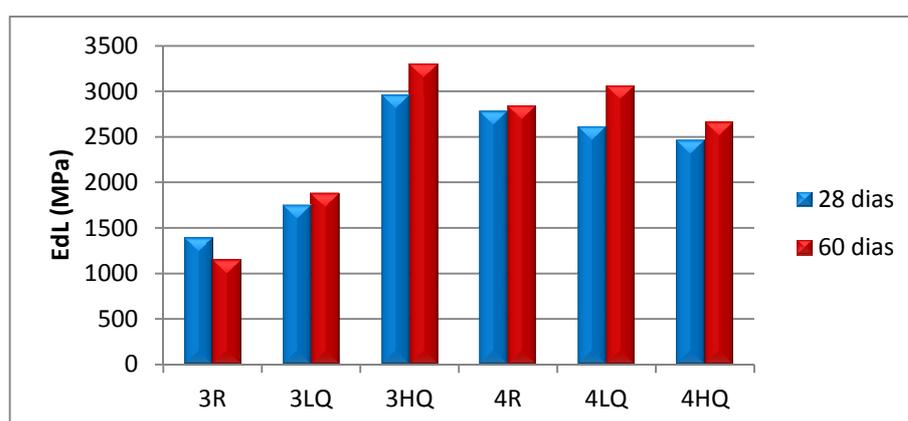


Figura 3.11 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e 60 dias, obtido por massa volúmica determinada por imersão

Verificamos que, de um modo geral, ocorre um aumento de módulo de elasticidade ao longo do tempo, sendo expectável já que as argamassas de cal tendem a ficar menos deformáveis com o aumento de tempo de cura. Denota-se, igualmente, uma melhoria de resultados quando calculados por massa volúmica determinada por imersão, como seria de esperar.

De acordo com o Quadro 2.1, os valores do módulo de elasticidade devem estar compreendidos entre 2000 MPa e 5000 MPa, para argamassas de reboco. Assim, de acordo com a Figura 3.10 e Figura 3.11, verifica-se que todas as argamassas, excetuando 3R e 3LQ, apresentam valores na gama aconselhável. Conclui-se também, que a argamassa com maior módulo de elasticidade dinâmico é a argamassa de traço volumétrico 1:3 com 40% de resíduo

incorporado, 3HQ. Analisando os traços volumétricos, as argamassas de traço 1:4 apresentam melhores valores que as de traço 1:3.

3.4.1.2 Resistência à tração por flexão

Este ensaio foi efetuado segundo a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999). Os provetes usados neste ensaio aos 28 dias, ainda não tinham sido alvo de nenhum ensaio. No ensaio aos 60 dias, os provetes foram os mesmos do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que este ensaio é destrutivo e o antecessor não.

Colocou-se o provete num equipamento adequado para a realização deste ensaio, apoiando-o, simetricamente, sobre dois apoios e posicionando a face em que a cura não esteve em contacto com o molde metálico voltada para o utilizador, ou seja, não sendo a face em contacto com os apoios nem a face em contacto com a carga (Figura 3.12). Aplicou-se uma carga a taxa constante, sujeitando os provetes a um esforço de flexão, até atingirem a rotura. O equipamento utilizado era de marca Instron 5884 e encontrava-se devidamente calibrado. As metades resultantes deste ensaio, foram utilizadas para o ensaio de resistência à compressão e para o ensaio de absorção de água por capilaridade, descritos em 3.4.1.3 e 3.4.2.2, respectivamente.

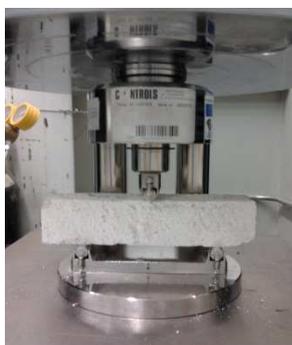


Figura 3.12 - Ensaio de resistência à tração por flexão

A resistência à flexão calculou-se através da equação:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (3.9)$$

Sendo, R_f - resistência à flexão, em N/mm²;

F - carga máxima aplicada, em N;

l - distância entre os eixos de apoio do provete, 100mm;

- largura do provete, em mm (40mm);
- espessura do provete, em mm (40mm).

Para o ensaio dos 28 dias, foram ensaiados apenas 16 provetes, já que dois deles apresentavam fissuras, podendo induzir erros nos resultados. Tais fissuras resultam da desmoldagem e da fragilidade dos provetes. Os resultados apresentam-se na Figura 3.13.

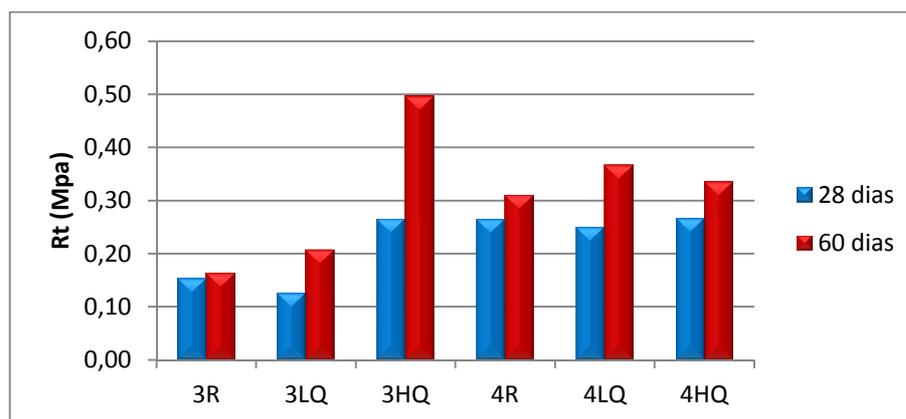


Figura 3.13 - Resistência à tração por flexão aos 28 dias e 60 dias

Verificamos um aumento de resistência à tração por flexão consoante o aumento do tempo de cura, sendo a argamassa 3HQ a que apresenta maior evolução. De notar que os resultados das argamassas de traço volumétrico 1:4 são melhores que as de traço 1:3.

Segundo o Quadro 2.1, os valores deveriam estar compreendidos entre 0,2 MPa e 0,7 MPa. Portanto, conclui-se que todas as argamassas, excetuando 3R e 3LQ, estão dentro dessa gama de valores. Verificamos que a argamassa de traço 1:3 com 40% de resíduos incorporados, 3HQ, é a que apresenta maior valor.

3.4.1.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado segundo a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999) e com metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à flexão. Tais metades foram criteriosamente escolhidas, já que do ensaio anterior resultaram duas metades, sendo uma para a realização deste ensaio e outra para o ensaio de absorção de água por capilaridade, como descrito anteriormente. Assim, devido à presença de resíduos de massa consistente num dos topos do provete, resultante da determinação do módulo de elasticidade dinâmico, poder afetar os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, para este ensaio foram selecionadas as metades com os resíduos da massa consistente. Tal seleção apenas foi

realizada no ensaio dos 60 dias, já que os provetes usados aos 28 dias não tendo sido alvos da determinação do módulo de elasticidade, não continham resíduos.

Colocou-se o provete num equipamento adequado para a realização deste ensaio, apoiando-o sobre um apoio metálico. Posicionou-se a face em que a cura não esteve em contacto com o molde metálico voltada para o utilizador, ou seja, não sendo a face em contacto com o apoio nem a face em contacto com a carga, tendo-se posicionado o provete de modo a que a superfície da rotura do ensaio de resistência à flexão estivesse fora do apoio metálico, aproximadamente, $16 \pm 0,1$ mm (Figura 3.14). Aplicou-se uma carga a taxa constante, com célula de carga de 10 KN, sujeitando os provetes a um esforço de compressão, até atingirem a rotura. O equipamento utilizado era de marca Instron 5884 e encontrava-se devidamente calibrado. A seção do provete que não está sobre o apoio, não estando sujeito à carga, geralmente destaca-se, do restante provete quando se atinge a rotura. Esta seção, mantendo portanto a sua integridade, irá ser utilizada para o ensaio de determinação da porosidade aberta.



Figura 3.14 - Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão calculou-se através da seguinte equação, apresentando os resultados na Figura 3.15.

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.10)$$

Sendo, R_c - resistência à compressão, em N/mm²;

F - carga máxima aplicada, em N;

A_c - área de carga, em mm² (40mm x 40mm = 1600mm²).

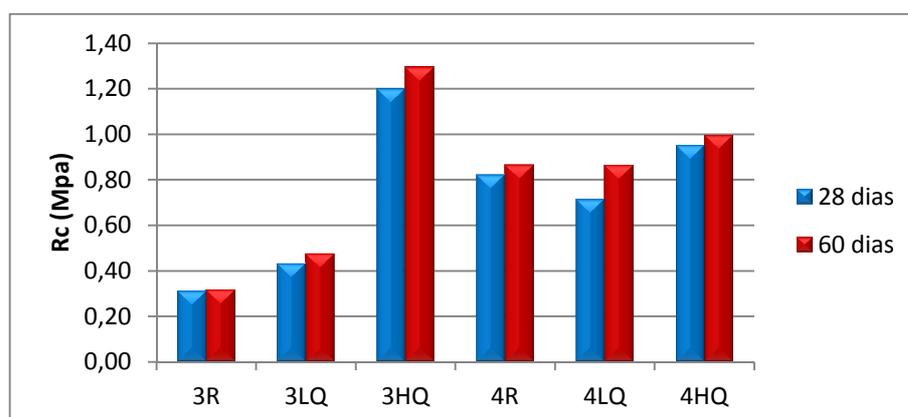


Figura 3.15 - Resistência à compressão aos 28 dias e 60 dias

De acordo com o Quadro 2.1, a resistência à compressão deve estar entre 0,4 MPa e 2,5 MPa. De facto, todas as argamassas, excetuando 3R, têm valores superiores a 0,4 MPa. Verifica-se que a argamassa de traço 1:3 e 40% de resíduos, 3HQ, apresenta os valores mais altos. Verifica-se igualmente que a resistência à compressão aumenta, ligeiramente, com o aumento do tempo de cura. De referir que, comparando os traços volumétricos, as argamassas de traço 1:4 apresentam melhores valores que as de traço 1:3.

3.4.2 Ensaios higrotérmicos

3.4.2.1 Porosidade aberta

A realização deste ensaio baseou-se na norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008a), tendo sofrido algumas alterações, já que esta é respeitante a métodos de ensaio para pedra natural.

O conceito de poros abertos consiste na quantidade de poros acessíveis à água, pela fronteira exterior e que comunicam entre si, conduzindo a água por capilaridade no interior do material. A maioria dos materiais de construção apresenta porosidade aberta, tornando-os de fácil embebição. Materiais de porosidade fechada, devido aos poros não comunicarem entre si, constituem uma barreira hídrica (Freitas et al, 2008) (Figura 3.16).

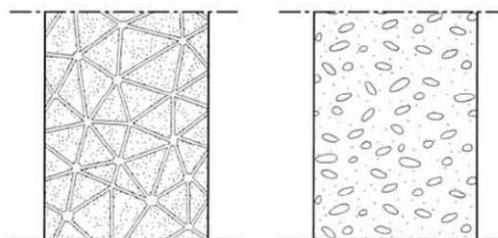


Figura 3.16 - Distinção entre material de porosidade aberta e material de porosidade fechada, respectivamente (Freitas et al, 2008)

Para este ensaio utilizaram-se os topos íntegros dos provetes do ensaio de resistência à compressão. Estes, devido às suas pequenas dimensões e fragilidade das argamassas, foram manuseados cuidadosamente.

Colocaram-se os provetes em estufa ventilada com temperatura de 60 ± 2 °C, durante, aproximadamente, 48 horas de modo a se garantir a secagem total destes. Armazenaram-se os provetes num exsiccador, contendo sílica, de modo a arrefecerem num ambiente totalmente seco. Após o arrefecimento, limpou-se cuidadosamente cada provete, com recurso a um pincel, de modo a se retirarem partículas que se encontravam pouco aderentes, podendo segregarem-se e induzir erros com as variações de massa. Pesou-se cada provete numa balança de precisão de 0,01 g. A limpeza e pesagem dos provetes foram processos rápidos, já que estes estando secos e em contacto com o ar de laboratório, poderiam absorver humidade e induzir erros. Colocou-se água no tabuleiro que continha todos os provetes, devidamente limpos e pesados, de forma cuidadosa para não possibilitar a segregação de partículas. Imergiu-se, totalmente, o conjunto de provetes durante, aproximadamente, 24 horas de forma a ficarem completamente saturados (Figura 3.17(a)). Pesou-se hidrosticamente cada provete, numa balança e mecanismo próprio para o efeito (Figura 3.17(b)). Para tal, colocou-se o provete num cesto com ligação à balança, imergindo-o num depósito de água. Neste processo, o registo da massa de cada provete ocorreu após a estabilização da balança, devido à colocação do provete provocar instabilidade da água e cesto e assim aos registos da balança. Registou-se a temperatura da água. Seguidamente, limpou-se cada provete de modo a retirar, apenas, o excesso de água da superfície exterior. Tal processo foi efetuado com cuidado para não danificar os provetes, já que se apresentavam frágeis. Pesou-se cada provete, após ligeira secagem, numa balança (Figura 3.17(c)).



Figura 3.17 - Ensaio de porosidade e massa volúmica: (a) imersão total dos provetes; (b) pesagem dos provetes imersos; (c) pesagem dos provetes saturados

O valor da porosidade aberta calculou-se segundo a seguinte equação:

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3.11)$$

Sendo, p_o - porosidade aberta, em percentagem;

m_s - massa do provete saturado, em g;

m_d - massa do provete seco, em g;

m_h - massa do provete imerso em água, em g.

Calculou-se, conjuntamente, o valor da massa volúmica aparente, ρ_b , para cada provete e através da equação (3.9). Os cálculos apresentam-se no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 28 dias e 60 dias

Provetes	28 dias				60 dias			
	p_o (%)	D.P.	ρ_b (Kg/m ³)	D.P.	p_o (%)	D.P.	ρ_b (Kg/m ³)	D.P.
3R	22	0,30	1740	4,33	21	0,46	1768	5,29
3LQ	21	0,47	1674	16,70	19	0,06	1700	5,51
3HQ	26	6,82	1623	146,75	21	0,63	1735	15,58
4R	21	0,37	1809	14,36	20	0,80	1825	17,22
4LQ	20	0,18	1736	7,25	14	9,59	1884	208,61
4HQ	21	1,17	1730	15,10	20	0,37	1740	10,06

Verifica-se que a porosidade aberta vai diminuindo com o avançar do tempo de cura. Tal facto é positivo, pois a porosidade deve ser baixa de forma a impedir a circulação de água entre os poros abertos do material. Portanto, o provete que apresenta o menor valor aos 28 dias e igualmente aos 60 dias, é a argamassa com traço volumétrico 1:4 e com incorporação

de 20% de resíduos, designada 4LQ. Analisando as argamassas relativamente à percentagem de resíduos, conclui-se que as melhores argamassas são as que contêm 20% de resíduos, sendo a diferença entre as argamassas com 40% de resíduos e as de referência quase inexistente. Verifica-se que a massa volúmica aparente varia inversamente à porosidade aberta, aumentando ao longo do tempo de cura.

3.4.2.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade está intimamente relacionada com a porosidade aberta, devido à comunicação dos poros entre si e sua exposição à água, como referido anteriormente em 3.4.2.1.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo as normas EN 15801:2009 (CEN, 2009) e EN 1015-18:2002 (CEN, 2002). Foram utilizados, como descrito em 3.4.1.3, as metades resultantes do ensaio de resistência à tração isentas de massa consistente em um dos topos, de modo a este resíduo não induzir erros neste ensaio. Apesar de os provetes terem alturas diferentes, admitiu-se que, em termos médios, a altura e assim o volume eram constantes no conjunto ensaiado de provetes.

Colocaram-se os provetes em estufa ventilada com temperatura de 60 ± 2 °C, durante, aproximadamente, 48 horas de modo a se garantir a secagem total destes. Armazenaram-se os provetes num exsiccador, contendo sílica, de modo a arrefecerem num ambiente totalmente seco. Após o arrefecimento, revestiu-se lateralmente, cada um deles, com material impermeável, nomeadamente película aderente de forma justa e esticada, com mais de uma camada, de modo a evitar evaporação lateral, favorecendo apenas a capilaridade (Figura 3.18(a)). A pesagem e o revestimento dos provetes foram processos rápidos, já que estes estando secos e em contacto com o ar de laboratório, poderiam absorver humidade e induzir erros. Seguidamente, pesou-se cada provete numa balança de precisão de 0,01 g (Figura 3.18(b)). Colocaram-se os provetes numa tina metálica com água, apoiados na base mais estável (Figura 3.18(c)). Tal apoio não é o sugerido pela norma EN 1015-18:2002 (CEN, 2002), que refere a face partida e irregular voltada para baixo, servindo de apoio. Mediu-se a altura da água da tina, garantindo uma altura compreendida entre 5mm e 10mm. Pesou-se cada provete aos 5, 10, 15, 30 minutos, 1h, 1h e 30minutos, 2h e 3h após exposição inicial à água, limpando apenas o excesso de água da base. Seguidamente, pesou-se cada provete a 24h, 48h e 72h após a imersão inicial.

Durante o manuseamento para as pesagens, teve-se a cautela de não deixar cair água em cima dos restantes provetes, já que condicionaria os resultados. As pesagens efetuaram-se de modo rápido, para que cada amostra não estivesse muito tempo sem as condições de capilaridade,

ou seja, contacto com água na base. De modo a evitar a ascensão por evaporação e/ou secagem dos provetes, tapou-se a tina com recurso a tampa (Figura 3.18(d)). Devido a retirar-se o excesso de água da base aquando das pesagens e do fenómeno de capilaridade, a altura da água da tina foi sendo medida, com auxílio de régua, e ajustada de forma a cumprir sempre os limites máximo e mínimo.

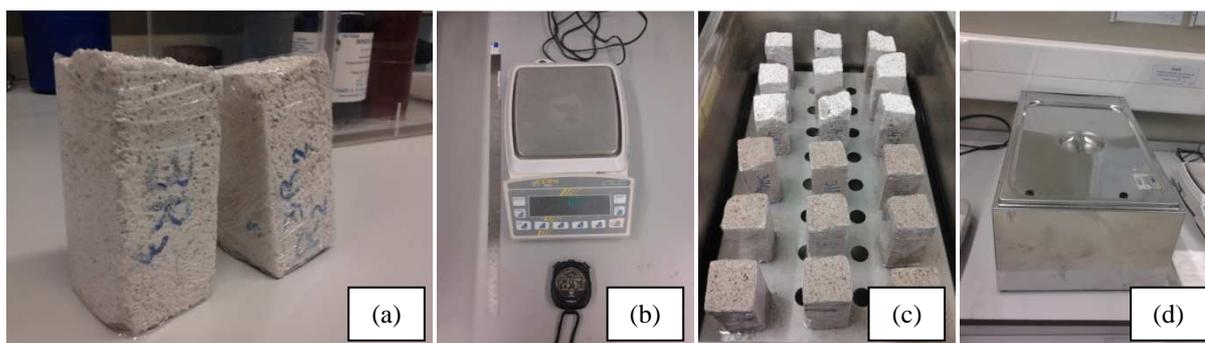


Figura 3.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) pormenor de provetes revestidos lateralmente; (b) balança, régua e cronómetro; (c) tina metálica com tampa; (d) provetes na tina com água

Tais intervalos de tempo foram ajustados das normas. A norma EN 1015-18:2002 (CEN, 2002) refere, para argamassas de reabilitação, a pesagem dos provetes secos e após 24 horas do início da imersão. Contudo, a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009) apenas refere que os intervalos de tempo dependem da rapidez de absorção, aconselhando intervalos curtos nas pesagens iniciais. De referir que as pesagens decorreram até 72 horas após a imersão, devido a garantir a não variabilidade de massa em mais de 0,1%, entre pesagens de 24 horas. Assim, a escolha dos intervalos de tempo referidos neste procedimento, teve como base trabalhos de argamassas de reabilitação de cal com incorporação de resíduos cerâmicos.

De acordo com a norma EN 1015-18:2002 (CEN, 2002), determinou-se o coeficiente de absorção de água por capilaridade, através da seguinte fórmula:

$$C = 0,1 \times (M_2 - M_1) \quad (3.12)$$

Sendo, C - coeficiente de absorção de água, em $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$;

M_2 - massa do provete após 90 minutos de imersão, em g;

M_0 - massa do provete após 10 minutos de imersão, em g;

Devido a terem sido ensaiados três provetes de cada argamassa, considerou-se o coeficiente de absorção de água para cada argamassa como a média dos três provetes. De referir que,

graficamente, o coeficiente de absorção de água consiste na inclinação da reta que une os pontos correspondentes da argamassa após 10 min e 90 min da sua exposição à água.

Para se calcular o coeficiente de absorção segundo a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009), começou por se calcular a quantidade de água absorvida pela amostra por unidade de área, com base em:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (3.13)$$

Sendo, M_i - quantidade de água absorvida pela amostra por unidade de área, em Kg/m²;

m_i - massa da amostra no instante t_i , em Kg;

m_0 - massa da amostra seca, em Kg;

A - área da amostra em contacto com a água, em m² (0,04m x 0,04m = 1,60x10⁻³).

Devido a terem sido ensaiados três provetes de cada argamassa, considerou-se a quantidade de água absorvida pela amostra por unidade de área para cada argamassa, como a média dos três provetes.

De acordo com a mesma norma, traçou-se a curva de absorção capilar para cada tipo de argamassa. Esta exprime a quantidade de água absorvida por unidade de área, em relação à raiz quadrada do tempo i . Desta curva, determinou-se o coeficiente de absorção de água por capilaridade, AC, que consiste na inclinação da seção linear da curva, devendo ser calculado por regressão linear usando pelo menos cinco pontos sucessivos do troço inicial reto da curva, e que não passa obrigatoriamente pela origem. Determinou-se também, o valor assintótico da curva de cada argamassa como sendo o valor máximo de água absorvida por capilaridade, por área de contacto com a água. A curva é detalhada devido às sucessivas pesagens, permitindo a determinação com precisão da evolução da absorção de água. Os resultados encontram-se nas Figura 3.19 e Figura 3.20 e no Quadro 3.6.

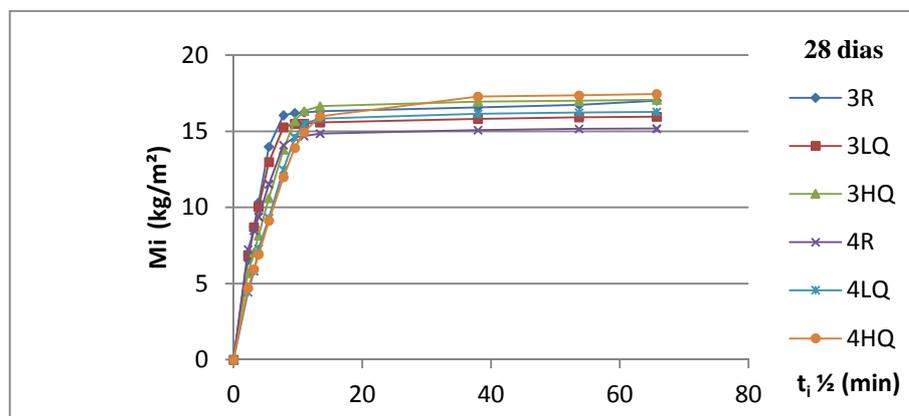


Figura 3.19 -Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo, aos 28 dias

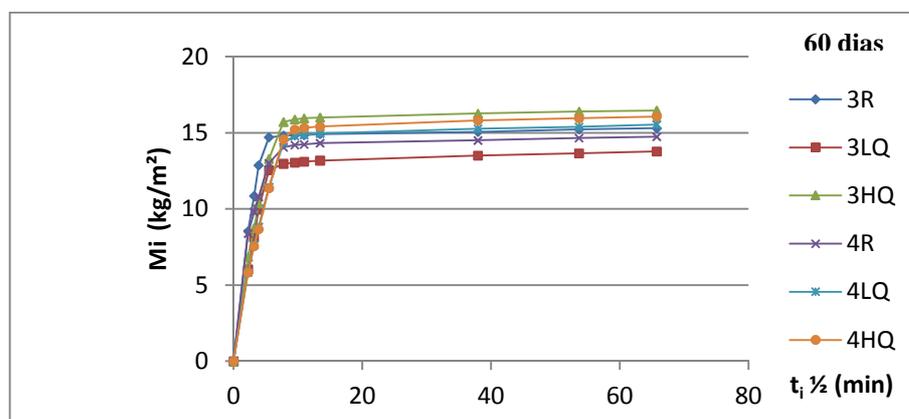


Figura 3.20 - Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo, aos 60 dias

Quadro 3.6 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade

Provetes	28 dias						60 dias					
	AC (Kg/m².m ^{1/2})	D. P.	V. A. (Kg/m²)	D. P.	C (Kg/m².m ^{1/2})	D. P.	AC (Kg/m².m ^{1/2})	D. P.	V. A. (Kg/m²)	D. P.	C (Kg/m².m ^{1/2})	D. P.
3R	1,75	0,04	17,01	0,50	1,20	0,16	1,10	0,14	15,30	1,17	0,64	0,17
3LQ	1,53	0,04	15,95	0,28	1,09	0,09	1,25	1,06	13,78	3,39	0,78	0,10
3HQ	1,48	0,07	17,06	1,01	1,38	0,04	1,61	0,05	16,46	0,59	1,14	0,12
4R	1,25	0,08	15,17	0,70	0,98	0,06	1,04	0,06	14,74	0,54	0,70	0,09
4LQ	1,45	0,03	16,26	0,60	1,40	0,03	1,53	0,07	15,54	0,99	1,14	0,14
4HQ	1,33	0,12	17,45	2,80	1,28	0,04	1,58	0,04	16,06	2,80	1,22	0,15

AC-Coeficiente de absorção de água por capilaridade (EN 15801:2009); C-Coeficiente de absorção de água por capilaridade (EN 1015-18:2002); V.A.-Valor assintótico; D.P.-Desvio padrão

Os valores mais elevados do coeficiente de absorção de água, aos 60 dias, correspondem às argamassas com incorporação de 40% de resíduos, sendo os valores mais baixos os relativos às argamassas de referência. De notar que as argamassas de traço 1:4, incluindo as de referência, possuem valores mais elevados de C que as de traço 1:3. Considerando-se para o cálculo de AC, os pontos sucessivos até antes dos 90 minutos, verifica-se que este coeficiente só transmite informação para o tempo inicial da absorção. De notar que o coeficiente de absorção de água C é relativo à quantidade de água absorvida entre os 10 minutos e os 90 minutos, e segundo a norma para argamassas cimentícias, diminuindo ao longo do tempo. Da análise gráfica, verifica-se que a argamassa 3R apresenta maior rapidez de absorção, enquanto a 4HQ apresenta o menor valor. O valor assintótico indica que o máximo de água absorvida diminui com o tempo de cura.

Relativamente ao Quadro 2.2, os valores do coeficiente de absorção por capilaridade devem estar compreendidos na gama [1; 1,5] Kg/m².min^½. Neste aspeto, as argamassas com 40% de incorporação de resíduos cumprem este requisito.

3.4.2.3 Secagem

Este ensaio foi realizado imediatamente após o ensaio de absorção de água por capilaridade, de modo a garantir uma secagem de amostras completamente saturadas. Este ensaio não foi baseado em nenhuma norma específica, tendo sido baseada em Cruz (2012).

Retirou-se a película aderente que envolvia lateralmente os provetes, de modo cuidadoso para não danificar as amostras e com rapidez possível para não se iniciar a secagem. Ao retirar as películas permite-se uma secagem não unidirecional, ao contrário da realidade, mas tal deveu-se à necessidade de aumentar a velocidade de secagem. Pesou-se cada provete, completamente saturado, numa balança de precisão de 0,01 g. Para tal, limpou-se cuidadosamente alguma camada de água presente na superfície dos provetes, garantido que a massa inicial seria apenas da sua saturação e não de água superficial. Seguidamente, colocou-se o conjunto de provetes em câmara climática com temperatura de 20±3 °C e 50±5% de humidade relativa (Figura 3.21). Pesou-se cada provete de hora a hora, até perfazer um total de 6 horas, após o início do ensaio. Posteriormente, pesou-se o conjunto a 24h, 48h e 72h após o início da secagem. De referir que as pesagens decorreram até 72 horas após o início do ensaio, devido a garantir a não variabilidade de massa em mais de 0,1%, entre pesagens de 24 horas.



Figura 3.21 - Pormenor de provetes na câmara climática

Com este ensaio calculou-se o teor em água através da seguinte equação, estando a representação gráfica em Figura 3.22 e Figura 3.23:

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3.14)$$

Sendo, W_t - teor em água, em percentagem;
 m_i - massa do provete no instante t_i , em g;
 m_0 - massa do provete seco, em g.

A variação no tempo do teor em água, consiste na curva de evaporação ou curva de secagem.

O índice de secagem, apresentado no Quadro 3.7, calculou-se segundo a expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (3.15)$$

Sendo, IS - índice de secagem;
 t_i - tempo de ensaio no instante i , em horas;
 Q_i - quantidade de água no interior do provete no instante i , em percentagem;
 $Q_{m\acute{a}x}$ - quantidade de água no instante inicial, em percentagem;
 t_f - tempo final do ensaio, em horas.

Com,

$$Q_i = \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (3.16)$$

Sendo, m_i - massa do provete no instante t_i , em g;

m_{seca} - massa do provete seco, em g.

O índice de secagem consiste na rapidez de secagem, em que quanto maior a rapidez de secagem, menor é este índice. O Quadro 3.7 apresenta os valores calculados.

Quadro 3.7 - Índice de secagem e desvio padrão

Provetes	28 dias		60 dias	
	Is	D.P.	Is	D.P.
3R	0,18	0,03	0,10	0,04
3LQ	0,19	0,01	0,12	0,01
3HQ	0,48	0,41	0,48	0,07
4R	0,19	0,00	0,16	0,05
4LQ	0,21	0,00	0,14	0,07
4HQ	0,22	0,00	0,54	0,49

Verificamos que todas as argamassas, excetuando a 4HQ, apresentam uma diminuição do valor do índice de secagem, ao longo do tempo de cura. Assim, estas secam mais rapidamente. As piores argamassas são 3HQ e 4HQ, concluindo que a incorporação de resíduos não é benéfica para a rapidez de secagem.

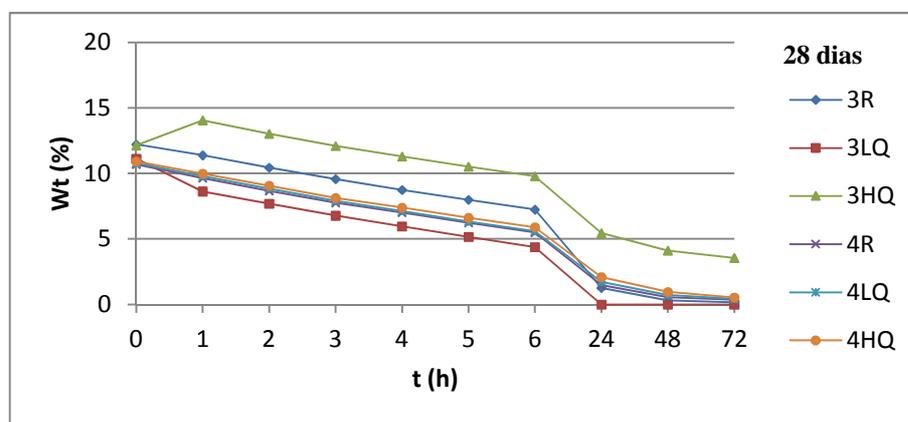


Figura 3.22 - Evolução do teor em água ao longo do tempo, aos 28 dias

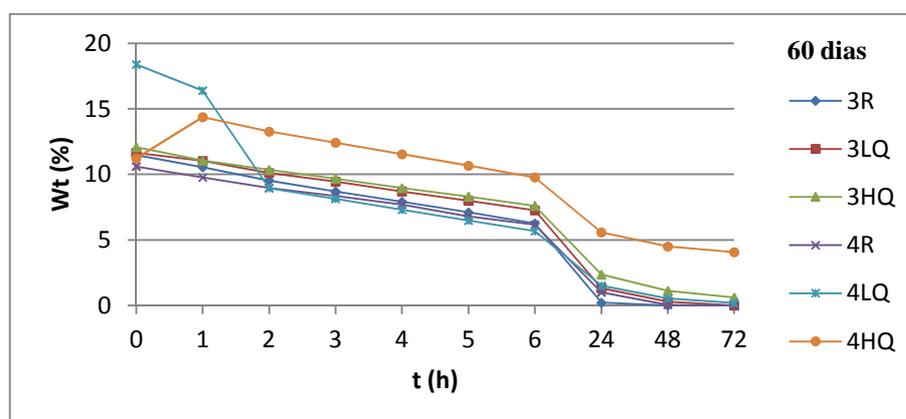


Figura 3.23 - Evolução do teor em água ao longo do tempo, aos 60 dias

De notar que o teor em água, W (%), diminui ao longo do ensaio, devido à secagem, ou seja, diminuição da massa do provete, como se verifica em Figura 3.23 e Figura 3.24. Verifica-se que passadas 24 horas há uma diminuição brusca de valores.

3.4.2.4 Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi realizado segundo as normas EN ISO 12572:2001 (CEN, 2001) e EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008), sendo a primeira relativa à determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas e a segunda designada para materiais com diversas origens. Para este ensaio foram utilizados os 18 provetes circulares.

A norma EN ISO 12572:2001 (CEN, 2001) refere a área exposta dos provetes deverá ser superior a $0,005\text{m}^2$ e, quando inferior a $0,02\text{m}^2$, deverão ser ensaiados, no mínimo, cinco provetes. Como os provetes circulares utilizados possuem uma área de exposição de, aproximadamente, $0,009\text{m}^2$, deveria-se ensaiar, pelo menos, cinco provetes. Tal não foi possível, tendo-se admitido o ensaio de apenas três provetes de cada argamassa.

Este ensaio representa a quantidade de vapor de água que se difunde através da argamassa por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a uma variação da pressão de vapor entre a face inferior e superior. Assim, este consiste numa simulação de dois ambientes com a mesma temperatura e com diferentes pressões parciais de vapor de água. O gradiente de pressão origina um fluxo de vapor constante, através do provete de argamassa, permitindo calcular a sua permeabilidade ao vapor de água.

Mediu-se com auxílio de um paquímetro, a espessura e o diâmetro dos provetes, através de três medições em direções diferentes, de modo a se obter uma espessura e um diâmetro médios para cada uma das amostras. Aplicou-se uma camada isolante, nomeadamente borracha líquida (Figura 3.24(a)), em todo o perímetro do provete, de modo a criar um fluxo unidirecional. Este processo realizou-se com cuidado para não aplicar a camada isolante sobre as superfícies inferior e superior, de forma a não impedir a permeabilidade ao vapor e de modo ao perímetro ficar totalmente vedado. Colocou-se uma fita aderente sobre a borracha, após a sua secagem, para promover maior resistência e facilitar a posterior desmontagem do sistema. Encheu-se a tina com água até uma altura de, aproximadamente, 2cm. Solidarizou-se o provete e a tina, circular de, aproximadamente, o mesmo diâmetro que os provetes, com recurso a fita adesiva e com especial cuidado para não ocorrer molhagem do provete, já que tal poderia induzir erros (Figura 3.24(b)). Revestiu-se a zona de ligação com parafina líquida de modo a tonar completamente estaque o sistema provete-tina. Colocaram-se os provetes em câmara climática com temperatura de 20 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa (Figura 3.24(c)). Tal humidade relativa, sendo diferente da interior (100% HR), irá contribuir para o desenvolvimento de um fluxo de vapor de água. Pesou-se cada provete, diariamente. Parou-se o ensaio quando a variação da massa dos provetes, durante o intervalo entre cada pesagem fosse constante durante cinco pesagens consecutivas. Para tal, considerou-se como constantes as pesagens com uma variação de $\pm 5\%$ do valor médio de variação para cada provete. De referir que este ensaio foi bastante longo, devido à demora para obter as cinco pesagens sucessivas que garantissem um fluxo constante.

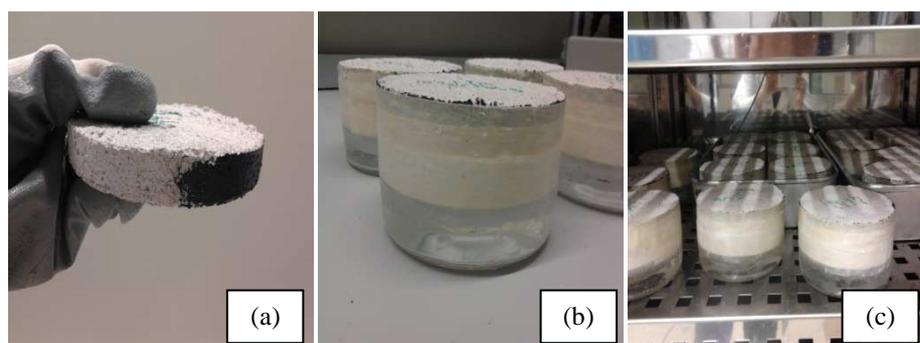


Figura 3.24 - Permeabilidade ao vapor de água: (a) revestimento com borracha; (b) pormenor de isolamento fita-parafina; (c) provetes em câmara climática

Calculou-se a relação entre a variação de massa e o tempo através de:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (3.17)$$

Sendo, Δm_{12} - relação entre a variação de massa e o tempo, em Kg/s;

m_1 - massa do sistema provete-tina, no instante t_1 , em Kg;

m_2 - massa do sistema provete-tina, no instante t_2 , em Kg;

t_1 e t_2 - tempos referentes a duas pesagens sucessivas, em segundos.

Quando a relação entre a variação de massa e o tempo Δm_{12} , se torna constante, assume-se esse valor como o valor de fluxo de difusão de vapor de água, G . O valor da densidade do fluxo de difusão calculou-se por:

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.18)$$

Sendo, g - valor da densidade do fluxo de difusão de vapor de água, em Kg.m²/s;

G - valor de fluxo de difusão de vapor de água Kg/s;

A - área exposta do provete, em m²; média aritmética entre as áreas das superfícies livres inferior e superior do provete, em que se considera igual à área do provete, já que a diferença de áreas é muito reduzida, devido à reduzida espessura da tina).

A permanência ao vapor de água determinou-se através de:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} \quad (3.19)$$

Com,

$$\Delta p_v = p_{sat} \times \frac{\varnothing_1 - \varnothing_2}{100} \quad (3.20)$$

Onde,

$$p_{sat} = 610,5 \times e^{\frac{17,269 - \theta}{237,3 + \theta}} \quad (3.21)$$

Sendo, W - permanência ao vapor de água, em Kg/(m².s.Pa);

Δp_v - média da temperatura e humidade relativa ao longo do ensaio, em Pa;

p_{sat} - pressão de saturação à temperatura do ensaio, em Pa;

\varnothing_1 e \varnothing_2 - diferença entre as humidades relativas no interior e no exterior da tina de ensaio, em percentagem;

θ - temperatura à qual decorre o ensaio, em °C; neste caso considerado aproximadamente 22 °C.

A permeabilidade ao vapor de água, δ [Kg/(m.s.Pa)], calculou-se segundo:

$$\delta = W \times d \quad (3.22)$$

Sendo, d - espessura do provete, em m.

O fator de resistência à difusão do vapor de água, μ , indica quantas vezes a resistência à difusão de um material é maior do que a de uma camada de ar em repouso de igual espessura e sujeitas às mesmas condições ambientais (Freitas et al, 2008), sendo dado por:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3.23)$$

Sendo, δ_a - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, em Kg/(m.s.Pa); sendo $1,95 \times 10^{-10}$ Kg/(m.s.Pa), segundo Isso 12572:2001.

A espessura da camada de ar equivalente, s_d , é a espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão do vapor de água que o elemento construtivo (sólido) existente (Freitas et al, 2008), sendo calculado por:

$$s_d = \mu \times d \quad (3.24)$$

Sendo, d - espessura do provete, em m.

Os resultados deste ensaio encontram-se no Quadro 3.8:

Quadro 3.8 - Permeabilidade ao vapor de água, fatores de resistência ao vapor de água, espessuras de camada de ar, respetivos desvio padrão, aos 28 dias e 6 dias

Provetes	28 dias						60 dias					
	δ E-11 (Kg/m.s.Pa)	D. P.	μ	D. P.	Sd (m)	D. P.	δ E-11 (Kg/m.s.Pa)	D. P.	μ	D. P.	Sd (m)	D. P.
3R	1,793	0,065	10,883	0,41	0,172	0,002	1,686	0,054	11,572	0,368	0,183	0,002
3LQ	1,970	0,111	9,919	0,561	0,155	0,006	1,748	0,096	11,181	0,623	0,174	0,006
3HQ	1,538	0,063	12,695	0,509	0,204	0,011	1,543	0,096	12,674	0,800	0,204	0,021
4R	1,444	0,054	13,516	0,498	0,209	0,010	1,426	0,091	13,708	0,879	0,212	0,013
4LQ	1,610	0,127	12,163	0,983	0,192	0,009	1,540	0,018	12,664	0,146	0,201	0,005
4HQ	1,483	0,030	13,155	0,264	0,216	0,010	1,459	0,012	13,364	0,111	0,219	0,006

Verifica-se que a permeabilidade ao vapor de água, δ , diminui com o aumento do tempo de cura, excetuando a argamassa 3HQ, mas com valores aproximados. Os valores demonstram que as argamassas que têm valores mais altos, tanto aos 28 dias como aos 60 dias, são as constituídas por 20% de resíduo. Aos 60 dias, a melhor argamassa é 3LQ, sendo 4R a pior.

De acordo com o Quadro 2.2, referindo que S_d deverá ter valores inferiores a 0,08 m para rebocos interiores e 0,10 para juntas, conclui-se que nenhuma das argamassas analisadas cumpre estes requisitos.

A espessura da camada de ar equivalente, S_d , é inversamente proporcional à permeabilidade ao vapor de água, aumentando ao longo do tempo de cura.

3.5 Análise global de resultados

O desempenho de uma argamassa depende de um conjunto de princípios essenciais de qualidade, como referido em 2.2. Portanto, na presente análise pretende-se comentar, de forma interligada, os resultados obtidos. Serão analisados os resultados aos 60 dias, pois é com o avançar do tempo de cura que as propriedades tendem a ser características da argamassa em estudo.

De referir que os provetes apresentavam fragilidade, pelo que alguns resultados podem incluir erros, apesar de terem sido cuidadosamente ensaiados. De facto, a desmoldagem dos provetes revelou-se difícil, e apesar do rigor, verificaram-se fissuras e desagregação de algumas partículas. Tal facto, pode ser resultante da granulometria da mistura, devido a esta apresentar pouca quantidade de material fino.

Efetivamente, a granulometria da mistura pode ter contribuído igualmente para a trabalhabilidade da argamassa, já que se realizaram sucessivos ajustes como referido em 3.3.1.1.

Como mencionado em 2.2, quando a relação módulo de elasticidade-resistência à flexão aumenta, aumenta a tendência para a fendilhação. Assim, analisando a Figura 3.25, concluímos que a tendência à fendilhação é tanto maior quanto maior for a diferença gráfica entre R_t (MPa) e E_dL (MPa). Assim, as argamassas com menor resistência à fendilhação são as argamassas de traço volumétrico 1:4, nomeadamente 4R, 4LQ e 4HQ.

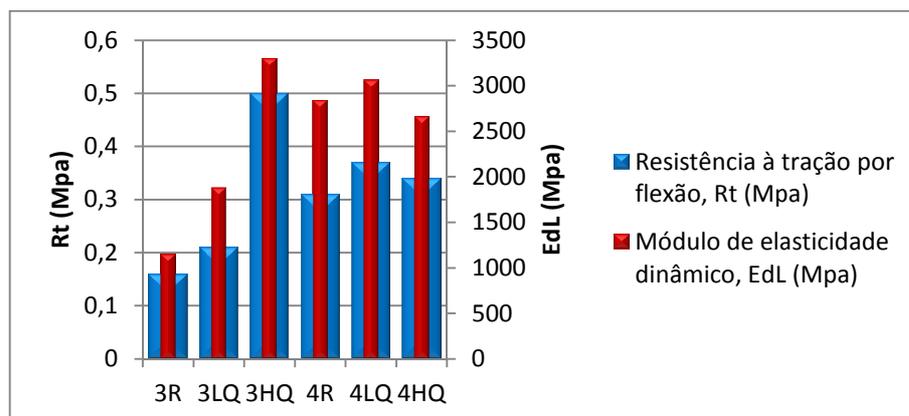


Figura 3.25 - Relação EdL-Rt

A absorção de água por capilaridade e a porosidade aberta são conceitos relacionáveis, já que a absorção ocorre pelos capilares e poros abertos em contacto com a superfície. Analisando as argamassas em estudo com recurso à Figura 3.26, concluímos que as melhores são as que apresentam maior porosidade aberta em conjunto com menor coeficiente de absorção. Assim concluímos que as melhores argamassas são as de referência.

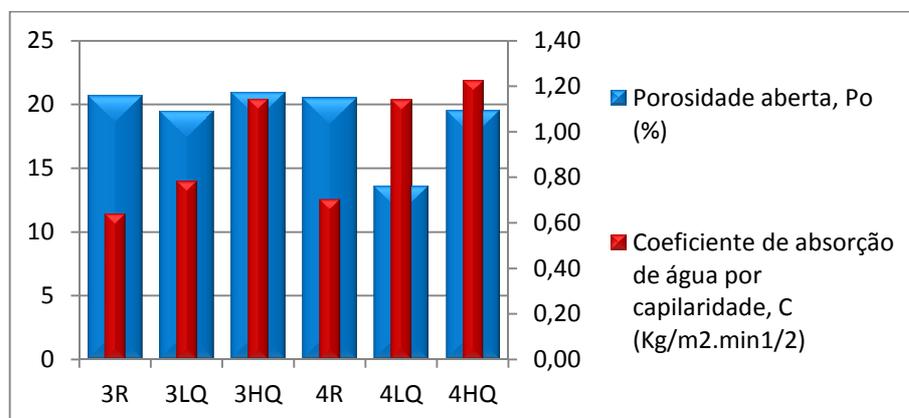


Figura3.26 - Relação Po-C

A análise conjunta das resistências é deveras importante, já que define os esforços que a argamassa pode suportar. De facto, pela Figura 3.27, a melhor argamassa é a 3HQ, apesar de todas as argamassas com resíduos possuírem resistências mais elevadas, aumentando as resistências com o aumento de resíduo incorporado.

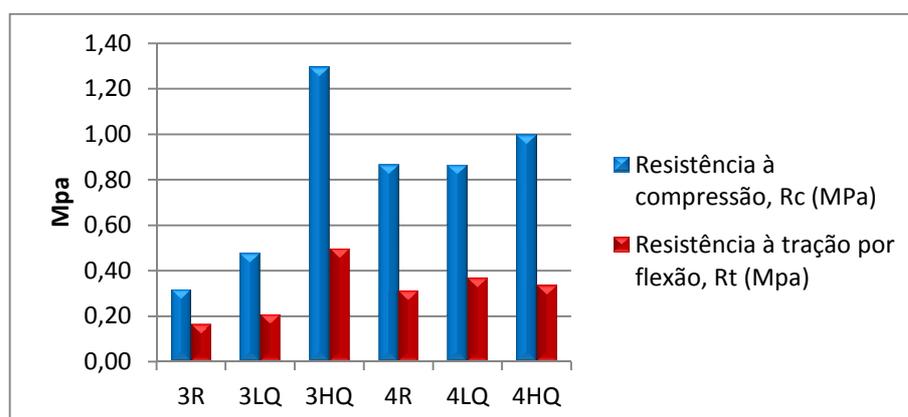


Figura 3.27- Relação Rc-Rt

A porosidade aberta e a permeabilidade ao vapor de água também são conceitos que se relacionam. Conclui-se que a argamassa 3LQ é a que possui maior permeabilidade e não tão alta porosidade, pela Figura 3.28. Verifica-se igualmente que 4LQ apresenta maior diferença de valores.

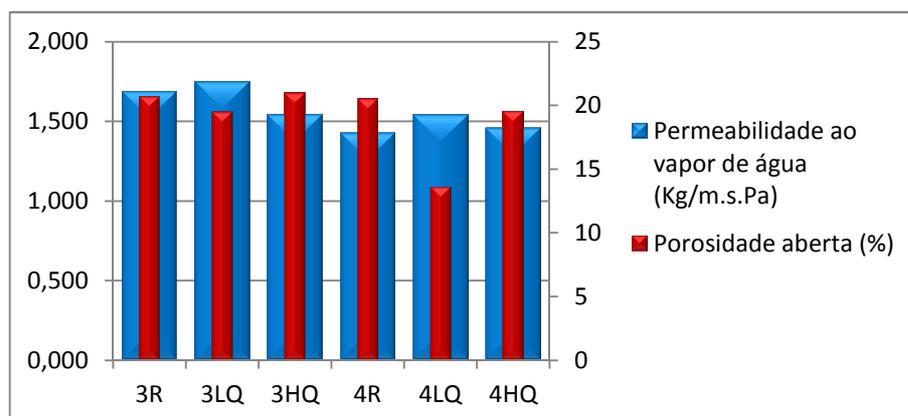


Figura 3.28 - Relação Porosidade aberta-Permeabilidade ao vapor de água

Pelas Figura 3.29 e 3.30, concluímos que o índice de secagem está correlacionado com o coeficiente de absorção de água por capilaridade e porosidade aberta. As melhores argamassas são aquelas que possuem baixo índice de secagem e baixo coeficiente de capilaridade, destacando-se a argamassa 3R. Relativamente à porosidade aberta e índice de secagem, concluímos que a melhor argamassa é igualmente a 4LQ, sendo as piores as argamassas com 40% de resíduos incorporados.

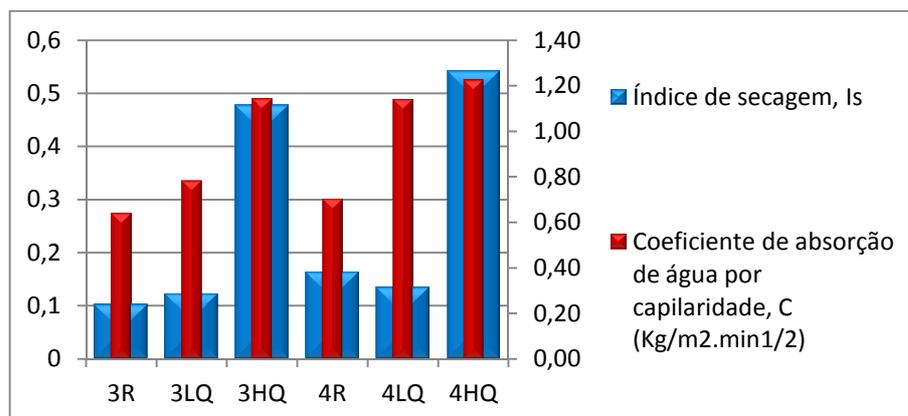


Figura 3.29- Relação índice de secagem-Coef. de absorção de água por capilaridade

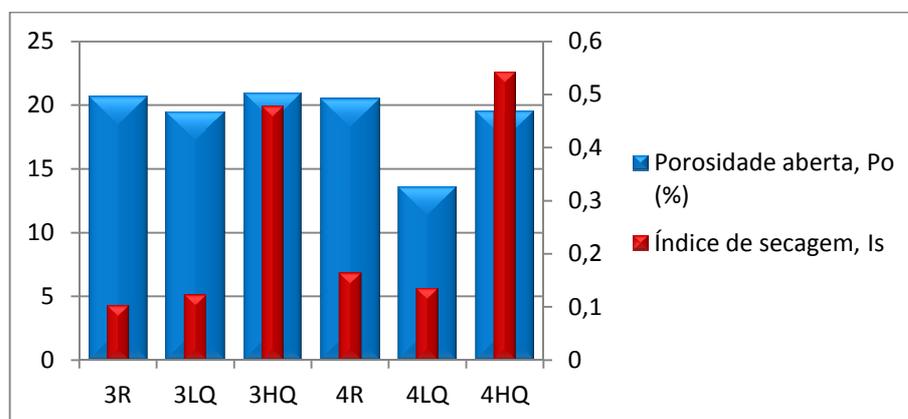


Figura 3.30 - Relação Índice de secagem-porosidade aberta

Fazendo um encerro geral de todas as conclusões feitas ao longo deste trabalho, podemos concluir que para os ensaios mecânicos, as argamassas 3HQ apresentaram os melhores valores, apesar das argamassas de traço volumétrico 1:4 apresentarem melhores valores quando comparadas com as de traço 1:3. Ou seja, a incorporação de resíduos acarreta melhores comportamentos, em destaque para 40% de incorporação. Relativamente aos ensaios higrotérmicos, as argamassas de referência obtiveram os melhores valores a nível de secagem e de absorção de água por capilaridade, tendo as argamassas com 20% de incorporação de resíduos apresentado os melhores resultados para a porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água. Ou seja, para os ensaios higrotérmicos, a incorporação de 40% de resíduos não é vantajosa.

3.6 Comparação de resultados

Nesta seção pretende-se fazer uma breve comparação de resultados com Cruz (2012). Esta autora, elaborou um trabalho de dissertação sobre argamassas de cal hidráulica natural (NHL3,5) com incorporação de resíduos cerâmicos de telha, vaso e tijolo em substituição do agregado. A incorporação deu-se igualmente em percentagens de 20% e 40%, sendo apenas estudado o traço volumétrico 1:3. De realçar, que a comparação contém condicionantes diferentes que podem influenciar a comparação dos resultados.

Estas condicionantes são relativas à preparação das argamassas. As areias são diferentes, tendo portanto características de granulometria e de baridade distintas, que influenciam as argamassas. A moldagem dos provetes em Cruz (2012), foi desenvolvida com compactador mecânico, não sendo portanto comparável uma compactação com pilão, como é o caso do presente trabalho. Tais diferenças podem induzir fatores discrepantes e provocando uma comparação de resultados pouco correta. Os agregados sendo diferentes, constituem misturas de granulometria e baridade também elas diferentes. A compactação mecânica promovendo uma compactação de tensão constante e 100% uniforme ao longo do provete, promove um melhor aglomeramento dos constituintes das argamassas.

De referir também, que apesar dos resíduos serem ambos de barro vermelho, estes diferem nas misturas de argilas e em todo o restante processo de fabrico, promovendo diferença no comportamento das argamassas. Este seria de facto o único condicionante plausível, para o objetivo da comparação destes tipos de resíduos nas argamassas de cal hidráulica natural (NHL 3,5).

Recorrendo a Cruz (2012), a autora refere que as argamassas só de cal hidráulica natural apresentam bons comportamentos mecânicos e higrotérmicos, quando em traço volumétrico 1:3 de ligante e areia de rio. No presente estudo, os ensaios mecânicos obtiveram melhores resultados com argamassas de traço 1:3 e com 40% de resíduo. No caso dos ensaios higrotérmicos, ocorreu uma melhoria com a incorporação de resíduos, exceto para o índice de secagem e coeficiente de absorção de água, que também revelaram melhores resultados com argamassa apenas de cal hidráulica natural. Refere igualmente que as argamassa com melhor comportamento higrotérmico são as argamassas de tijolo em menor proporção de resíduo. Neste trabalho, as argamassas com pior comportamento higrotérmico foram as argamassas com 40% de incorporação de resíduos.

Esta argamassa com 20% de tijolo, também revela bons comportamentos à capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e secagem. De facto, no presente estudo, as melhores

argamassas foram as argamassas de referência para capilaridade e secagem, e argamassas de traço 1:3 com 20% de resíduos para permeabilidade.

4 Conclusão

Como conclusão fundamental, é de referir que todos os objetivos estabelecidos foram cumpridos com êxito. Realizaram-se ensaios para conhecimento das propriedades mecânicas e higrotérmicas de argamassas de traço volumétrico 1:3 e 1:4, com 20% e 40% de incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho. Tal estudo contribuiu para um melhor conhecimento sobre a incorporação de resíduos de barro vermelho, em argamassas de cal hidráulica natural, complementando estudos de investigação sobre "incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação".

A realização do inquérito e recolha de resíduos foi exigente devido à quase inexistência de mercado de mosaicos de barro vermelho. Tal permitiu concluir que apesar de existir consciência ambiental e económica, existe total desconhecimento sobre a incorporação destes resíduos em argamassas, contribuindo para melhoria de propriedades e sendo uma arte com vários milhares de anos.

Os ensaios basearam-se nas normas existentes, tendo-se procedido a pequenas alterações de procedimentos, sem no entanto comprometer as normas e seus procedimentos, de modo a se poderem aplicar aos ensaios realizados.

Pode-se afirmar que a incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho, pode contribuir para melhoria das propriedades mecânicas e higrotérmicas das argamassas em estudo, excetuando a secagem e a absorção de água por capilaridade que obtiveram melhores resultados para ambas as argamassas de referência. A incorporação de 40% de resíduos melhora as propriedades mecânicas, não melhorando as propriedades higrotérmicas.

Considerando os resultados de incorporação de resíduos como favoráveis e encarando a necessidade de valorização de resíduos cerâmicos, de modo a fomentar os conceitos de sustentabilidade ambiental e económica, conclui-se que pode existir uma forte simbiose entre a reabilitação e a sustentabilidade. Tal relação pode ser favorável, através de uma gestão de resíduos, fomentando a reciclagem e contribuindo vantajosamente para agentes económicos, com fundamental participação de todos os intervenientes na cadeia.

Para um estudo mais completo deste tipo de argamassas, poder-se-ia estudar o comportamento face à ação de sais solúveis e retração sofrida durante a cura. De notar que também dever-se-iam realizar estudos com tempo de cura maior, devido à tendência de diminuição da

carbonatação ao longo do tempo. Também poder-se-iam realizar ensaios de aderência ao suporte, devido à compatibilidade dos sistemas ser um dos princípios essenciais da qualidade dos rebocos.

Devido aos produtos cerâmicos de barro vermelho não terem todos as mesmas características, devido aos diferentes processos de fabrico, seria interessante estudar este tipo de argamassas com mosaico vidrado mate ou vidrado brilhante, ou ladrilhos de revestimento de paredes. De facto, este resíduo é não vidrado e destinado a revestimento de pavimento. Devido ao resíduo em estudo ter sido sujeito a temperatura de cozedura elevada, não se efetuou análise de pozolanicidade, devendo ser analisada em outros resíduos quando produzidos a temperaturas mais reduzidas.

Como trabalhos futuros também poder-se-iam estudar os mesmos tipos de argamassas, mas com resíduos de pasta branca, devido ao reduzido mercado de mosaicos de barro vermelho. De notar que a cerâmica de pasta branca tem outra composição e dureza que a pasta de barro vermelho.

5 Referências Bibliográficas

- Akkurt, S., Böke, H., Budak, M. (2006). "Evaluation of heat treated clay for potential use in intervention mortars". *Applied Clay Science* (2010), pp. 414-419, Elsevier Ltd..
- Alvarez, J. (2007). "Alvenarias e Argamassas anteriores ao Império Romano". 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Alvarez, J., Sequeira, C., Costa, M. (2005). "Ensinamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas". 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- APA, I.P. @ (2013). <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84> . Agência Portuguesa do Ambiente, I.P (página internet oficial). [Acedido em: 23 de Maio de 2013].
- Baronio, G., Binda, L. (1988). "Survey of brick/binder adhesion in "powdered brick" mortars and plasters". *Masonry International Journal*, Vol. 2, n.3, pp 87-92.
- Baronio, G., Binda, L. (1997). "Study of the pozzolanicity of some bricks and clays". *Construction and Building Materials*, Vol. 11, nº1 (1997), pp. 41-46, Elsevier Ltd..
- Binici, H. (2006). "Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties". *Construction and Building Materials* 21 (2007), pág. 1191-1197, Elsevier Ltd..
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., Uğurlu, E. (2006). "Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters". *Cement and Concrete Research*, June 2006, Volume 36, Issue 6, Pages 1115-1122.
- Cavaco, L. (2005). "Técnicas de Aplicação de Argamassas de Revestimento em Edifícios Antigos. Influência no Desempenho". Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Coutinho, J. (2012). "Ciência de Materiais - 1ª Parte". Documento provisório, 2002
- Couto, A., Couto, J. (2007). "Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios antigos". 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

Cruz, A. (2012). "Argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos cerâmicos". Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Decreto-Lei nº 73/2011. Diário da República - 1ª Série - Nº 116 - 17 Junho 2011, pp. 3251-3300.

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

European Committee for Standardization (CEN) (1999a, 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, CEN, Brussels.

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

European Committee for Standardization (CEN) (2001). "Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties". EN ISO 12572:2001, CEN, Brussels.

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

European Committee for Standardization (CEN) (2009). "Conservation of cultural property – Test methods - Determination of water absorption by capillarity". EN 15801:2009, CEN, Brussels.

European Committee for Standardization (CEN) (2012). "Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method". EN 933-1:2012, CEN, Brussels.

Faria, P., Silva, V., Flores-Colen, I. (2012). "Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais. Avaliação laboratorial.". 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, APFAC, Coimbra.

- Faria-Rodrigues, 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.
- Ferreira, T. (2011). “Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Figueiredo, V. (1993). “Materiais de construção – produtos cerâmicos de barro vermelho. Fabrico, propriedades e aplicações”. Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- Freitas, V., Torres, I., Guimarães, A. (2008). “Humidade Ascensional”. FEUP Edições. 1ª edição, Porto
- Fröschl, S. (1998). “Lime within and on top of the outside wall structure”. COST C5/EUROCARE Workshop. Viena.
- Grilo, J. (2013). "Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 de fabrico nacional". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Instituto Nacional de Estatística, I.P. (INE, I.P.) (2012). "Estatísticas da Construção e Habitação 2011". Lisboa-Portugal, 2012.
- Instituto Português da Qualidade (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, IPQ.
- 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: 2006, IPQ.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2008a). “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.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2008b). “Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas”. NP EN 1015-19, IPQ, Caparica.

- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2010a). "Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade". NP 4220: 2010, IPQ.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2010b). "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água". NP EN 1097-6: 2003/A1: 2010, IPQ.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2011a). "Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade". NP EN 459-1: 2011, IPQ.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2011b). "Cal de construção. Parte 2: Métodos de ensaio". NP EN 459-2: 2011, IPQ.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2011c). "Cal de construção. Parte 3: Avaliação da conformidade". NP EN 459-3: 2011, IPQ.
- Matias, G., Torres, I., Faria, P. (2010). " Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico". 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Miranda, L. (2009). "Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Penas, F. (2008). "Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Santos, A., Veiga, R. (2012). "Argamassas compatíveis para edifícios antigos". Jornadas LNEC, Engenharia para a sociedade - Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. LNEC, Lisboa.
- Silva, H. (2012). "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduo de cerâmica em granulometria fina". Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Silva, M. (2010). "Aproveitamento de materiais resultantes de uma demolição selectiva". Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Stevens, C. (2005). "Measuring Sustainable Development". Statistics Brief. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2005, Vol. No. 10.
-

- Tomás, A. (2012). "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos em substituição de parte do agregado". Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Veiga, M., Brito, J., Lampreia, N. (2012). "Argamassas de revestimento com baixa energia incorporada através da reutilização de resíduos". Jornadas LNEC, Engenharia para a sociedade - Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. LNEC, Lisboa.
- Veiga, R. (1998). "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação". Teses e Programas de Investigação LNEC. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Veiga, R. (2003a). "As Argamassas na Conservação". 1as Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro. Publicações do LNEC, Lisboa.
- Veiga, R. (2003b). "Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes". Atas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa.
- Velosa, A., Coroado, J., Veiga, R., Rocha, F. (2007). "Characterization of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair". Original Research Article, Materials Characterization, November-December 2007, Volume 58, Issues 11-12, Pages 1208-1216.