



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

Argamassas de Cal com Incorporação de Resíduos de Cerâmica Branca: Estudo do seu comportamento

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

Autor

Hugo Filipe Pedrosa Alberto

Orientador

Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva

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, Julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Após o término desta dissertação não podia deixar de agradecer o contributo de algumas pessoas para a realização deste trabalho, em particular:

- Aos meus orientadores, Prof.^a Maria Isabel Morais Torres e Prof. José António Raimundo Mendes da Silva pela orientação, apoio e disponibilidade que demonstraram ao longo deste trabalho.
- À Eng.^a Gina Matias e à Sofia Tavares, técnicas superiores do ITeCons, incansáveis no acompanhamento, dedicação e paciência que demonstraram no trabalho experimental e escrito.
- À Eng.^a Rita Vieira, da Value Ceramic, pelo fornecimento dos resíduos cerâmicos que permitiram a realização deste estudo.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que conheci ao longo deste percurso, em especial aos meus amigos, pelos excelentes momentos que vivi, sem dúvida os melhores da minha vida académica.

E por fim, o maior agradecimento deste trabalho é dirigido à minha família, em especial os meus pais e irmãs, pela oportunidade, força e motivação que sempre me transmitiram e que permitiu concluir esta etapa da minha vida.

Este trabalho foi 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".

Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

RESUMO

Na reabilitação de revestimentos exteriores antigos deve ter-se em conta que são os elementos mais expostos a degradação, e por isso, devem apresentar propriedades mecânicas e higrotérmicas adequadas para um bom desempenho. Assim, a produção da argamassa deve ter aparência e constituição próximas das originais, para compatibilizar com a argamassa pré-existente e o suporte.

Tendo em conta os desperdícios resultantes da indústria cerâmica e da construção, acrescendo a preocupação ambiental e a limitação do consumo de recursos naturais, pretende-se com este trabalho avaliar a viabilidade da reciclagem de resíduos de cerâmica branca, por incorporação em argamassas, em substituição parcial de agregado. Assim, podemos obter valorização económica destes resíduos aliando o conceito de reabilitação ao da sustentabilidade.

Assim é analisada a influência de resíduos de cerâmica branca, nomeadamente, faiança e porcelana, em argamassas de cal hidráulica natural (NHL 3,5) ao traço volumétrico 1:3. A incorporação de resíduos será feita em granulometria dispersa com substituição parcial de 20% e 40% do volume de agregado. Os resultados obtidos são comparados com argamassas de referência, que contêm apenas cal hidráulica natural e areia. As argamassas serão ensaiadas, aos 28 dias, para avaliar as suas propriedades mecânicas e o seu comportamento face à presença de água.

Verificou-se que a incorporação de resíduos cerâmicos por substituição parcial de agregado permite moldar o comportamento de argamassas de cal hidráulica natural, conforme o tipo e a quantidade de resíduo. Estas argamassas, no âmbito geral, apresentam melhores resultados nos ensaios mecânicos, no entanto, para o ensaio de secagem e permeabilidade ao vapor de água não se verifica o mesmo.

ABSTRACT

Elements most exposed to degradation must be taken into account for the rehabilitation of old outdoor finishes. These elements should show mechanical and hydrothermal properties suitable for a good performance. Thus, mortar production should have similar appearance and constitution to the original in order to match with the prior mortar and support.

This work aims to assess the recycling viability of waste and scrap of white ceramic by incorporating mortars in replacement of partial aggregate, by taking into account the waste and scrap resulting from ceramics and building industry; to that it should be added environmental concerns and limitation of natural resources consumption. Thus, it is possible to combine the economic value of these wastes and scraps with rehabilitation and sustainability concepts.

Waste and scrap of white ceramics are analysed, mainly faience and porcelain, in mortar of Natural hydraulic Lime (NHL 3.5) at volumetric ratio of 1:3. The incorporation of waste and scrap will be done in dispersed grain size with partial replacement of 20% and 40% of the aggregate volume. The results obtained are compared with reference mortars which contain only hydraulic lime and sand. The mortars will be tested after 28 days in order to evaluate their mechanical properties and their behaviour in the presence of water.

It was verified that the incorporation of ceramic waste and scrap by partial replacement of the aggregate allows shaping the behaviour of natural hydraulic lime mortars depending on the type and amount of waste and scrap. Overall, the mortars studied show better results for mechanics tests but worse results for the drying test and water vapour permeability than the reference mortars.

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 metodologias	2
1.3. Organização do texto	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	4
2.1. Argamassas.....	4
2.1.1. Agregados.....	4
2.1.2. Água da amassadura	5
2.1.3. Ligantes	6
2.1.3.1. Cal Aérea	6
2.1.3.2. Cal Hidráulica.....	8
2.1.4. Pozolanas	8
2.2. Argamassas de substituição	9
2.2.1. Considerações iniciais	9
2.2.2. Alvenarias e rebocos antigos	10
2.2.3. Escolha adequada das argamassas de substituição	10
2.2.4. Características a exigir às argamassas e compatibilidade com o suporte.....	11
2.2.5. Resíduos cerâmicos industriais.....	12
2.2.6. Argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica.....	15
2.2.7. Fatores que influenciam o comportamento das argamassas	17

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	19
3.1. Descrição dos procedimentos experimentais.....	19
3.1.1. Caraterização da matéria-prima.....	19
3.1.1.1. Análise granulométrica dos materiais por peneiração gravítica.....	19
3.1.1.2. Determinação da baridade dos materiais	22
3.1.1.3 Determinação da massa volúmica dos materiais	23
3.1.1.4. Preparação das argamassas	26
3.1.2. Caraterização das argamassas frescas.....	28
3.1.2.1. Ensaio de consistência por espalhamento.....	28
3.1.3. Caraterização das argamassas endurecidas.....	30
3.1.3.1. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	30
3.1.3.2. Ensaio de resistência à tração por flexão.....	33
3.1.3.3. Ensaio de resistência à compressão	35
3.1.3.4. Determinação da massa volúmica e porosidade aberta	37
3.1.3.5. Determinação da absorção de água por capilaridade.....	39
3.1.3.6. Ensaio de secagem.....	44
3.1.3.7. Determinação da permeabilidade ao vapor de água	46
3.2 Análise global de resultados	51
3.3. Comparação de resultados	53
4. CONCLUSÃO.....	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Ciclo da Cal aérea (NSG@2014).....	7
Figura 2.2- Incompatibilidade de reboco antigo à base de cal com reparação através de cimento Portland (Silva, R. (2009))... ..	11
Figura 2.3- Produção de resíduos industriais na região centro.....	13
Figura 2.4- Quantificação e qualificação dos resíduos obtidos no processo de fabrico..	15
Figura 2.5- Classificação de agregados usada em petrografia (Coutinho, J. (1999)).....	18
Figura 3.1- Resíduos aplicados no estudo: (a) porcelana vidrada; (b) faiança vidrada; (c) faiança não vidrada.....	19
Figura 3.2- Balança utilizada na análise granulométrica dos materiais.....	20
Figura 3.3- Peneiração: (a) faiança vidrada; (b) faiança não vidrada.....	20
Figura 3.4- Curva granulométrica das matérias-primas empregues no estudo.....	21
Figura 3.5- Lavagem dos agregados sobre o peneiro 0,063 mm.....	24
Figura 3.6- Moldagem dos provetes prismáticos (a); moldagem dos provetes cilíndricos (b); provete prismático (c).....	27
Figura 3.7- Organograma com os ensaios e número de provetes a ensaiar.....	28
Figura 3.8- Equipamentos usados no ensaio.....	29
Figura 3.9- Representação esquemática da preparação do provete de acordo com a norma NP EN 14 146:2006 (IPQ, 2006).....	31
Figura 3.10- Ed_1 [1] obtido para massa volúmica determinada através de medição de volume por cubicagem e Ed_1 [2] obtido por imersão, aos 28 dias.....	33
Figura 3.11- Ensaio de resistência à tração por flexão (Duarte, T. (2011))... ..	34
Figura 3.12- Resistência à flexão aos 28 dias.....	35
Figura 3.13- Ensaio de resistência à compressão (Duarte, T. (2011)).....	36
Figura 3.14- Resistência à compressão aos 28 dias.....	37
Figura 3.15- Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 dias.....	39
Figura 3.16- Provetes sujeitos à absorção por capilaridade.....	40
Figura 3.17- Curvas de absorção de água por capilaridade obtidas no ensaio aos 28 dias.....	42
Figura 3.18- Curvas de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio aos 28 dias.....	43
Figura 3.19- Curvas de secagem das argamassas aos 28 dias.....	45
Figura 3.20- Sistema provete/tina na câmara climática (Tomás, A. (2012)).....	47

Figura 3.21- Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente.....	50
Figura 3.22- Relação módulo de elasticidade com resistência à flexão.	51
Figura 3.23- Relação das resistências à flexão e compressão... ..	51
Figura 3.24- Relação entre permeabilidade e porosidade aberta.....	52
Figura 3.25- Relação entre coeficiente de absorção e índice de secagem.	52
Figura 3.26- Relação entre índice de secagem e porosidade aberta.	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Classificação das Cais Hidráulicas.....	8
Quadro 2.2- Requisitos estabelecidos para características mecânicas das argamassas ...	12
Quadro 2.3- Características de comportamento à água e ao clima	12
Quadro 3.1- Abertura de peneiros utilizados para definição da curva granulométrica ...	21
Quadro 3.2- Baridade das matérias-primas empregues no estudo.....	23
Quadro 3.3- Massas volúmicas dos materiais	25
Quadro 3.4- Caracterização das argamassas em estudo	26
Quadro 3.5- Caracterização do ensaio de consistência ao espalhamento.....	30
Quadro 3.6- Coeficientes de capilaridade, valores assintóticos e respetivos desvios- padrão	43
Quadro 3.7- Valores do índice de secagem e respetivos desvios-padrão	46
Quadro 3.8- Permeabilidades ao vapor de água, fatores de resistência ao vapor de água, espessuras da camada de ar equivalente e respetivos desvios-padrão, aos 28 dias	50
Quadro 3.9- Módulo de elasticidade	54
Quadro 3.10- Resistência à tração por flexão.....	54
Quadro 3.11- Resistência à compressão	55
Quadro 3.12- Absorção de água por capilaridade	55
Quadro 3.13- Índice de secagem	56
Quadro 3.14- Porosidade aberta e massa volúmica aparente	56
Quadro 3.15- Permeabilidade ao vapor de água.....	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Com a evolução demográfica e urbanística que ocorreu ao longo do século XX e inícios do século XXI novos conceitos surgiram, destacando a reabilitação e a sustentabilidade que vão adquirindo grande relevância na construção atual.

Com a introdução do conceito sustentabilidade novos valores começaram a ser tidos em conta, tais como a proteção ambiental e o consumo energético, por outro lado a reabilitação de edifícios antigos torna-se vital pelo excesso de construção e como forma a preservar os valores culturais.

A proteção dos edifícios contra os agentes atmosféricos é exercida fundamentalmente pelas fachadas e coberturas, que ao longo do tempo de vida útil dos materiais e do uso se vão degradando progressivamente, perdendo capacidade de responder adequadamente às exigências funcionais.

As argamassas de revestimento de edifícios devem assegurar a proteção do suporte, a impermeabilização e um aspeto visualmente agradável.

O processo de reabilitação através da substituição de parte ou totalidade do revestimento exterior de qualquer edifício deve ser tratada com uma avaliação pormenorizada por forma a obter a solução otimizada do ponto de vista da qualidade e economia, e compatível com o suporte.

Os revestimentos exteriores dos edifícios antigos, na sua grande maioria, foram executados com base em argamassas cal aérea.

As argamassas do revestimento das fachadas antigas continham na sua constituição a cal aérea que atuava como ligante, a areia como agregado e ocasionalmente a adição de produtos que conferiam determinadas características, como por exemplo, resíduos de cerâmica de barro ou em alternativa materiais com características pozolânicas para melhorar a resistência e durabilidade da mistura.

Atualmente, devido à abundância de materiais que podem constituir uma argamassa e face aos novos conceitos no panorama atual da construção (sustentabilidade e reabilitação) é do interesse de todos o reaproveitamento de resíduos industriais. Alguns estudos revelam que a indústria cerâmica produz taxas elevadas de resíduos não utilizáveis, até 10% da sua produção, posteriormente depositados em aterro, que a médio prazo se constitui uma ameaça ambiental gravosa.

Esta dissertação surge no seguimento de outros trabalhos de investigação que caracterizaram argamassas com substituição de parte do agregado por resíduos cerâmicos em grão, a fim de se poder comparar os resultados obtidos com estudos já existentes.

1.2. Objetivos e metodologias

O objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento mecânico e o comportamento face à presença de água de argamassas de cal hidráulica com incorporação de resíduos de cerâmica branca, nomeadamente porcelana e faiança, provenientes da produção de loiças, analisando o potencial de utilização destes resíduos em substituição parcial do agregado.

Os resíduos cerâmicos foram partidos, posteriormente moídos e peneirados para obter uma granulometria dispersa para uma substituição plausível de parte do agregado.

As argamassas analisadas foram de cal hidráulica ao traço 1:3. Além da argamassa de referência foram produzidas mais seis argamassas em que se procedeu à substituição parcial do agregado por resíduo de cerâmica branca, sendo duas com resíduos de porcelana, duas com resíduos de faiança vidrada e duas com faiança não vidrada. As percentagens de substituição foram de 20% e 40% do volume de areia. As argamassas foram ensaiadas aos 28 dias.

Com este trabalho pretende-se incentivar a reutilização de resíduos, reduzindo os volumes de resíduos a inserir em aterros e consequentemente abrandar o consumo de recursos naturais, promovendo um ambiente mais saudável e sustentável.

1.3. Organização do texto

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema, uma descrição geral da metodologia proposta e objetivos do trabalho desenvolvido.

O segundo capítulo apresenta o estado do conhecimento atual, estando dividido em dois subcapítulos. Na primeira parte são descritos os materiais aplicáveis a argamassas de edifícios antigos e expostas as suas características. Na segunda parte são abordados os resíduos cerâmicos, desde a sua constituição até ao seu reaproveitamento, com a apresentação de alguns estudos.

O terceiro capítulo contém toda a descrição da parte experimental do trabalho, a apresentação dos resultados e uma análise crítica a esses resultados.

O quarto capítulo contém as conclusões, onde é apresentada uma análise aos resultados retirados ao longo do trabalho, através de uma reflexão global e crítica ao trabalho realizado, comparando com um trabalho realizado anteriormente, e apresentando sugestões ou novas abordagens para futuros trabalhos.

No quinto e último capítulo apresentam-se todas as referências bibliográficas utilizadas como elementos de pesquisa úteis na realização deste trabalho.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Argamassas

Podemos dizer que uma argamassa é uma mistura homogénea constituída por vários elementos, dos quais três são essenciais - agregado, água e ligante, podendo ainda juntar-se outros - aditivos e adjuvantes que servem melhorar características específicas da argamassa.

A aplicação de argamassas no revestimento de paramentos é uma técnica bastante antiga de conservação de edifícios e que suscita um espectro de dificuldades bastante distinto das equacionadas nos edifícios contemporâneos.

Com o despontar de novos materiais na formulação das argamassas de revestimento (cimento Portland), a sua caracterização tornou-se relevante devido às patologias que surgiram nas argamassas que pretendiam ser de substituição.

Segundo Rodrigues (2010a) apesar dos novos materiais apresentarem comportamentos ótimos na ótica da construção atual não significa que se estabeleça uma correlação com o desempenho destes materiais quando aplicados em alvenarias antigas.

O facto de as argamassas de cimento serem pouco compatíveis com as alvenarias antigas tem incentivado o uso de outro tipo de argamassas de substituição, como é o caso de argamassas bastardas de cimento, cal aérea ou hidráulica e areia, combinando assim as vantagens dos dois tipos de ligantes (Ferreira, 2011).

Veiga (2003) também refere que uma argamassa inadequada pode provocar degradação em vez de proteger os elementos com os quais está em contacto, como é o caso da utilização de argamassas à base de cimento.

2.1.1. Agregados

Antigamente designados de “inertes” por se pensar que não reagiam quimicamente com os outros elementos devido à sua estabilidade química, mantendo a sua estrutura orgânica

ao longo do processo de utilização. Atualmente sabe-se que alguns agregados não são efetivamente inertes pelo que hoje se designam por agregados.

Estes componentes das argamassas possuem várias funções: diminuem a retração da argamassa, diminuem a quantidade de ligante necessário, aumentam a porosidade, a resistência à compressão e a resistência ao gelo (Cavaco, 2005).

Quanto à composição, as areias podem ser siliciosas se resultantes da degradação de quartzo e granito e areias calcárias se provenientes da degradação do calcário. A exploração das areias passa, atualmente, pelo uso das areias de rios ou areiros (siliciosas) mas também por britagem (calcárias), havendo condicionalismos ambientais a respeitar.

A areia funciona como o esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que, o comportamento global da mistura depende da qualidade do agregado.

Fatores como a forma dos grãos, a dureza, a granulometria, o estado de limpeza e a origem do agregado afetam o comportamento da mistura. Deve-se procurar que a granulometria do agregado seja extensa para que as partículas finas reduzam o volume de vazios e as partículas de maiores dimensões forneçam a resistência adequada à argamassa. Assim sendo, reduz-se a quantidade de ligante e, conseqüentemente, as retrações da argamassa e mantendo uma trabalhabilidade aceitável à mistura. Outra condição essencial corresponde à limpeza do agregado que deve estar livre de impurezas químicas, matéria vegetal e matérias finas de natureza argilosa. Estas impurezas dificultam o perfeito contacto dos grãos da areia com o ligante, impedindo uma boa aderência que se pode traduzir numa quebra relevante da sua resistência (Petrucci, 1976).

2.1.2. Água da amassadura

A água de amassadura vai permitir a ligação entre o agregado e o ligante, dando origem à argamassa. A quantidade de água a adicionar não sendo fácil de aferir, deve ser analisada caso a caso, para conferir uma trabalhabilidade e consistência adequadas à argamassa.

De acordo com Ribeiro (2000), a água a utilizar deverá ser limpa, incolor e isenta de impurezas, sais nocivos e substâncias orgânicas. Portanto, qualquer água potável, poderá ser aplicável na amassadura.

2.1.3. Ligantes

Na indústria da construção existem vários ligantes, que podem ser divididos em três grandes categorias: aéreos, hidráulicos e orgânicos.

Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós bastante finos que adicionados à água formam uma pasta que endurece pela reação química entre ambos, podendo endurecer tanto ao ar como imersos.

Os ligantes aéreos diferem dos ligantes hidráulicos porque não têm capacidade de endurecer dentro de água devido à necessidade de estar em contacto com o dióxido de carbono existente na atmosfera para os transformar em carbonatos.

Os ligantes orgânicos estão em fase de expansão, destacando-se as resinas sintéticas e os hidrocarbonetos.

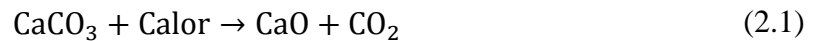
Durante muitos séculos a cal aérea foi o ligante mais usado na execução de edifícios, nomeadamente em argamassas para assentamento de alvenarias e para revestimento das fachadas, no entanto, com o aparecimento da cal hidráulica, que é mais resistente e possui algumas propriedades hidráulicas como a capacidade de endurecer imersa, caiu em desuso. Mais tarde, surgiu o cimento Portland, ligante mais usado na construção nova nos dias de hoje.

2.1.3.1. Cal Aérea

Como refere Coutinho (2002), as cals aéreas resultam da decomposição de rochas cálcicas que contêm percentagens nunca inferiores a 95% de carbonato de cálcio – CaCO_3 , ou, em alternativa, de rochas dolomítica, constituída por carbonato de cálcio e magnésio (com teor mínimo de 20% de magnésio) – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Estas cals podem ter uma designação alternativa, DL para a cal dolomítica ou magnésiana e CL para a cal cálcica.

As cals aéreas também são classificadas em dois grupos quanto ao teor de impurezas: gordas e magras. Designam-se gordas quando se está na presença de calcários quase puros, com teores de carbonato não inferiores a 99%. As cals aéreas magras provêm de calcários com teores de argila ou outras impurezas entre 1 a 5%.

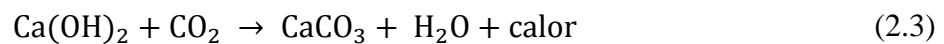
O processo de produção da cal aérea inicia-se quando o carbonato de cálcio, na presença de temperaturas na ordem de 900°C , se decompõe em óxido de cálcio e dióxido de carbono que é libertado para a atmosfera.



O óxido de cálcio, mais conhecido por cal viva, é um produto bastante instável, que ao sofrer a hidratação, processo de extinção da cal viva que pode desenvolver-se por imersão ou aspersão com água, vai formar a hidróxido de cálcio – cal apagada.



A cal apagada estando em contato com o dióxido de carbono da atmosfera, transforma-se em carbonato de cálcio, reconstituindo a composição química da pedra que é proveniente, libertando água e calor.



Durante a secagem da pasta de cal observam-se fenómenos de contração e de fissuração, havendo necessidade de adicionar areia ou pó de pedra, consoante a situação, na argamassa para a baixar a retração do produto, permitindo a carbonatação ao mesmo tempo que ocorre a secagem.

Na Figura 2.1, apresenta-se o ciclo da cal aérea com os principais processos transformação.

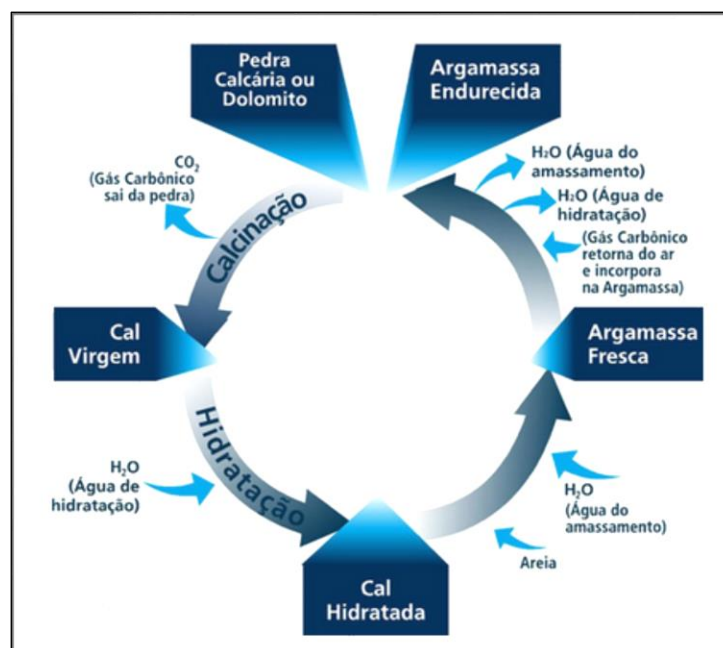


Figura 2.1- Ciclo da Cal aérea (NSG@2014).

2.1.3.2. Cal Hidráulica

De acordo com a norma NP EN 459-1:2011 (1PQ, 2011), as cal hidráulicas são constituídas fundamentalmente por silicatos, aluminatos e hidróxidos de cálcio, provenientes da queima de rocha calcária argilosa e subsequente extinção de materiais adequados com o hidróxido de cálcio e pode fazer presa e endurecer dentro e fora de água

A cal hidráulica provém da cozedura de calcários que contêm entre 5% e 20% de argila na sua constituição, através de temperaturas na ordem de 1200°C a 1500°C. Forma-se o óxido de cálcio e surge a combinação da sílica e da alumina da argila com parte significativa do óxido de cálcio formado. A cal hidráulica surge nos produtos formados pelos silicatos e aluminatos, que hidratados dão origem a produtos que endurecem tanto no ar como em água.

As cal hidráulicas podem ser naturais e artificiais consoante os seus processos de transformação.

A cal hidráulica natural é designada por NHL e é produzida por cozeduras não superiores a 1250°C de calcário argiloso ou silicioso, extintas e reduzidas a pó e com ou sem moagem. De forma semelhante temos a cal hidráulica natural com adição que é designada por NHL-Z e contém até 20% da massa por adição de materiais pozolânicos.

A cal hidráulica artificial, HL, corresponde a cimentos magros, provenientes de fíleres inertes de rocha calcária adicionados ao clínquer do cimento Portland.

Segundo a NP EN 459-1: 2011, a classificação das cal hidráulicas é estabelecida em função da resistência à compressão apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Classificação das Cais Hidráulicas.

Tipos de Cal	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
HL2 e NHL2	-	≥ 2 a ≤ 7
HL3,5 e NHL 3,5	-	$\geq 3,5$ a ≤ 10
HL5 e NHL5	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

2.1.4. Pozolanas

A designação pozolana provém do italiano pozzuolana, resgatado à localidade Pozzuoli nas imediações de Vesúvio.

Segundo alguns estudos, as pozolanas começaram a ser utilizadas na época dos romanos para melhoramento de algumas características das argamassas. São materiais siliciosos ou silício-aluminosos sem propriedades cimentícias, mas que finamente moídos e adicionando água, a temperatura ambiente, se aliam ao hidróxido de cálcio, formando compostos com características cimentícias.

As pozolanas podem ser de origem natural quando provenientes de erupções vulcânicas e/ou de argilas cozidas naturalmente pela lava incandescentes e artificiais quando referentes a tratamento de materiais com base siliciosa a temperaturas específicas para cada material, dando origem a sílica amorfa. Neste segundo grupo inserem-se materiais como os tijolos, ladrilhos e telhas.

De acordo com Tomás (2012) citando Veiga (1998), a utilização de pozolanas em argamassas de reboco tem como vantagens: a melhoria da trabalhabilidade, coesão e resistência aos ataques de sulfatos e redução da retração. Como aspetos penalizadores destaca-se o aumento de tempo da presa e o atraso das reações de hidratação que levam ao aumento dos tempos de execução.

Segundo Matias (2008) a pozolanidade dos materiais pode ser calculada diretamente através do método da broca de Vicat ou pelo método de Feret baseados na resistência mecânica. Pelo cálculo indireto, a pozolanidade pode ser obtida por métodos de análise química do teor de óxido de cálcio e alcalis, nomeadamente o método de Fratini ou Chapelle modificado.

2.2. Argamassas de substituição

2.2.1. Considerações iniciais

A reabilitação de edifícios antigos tem sido alvo de estudos para otimizar técnicas e materiais a aplicar nas intervenções. Os revestimentos exteriores das fachadas têm uma importância fundamental na proteção da parede perante as ações climáticas, ambientais, mecânicas e biológicas, estando assim, mais suscetível à deterioração do que outros elementos construtivos. Poderá, assim, dependendo da deterioração do reboco, ser necessário substituir parte ou a totalidade deste revestimento.

Antes de iniciar os procedimentos da sua substituição deve fazer-se uma análise prévia cuidada para conhecer os materiais constituintes e as suas características para não ocorrer erros de execução na escolha das argamassas de substituição. A aplicação de uma

argamassa inadequada pode levar a uma deterioração precoce do revestimento e dos próprios elementos do suporte.

Segundo Rodrigues (2010b), é necessário desenvolver argamassas que sejam compatíveis com as alvenarias e que cumpram a sua função de proteção, como também tenham resistência e durabilidade suficientes para garantir a sua integridade.

No entanto, por vezes a necessidade de cumprir prazos de execução e a falta de mão-de-obra especializada, são fatores que penalizam o desempenho que se pretende com a argamassa de revestimento. O uso generalizado de argamassas de cimento que se tem vindo a notar atualmente pode ser penalizador quando a entidade executante desconhecer os cuidados a ter e os seus procedimentos em cada situação específica.

2.2.2. Alvenarias e rebocos antigos

De acordo com Veiga, M e Carvalho, F. (2002), as paredes antigas são na sua grande maioria bastante deformáveis, constituídas por materiais bastante porosos e de baixa resistência mecânica, apesar das elevadas espessuras lhes conferirem boas capacidades resistentes. A ascensão de água por capilaridade é permitida não existindo cortes de capilaridade. A evolução e características dos produtos aplicados atualmente diferem consideravelmente dos materiais antigos mas a sua principal função de proteção mantém-se nos dias de hoje.

Como refere Faria et al (2008), com o aparecimento do cimento em meados do século passado, o uso da cal decaiu progressivamente, tendo atualmente um uso muito restrito.

2.2.3. Escolha adequada das argamassas de substituição

De acordo com Ferreira (2011), os requisitos que as argamassas de substituição total ou parcial devem garantir um comportamento satisfatório e contribuir para a durabilidade do edifício, mantendo a identidade histórica, de compatibilidade e de funcionamento, evitando a degradação das paredes e o aparecimento de fenómenos de envelhecimento diferencial entre novos e velhos revestimentos.

Segundo Santos et al (2012), quando é necessário avançar com a substituição parcial ou total de um revestimento de um edifício antigo, é fundamental conhecer as características do substrato, a sua composição e o estado de conservação dos revestimentos pré-existentes. A escolha da argamassa de substituição deve ter em conta principalmente o critério de compatibilidade com os elementos pré-existentes para evitar a sua degradação prematura.

Para Henriques (2002), em situações de elevado valor cultural, como por exemplo património histórico, para além do critério da compatibilidade deve ter-se em conta requisitos funcionais e de desempenho. Estes requisitos referem-se à escolha dos materiais tendo em conta a preocupação da conservação, da estética, a nível estrutural e da aplicação da argamassa.

Veiga et al (2010) acrescenta que a envolvente ao edifício pode determinar tomadas de decisão, tais como, a proximidade ao mar devido à presença de sais, condições climáticas como a intensidade da chuva, vento e humidade, e também a exposição do edifício à chuva e à absorção de água do solo.

A Figura 2.2 apresenta uma situação em que não se respeitou a génese do edifício antigo incorporando cimento Portland na reparação de um reboco antigo, incorrendo numa situação gravosa para o edifício, provocando não só a degradação do revestimento como também do suporte.



Figura 2.2- Incompatibilidade de reboco antigo à base de cal com reparação através de cimento Portland (Silva, R. (2009)).

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

Santos e Veiga (2012) participou numa campanha experimental sobre um conjunto de formulações de argamassas vocacionadas para revestimento de edifícios antigos. A campanha continha argamassas com cal aérea, cal hidráulica e produtos pré-doseados com base em cal. Tendo em conta várias situações tidas como padrão, avaliou a adequabilidade de cada tipo de argamassa apresentando nos Quadros 2.2 e 2.3 os

requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas e o seu comportamento à água e ao clima.

Quadro 2.2- Requisitos estabelecidos para características mecânicas das argamassas.

Uso	Características Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à retração restringida (90 dias)			
	R _t	R _c	E		Fr _{máx} (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 Ou rotura coesiva pelo reboco	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Reboco interior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000		< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Juntas	0,4 - 0,8	0,6 - 3	3000 - 6000	0,1 - 0,5 Ou rotura coesiva pela junta	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7

R_t – Resistência à tração; R_c – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade; Fr_{máx} – força máxima induzida por retração restringida; G – Energia de rotura à tração; CSAF – Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda; CREF – Coeficiente de resistência à evolução de fendilhação.

Quadro 2.3- Características de comportamento à água e ao clima.

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento artificial acelerado
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro			
	S _D (m)	C (kg/m ² .h ^{1/2})	M (h)	S (h)	H (mv.h)	
Reboco exterior	< 0,08	1 - 1,5	> 0,1	< 120	< 16000	Médio: degradação moderada nos ciclos água/gelo
Reboco interior	< 0,10	-	-	< 120	-	
Juntas	< 0,10	1 - 1,5	> 0,1	< 120	< 16000	

S_D – espessura da camada de ar de difusão equivalente (valor relacionado com a permeância); C – coeficiente de capilaridade; M – atraso na molhagem; S – período de humedecimento; H – intensidade de molhagem.

2.2.5. Resíduos cerâmicos industriais

A evolução da indústria em geral tem criado um conjunto de situações prejudiciais ao ambiente, nomeadamente, a exploração desmedida dos recursos naturais que pode ter consequências gravosas nas próximas gerações.

O aproveitamento de forma racional dos resíduos provenientes de processos de construção e demolição da indústria da construção torna-se vital para a sustentabilidade do meio ambiente mas também pode ser vantajoso para a própria indústria se potencializarem a reutilização dos resíduos de forma criteriosa.

Num estudo realizado em São Paulo, Campos et al (2013) refere que a indústria cerâmica de porcelana da cidade tem um desperdício que pode aproximar-se a 10% das peças produzidas anualmente. Esta quantidade de resíduos provenientes da indústria aliada à ausência de políticas para a sua reciclagem, ganha maior relevo comprometendo a sustentabilidade ambiental e dos recursos materiais.

Segundo Fernandes (2004), na Europa, a quantidade de resíduos ao longo das diferentes etapas da indústria cerâmica representam cerca de 3 a 7% da sua produção global, que se traduz em milhões de toneladas de argila calcinada por ano que é depositada em aterro.

A comissão de coordenação e desenvolvimento regional do centro (CCDRC) lançou vários estudos em anos consecutivos sobre a produção de resíduos industriais na região Centro, individualizando os resíduos por distritos. Com base nesses estudos, apresenta-se na Figura 2.3 a distribuição da produção de resíduos nos distritos da Região Centro nos anos 2001, 2002 e 2003, consecutivamente.

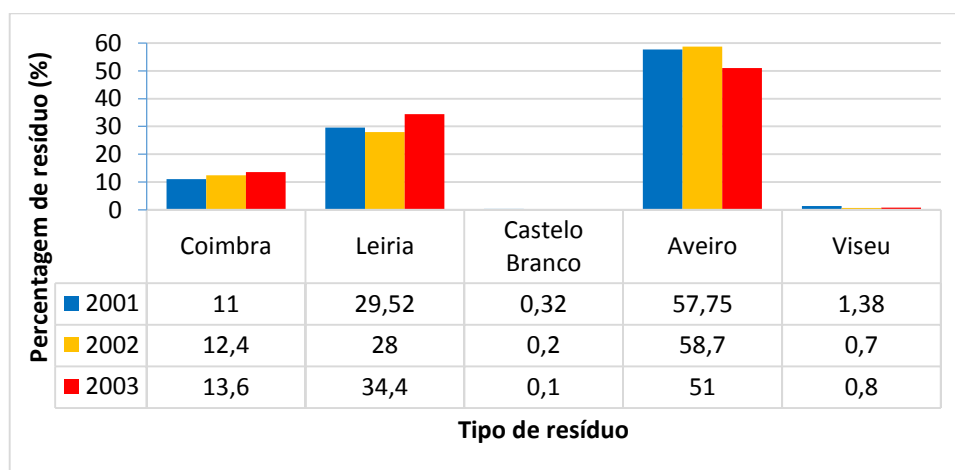


Figura 2.3- Produção de resíduos industriais na Região Centro.

Através da análise da Figura 2.3, pode-se constatar que cerca de metade dos resíduos são resultantes da atividade cerâmica em Aveiro, contudo se acrescentarmos ao distrito de Aveiro o distrito de Leiria temos uma produção de resíduos acumulados de valor aproximado 85%.

Em 2008 surgiu legislação específica sobre a gestão desses resíduos, estabelecida pelo Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de Março, denominado por “Regime da Gestão de Resíduos de Construção e Demolição”. Este diploma foi criado com o objetivo de estabelecer um regime de operações para gestão dos resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou derrocadas, abreviadamente designados resíduos de construção e demolição (RCD), compreendendo a sua prevenção e reutilização, as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação, e também a redução de carga burocrática promovendo assim a reutilização dos materiais. Posteriormente, o decreto-Lei n 46/2008, de 12 de Março foi alterado pelo Decreto-Lei 73/2011, de 17 de junho, que complementa o anterior Decreto-Lei, lançando uma série de medidas legislativas e normativas no sentido de se colmatarem lacunas de conhecimento, e de se promover a aplicação da hierarquia de resíduos. Destaque para as metas estabelecidas neste diploma, tais como, a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) bastantes ambiciosas: em 2020, 70% dos RCD nos Estados Membros terão de ser encaminhados para reciclagem.

Com o conceito de sustentabilidade a assumir um papel preponderante nos últimos anos, tem aumentado a necessidade de aproveitamento de produtos gerados pela indústria como forma de redução do consumo de matérias-primas, de energia e de quantidade de material a depositar em aterro.

A comissão de coordenação e desenvolvimento regional do centro (CCDRC) elaborou um estudo em dois anos consecutivos, 2002 e 2003, acerca dos principais tipos de resíduos cerâmicos obtidos no processo de fabrico dos produtos. Os resultados obtidos estão representados na Figura 2.4.

Como se pode constatar, dois terços da quantidade de resíduos cerâmicos inerentes ao processo de fabrico são provenientes dos cacos cozidos e crus.

É desta forma que têm surgido estudos sobre agregados alternativos às areias como substituinte parcial ou total. Neste trabalho é proposto o uso de cerâmica branca, faiança e porcelana em substituição parcial do agregado tradicional areia.

A produção de peças de faiança na indústria cerâmica contém no seu processo duas cozeduras, a primeira para conformação da peça é de 1100°C designando-se à peça de chacota e a segunda cozedura de 1080°C para vidrar a peça.

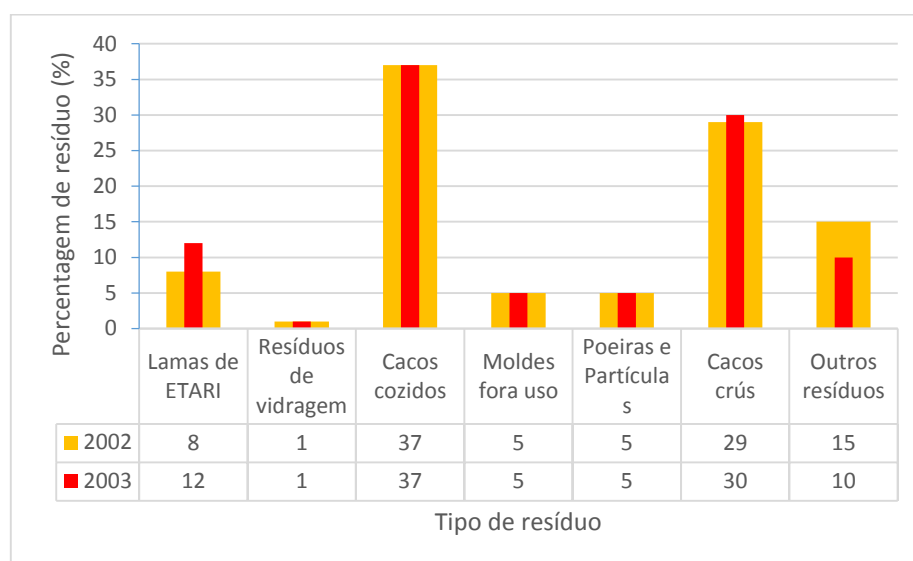


Figura 2.4- Quantificação e qualificação dos resíduos cerâmicos obtidos no processo de fabrico.

Nas peças de porcelana a primeira cozedura produz o biscoito e desenrola-se a 1000°C, sendo a segunda de 1300°C em atmosfera redutora para dar brancura à porcelana e um aspeto brilhante à peça.

2.2.6. Argamassas com incorporação de resíduos de cerâmica

Tendo em vista a preservação dos recursos naturais e de promoção da valorização dos resíduos, a publicação do despacho 4015/2007 permitiu a incorporação em obra de materiais que incorporem resíduos, por exemplo, misturas modificadas com granulado de borracha de pneus usados.

Esta legislação fomentou o desenvolvimento de alguns trabalhos de investigação acerca de argamassas de cal aérea com incorporação de resíduos cerâmicos, nomeadamente, telhas, tijolos e vasos, permitindo obter características mecânicas e físicas de argamassas de substituição.

Velosa (2006) analisou argamassas com pozolanas para edifícios antigos de vários locais e épocas. Após a análise recriou as argamassas previamente observadas, efetuando composições semelhantes às encontradas nos edifícios antigos. Neste estudo concluiu que as argamassas de cal com incorporação de pó de tijolo em substituição de 50% do agregado apresentavam um bom comportamento à água e reduzida possibilidade de fissuração, no entanto, como fator penalizador revelaram pouca resistência mecânica.

Segundo um trabalho de investigação desenvolvido por Matias (2008), as argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica de barro vermelho, pó de tijolo e/ou grânulos de tijolo, numa dosagem correta de ligante e agregado, obtêm um comportamento razoável, tornando viável esta alternativa para argamassas de substituição.

Tem-se vindo então a alargar o estudo de argamassas com resíduos, com diferentes tipos de ligantes e diversos traços (cais e finos de cerâmica de barro vermelho) e ainda distintos agregados (areia e granulados de cerâmica de barro vermelho) com a pretensão de avaliar e otimizar a sua viabilidade da sua incorporação em argamassas de reboco para edifícios antigos.

Duarte (2011) e Ferreira (2011) elaboraram estudos sobre argamassas de cal aérea, com um traço volumétrico 1:3, com substituição parcial de volume da areia por resíduos de tijolo, telhas e vasos, em duas dosagens distintas, 20% e 40% e na granulometria integral.

Mais tarde, e complementando os trabalhos anteriores, Tomás (2012) utilizou apenas a fração grossa de cada resíduo cerâmico em substituição parcial da areia, mantendo o traço volumétrico e suas proporções. Por outro lado, Silva (2012) utilizou no seu trabalho apenas a fração fina de cada resíduo em substituição parcial do ligante, nas dosagens 10% e 20%.

Noutro patamar, Barbosa (2013) desenvolveu trabalho idêntico aos anteriores. Usando cal aérea, os resíduos já referidos na forma integral e também as suas dosagens, usou um traço volumétrico 1:2.

Para todos estes trabalhos procedeu-se à elaboração de argamassas de referência adequadas, com areia e cal aérea, para permitir uma comparação de resultados das argamassas. Foram estudadas propriedades mecânicas e físicas, incluindo a caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.

De outro modo, com o trabalho elaborado por Cruz (2012), iniciou-se uma nova vertente visando as argamassas de cal hidráulica natural. Assim, produziram-se argamassas com traço volumétrico 1:3 e 1:4 com incorporação dos três tipos de resíduos de cerâmicos já referidos. As argamassas com traço 1:4 foram testadas apenas para a percentagem de 30% de resíduo cerâmico. Dos resultados obtidos, destacam-se as argamassas com traço 1:4, por possuírem coeficientes de absorção e coeficientes de permeabilidade ao vapor superiores às argamassas de traço 1:3, porém, apresentaram valores das resistências mecânicas e módulo de elasticidade inferiores.

Já Raimundo (2013) produziu argamassas de cal hidráulica natural (NHL 3,5) com traços volumétricos 1:3 e 1:4 com incorporação de resíduos na forma integral de ladrilhos cerâmicos de barro vermelho em substituição de areia nas percentagens 20% e 40% do seu volume. Os resultados foram satisfatórios, com realce para as argamassas com 20% de resíduos que apresentam valores superiores para a permeabilidade ao vapor de água comparativamente às argamassas de referência. Relativamente ao comportamento face a água líquida, todas as argamassas apresentam valores superiores às de referência.

Com base nos trabalhos de investigação desenvolvidos nestes últimos anos, verifica-se que as argamassas testadas têm um comportamento satisfatório, e que pode ser vantajoso na medida em que os resíduos a incorporar as argamassas podem melhorar o comportamento de algumas características das argamassas, reduzindo a extração de rochas para produção de ligantes e deposição de resíduos em aterro.

2.2.7. Fatores que influenciam o comportamento das argamassas

Para além do que já foi referido, existem outros fatores que podem influenciar o comportamento das argamassas, são eles: a forma das partículas do agregado, a dimensão das suas partículas, a curva granulométrica, a baridade e volume de vazios.

A forma das partículas do agregado influencia a aderência da pasta de ligante ao agregado, a trabalhabilidade do material fresco, a compacidade do material endurecido e também quantidade de água de amassadura por depender da superfície específica do material.

Na Figura 2.5, expõe-se uma classificação usada em petrografia.

Para o conhecimento da dimensão das partículas do agregado deve proceder-se à determinação das frações de areia cujas partículas têm uma dimensão compreendida entre dois limites pré-definidos - peneiração, para posteriormente a sua granulometria e consequentemente representar a sua curva granulométrica.

Contudo, os fatores enumerados acima sobre os constituintes das argamassas são apenas parte do problema, pois existem fatores externos que influenciam o comportamento das argamassas.

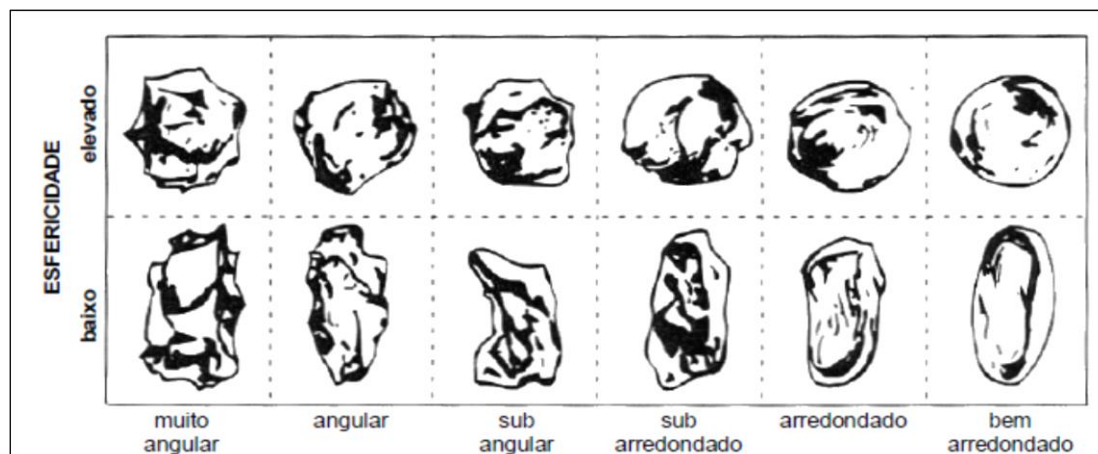


Figura 2.5- Classificação de agregados usada em petrografia (Coutinho, J. (1999)).

As técnicas aplicadas nas amassaduras, os processos de cura, os procedimentos de aplicação e o suporte onde estão aplicadas podem ser determinantes nas suas características.

Em síntese, todos estes fatores vão influenciar a estrutura da argamassa e consequentemente desempenho das argamassas.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1. Descrição dos procedimentos experimentais

3.1.1. Caracterização da matéria-prima

Para a realização da atividade experimental proposta, as matérias-primas que foram utilizadas na produção das argamassas e que funcionaram como agregado para além da areia foram: faiança vidrada e não vidrada e porcelana vidrada, todas provenientes de uma indústria cerâmica da periferia de Fátima. Estes materiais provêm, em parte, dos resíduos obtidos na produção de utensílios de loiça, tais como copos, pratos e taças. A cal hidráulica foi utilizada como ligante nas argamassas ensaiadas.

Em laboratório, após a recolha dos materiais, os resíduos cerâmicos foram manualmente partidos com auxílio de um martelo até se reduzirem significativamente as dimensões destes, para posteriormente poderem ser moídos pelo moinho de maxilas. A Figura 3.1 apresenta os resíduos moídos.



Figura 3.1- Resíduos aplicados no estudo: (a) porcelana vidrada; (b) faiança vidrada; (c) faiança não vidrada.

3.1.1.1. Análise granulométrica dos materiais por peneiração gravítica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a norma EN 933-1:2012 e com a ajuda de peneiros de ensaio normalizados.

De acordo com a norma referida, antes da realização da peneiração, pesou-se aproximadamente 200g de cada material numa balança de precisão 0,0001g. Optou-se

por uma balança de maior precisão por se tratar de quantidades a pesar bastante reduzidas, em alguns peneiros. Na Figura 2.2 apresenta-se a balança usada nas pesagens para obter a granulometria dos materiais.



Figura 3.2- Balança utilizada na análise granulométrica dos materiais.

Colocaram-se as amostras na estufa à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, até se atingir a massa constante. Considera-se que a amostra atinge a massa constante quando a diferença de duas pesagens sucessivas, com pelo menos uma hora de intervalo, não atingir 1% da sua massa.

Após o registo da massa seca de cada agregado, foi despejada cada amostra na coluna de peneiros que foram sobrepostos, do peneiro de menor abertura para o maior de maior abertura, no sentido ascendente, e através de uma peneiração manual separaram-se os agregados em diversas classes granulométricas, obtendo uma distribuição em termos quantitativos de cada agregado a incorporar nas misturas (Figura 3.3).

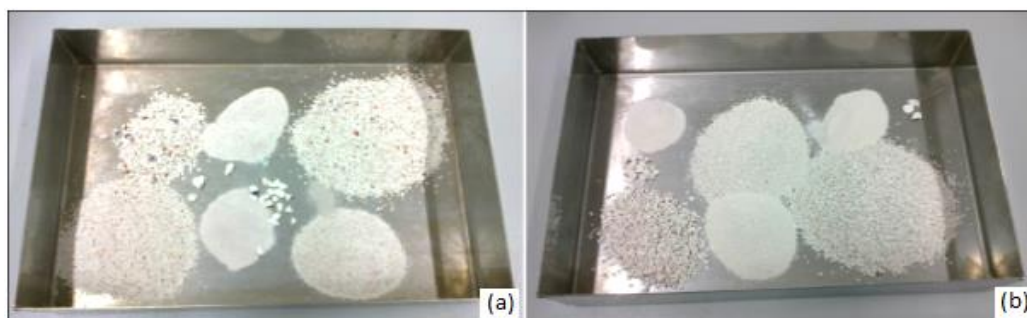


Figura 3.3- Peneiração: (a) faiança vidrada; (b) faiança não vidrada.

As aberturas de peneiros de ensaio normalizados usados nesta atividade experimental são apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1- Abertura de peneiros utilizados para definição da curva granulométrica.

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)
4
2
1
0,5
0,25
0,125
0,063

Por fim, a massa retida em cada peneiro (R_i) e a massa total (M_1) foram registadas permitindo calcular as percentagens cumulativas do material passado pela expressão:

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

Os resultados obtidos da caracterização granulométrica dos quatro materiais que vão servir de agregado para as argamassas são apresentados na Figura 3.4.

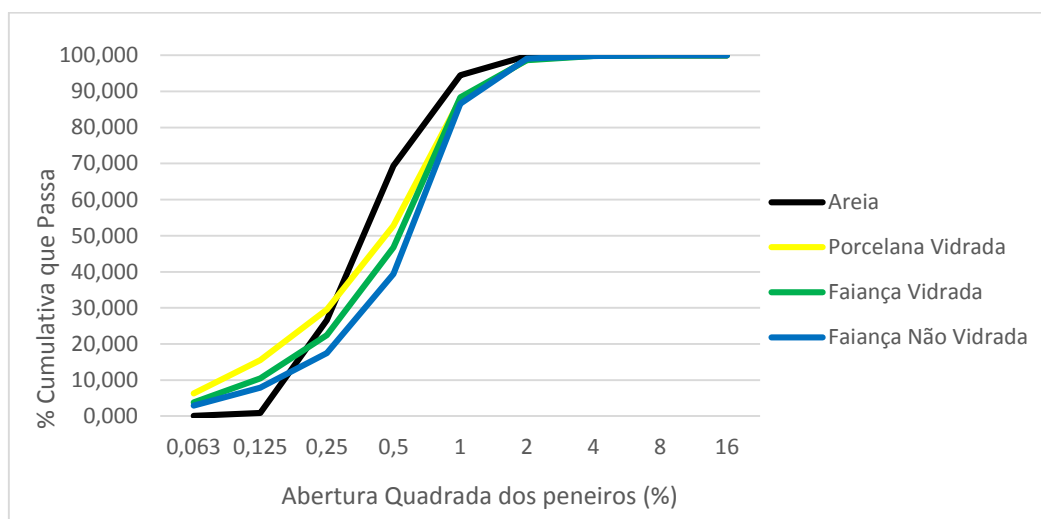


Figura 3.4- Curva granulométrica das matérias-primas empregues no estudo.

De acordo com a caracterização granulométrica apresentada, os resíduos cerâmicos apresentam uma distribuição idêntica entre eles e, comparando com a areia possuem uma quantidade bastante superior de matéria fina.

3.1.1.2. Determinação da baridade dos materiais

A baridade define-se como o quociente entre a massa do agregado seco preenchendo sem compactação um dado recipiente pela capacidade do recipiente.

A determinação da baridade dos materiais deste estudo foi efetuada de acordo com a norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002), através da expressão:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.2)$$

Sendo,

m_1 – massa do recipiente vazio, [g];

m_2 – massa do recipiente e do provete elementar, [g];

V - capacidade do recipiente, [cm³].

Para a execução deste ensaio utilizou-se um recipiente metálico inoxidável, cilíndrico e estanque, com uma capacidade de 1029,8 cm³ (V) e uma massa de 1343,13g (m_1).

O ensaio iniciou-se com a preparação das amostras. Para tal, preparou-se uma amostra de cada material, com massa compreendida entre 120% a 150% da necessária para preencher o recipiente metálico e levada à estufa para eliminar qualquer quantidade de água que pudesse existir. A secagem na estufa foi feita à temperatura de 110±5°C, até atingir a massa constante.

Com auxílio de uma pá e a uma altura constante depositou-se lentamente cada amostra no recipiente, para que a compactação por queda livre fosse homogénea, até transbordar. Procedeu-se então à remoção de todo o excedente presente no cimo do recipiente com ajuda de uma rasoira, nivelando a superfície e com cuidado para não compactar nenhuma parte.

Para terminar, registaram-se as pesagens com o recipiente cheio com cada amostra (m_2) numa balança com precisão 0,01%. Os resultados obtidos para a baridade dos materiais estão no Quadro 3.2.

Quadro 3.2- Baridade das matérias-primas empregues no estudo.

Material	ρ_b - Baridade (g/cm ³)			ρ_b - Baridade Média (g/cm ³)
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	
Porcelana Vidrada (PV)	1,43	1,40	1,41	1,41
Faiança Vidrada (FV)	1,00	1,00	1,00	1,00
Faiança Não Vidrada (FNV)	0,97	0,98	0,98	0,98
Areia	-	-	-	1,44
Cal Hidráulica	-	-	-	0,81

A baridade de cada material resulta da média dos três valores obtidos nos provetes. Dos valores obtidos no ensaio podemos observar que os resíduos cerâmicos possuem uma baridade inferior à da areia, particularmente no que se refere à faiança. Este valor representa a massa necessária para preencher um determinado volume, isto é, quanto maior for a baridade, mais massa é necessária para o preencher.

3.1.1.3. Determinação da massa volúmica dos materiais

Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 1097-6:2003/A1:2010 (IPQ, 2010) para os elementos a usar como agregado. Portanto, foi efetuado para a areia, porcelana vidrada, faiança vidrada e não vidrada.

A escolha do método a usar para o ensaio baseou-se na granulometria dispersa dos agregados obtida anteriormente, ou seja procedeu-se ao ensaio de acordo com o método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063mm e 4mm.

Iniciou-se o ensaio com a lavagem cuidada do cada material em água corrente sobre o peneiro 0,063mm (Figura 3.5) de forma a remover as partículas mais finas. O material retido no peneiro foi depositado no picnómetro e posteriormente colocada água até ficar atestado para eliminar o ar ocluído.



Figura 3.5- Lavagem dos agregados sobre o peneiro 0,063mm.

Coloca-se a tampa do picnómetro e agita-se cuidadosamente, através de rotação e ligeira inclinação do picnómetro para remover qualquer sinal de ar. O picnómetro é depois imerso em banho-maria, a uma temperatura 22 ± 3 °C. Após $24\pm 0,5$ h, retirou-se e pesou-se o picnómetro, eliminando-se novamente o ar ocluído e secando-se a superfície exterior antes da pesagem. Decantou-se o picnómetro e esvaziou-se o material para um tabuleiro, espalhando-se de forma a criar uma camada uniformemente distribuída. Colocou-se o material numa estufa, sujeita a uma leve corrente de ar morno. Para garantir uma secagem uniforme, o material foi remexido variadas vezes até à evaporação a humidade superficial. Para avaliar o estado saturado com superfície seca dos agregados, introduziu-se o material com auxílio de uma espátula num molde troncocónico e apiloou-se a superfície do molde com 25 pancadas suaves, não completando com material o assentamento deste devido às pancadas. Retirou-se cautelosamente o molde e apenas se validou o processo quando este se deformou após a desmoldagem, perdendo a forma troncotónica inicial. Após esta validação pesou-se o material saturado com superfície seca e mais tarde, repetiu-se a pesagem do material após secagem completa em estufa, sujeito a temperatura 110 ± 5 °C. Todas as pesagens foram efetuadas com auxílio de uma balança de precisão de 0,01g.

Este ensaio permitiu obter vários parâmetros de avaliação.

A massa volúmica do material impermeável das partículas é definida pela expressão:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.3)$$

Enquanto a massa volúmica das partículas secas em estufa é dada por:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.4)$$

Já a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca é obtida através de:

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

A absorção de água, em percentagem da massa seca, após imersão durante 24 horas resulta da expressão:

$$WA_{24} = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \times 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

Sendo,

M_1 – massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, [g];

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

M_3 – massa do picnómetro apenas cheio de água, [g]

M_4 – massa do provete seco em estufa, [g]

Os resultados obtidos das expressões anteriores estão representados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3- Massas volúmicas dos materiais.

Agregado	ρ_w (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	ρ_{rd} (Kg/m ³)	ρ_{ssd} (Kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
Areia	997,6	2642,33	2634,30	2637,34	0,115
Porcelana Vidrada	997,5	2473,53	2470,38	2471,65	0,051
Faiança Vidrada	997,4	2612,01	2145,06	2323,37	8,312
Faiança Não Vidrada	998,4	2624,36	1814,40	2122,53	16,983

As massas volúmicas dos resíduos cerâmicos são inferiores às da areia, como já era esperado, face aos valores obtidos para a baridade. Também se verifica que ambos os resíduos de faiança têm uma elevada absorção de água, possuindo também os menores valores das massas volúmicas de partículas secas em estufa e partículas saturadas com superfície seca.

3.1.1.4. Preparação das argamassas

Nesta atividade experimental foram preparadas 7 argamassas com traço volumétrico 1:3 de cal hidráulica natural (NHL 3,5) e agregados. A argamassa de referência apenas com cal hidráulica natural e areia com o traço volumétrico 1:3 e seis argamassas com substituição parcial da areia por resíduos cerâmicos nas proporções de 20% e 40%. A definição das argamassas apresenta-se no Quadro 3.4.

Quadro 3.4- Caracterização das argamassas em estudo.

Argamassa	Designação	Porcentagem de resíduos de cerâmica (%)	Traço volumétrico
Argamassa de referência	RHPF	0	1:3
Argamassa com resíduos de porcelana vidrada	HLPV	20	1:0,6:2,4
	HHPV	40	1:1,2:1,8
Argamassa com resíduos de faiança vidrada	HLFV	20	1:0,6:2,4
	HHFV	40	1:1,2:1,8
Argamassa com resíduos de faiança não vidrada	HLFNV	20	1:0,6:2,4
	HHFNV	40	1:1,2:1,8

A preparação das argamassas iniciou-se com o cálculo das dosagens a empregar em cada argamassa de acordo com o traço volumétrico adotado. O tipo e número de provetes produzidos tiveram em conta os ensaios a efetuar.

Com um tabuleiro sobre a balança de precisão de 0,01%, depositaram-se as quantidades de cada constituinte seco, definidas anteriormente, até perfazer as quantidades exatas pretendidas. Retirado o tabuleiro da balança, envolveram-se manualmente os constituintes secos da argamassa com auxílio de uma espátula metálica até ficar homogénea. Após colocar essa mistura na cuba da misturadora mecânica, deu-se início ao processo de amassadura mecânica que durou 3 minutos. Introduziu-se a quantidade de água conveniente na mistura até durante os 15 segundos iniciais e decorridos 2 minutos e 30 segundos desligou-se a misturadora para raspar as paredes da cuba, ativando de seguida, novamente a misturadora por mais 30 segundos.

Por cada argamassa realizada, efetuaram-se 3 provetes circulares para o ensaio da permeabilidade ao vapor de água, e 3 provetes prismáticos (Figura 3.6) para a determinação das restantes características face à água e para determinação das características mecânicas.

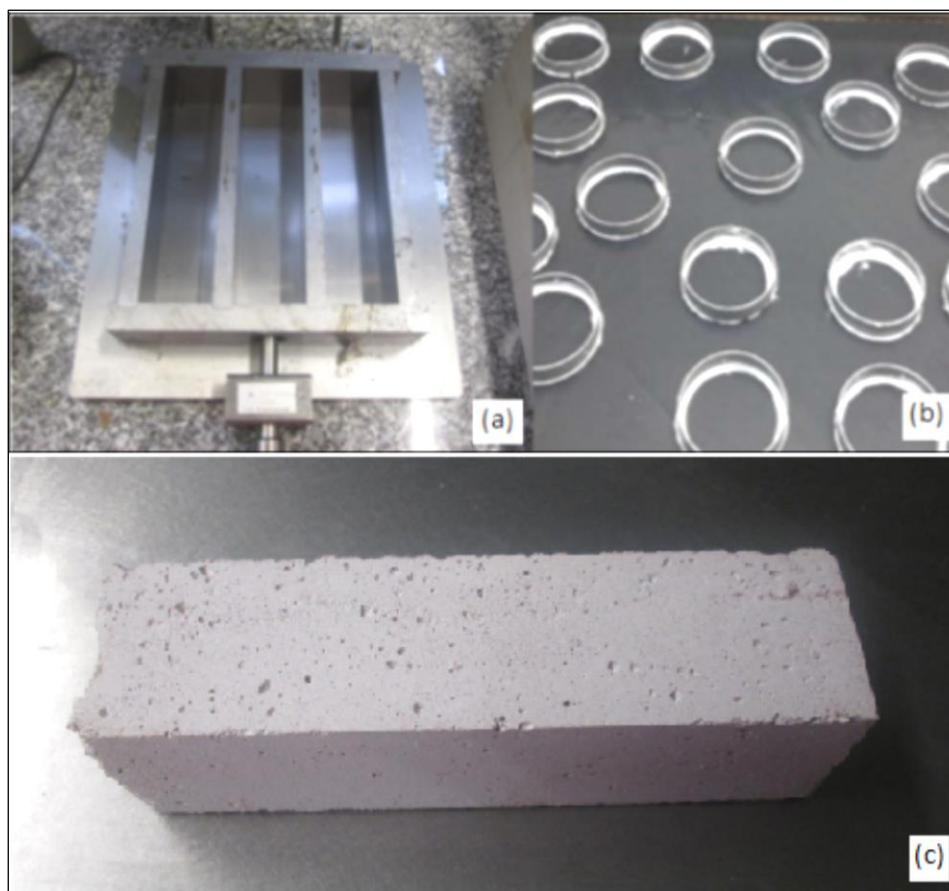


Figura 3.6- Moldagem dos provetes Prismáticos (a); moldagem dos provetes cilíndricos (b); Provede prismático (c).

Na Figura 3.7 apresenta-se de forma detalhada os ensaios a realizar e quais os provetes a serem testados em cada ensaio.

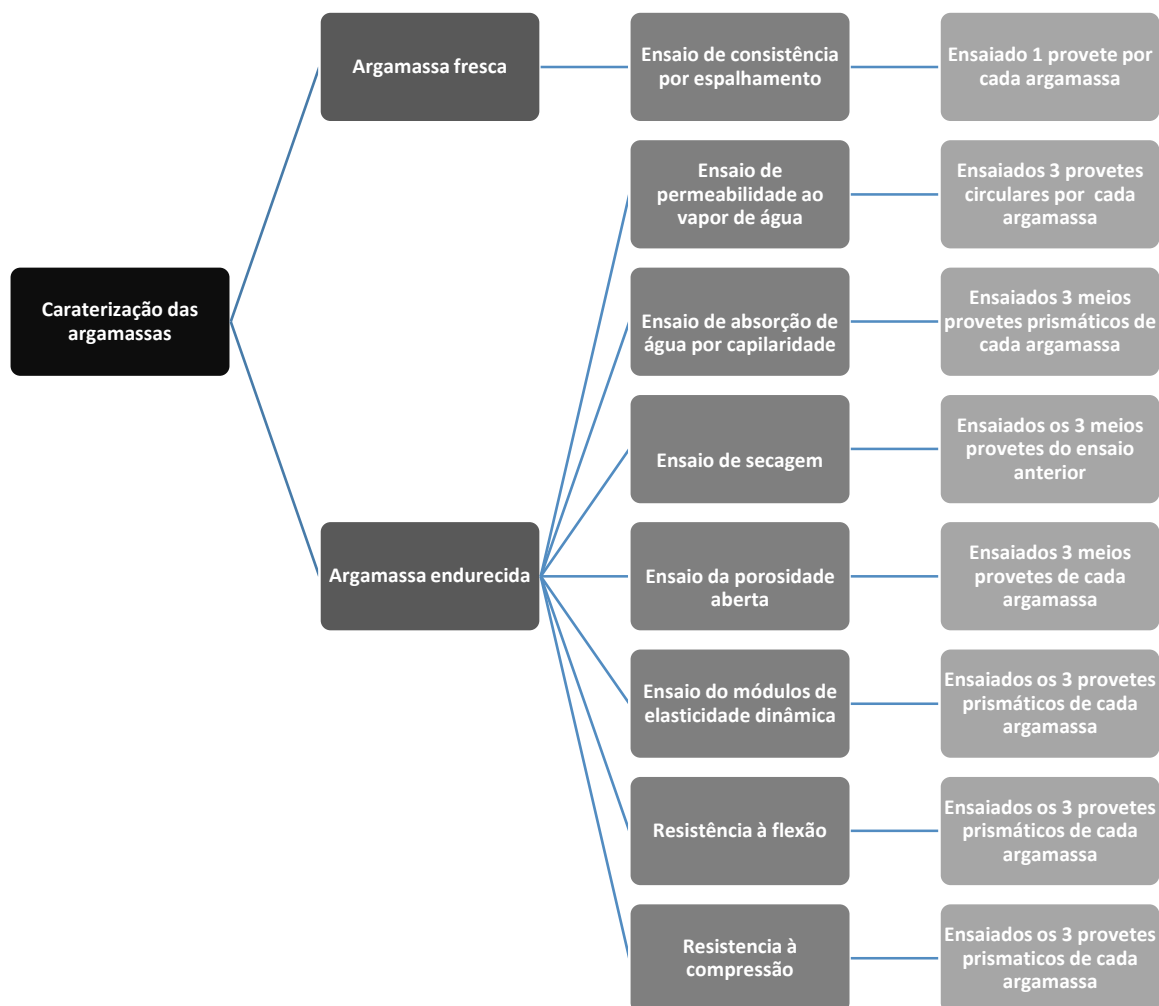


Figura 3.7- Organograma com os ensaios e número de provetes a ensaiar.

3.1.2. Caraterização das argamassas frescas

3.1.2.1. Ensaio de consistência por espalhamento

A consistência de uma argamassa é medida através do comportamento da argamassa no estado fresco com auxílio dos equipamentos expostos na Figura 3.8. As argamassas com espalhamentos reduzidos definem-se como argamassas pouco deformáveis e, conseqüentemente, mais consistentes.

O ensaio de consistência por espalhamento foi efetuado de acordo com a norma EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 (CEN, 2006).



Figura 3.8- Equipamentos usados no ensaio.

O molde metálico deve estar devidamente centrado sobre gravação de um círculo que contém a mesa. A argamassa é inserida no molde em duas fases, a primeira até meio e a segunda preenchendo até transbordar. No final de cada fase, aplicaram-se 10 pancadas com auxílio do pilão para compactar a argamassa. No final passou-se com a rasoira no topo do molde para retirar excessos de argamassa e limpou-se cuidadosamente a superfície exterior do molde e a mesa de forma a evitar qualquer deslocamento do molde. Passados 15 segundos retirou-se o molde, e rodando a manivela do aparelho deram-se 15 pancadas normalizadas.

Para desvios inferiores a 10% do seu valor médio, a norma refere que a consistência por espalhamento é dada pela média dos diâmetros das duas medições efetuadas pelo paquímetro. Se ocorrer um desvio superior a 10%, a norma refere que deve ser corrigida a quantidade de água e repetido todo o processo de ensaio.

Assim, tomando 150mm como o valor referência da consistência por espalhamento, e assumindo um desvio máximo de 10% referido na norma, obtemos o intervalo de confiança [135;165] mm que deve ser respeitado no ensaio. Os resultados obtidos encontram-se dispostos no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Caracterização do ensaio de consistência ao espalhamento.

Argamassa	d ₁	d ₂	d _{médio}	D. P.
RHPF	149,82	149,90	149,86	0,04
HLPV	164,42	163,83	164,12	0,29
HHPV	159,80	158,43	159,12	0,69
HLFV	144,66	141,11	142,89	1,77
HHFV	157,36	155,89	156,63	0,74
HLFNV	138,24	137,34	137,79	0,45
HHFNV	145,20	144,71	144,96	0,24

d → espalhamento; D.P. → desvio padrão.

3.1.3. Caracterização das argamassas endurecidas

3.1.3.1. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade é um parâmetro intrínseco dos materiais, que interligado a outras propriedades mecânicas, permite medir a rigidez de uma argamassa.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi executada de acordo com a norma NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006), definida para pedras naturais, pelo que foi adaptada aos provetes prismáticos de argamassas, de dimensões 160x40x40mm.

As restantes alterações efetuadas ao procedimento definido na norma prenderam-se com o número de provetes a ensaiar de cada argamassa e a localização dos suportes aos provetes na execução do ensaio. Quanto aos provetes, assumiu-se que 3 provetes por cada argamassa eram representativos de um lote homogéneo, em vez dos 6 referidos na norma, porque o processo de produção dos provetes foi controlado de igual modo. O suporte prismático para a medição do módulo de elasticidade dinâmico através da vibração longitudinal ao estar centrado com o provete tornava-se instável na realização do ensaio, optando-se por colocar os dois suportes que a norma indica para a vibração em flexão. Os suportes empregues neste ensaio foram prismas de secção triangular, metálicos, e com comprimentos superior à largura dos provetes a ensaiar.

O ensaio realizado encontra-se representado na Figura 3.9. Como se pode constatar, o transdutor recetor – acelerómetro, e o transdutor emissor - martelo de impacto, situam-se em locais opostos do provete. O acelerómetro na zona 1 e o local de impacto na zona 3.

Para o transdutor recetor obter melhor aderência ao provete foi adicionada massa consistente. O martelo de impacto embate no provete sobre a zona 3 através de pancadas suaves, constantes e igualmente espaçadas.

A excitação provocada pelo martelo de impacto emite um sinal, que é medido pelo analisador de sinal e reproduzindo um gráfico, em função da aceleração e da frequência. O espectro que resulta desta função permite localizar, através do pico, a frequência de ressonância fundamental dos provetes.

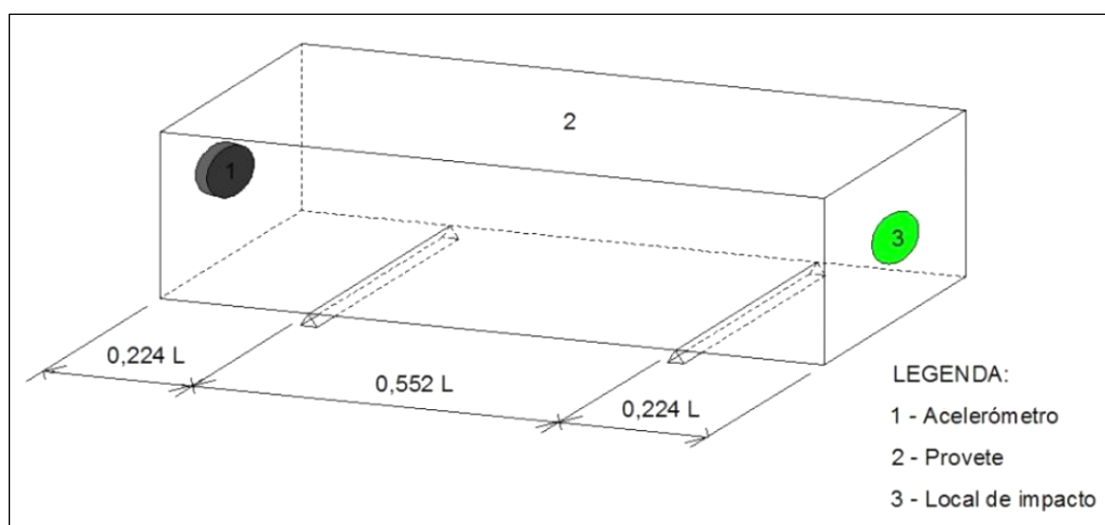


Figura 3.9- Representação esquemática da preparação do provete de acordo com a norma NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006).

Para cada argamassa efetuaram-se 3 medições a cada provete com a variação não superior a ± 60 Hz entre elas. O valor da frequência de ressonância fundamental em vibração longitudinal corresponde à média dos três valores.

O módulo de elasticidade dinâmico longitudinal é calculado pela expressão seguinte:

$$Ed_1 = 4 \times 10^{-6} \times l^2 \times F_1^2 \times \rho \times T \quad (3.7)$$

Por se tratar de provetes prismáticos, é necessário introduzir um coeficiente de correção no cálculo anterior, obtido pela expressão:

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \times v^2 \times i^2}{l^2} \quad (3.8)$$

Sendo,

l – comprimento do provete, [mm];

ν – coeficiente de poisson;

i – raio de giração da seção do provete com $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ [mm];

I – momento de inercia do provete, [mm⁴];

A – Área da seção transversal do provete, [mm²].

A massa volúmica de cada provete foi determinada através de dois processos. A primeira foi através da cubicagem que é baseada nas dimensões do provete a ensaiar, largura, altura e comprimento através de uma régua graduada. O valor da massa volúmica de cada provete é calculado pela expressão:

$$\rho = \frac{m_d}{A \times l} \quad [\text{g/mm}^3] \quad (3.9)$$

Sabendo que:

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

m_d – massa do provete seco, [g];

A – área da seção transversal do provete, [mm²];

l – comprimento do provete, [mm].

A segunda via para a determinação da massa volúmica foi por imersão. Este processo consiste em efetuar medições de massa do provete quando está seco, saturado, e por pesagem hidrostática. Assim, a massa volúmica obtida por imersão é dada por:

$$\rho = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_w \quad [\text{g/mm}^3] \quad (3.10)$$

Sendo,

m_d – massa do provete seco, [g];

m_s – massa do provete saturado, [g];

m_h – massa do provete imerso em água, [g];

ρ_w – massa volúmica da água, [g/mm³].

Na Figura 3.10 apresentam-se os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal com base nas duas massas volúmicas já referidas.

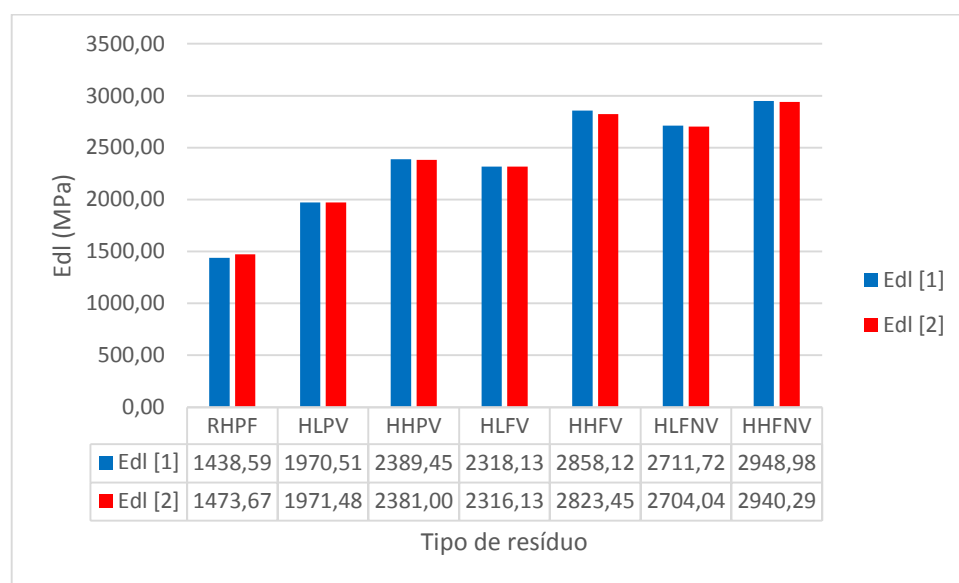


Figura 3.10- Edl [1] obtido para massa volúmica determinada através da medição de volume por cubicagem e Edl [2] obtida por imersão, aos 28 dias.

A diferença de valores obtidos para cada argamassa pode justificar-se por vários fatores, entre eles, as condições físicas dos provetes, os métodos utilizados e a própria experiência de ensaio.

Segundo Santos e Veiga (2012), o valor do módulo de elasticidade deve estar compreendido no intervalo 2000 MPa e 5000 MPa, tanto para os rebocos interiores como exteriores. Assim, verifica-se que em geral os valores obtidos nestas argamassas situam-se no intervalo aconselhado, à exceção da argamassa de referência (RHPF) e a argamassa com teor de 20% de porcelana (HLPV).

3.1.3.2. Ensaio de resistência à tração por flexão

A resistência à tração por flexão de uma argamassa corresponde à energia necessária para provocar a rotura do provete de argamassa. Esta rotura ocorre quando as fibras inferiores do provete se plastificam.

O ensaio da resistência à tração por flexão foi executado de acordo com a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999). O ensaio do módulo de elasticidade dinâmica não é um ensaio destrutivo, pelo que os provetes usados nele foram empregues neste ensaio.

Desta forma, os provetes foram dispostos sobre o equipamento adequado (Figura 3.11), apoiados em dois suportes equidistantes em relação às extremidades laterais dos provetes.

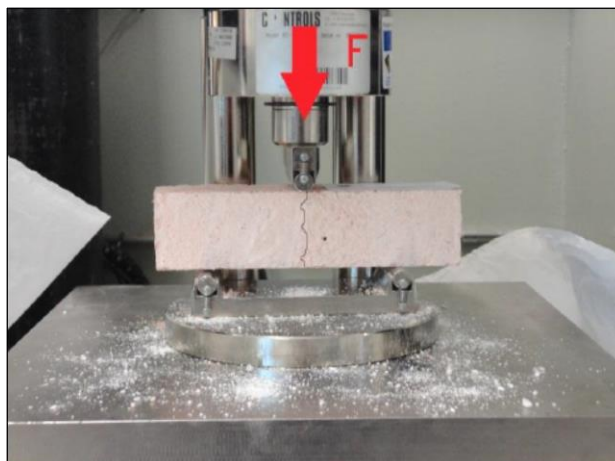


Figura 3.11- Ensaio de resistência à tração por flexão (Duarte, T. (2011)).

A resistência à tração por flexão é obtida aplicando uma carga a taxa constante sobre o provete, até atingir a rotura. A expressão que permite esse cálculo é:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.11)$$

Sendo,

F – carga máxima aplicada, [N];

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

b – largura do provete, [mm];

d – espessura do provete, [mm].

Com base nas dimensões dos provetes, a expressão final para o cálculo da resistência à flexão será:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \times 100}{40 \times 40^2} = \frac{3}{1280} \times F \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.12)$$

Os resultados da resistência à flexão das argamassas em estudo estão representados na Figura 3.12.

Com base no Quadro 2.2, os requisitos estabelecidos para as argamassas de reboco para edifícios antigos compreendem valores de 0,2 MPa a 0,7 MPa. Como se verifica, todas as argamassas em estudo superam o valor mínimo adequado para a situação, e não se superiorizam ao máximo desejado, pelo que podemos afirmar que os resultados

apresentados colocam as argamassas em estudo numa opção válida para a sua aplicabilidade.

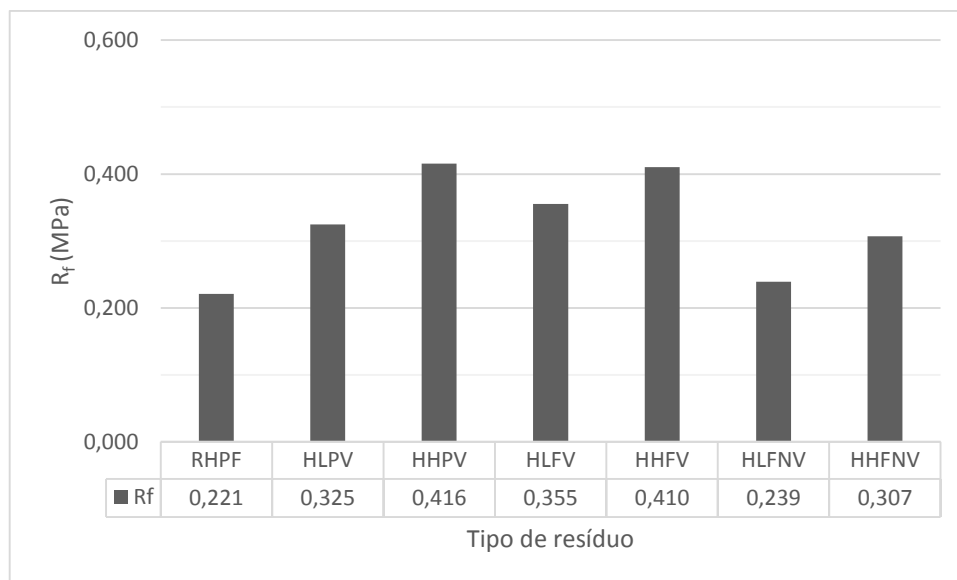


Figura 3.12- Resistência à flexão aos 28 dias.

3.1.3.3. Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão de uma argamassa representa a energia necessária fazer incidir sobre a área do provete para provocar a rotura deste por compressão.

O ensaio de resistência à compressão foi executado de acordo com mesma norma do ensaio anterior - EN 1015-11:1999 (CEN, 1999).

Para a realização deste ensaio, foi seleccionada previamente uma metade de cada provete ensaiado à flexão. Procedeu-se à colocação do meio provete no equipamento adequado ao ensaio, deixando-o parcialmente apoiado no suporte (Figura 3.13).

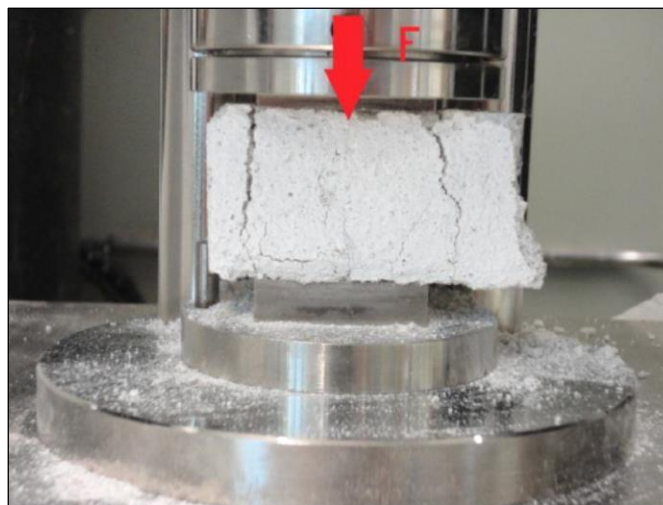


Figura 3.13-Ensaio de resistência à compressão (Duarte, T. (2011)).

Sobre o provete foi aplicada uma força a taxa constante até se atingir a rotura. A resistência à compressão obtém-se após o cálculo da expressão:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.13)$$

Sendo,

F – carga máxima aplicada, [N];

A_c – Área de carga, [mm²].

Como a área de carga, A_c, é igual a 1600 mm², a expressão final para a obtenção da resistência à compressão é dada por:

$$R_c = \frac{F}{A_c} = \frac{F}{40 \times 40} = \frac{F}{1600} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.14)$$

Na Figura 3.14, apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão.

Recorrendo novamente ao Quadro 2.2, podemos analisar que os requisitos estabelecidos para a resistência à compressão para as argamassas de reboco para edifícios antigos estão compreendidos entre 0,4 MPa e 2,5 MPa. Analisando os valores obtidos, conclui-se que as argamassas com resíduos cerâmicos em estudo apresentam boa resistência à compressão, em ambos os traços, por cumprirem os limites impostos por Veiga, com

destaque para a argamassa de referência (RHPF) possuir a menor resistência à compressão.

Pode-se verificar ainda que as argamassas com maiores percentagens de resíduo têm melhores resultados na resistência à compressão, pertencendo o melhor resultado à argamassa HHFNV.

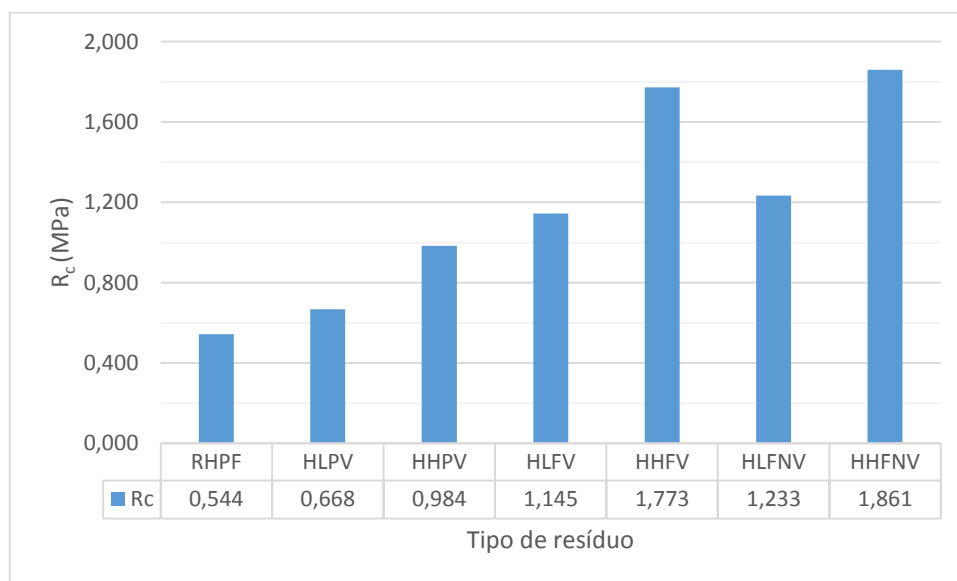


Figura 3.14- Resistência à compressão aos 28 dias.

3.1.3.4. Determinação da massa volúmica e porosidade aberta

Define-se porosidade aberta como o quociente entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete.

A norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008) regulamenta o método para o cálculo da porosidade aberta para pedras naturais, pelo que foram necessárias efetuar pequenas modificações para realizar o ensaio com provetes de argamassa de cal.

Para a realização do ensaio empregaram-se os topos mais intactos resultantes dos meios provetes ensaiados do ensaio de resistência à compressão. Para tal, os provetes foram limpos com auxílio de um pincel e identificados.

Os provetes foram dispostos na estufa a $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingirem a massa constante, isto é, até atingirem uma variação inferior a 0,1% da massa do provete entre duas pesagens

consecutivas, com um mínimo de 24 ± 2 h nas medições. Depois de secos, colocaram-se os provetes num exsiccador até atingirem a temperatura ambiente.

Com os provetes secos, e à temperatura ambiente procedeu-se à primeira pesagem do ensaio. Com os provetes dispostos num tabuleiro, ordenados e espaçados, efetuou-se a sua saturação através da imersão total. Após se ter atingido a saturação, limpou-se o excedente de água de cada provete com um pano e fez-se a pesagem. Foi utilizada a mesma balança para todas as pesagens, de precisão 0,01%.

Por fim, realizou-se a pesagem hidrostática dos provetes. A balança onde foi efetuada cada pesagem contém um sistema articulado entre um cesto que está acoplado à balança e que se imerge num recipiente preenchido de água. O provete deve ser colocado no cesto imerso e após a balança estabilizar regista-se a massa obtida.

A expressão que permite o cálculo da porosidade aberta é apresentada a seguir:

$$P_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad [\%] \quad (3.15)$$

Sendo,

- m_s – massa do provete saturado, [g];
- m_d – massa do provete seco, [g];
- m_h – massa do provete imerso em água, [g].

A massa volúmica aparente, ρ_b , determina-se através da expressão:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.15)$$

Sendo,

- ρ_{rh} – massa volúmica da água à temperatura de ensaio, [kg/m^3].

Na Figura 3.15 estão apresentados todos os valores obtidos ensaio realizado aos 28 dias.

Observando os valores obtidos para a porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 dias, podemos verificar que as argamassas com maior teor em resíduos cerâmicos (HHPV, HHFV e HHFNV) são mais porosas, com destaque para a argamassa HHVNV que é a mais porosa de todas. Deste modo, vemos que uma maior percentagem de resíduo cerâmico implica uma maior porosidade da argamassa. Relativamente à massa volúmica

aparente verifica-se que varia de forma inversa e proporcional à porosidade aberta uma vez que as argamassas com maior massa volúmica aparente, correspondentes às argamassas de menor teor em resíduo cerâmico em geral (HLPV, HLFV e HLFNV), possuem baixa porosidade aberta. Da mesma forma, argamassa de referência possui a menor porosidade aberta mas possui a maior massa volúmica aparente. Este facto deve-se à baridade dos materiais em estudo, que variam proporcionalmente com as respetivas massas volúmicas, isto é, uma maior baridade vai implicar uma maior massa volúmica. Quando estamos a substituir agregado por resíduo de cerâmica cuja baridade é menor é expectável que o resultado seja a diminuição da massa volúmica aparente da argamassa.

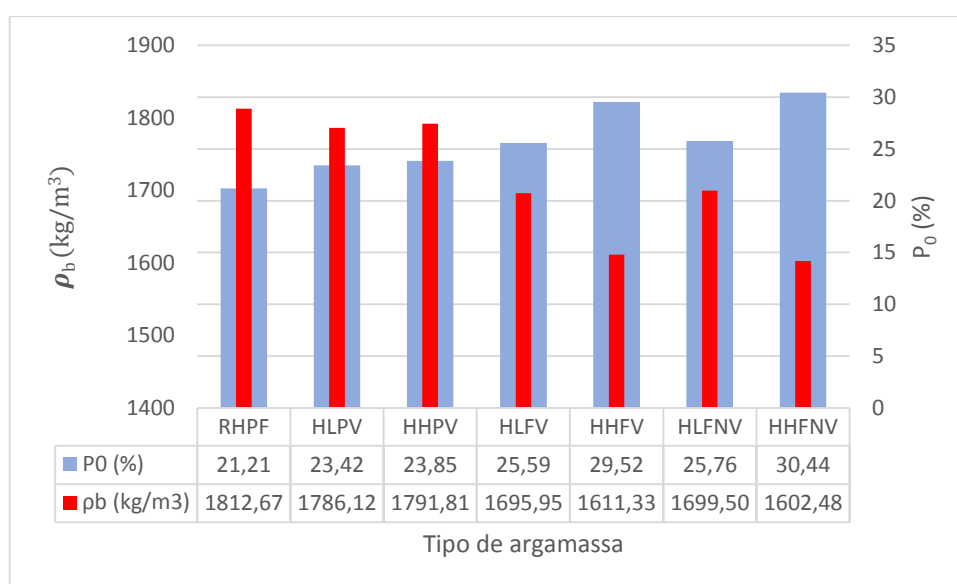


Figura 3.15- Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 dias.

3.1.3.5. Determinação da absorção de água por capilaridade

Com este ensaio pretende-se obter o coeficiente de absorção de água por capilaridade que traduz a relação da massa de água absorvida por área da argamassa em contato com a água, isto é, a capacidade do material tem de absorver água por forças de sucção capilar. O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efetuado respeitando a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009).

Para este ensaio foram usados os meios provetes prismáticos resultantes do ensaio à tração por flexão e não usados no ensaio de compressão. Apesar de o volume dos meios provetes variar, devido à rotura no provete do ensaio não se dar sempre sobre o mesmo ponto, as dimensões na base permaneceram 40x40 mm² e com uma altura média de 80 mm.

A preparação do ensaio para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade iniciou-se com a colocação dos provetes numa estufa à temperatura de $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até se atingir a massa constante, isto é, a uma variação inferior a 0,1% entre pesagens realizadas num intervalo de pelo menos 24 horas. Para tal, foram necessárias 48 horas.

Posteriormente, os provetes foram introduzidos num exsiccador para arrefecerem num ambiente seco, e adicionada uma pequena quantidade de sílica para absorver a humidade no recipiente. Após a normalização da temperatura e humidade foi necessária efetuar a selagem das faces laterais dos provetes, envolvendo-os com várias camadas de filme plástico, para promover a absorção unicamente pela base do provete (Figura 3.16). Foram pesados os provetes e registadas as massa secas. Todas as pesagens do ensaio foram realizadas numa balança de precisão 0,01g.

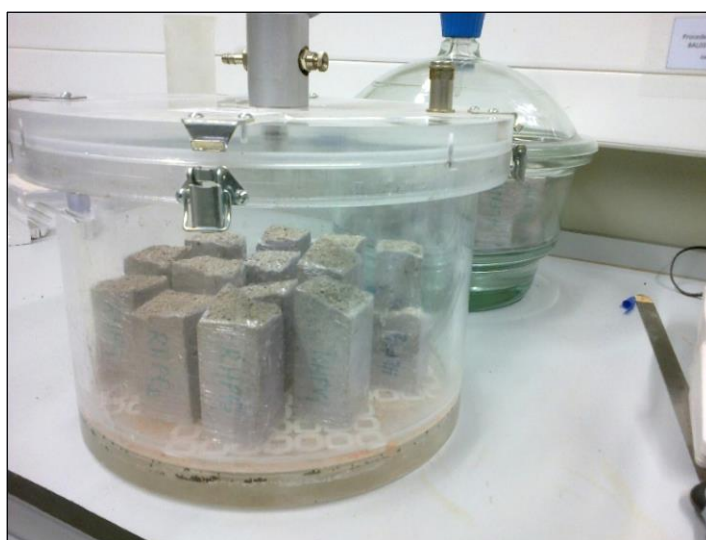


Figura 3.16- Provetes sujeitos a absorção por capilaridade.

Para o ensaio foi utilizado um equipamento contendo uma malha plástica no fundo para reduzir o contato dos provetes sobre a base do equipamento, facilitando a ascensão capilar nos provetes por absorção pela base. Foi adicionada água até atingir 5 mm acima da malha que serve de suporte aos provetes e fechado o recipiente para conservar a humidade relativa elevada. Durante o ensaio foi-se analisando a altura de água nos recipientes, corrigindo as eventuais alterações detetadas com a adição de água evitando salpicar os provetes para não influenciar a absorção.

Como neste tipo de argamassas a absorção é mais intensa nas primeiras horas perdendo ênfase no decurso do ensaio, as pesagens foram efetuadas aos 5, 10, 15 e 30 minutos, à 1h, 1,5h, 2h e 3h e por fim às 24h, 48h e 72h. Assim, podemos avaliar com precisão a evolução da absorção de água nos provetes, através da curva de absorção e detetar os seus pontos de saturação.

O processo de pesagem dos provetes foi individual. Cada provete foi retirado do recipiente, de modo a não salpicar os restantes provetes, limpo com um pano seco para absorver o excesso de água nele contido e pesado. Apenas se avançou para outro provete após o anterior ser colocado no mesmo recipiente. Pretendeu-se que as pesagens fossem realizadas de forma rápida para reduzir o tempo que os provetes estavam fora do recipiente.

Entre pesagens consecutivas, mantiveram-se os recipientes fechados para manter as condições de humidade relativa e reduzir a quantidade de água evaporada dos provetes. O ensaio concluiu-se quando entre duas pesagens consecutivas de, pelo menos 24 horas de intervalo, a variação da massa registada do provete fosse inferior a 1%. Para tal, foram necessárias 72 horas para atingir a suturação dos provetes.

Através dos resultados obtidos das várias pesagens efetuadas, foi calculada a quantidade de água absorvida por unidade de superfície, para cada provete através da expressão:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} = \frac{m_i - m_0}{40 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3}} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (3.15)$$

Sendo,

m_i – massa do meio provete ao fim de um determinado tempo t_i , [kg];

m_0 – massa do meio provete seco, [kg];

A – seção do provete em contacto com a água, [mm²]

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (CC) é obtido pelo declive da seção linear da curva obtida graficamente através da variação da massa (M_i) em função da raiz quadrada do tempo ($t^{0,5}$), usando pelo menos cinco pontos sucessivos da curva, iniciando-se aos 5 minutos terminando aos 60 minutos.

E acordo com Henriques (1999), foi definido também o valor assintótico da curva de capilaridade que representa a quantidade total de água absorvida por área de contato do provete.

Durante a execução do ensaio, verificou-se que a massa dos provetes foi aumentando significativamente durante as duas primeiras horas do ensaio, ocorrendo uma estabilização da massa dos provetes com o decorrer do ensaio. Devido a esse facto, são apresentadas nas Figuras 3.17 e 3.18 as curvas de absorção de água por capilaridade relativas ao ensaio global e à primeira hora de ensaio de todas as argamassas do estudo respetivamente.

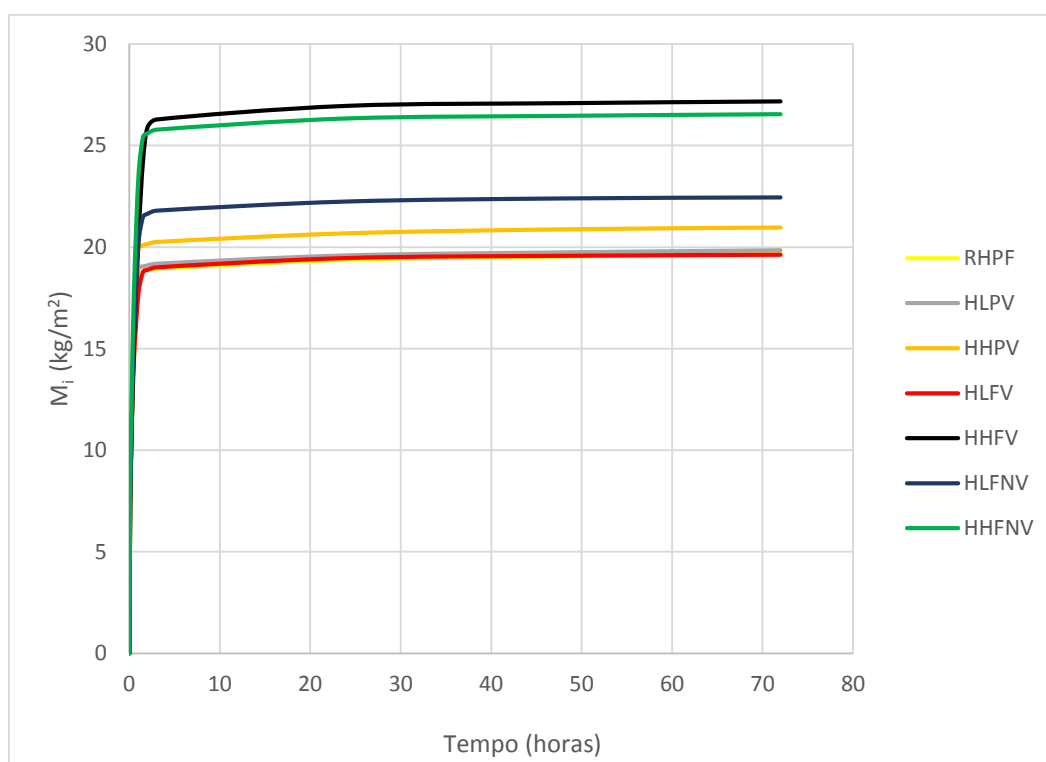


Figura 3.17 Curvas de absorção de água por capilaridade obtidas no ensaio aos 28 dias.

O coeficiente de absorção por capilaridade varia com a inclinação da curva de cada argamassa, sendo maior com o aumento da inclinação. Deste modo, destaque para a argamassa HHFNV que apresenta o maior valor absorvido de água. Notar que a inclinação das curvas de absorção vão diminuindo com o decorrer do ensaio, atingindo a inclinação máxima ao início e formando um valor assintótico ao final de um dia de ensaio, quando ocorre a saturação dos provetes das argamassas.

Assim, para este tipo de argamassas o 1º troço de absorção decorre principalmente entre os 5min e os 60 minutos, pelo que deve ser esse o intervalo a considerar para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

No Quadro 3.6 indicam-se os valores do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico aos 28 dias de cada argamassa.

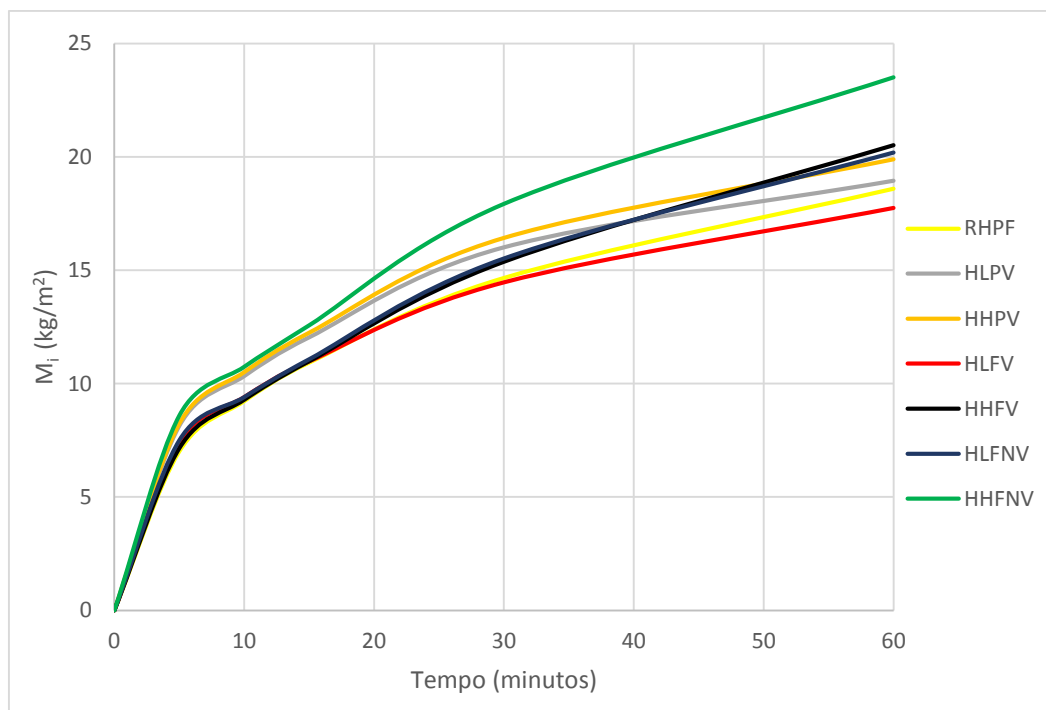


Figura 3.18- Curvas de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio, aos 28 dias.

Quadro 3.6- Coeficientes de capilaridade, valores assintóticos e respectivos desvios-padrão.

Argamassa	CC (kg/m ² .min ^{1/2})	D.P.	V.A. (kg/m ²)	D. P.
RHPF	1,84	0,13	19,66	0,80
HLPV	1,67	0,08	19,85	1,10
HHPV	1,84	0,19	20,97	1,05
HLFV	1,80	0,69	19,63	3,95
HHFV	2,87	0,14	27,17	1,87
HLFNV	2,32	0,17	22,45	0,89
HHFNV	2,82	0,04	26,55	0,74

As argamassas com menor teor em resíduo (HLPV, HLFV e HLFNV) possuem valores mais baixos no coeficiente de capilaridade. Para Santos e Veiga (2012), os valores do coeficiente de capilaridade (CC) devem estar compreendidos entre 1 - 1,5, pelo que não existem argamassas que respeitam a condição.

3.1.3.6. Ensaio de secagem

O ensaio de secagem foi realizado com base em trabalhos anteriores, tais como, Ferreira (2011) e Tomás (2011), e imediatamente a seguir ao ensaio de absorção de água por capilaridade de modo que os provetes estivessem completamente saturados.

O ensaio iniciou-se com a pesagem dos provetes completamente saturados, já sem película plástica envolvente ao provete no ensaio de absorção de água por capilaridade, e colocados numa câmara climática a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa. Efetuaram-se pesagens de hora a hora até perfazer um total de 6 horas e mais tarde de 24 horas a 24 horas, contando a partir da primeira pesagem, até que a variação de massa entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 1%. Deu-se por terminado o ensaio ao fim de 120 horas (5 dias). Todas as pesagens foram realizadas numa balança de precisão 0,01g e os provetes permaneceram em repouso dentro da câmara climática entre as pesagens do ensaio.

Os resultados deste ensaio são expressos através dos parâmetros seguintes: a curva de secagem que exprime a variação do teor em água ao longo do tempo e o índice de secagem que mostra a rapidez de secagem das argamassas, ou seja, quanto maior a rapidez de secagem menor será o respetivo índice de secagem.

A expressão que permite obter o teor em água numa dada argamassa é:

$$W_t = \frac{m_i - m_o}{m_o} * 100 \quad [\%] \quad (3.17)$$

Sendo,

m_i – massa do meio provete no instante t , [g];

m_o – massa do meio provete seco na câmara climática, [g].

O índice de secagem é traduzida pela expressão:

$$i_s = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{\max} \times t_n} \quad (3.18)$$

Com,

$$Q_i = \frac{m_i - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}} \times 100 \quad [\%] \quad (3.19)$$

Sendo,

t_i – tempo de ensaio i , [h];

t_n – tempo final do ensaio, [h];

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

Q_{max} – quantidade de água no instante inicial, [%].

Fazendo uma análise às curvas de secagem aos 28 dias, na Figura 3.19, vemos que todas as argamassas absorveram quantidades de água semelhantes, no entanto as argamassas com maior teor em resíduos cerâmicos (HHFNV e HHFV e HHPV) demoram mais tempo a libertar quantidade de água absorvida e, conseqüentemente, um tempo mais alargado para a eliminar. A curva de secagem da argamassa de referência (RHPF) é a que elimina a água de um modo consideravelmente mais rápido.

Por outro lado, os valores obtidos no ensaio de secagem não chegam a zero porque a temperatura de secagem dos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi mais elevada (65°C) que a temperatura para o ensaio de secagem dos provetes (20°C).

Da análise ao Quadro 3.7, constata-se que a argamassa de referência possui o índice de secagem mais baixo e como tal, apresenta uma secagem mais rápida. As argamassas com incorporação de resíduos cerâmicos de porcelana possuem um índice de secagem mais baixo que as argamassas com incorporação de faiança. O índice de secagem para as argamassas de faiança vidrada e não vidrada são idênticos. Esta análise pode ser comprovada observando a Figura 3.19.

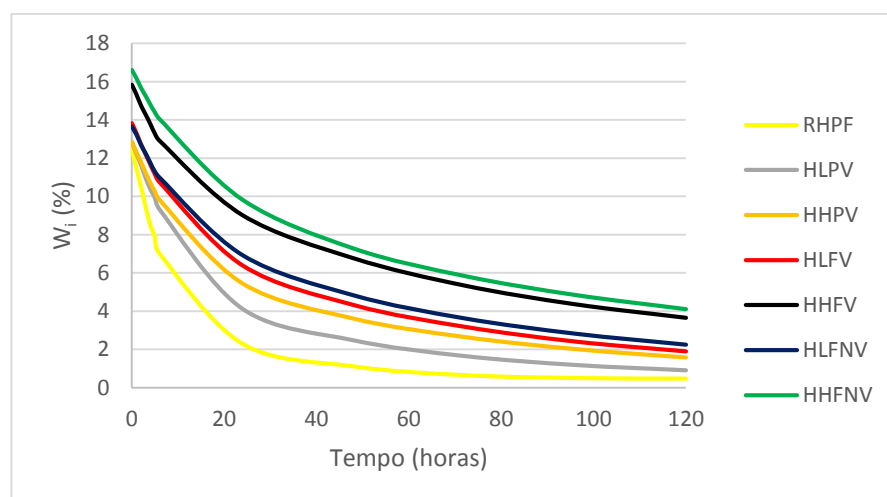


Figura 3.19 – Curvas de secagem das argamassas aos 28 dias.

Quadro 3.7- Valores do índice de secagem e respectivos desvios-padrão.

Argamassa	Índice de Secagem	
	I _s	D.P.
RHPF	0,160	0,001
HLPV	0,250	0,000
HHPV	0,323	0,000
HLFV	0,347	0,003
HHFV	0,444	0,001
HLFNV	0,381	0,001
HHFNV	0,460	0,001

3.1.3.7. Determinação da permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi executado com base nos procedimentos das normas EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008) e ISO 12572:2001 (CEN, 2001). A permeabilidade representa a quantidade de vapor de água que se difunde através da argamassa por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a uma diferença de pressão nas duas faces. Pequenas alterações foram efetuadas aos procedimentos gerais do ensaio devido a razões apresentadas na descrição do ensaio.

A execução do ensaio prende-se com a criação de dois ambientes com temperaturas idênticas mas com pressões de vapor distintas, para que o gradiente de pressão produzido provoque um fluxo de vapor constante, do interior para o exterior do sistema tina-provete.

Após o período de cura dos provetes circulares e a sua respetiva desmoldagem, determinou-se a espessura dos provetes através de um paquímetro digital, de precisão 0,01mm, medindo em três pontos aproximadamente equidistantes, sendo o valor final resultante da média das medições. A espessura média resultante dos provetes, 16mm, respeita as especificações da norma EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008), que limita a espessura em [10;30] mm.

Tendo em conta a superfície exposta dos provetes durante o ensaio, a norma recomenda que as áreas sejam superiores a 0,005m², e que quando inferiores a 0,02m² devem ser realizados 5 provetes por argamassa. Neste caso temos,

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times \frac{106^2}{4} \times 10^{-6} = 0,0088 \text{ m}^2 \quad (3.20)$$

Assim, pela norma EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008) deveriam ser testados 5 provetes de cada argamassa. No entanto, por se considerar suficiente para este tipo de ensaio, efetuaram-se 3 provetes para cada argamassa.

Após a secagem dos provetes, revestiram-se as superfícies laterais com uma camada de borracha líquida, de modo a criar um fluxo unidirecional. Depois da secagem da borracha líquida, colocou-se fita de papel adesiva sobre esta para promover uma maior resistência e facilitar a desmoldagem do sistema. Adicionou-se água destilada até a uma altura aproximada de 15mm nas tinas do mesmo formato e dimensão dos provetes a ensaiar, e solidarizou-se cada provete a uma tina com auxílio da fita de papel adesiva. Para finalizar o processo de preparação das amostras recorreu-se a parafina para cobrir toda a lateral dos provetes e parte da tina, impedindo qualquer passagem de vapor de água pelas laterais dos provetes.

Todos os provetes a ensaiar foram expostos numa câmara climática (Figura 3.20), à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a humidade relativa de $50 \pm 5\%$. Foram efetuadas pesagens diárias, aproximadamente à mesma hora e com recurso a uma balança de precisão 0,01g em todas as pesagens do ensaio, até que a variação de massa face ao tempo decorrido fosse constante durante 5 medições consecutivas.

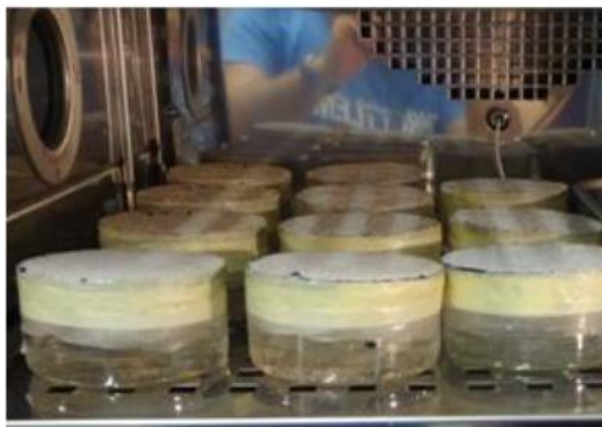


Figura 3.20- Sistema provete/tina na câmara climática (Tomás, A. @2012).

Para tal, assumiu-se que esta relação seria constante quando a sua variação fosse inferior a 5% do valor médio de variação para cada um dos provetes, determinando-se assim, a taxa de variação de massa pela expressão:

$$\Delta_{m12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad [\text{kg/s}] \quad (3.21)$$

Sendo,

- m_1 – massa do sistema provete/tina, no instante t_1 , [Kg];
- m_2 – massa do sistema provete/tina, no instante t_2 , [Kg];
- t_1 e t_2 – tempos referentes a duas pesagens sucessivas, [s].

Após a obtenção da variação constante, através das 5 medições consecutivas, a variação linear Δ_{m12} transforma-se em fluxo de difusão do vapor de água designado por G.

Desta forma, podemos determinar o valor da densidade do fluxo de difusão de vapor de água pela expressão:

$$g = \frac{G}{A} \quad [\text{kg. m}^2/\text{s}] \quad (3.22)$$

Sendo,

- A- Área exposta do provete (média aritmética entre a superfície livre superior e inferior do provete, [mm²];
- G – fluxo de difusão do vapor de água, [kg/s].

A densidade de fluxo de vapor de água que atravessa a argamassa corresponde à permeância ao vapor de água, e pode ser determinado através da expressão:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})] \quad (3.23)$$

Em que a norma ISO 12572:2001 apresenta,

$$\Delta p_v = p_{\text{sat}} \frac{\phi_2 - \phi_1}{100} \quad [\text{Pa}] \quad (3.24)$$

E

$$p_{\text{sat}} = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{237,3 + \theta}} \quad [\text{Pa}] \quad (3.25)$$

Sendo,

- p_{sat} – pressão de saturação à temperatura, [Pa];
- ϕ_1 e ϕ_2 – diferença entre as humidades relativas no interior e exterior da tina de ensaio, [%];

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

Regulando o ensaio pelas condições expostas anteriormente, obtém-se a pressão de saturação, p_{sat} , igual a 2642 Pa. Como a humidade relativa no exterior da tina é aproximadamente metade da pressão no interior da mesma, é razoável adotar que o valor da variação de pressão à temperatura do ensaio, Δp_v , é 1321,2 Pa.

A permeabilidade ao vapor de água é obtida pela expressão:

$$\delta = W \times d \quad [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})] \quad (3.26)$$

Sendo,

d – espessura do provete, [m].

Para ter uma análise mais detalhada, procedeu-se à determinação do fator de resistência à difusão do vapor de água, parâmetro adimensional, que 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 sujeita às mesmas condições ambientais, e pode ser obtida pelo cálculo seguinte:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3.27)$$

Sendo,

δ_a – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, [kg/(m.s.Pa)];

δ – permeabilidade ao vapor de água, [kg/(m.s.Pa)].

A norma ISO 12572:2001 refere que o valor de δ_a deverá ser $1,95 \times 10^{-10}$ [kg/(m.s.Pa)].

Também se determinou a espessura da camada de ar equivalente, s_d , que corresponde à espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de vapor de água que a argamassa de espessura d , através da expressão:

$$s_d = \mu \times d \quad [\text{m}] \quad (3.28)$$

Sendo,

d – espessura do provete, [m]

Os resultados expostos no Quadro 3.8 e a Figura 3.21 permitem observar que as argamassas com maior teor em resíduos vidrados (HHPV e HHFV) apresentam permeabilidades mais baixas ao vapor de água mas, por outro lado, as argamassas de faiança não vidrada apresentam menor fator de resistência ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente.

Quadro 3.8- Permeabilidades ao vapor de água, fatores de resistência ao vapor de água, espessuras da camada de ar equivalente e respectivos desvios padrão, aos 28 dias.

Argamassa	$\delta_{\text{médio}}$ $\times 10^{-11}$ (Kg/(m.s.Pa))	D.P. $\times 10^{-11}$	$\mu_{\text{médio}}$	D.P.	$S_d_{\text{médio}}$ (m)	D.P.
RHPF	1,48	0,043	13,16	0,39	0,21	0,00
HLPV	1,34	0,038	14,55	0,41	0,23	0,00
HHPV	1,25	0,050	15,58	0,61	0,25	0,01
HLFV	1,46	0,060	13,35	0,54	0,22	0,01
HHFV	1,30	0,045	15,03	0,53	0,24	0,01
HLFNV	1,47	0,088	13,27	0,78	0,22	0,01
HHFNV	1,48	0,055	13,22	0,50	0,21	0,01

δ – permeabilidade ao vapor de água; μ – fator de resistência ao vapor de água; S_d – espessura da camada de ar equivalente; D.P. – desvio padrão

De acordo com o Quadro 2.3, a espessura da camada de ar equivalente de ser inferior a 0,08 m para rebocos interiores. Conclui-se assim que nenhuma argamassa do estudo cumpre este requisito.

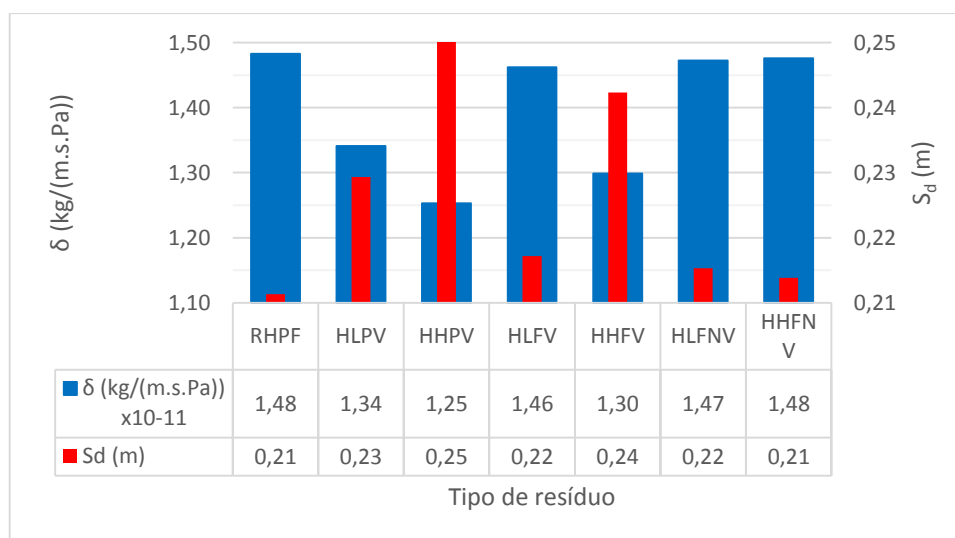


Figura 3.21- Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente.

3.2. Análise global dos resultados

O módulo de elasticidade dinâmico longitudinal quando relacionado com a resistência à flexão permite formular uma ideia sobre as argamassas, se têm maior ou menor tendência para a fendilhação (Figura 3.22). Quanto maior for a relação entre estes dois parâmetros, maior tendência terá para fendilhar. Assim, as argamassas com resistência mais baixa e módulo de elasticidade mais elevado e, conseqüentemente, com maior probabilidade de fendilhar são as argamassas com faiança não vidrada, HLFNV e HHFNV.

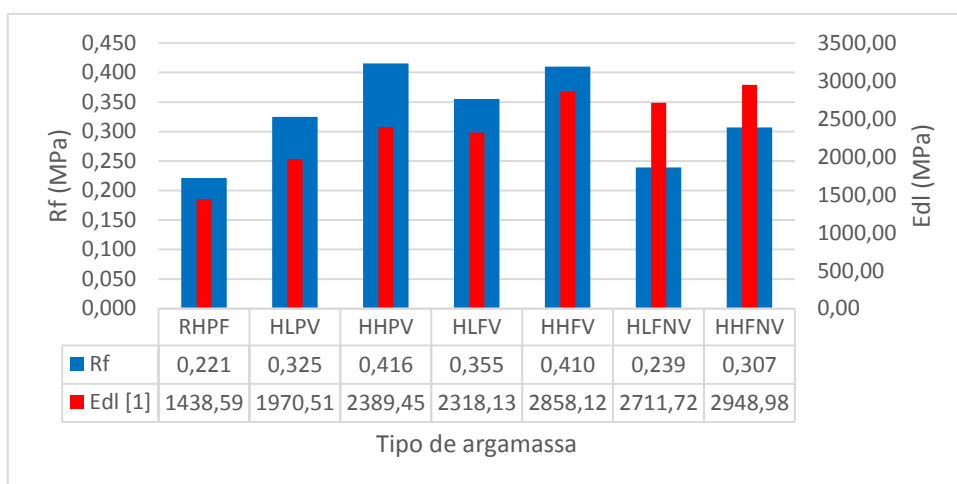


Figura 3.22- Relação módulo elasticidade com resistência à flexão.

A análise que é apresentada na Figura 3.23 é bastante importante porque define os esforços que a argamassa pode suportar. Nesse sentido, as argamassas com maior teor em resíduos cerâmicos apresentam valores globalmente melhores que as restantes.

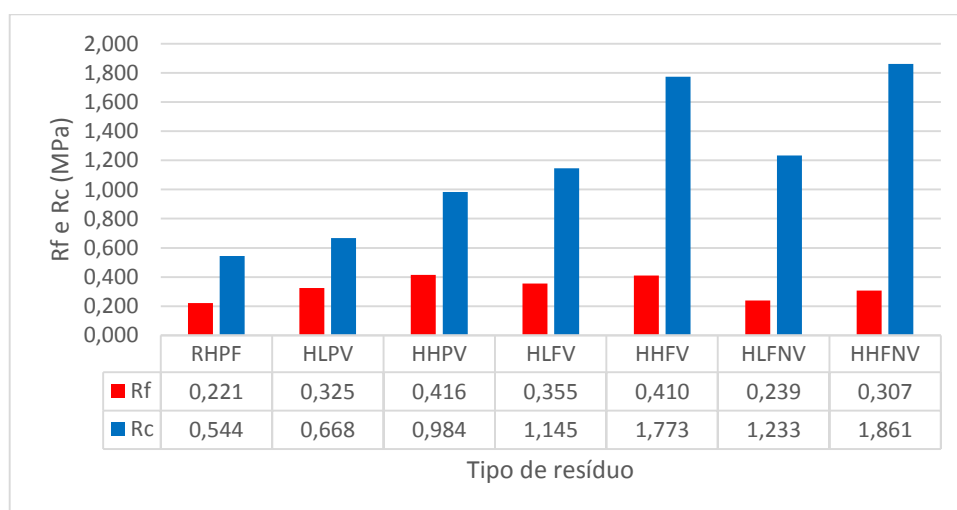


Figura 3.23- Relação das resistências à flexão e compressão.

Na Figura 3.24 relaciona-se a permeabilidade ao vapor de água e a porosidade aberta. Neste campo de avaliação destaca-se a argamassa de referência que apresenta a maior permeabilidade ao vapor de água e a menor porosidade aberta. A argamassa com maior teor em faiança vidrada (HHFV) apresenta o maior valor referente à porosidade aberta e uma muito baixa permeabilidade ao vapor de água.

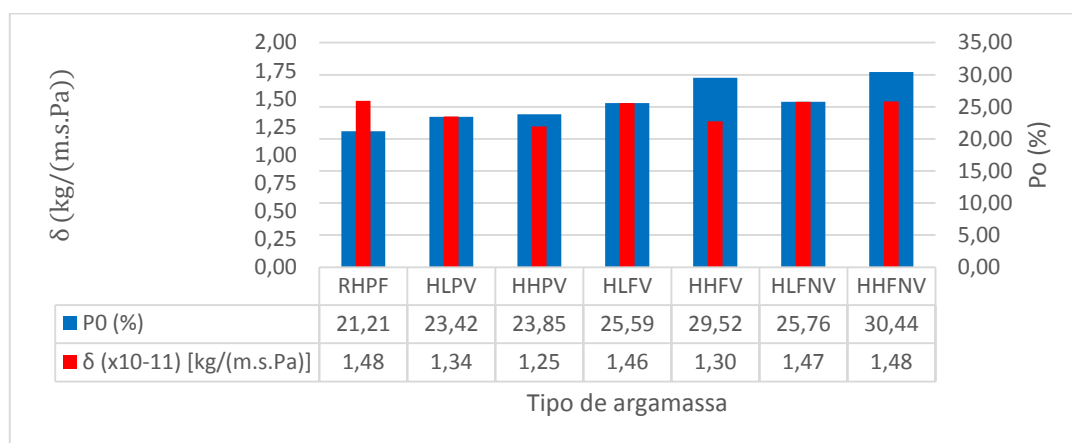


Figura 3.24- Relação entre permeabilidade e porosidade aberta.

Na Figura 3.25, compara-se o coeficiente de absorção de água por capilaridade com o índice de secagem. Neste contexto, as argamassas com melhores resultados são aquelas que apresentam baixo coeficiente de capilaridade e baixo índice de secagem. Assim, a argamassa que melhor se enquadra como melhor solução seria a argamassa de referência, que possui o índice de secagem mais baixo e um dos mais baixos para o coeficiente de capilaridade. As argamassas com maior teor em resíduos possuem os piores resultados nestes ensaios.

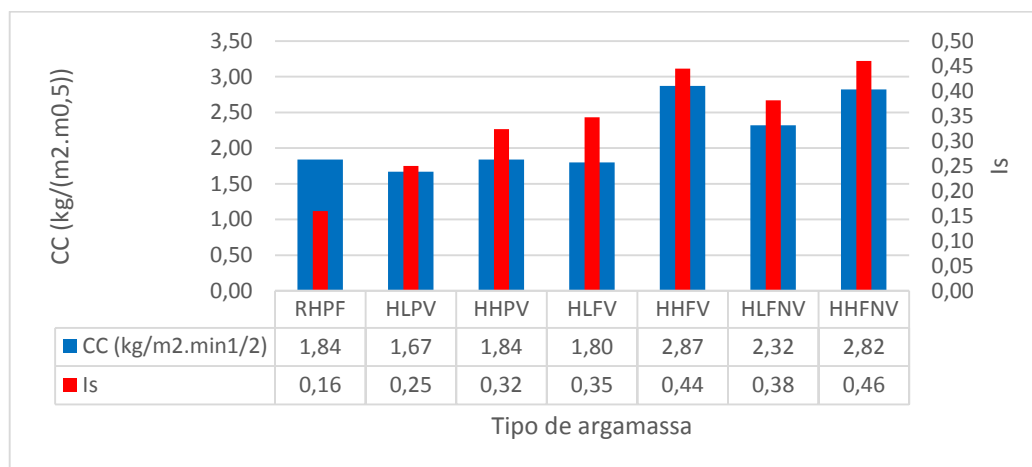


Figura 3.25- Relação entre coeficiente de absorção e índice de secagem.

A última relação apresentada nesta análise de resultados concentra-se sobre o índice de secagem e a porosidade, que é apresentada na Figura 3.26. A argamassa com melhor comportamento nesta área corresponde à argamassa de referência, possuindo o melhor valor de porosidade aberta.

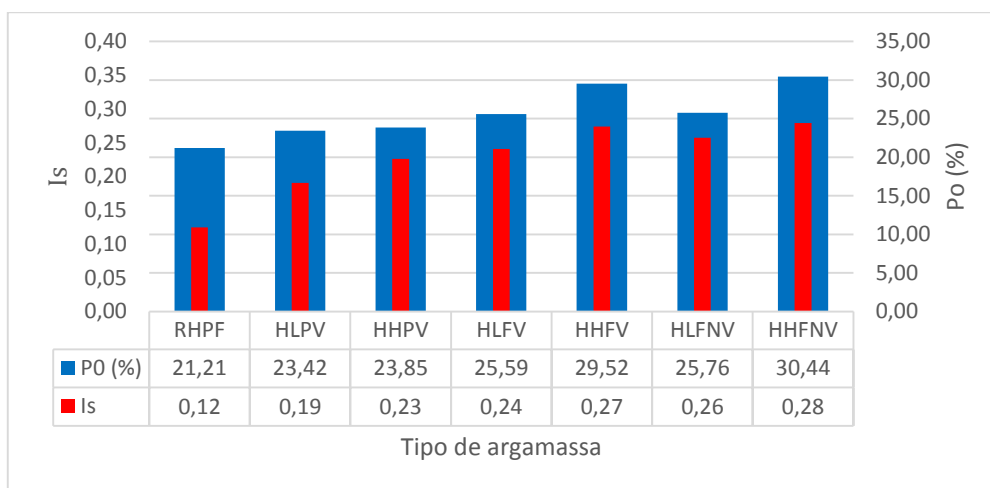


Figura 3.26- Relação entre índice de secagem e porosidade aberta.

Em síntese, podemos concluir que a argamassa com melhor comportamento aos ensaios mecânicos corresponde à argamassa HHFV, e afirmar que a introdução de resíduos cerâmicos como parte integrante da argamassa na substituição parcial de agregado produz resultados positivos. Por outro lado, nos ensaios do comportamento face à água, a argamassa de referência apresentou os melhores resultados nos ensaios de secagem e do coeficiente de absorção por capilaridade enquanto a permeabilidade ao vapor de água e a porosidade HHPV apresenta-se como a melhor solução.

3.2. Comparação de resultados

Neste subcapítulo apresenta-se uma comparação de resultados com Raimundo (2013) que desenvolveu um trabalho sobre argamassas de cal hidráulica natural (NHL3,5), contendo resíduos de mosaicos cerâmicos de barro vermelho, não vidrados, com traço volumétrico 1:3 e duas percentagens distintas de substituição de agregado por resíduo, 20% (3BP) e 40% (3AP).

Notar que a comparação de resultados com estes trabalhos é condicionada e, consequentemente, influenciada por diferentes processos de execução no fabrico dos provetes das argamassas. Enquanto no presente trabalho a moldagem dos provetes foi

desenvolvida por um compactador mecânico, o trabalho desenvolvido por Raimundo (2013) a compactação foi realizada com um pilão.

Relativamente ao módulo de elasticidade, o Quadro 3.9 mostra que as argamassas do estudo e as complementares têm valores da mesma ordem de grandeza, mas para a utilização em rebocos de paredes antigas, não é aconselhável o uso das argamassas 3BP e HLPV.

Quadro 3.9- Módulo de elasticidade.

Provetes	Módulo de Elasticidade (MPa) – aos 28 dias
3BP	1730
3AP	3110
HLPV	1971
HHPV	2389
HLFV	2318
HHFV	2858
HLFNV	2712
HHFNV	2948

No Quadro 3.10 podemos observar que as argamassas com resíduos cerâmicos deste estudo têm valores mais elevados para a resistência à tração por flexão que as argamassas com resíduo de mosaicos não vidrados (3BP e 3AP).

Quadro 3.10- Resistência à tração por flexão.

Provetes	Resistência à tração por flexão (MPa) - aos 28 dias
3BP	0,13
3AP	0,26
HLPV	0,33
HHPV	0,42
HLFV	0,36
HHFV	0,41
HLFNV	0,24
HHFNV	0,31

No Quadro 3.11 verifica-se que a resistência à compressão das argamassas de faiança vidrada e não vidrada possuem mais resistência que as do estudo complementar. Por outro lado, as argamassas com resíduo de porcelana têm resistências intermédias comparativamente às argamassas com resíduo de mosaico cerâmico de barro vermelho.

Quadro 3.11- Resistência à compressão.

Provetes	Resistência à compressão (MPa) - aos 28 dias
3BP	0,43
3AP	1,20
HLPV	0,67
HHPV	0,98
HLFV	1,15
HHFV	1,77
HLFNV	1,23
HHFNV	1,86

Pela análise ao Quadro 3.12, verifica-se que os resultados obtidos por Raimundo (2013) são mais baixos e mais próximos dos limites definidos por Santos e Veiga (2012) comparativamente aos ensaiados neste trabalho (1-1,5). Esta diferença pode justificar-se, em parte, pelo método de cálculo do coeficiente de capilaridade (CC). No presente estudo efetuou-se de acordo com a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009) por se adequar melhor às argamassas de cal, enquanto para as argamassas 3BP e 3AP foi tratada pela norma EN 1015-18:2002 (CEN, 2002) que é mais adequada a argamassas de cimento.

Quadro 3.12- Absorção de água por capilaridade.

Provetes	Absorção de água por capilaridade - aos 28 dias	
	CC (Kg/m ² .m ^{0,5})	V.A. (Kg/m ²)
3BP	1,53	15,95
3AP	1,48	17,06
HLPV	1,84	19,85
HHPV	1,67	20,97
HLFV	1,84	19,63
HHFV	1,80	27,17
HLFNV	2,32	22,45
HHFNV	2,82	26,55

Relativamente ao ensaio de secagem (Quadro 3.13) e ao ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente (Quadro 3.14), sabemos que as argamassas com melhor comportamento terão menor índice de secagem e porosidade aberta. Assim, a argamassa com teor de 20% de mosaico não vidrado (3BP) possui o melhor resultado nestes ensaios.

Quadro 3.13- Índice de Secagem.

Provetes	Índice de secagem - aos 28 dias
3BP	0,19
3AP	0,48
HLPV	0,25
HHPV	0,32
HLFV	0,35
HHFV	0,44
HLFNV	0,38
HHFNV	0,46

Quadro 3.14- Porosidade aberta e massa volúmica aparente.

Provetes	Porosidade aberta e massa volúmica aparente - aos 28 dias	
	P ₀ (%)	ρ_b (Kg/m ²)
3BP	20,67	1673,52
3AP	25,91	1623,41
HLPV	23,42	1786,12
HHPV	23,85	1791,81
HLFV	25,59	1695,95
HHFV	29,52	1611,33
HLFNV	25,76	1699,50
HHFNV	30,44	1602,48

No Quadro 3.15 expõe-se os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade ao vapor de água. Os valores obtidos para a permeabilidade ao vapor de água são inferiores aos valores comparativos. Por outro lado, todos os valores obtidos para o fator de resistência à difusão de água (μ) e para a espessura da camada de ar equivalente (S_d) são superiores aos obtidos com mosaico não vidrado.

Quadro 3.15- Permeabilidade ao vapor de água.

Provetes	Permeabilidade ao vapor de água - aos 28 dias		
	δ [10×10^{-11}] (Kg/(m.s.Pa))	μ	S _d (m)
3BP	2,02	9,69	0,15
3AP	1,54	12,70	0,20
HLPV	1,34	14,55	0,23
HHPV	1,25	15,58	0,25
HLFV	1,46	13,35	0,22
HHFV	1,30	15,03	0,24
HLFNV	1,47	13,27	0,22
HHFNV	1,48	13,22	0,21

Em síntese, conclui-se que em ambos os estudos as argamassas com maior teor em resíduos cerâmicos (40%) apresentam melhores características nos ensaios mecânicos.

Para os ensaios relativos ao comportamento face à presença de água, os resultados obtidos por Raimundo (2013), revelam que as argamassas com incorporação de resíduos tiveram uma pequena melhoria nos resultados à exceção do ensaio de secagem e do coeficiente de absorção de água por capilaridade em que as argamassas de referência obtiveram os melhores resultados.

Já neste trabalho, confirmou-se que a argamassa de referência obteve os melhores resultados no ensaio de secagem e do coeficiente de absorção de capilaridade, mas que nos restantes, a argamassa com incorporação de resíduos de porcelana na percentagem de 40% (HHPV) obteve a melhor classificação.

4. CONCLUSÃO

Pretendia-se com este estudo analisar o comportamento mecânico e o comportamento face à presença água em argamassas de cal hidráulica com incorporação de resíduos de faiança e porcelana, avaliando o potencial de utilização destes resíduos em substituição parcial do agregado.

Após a realização deste estudo conclui-se que os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos e os seus resultados foram considerados satisfatórios.

Ao longo da realização deste trabalho notou-se que os resíduos cerâmicos são uma preocupação ambiental crescente, e com a sua incorporação em argamassas poderá ser, no futuro, uma vantagem a nível económico e ambiental. Assim, este trabalho contribuiu para um conhecimento mais exaustivo sobre a incorporação de resíduos de cerâmica branca, complementando estudos de investigação sobre argamassas de reabilitação. Verificou-se também que a generalidade das empresas do setor da indústria cerâmica não tem conhecimento de estudos sobre a incorporação de resíduos de cerâmica nas argamassas de reabilitação.

Tendo em conta a bibliografia apresentada verifica-se que este tema tem sido desenvolvido por diversos autores, principalmente nos últimos anos, notando um crescimento na procura de novas soluções para o mercado.

Os ensaios deste estudo foram baseados em normas existentes, procedendo a alterações de procedimentos pontuais por forma a adaptá-las às argamassas do estudo, sem comprometer as normas e seus procedimentos pré-estabelecidos.

Pelos resultados obtidos, a incorporação de resíduos de cerâmica branca em argamassas contribuiu para uma melhoria significativa das propriedades mecânicas e face à presença de água nas argamassas, com exceção na secagem e absorção de água por capilaridade em que a argamassa de referência obteve melhores resultados. As propriedades mecânicas das argamassas melhoram com o aumento do teor em resíduos, mas não produzem resultados positivos nas características face à presença de água, com exceção da argamassa HHPV.

Como os resíduos de cerâmica branca utilizados neste trabalho, porcelana e faiança, têm características diferentes, devido aos processos de fabrico distintos, seria interessante e estudo com a avaliação do comportamento às propriedades estudadas, com um período de cura mais extenso (60 dias). Poderia também complementar-se este estudo com a avaliação de outros requisitos, tais como, a aderência da argamassa ao suporte, determinação da velocidade da carbonatação, comportamento face à presença de sais e efetuar ensaios ao envelhecimento.

Para preencher algumas lacunas ainda presentes nesta área, deve no futuro estudar-se os mesmos tipos de argamassas, com resíduos de terracota, grés, entre outros, por se tratar de elementos produzidos em larga escala pelas indústria cerâmica do país e, por conseguinte, muitos resíduos haverá para tratar.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, I., Póvoas F., “Produção de Resíduos na Indústria Cerâmica – Região Centro 2001”, DRAOT – Centro (2002).

Andrade, I., “Produção de Resíduos na Indústria Cerâmica – Região Centro 2002”, DRAOT – Centro (2003).

Andrade, I., “Produção de Resíduos na Indústria Cerâmica – Região Centro 2003”, DRAOT – Centro (2004).

Barbosa, T. (2013). “Comportamento de Argamassas de Cal Aérea ao traço 1:2 com incorporação de Resíduos Cerâmicos”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra

Campos M, Paulon V, Filho J. (2013). “Resíduos cerâmicos no município de Pedreira (São Paulo): equacionamento e soluções de reciclagem”. Revista Labor & Engenho. Volume 7, n.º 1, pp 74-83.

Cavaco, L. (2005). “Técnicas de Aplicação de Argamassas de Revestimento em Edifícios Antigos. Influência no Desempenho”; Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico. Lisboa.

CEN (1999). “Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). EN 1015-3 European Committee standardization, Brussels.

CEN (2000). “Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar”. EN 1015-11, European Committee standardization, Brussels.

CEN (2001). “Hygrothermal Performance of Building Materials and Products – Determination of water vapour transmission properties”. ISO 12572:2001, European Committee Standardization, Brussels

Cruz, A. (2012). “Argamassa de Cal Hidráulica Natural com Incorporação de Resíduos Cerâmicos”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Coutinho, J. (1999). “Agregados para Argamassas e Betões”. Materiais de Construção 1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Despacho 4015/2007, Diário da República – 2ª série – N.º 44 – 2 de Março de 2007, pp 5708-5709.

Decreto-Lei nº 46/2008, Diário da República – 1ª série – N.º51 – 12 de Março 2008, pp 1567-1574.

Decreto-Lei 73/2011, Diário da República – 1ª série – N.º116 – 17 de 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 Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2008). “Comparative Evaluation of Aerial Lime Mortars for Architectural Conservation”. J. Cultural Heritage 9, 3, Pages 338-346.

Fernandes M., Sousa A., Dias A. (2004). “Environmental Impact and Emissions Trade. Ceramic Industry. A Case Study.” Portuguese Association of Ceramic Industry – APICER.

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 Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Henriques, F. (2002). “Conservação dos Revestimentos Exteriores do Palácio Nacional de Sintra”. Caderno de Edifícios n.º2 – Revestimentos de Paredes em Edifícios Antigos, LNEC, pp. 27-37.

Henriques, F. (1999). “The Conservation of the Rendered Walls of Natural Palace of Sintra”, Portugal, Pages 487-498.

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

IPQ (2002). “Ensaio das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Agregados. Parte 3: Determinação da Baridade e do Volume de Vazios”. NP EN 1097-3, 2ª edição, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2006). “Métodos de Ensaio para Pedra Natural. Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (através da Medição da Frequência de Ressonância Fundamental)”. NP EN 14146, 1ª edição, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2011). “Cal de Construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade” NP EN 459-1:2011, 2ª edição, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

Matias, G. (2008).”A Influência de Resíduos de Tijolo de Argamassas de Cal”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

NSG@ (2014). <http://www.calcinacaonsg.com.br/index.php?pg=interessante>.
Calcinação Nossa Senhora da Guia, Ltda. Minas Gerais. Brasil.

Petrucci, E. (1976). “Materiais de Construção”. Editora Globo/MEC. 8ª edição. Rio de Janeiro.

Raimundo, A. (2013). “Argamassas de Cal Hidráulica Natural com Incorporação de Resíduos de Mosaico de Barro Vermelho”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Rodrigues, D. (2010). “Influência dos Métodos de Ensaio nas Características de Argamassas de Cal Aérea e Hidráulica” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. 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.

Santos, A., Pontes, J., Faria, P. (2012), “Contributos para a Melhoria da Durabilidade e Sustentabilidade de Argamassas e Betões: Avaliação da Reatividade de Pozolanas Artificiais”. Congresso Construção 2012. Universidade de Coimbra.

Silva, H. (2012). “Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos de Cerâmica em Granulometria Fina”. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

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 Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Veiga, R. (1998). “Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes – Contribuição para o Estudo da sua Resistência à Fendilhação”. Teses e Programas de Investigação do LNEC. Lisboa

Veiga, M. e Carvalho, F. (2002), “Argamassas de Reboco para Paredes de Edifícios Antigos: Requisitos e Características a Respeitar”. Caderno de edifícios n.º2, LNEC, Lisboa.

Veiga, R (2003). “Argamassas para Revestimento de Paredes de Edifícios Antigos: Características e Campo de Aplicação de algumas Formulações Correntes.” ENCORE – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios Antigos. LNEC, Lisboa.

Veiga R. et al (2010) “Lime-based Mortar: Viably for Use as Substitution Renders in Historical Buildings”. International Journal of Architectural Heritage, Volume 5, Pages 177-195.

Velosa, A. (2006). “Argamassas de Cal com Pozolanas para Revestimento de Paredes Antigas”. Tese de Mestrado, Seção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Aveiro.

Silva, R. (2009). “Anomalias de Revestimentos de Fachada e Soluções de Reabilitação”. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da universidade de Coimbra. Coimbra.

St John, D. A., Poole, A. B., Sims, I. (1998). Concrete Petrography – A Handbook of Investigative Techniques”, Arnold, U.K, p 474.