



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Sara Andreia Couto Fonseca

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM INTRODUÇÃO DE
LAMAS DE ETARS

STUDY MORTARS WITH INCORPORATION OF
SLUDGE FROM WTPS

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

Coimbra, 7 de Setembro 2018



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

Sara Andreia Couto Fonseca

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM INTRODUÇÃO DE LAMAS DE ETARs

STUDY MORTARS WITH INCORPORATION OF SLUDGE FROM WTPs

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

Colaboração institucional



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

Coimbra, 7 de Setembro 2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer às minhas orientadoras Professora Doutora Isabel Torres e Doutora Gina Matias pela disponibilidade, dedicação e orientação nesta fase do meu percurso académico.

Ao Instituto de Investigação de Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) pela cedência das suas instalações, materiais e equipamentos. A todos os profissionais deste estabelecimento com os quais tive oportunidade de me cruzar que me ajudaram e presentearam com a sua simpatia.

Aos meus pais, à mãe Dina por todas as palavras de incentivo, pela compreensão e amor incondicional, por ser para mim o conforto e o ombro amigo. Ao pai Manuel, agradeço por todos os esforços que reuniu, que me possibilitaram chegar até aqui.

À minha família, em particular à minha irmã Juliana pelo amor e o carinho.

À Marisa, pelo apoio e ajuda constante, por ser para mim um exemplo de bondade e dedicação. Obrigado pela tua mão amiga!

Ao Zé, pela força, amor, compreensão, incentivo partilhado através da premissa fazer mais e melhor, e por ter o dom de apaziguar os momentos mais difíceis mostrando sempre o melhor de mim.

À Liliana pela amizade e apoio constante, mostrando não haver barreiras apesar da distância que nos separa.

A todos os meus amigos, aos que me conhecem desde sempre, e às grandes amizades que fiz durante o meu percurso académico. Também gostaria de lhes agradecer o apoio e o companheirismo vividos.

Por último, às minhas estrelinhas, acreditem que senti a vossa presença, avô Manuel, tios Sérgio e António a quem dedico esta dissertação.

A todos, o meu sincero obrigado!

RESUMO

Na atualidade é cada vez maior o interesse global no reaproveitamento e valorização de resíduos, de forma a reduzir a utilização de matérias-primas, energia e água, e de limitar emissões de poluentes. Um dos sectores que contribuiu para estes impactos é o sector da construção, sendo a indústria cimentícia à grande responsável pela extração de recursos. Outro aspeto igualmente problemático é o crescente aumento da quantidade de lamas de ETAR produzidas e as restrições para a sua deposição final, assim surge o propósito de integração deste subproduto em argamassas como intuito de valorização.

A campanha experimental contou com a colaboração Institucional do IteCons, onde se procedeu à realização de ensaios sob o ponto de vista mecânico, físico e higrotérmico, com o intuito de aferir a viabilidade de integração de lamas de ETAR em argamassas cimentícias.

Este estudo foi desenvolvido segundo duas vertentes, por um lado as lamas de ETAR foram integradas nas argamassas no seu estado natural, após o processo de secagem e por outro lado, as lamas de ETAR foram integradas no estado calcinado, sendo possível avaliar o seu desempenho, comparando o comportamento de ambas para avaliar se o processo térmico de calcinação constitui uma mais-valia quando comparado com as restantes argamassas. Foi possível concluir que a integração de lamas de ETAR no estado calcinado poderá não ter interesse, na medida em que a melhoria dos parâmetros avaliados neste estudo não foi significativa. Como nota final, podemos considerar que a integração de lamas de ETAR constitui uma boa alternativa para diminuir o impacto ambiental, causado pela incineração e deposição em aterros.

Palavras-chave: argamassas, calcinação, lama de ETAR, resíduos

ABSTRACT

Increasing awareness and global interest in waste reuse is now increasing, so as to reduce the use of raw materials, energy and water, and to limit emissions of pollutants. One of the sectors that contributed to these impacts is the construction sector, the cement industry being the main responsible for the extraction of resources, another equally problematic aspect is the increasing increase of the amount of sludge produced, and the restrictions for its final deposition, thus the purpose of integration of this by-product in mortars as an aim of valorization arises.

The experimental campaign consisted of the institutional collaboration of IteCons, where mechanical, physical and hygrothermal tests were carried out, in order to assess the feasibility of integrating sludge from sewage treatment plants into cementitious mortars.

This study was developed according to two aspects, on the one hand the sewage sludge was integrated in the mortars in their natural state, after the drying process and on the other hand, the sludge from the WTP was integrated in the calcined state, being possible to evaluate its performance, comparing the behavior of both, to evaluate if the thermal process of calcination is an added value when compared to the group of other mortars. It was possible to conclude that the integration of wastewater treatment plants in the calcined state may not be of interest, since the improvement of the parameters evaluated in this study was not significant. As a final note, we can consider that the integration of sewage sludge is a good alternative to reduce the environmental impact caused by incineration and landfill.

Keywords: mortars, calcination, sludge of WTP, residues

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Guia de leitura	2
2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	4
2.1 Introdução	4
2.2 Consciência ambiental e aproveitamento de resíduos	5
2.3 Construção sustentável	7
3 ARGAMASSAS COM INTEGRAÇÃO DE LAMAS DE ETARs	12
3.1 Introdução	12
3.1.1 Aplicações e funções das argamassas.....	12
3.2 Caracterização dos constituintes das argamassas	13
3.2.1 Agregado	14
3.2.3 Ligante	15
3.2.3.1 Cimento	15
3.2.2 Água	16
3.3 Lamas da ETAR do Choupal	17
3.3.1 Introdução	17
3.3.2 Funcionamento da ETAR do Choupal	19
3.3.2 Composição das lamas residuais	21
3.3.4 Alguns estudos desenvolvidos.....	21
4 DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS	23
4.1 Introdução	23
4.2 Materiais e técnicas de preparação	23
4.2.1 Caraterização dos materiais constituintes.....	23
4.2.2 Equipamentos utilizados.....	24

4.2.3	Preparação das argamassas.....	26
4.3	Caracterização das argamassas	27
4.3.1	Estado fresco.....	27
4.3.1.1	Consistência por espalhamento	27
4.3.2	Moldagem, desmoldagem e condições de cura	29
4.3.3	Estado endurecido.....	29
4.3.3.1	Módulo de Elasticidade Dinâmico	30
4.3.3.2	Resistência mecânica á tração por flexão	31
4.3.3.3	Resistência mecânica á compressão	33
4.3.3.4	Massa volúmica aparente seca.....	34
4.3.3.5	Absorção de água por capilaridade.....	34
4.3.3.6	Secagem.....	36
4.3.3.7	Permeabilidade ao vapor de água	37
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	40
5.1	Introdução.....	40
5.2	Análise das argamassas no estado fresco	40
5.2.1	Consistência por espalhamento	40
5.3	Análise das argamassas no estado endurecido	41
5.3.1	Módulo de elasticidade dinâmico.....	41
5.3.2	Resistência mecânica à tração por flexão	42
5.3.3	Resistência mecânica à compressão	43
5.3.4	Massa volúmica aparente seca.....	44
5.3.5	Absorção de água por capilaridade.....	44
5.3.6	Secagem.....	46
5.3.7	Permeabilidade ao vapor de água	48
5.4	Considerações finais.....	49
5.5	Classificação normativa	52
6	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	58
6.1	Introdução.....	58
6.1.1	Conclusões.....	58
6.1.2	Propostas para trabalhos futuros.....	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hierarquização de resíduos (imagem adaptada Plano nacional de gestão de resíduos, 2014).....	6
Figura 3.1 – Fissuração potenciada pelo fenómeno de retração (http://www.mapadaobra.com.br , 2016).....	14
Figura 3.2 – Vista aérea da ETAR do Choupal, Coimbra (retirada http://www.aguasdocontrolitoral.pt ,2015).....	20
Figura 3.3 – Etapas do funcionamento de uma ETAR do Choupal (a) obra de entrada, (b) decantadores primários, (c) leitos percoladores, (d) digestores anaeróbios (e) centrifuga (retirado Leonardo, 2012).....	21
Figura 4.1 – Fases de aplicação da Lama de ETAR (a) Lama de ETAR seca, não calcinadas (b) Lamas de ETAR calcinada.....	26
Figura 4.2 – Equipamentos utilizado no procedimento laboratorial (a) balança digital (b) mesa de espalhamento (c) tanque com suporte de rede metálica (d) aquecedor parafina e utensílios (e) molde prismáticos.....	27
Figura 4.3 – Representação esquemáticas das formulações produzidas (adaptado Veiga et al,2012).....	28
Figura 4.4 – Ensaio de Consistência por Espalhamento (a) Utensílios do ensaio: 1- mesa de espalhamento, 2- molde tronco-cónico e 3- manivela (b) preenchimento do cone com argamassa (c) remoção do cone (d) espalhamento da argamassa.....	30
Figura 4.5 – Provetes no estado endurecido (a) provetes prismáticos (b) provetes circulares.....	32
Figura 4.6 – Figura 4.6 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico (a) montagem do provete prismático (b) esquema representativo de ensaio retirado da norma NP EN 14146:2006, onde 1- emissor, 2- provete prismático e 3- recetor.....	33
Figura 4.7 – Ensaio de resistência mecânica á tração por flexão (a) provete prismático (40×40×160 mm) no estado inicial (b) provete prismático (40×40×160 mm) submetido a rotura.....	34
Figura 4.8 – Esquema representativo da disposição dos roletes nas faces de um provete prismático (imagem retirada da norma EN 1015-11:1999).....	35

Figura 4.9 – Ensaio de resistência á compressão (a) provete prismático (40×40×40 mm) no estado inicial (b) provete prismático (40×40×40 mm) após a aplicação de uma força de compressão.....	36
Figura 4.10 – Ensaio de absorção por capilaridade (a) provetes envolvidos em película aderente (b) tanque com nível de água entre os 5-10 mm (c) provetes prismáticos colocados no tanque apoiados no suporte de rede metálico (d) colocação de uma tampa no tanque de vidro.....	38
Figura 4.11 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água (a) tinta impermeabilizante marca Ceys (b) aplicação da tinta impermeabilizante (c) colocação dos provetes circulares apoiado em tinas de vidro (d) colocação de parafina em volta do conjunto provete – tina.....	41
Figura 5.1 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas LE e LEC.....	44
Figura 5.2 – Resistência mecânica à tração por flexão para as argamassas LE e LEC.....	45
Figura 5.3 – Resistência mecânica à compressão, para argamassas LE e LEC.....	46
Figura 5.4 – Massa volúmica aparente seca, após 28 dias de cura, das argamassas LE e LEC.....	46
Figura 5.5 – Curva de absorção por capilaridade no tempo total do ensaio (a) argamassas LE (b) argamassas LEC.....	48
Figura 5.6 – Curva de secagem no tempo total do ensaio (a) argamassas LE (b) argamassas LEC.....	50
Figura 5.7 – Relação entre a permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente, aos 28 dias, das argamassas cimentícias.....	51
Figura 5.8 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e resistência mecânica à tração por flexão, aos 28 dias, das argamassas de cimento.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

C- Coeficiente de absorção por capilaridade

IS – Índice de secagem

LE – Lama de ETAR seca

LEC – lama de ETAR seca calcinada

LER – Lista Europeia de Resíduos

RCD – Resíduos de construção e demolição

ÍNDICE DE TABELAS

Quadro 3.1 – Boletim de ensaio lamas da ETAR do Choupal.....	22
Quadro 3.2 – Resumo de alguns trabalhos de investigação no âmbito da valorização e reaproveitamento de lamas na constituição de argamassas.....	23-24
Quadro 4.1 – Baridade dos constituintes.....	26
Quadro 4.2 – Caraterização das argamassas produzidas.....	29
Quadro 5.1 - Espalhamento, relação água/ligante, relação água/ finos das argamassas em LE e LEC (adaptado de Silva, 2017b).....	42
Quadro 5.2 – Coeficiente de absorção por capilaridade, e desvio padrão, das argamassas LE e LEC.....	47
Quadro 5.3 – Índice de secagem (IS) (a) argamassas LE (b) argamassas LEC.....	48
Quadro 5.4 – Permeabilidade ao vapor de água, fator de resistência à difusão do vapor de água e espessura de ar equivalente das argamassas, para as argamassas LE e LEC.....	50-51
Quadro 5.5 – Caraterização das argamassas em estudo, para os ensaios mecânicos, ao 28º dia de cura.....	53
Quadro 5.6 – Caracterização das argamassas LE, para os ensaios físicos e higrotérmicos, ao 28º dia de cura.....	53
Quadro 5.7 – Características das argamassas LEC, para os ensaios físicos e higrotérmicos, ao 28º dia de cura.....	54
Quadro 5.8 – Requisitos aplicado às argamassas endurecidas, para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, segundo a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013).....	56
Quadro 5.9 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa de uso geral para rebocos interiores/exteriores (adaptada Monteiro, 2015).....	56
Quadro 5.10 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa leves para rebocos exteriores/interiores.....	57
Quadro 5.11 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa coloridas para reboco exteriores.....	57
Quadro 5.12 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa monomassa para rebocos exteriores.....	58
Quadro 5.13 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassas de drenagem para rebocos interiores/exteriores.....	58

Quadro 5.14 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassas de isolamento térmico.....67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O século XVIII, trouxe com ele a Revolução Industrial, dando início a uma nova era tecnológica, onde o homem passou a ter ajuda de máquinas para gerar produtos. Inicialmente esta mudança demonstrou ser benéfica, pois trouxe rapidez na produção fabril, mas por outro lado foi ponto de partida para desencadear problemas graves no meio ambiente, devido ao crescente desenvolvimento económico que potenciou o aumento do consumo de recursos naturais e libertação de CO₂ para a atmosfera. Estas mudanças estão a forçar os limites da “*capacidade de suporte*” da Terra, pois este “*fornecimento é vital para sustentar a vida, mantendo a capacidade de regeneração e fornecimento ilimitado*” (Garcia, 2011).

Um dos sectores que contribuiu para estes impactos negativos foi o setor da construção, que segundo dados da Quercus produz mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das restantes atividades humanas, sendo a indústria cimentícia responsável pelo impacto na extração de recursos naturais, contribuindo, por sua vez, para o aquecimento global.

Outro aspeto problemático é o aumento da quantidade de lamas de ETAR produzidas, e por sua vez os problemas causados pela sua deposição final: (i) valorização agrícola, (ii) valorização energética (incineração) e (iii) deposição em aterro.

Face a este paradigma, à problemática causada pela indústria cimentícia devido aos danos ambientais causados e às restrições, a deposição final para as lamas de ETAR surge o propósito de integração deste subproduto em argamassas como substituinte do cimento, ou seja, por um lado reduz-se a deposição deste subproduto em aterros e por outro a quantidade de resíduos produzidos na indústria cimentícia.

Foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos estudos que comprovaram que a integração deste subproduto na produção de argamassas cimentícias, constitui uma alternativa bastante favorável, devido à sua constituição química e elevada finura das lamas (Garcia, 2011). (Garcés et, al, 2008) conclui que as cinzas de lama de esgoto exibem moderada atividade pozolânica que na prática, com a sua integração na matriz cimentícia aumenta os parâmetros de resistência. Por outro lado a calcinação é considerada, do mesmo modo, uma mais-valia, pois o processo

de calcinação aumenta as resistências mecânicas (Monfroi et al, 2010). (Garcia, 2011), concluiu que as lamas de ETAR calcinadas a 950°C durante 5 horas apresentam eliminação total de carbono e matéria orgânica, face às restantes amostras. (García et al, 2008) concluiu que as lamas provenientes da pasta de papel possuem potencialidades como matéria-prima para produzir produtos com atividade pozolânica, após o processo térmico de calcinação.

Assim, no presente estudo, optou-se por utilizar as lamas de ETAR, provenientes da ETAR do Choupal (Coimbra), quer no estado natural, quer no estado submetido à calcinação, na produção de argamassas cimentícias. Uma vez que a integração de lamas calcinadas e secas parece ser uma boa solução para a valorização destes resíduos e contribui para a diminuição da utilização do cimento.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar o comportamento das argamassas, ao nível mecânico, físico e higrotérmico com integração de lamas ETAR, em dois estados distintos no estado seco, não calcinado e quando sujeitas ao processo térmico de calcinação na substituição parcial do cimento, que serão posteriormente avaliadas de acordo com as características funcionais apresentadas na norma NP EN 998-1:2010 (IPQ, 2010).

Face ao objetivo inicial pretende-se analisar os resultados obtidos para as argamassas produzidas, tendo como parâmetros comparativos os obtidos para a argamassas de referência, que resultaram do trabalho experimental de (Silva,2017a), e aferir se o processo térmico de calcinação utilizado nas lamas de ETAR constitui uma mais-valia, em relação às restantes formulações de argamassas.

1.3 Guia de leitura

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, seguidamente faz-se uma breve descrição do que tratam.

No primeiro capítulo é feita a introdução geral ao tema, são apresentados os objetivos, é justificada a importância do tema proposto e é definida a organização geral da dissertação.

No segundo capítulo “Desenvolvimento sustentável” o mesmo encontra-se dividido em três subcapítulos, sendo que o primeiro é de cariz introdutório e pretende descrever sumariamente as preocupações ambientais causadas pelo crescente aumento de produção de resíduos, tendo como ponto de partida a sua valorização e integração de resíduos na constituição de argamassas, o segundo pretende descrever detalhadamente a importância da valorização de resíduos e sua

classificação segundo as LER, o último apresenta várias investigações realizadas, tanto a nível nacional como internacional, no âmbito do reaproveitamento de resíduos na produção de argamassas e betões.

O terceiro capítulo “Argamassas com integração de lamas de ETARs”, este encontra-se dividido em três subcapítulos, o primeiro é introdutório e expõe as aplicações e funções das argamassas, o seguinte pretende abordar os materiais constituintes das argamassas em estudo, e o último apresenta o funcionamento, caracterização/composição das lamas de ETAR e alguns estudos que têm vindo a ser desenvolvidos no sentido da valorização das lamas.

No quarto capítulo, “Descrição do plano de ensaios”, apresentam-se detalhadamente todos os procedimentos e metodologias utilizados ao longo de toda a campanha experimental.

No quinto capítulo “Apresentação e discussão de resultados” são expostos os resultados obtidos durante a fase experimental com as respetivas considerações e discussões para cada análise efetuada. Importa ainda referir que a estrutura deste capítulo, ao longo da apresentação de resultados, segue a mesma ordem atribuída no capítulo anterior.

No sexto capítulo, “Conclusões e propostas de trabalhos futuros”, são expostas as principais conclusões e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, no sétimo e último capítulo, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento da presente dissertação.

2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1 Introdução

Assistimos, dia após dia, a práticas com impacto negativo sobre o planeta Terra, como o consumo excessivo de recursos, a produção de resíduos e a emissão de poluentes para a atmosfera. Estas ações têm motivado, ao longo das últimas décadas, a elaboração de protocolos, relatórios e diretivas que desencadearam a implementação de medidas nas seguintes áreas de intervenção: “água”, “resíduos”, “energia”, “transportes”, “indústria extrativa e transformadora”, “biodiversidade e serviços dos ecossistemas”, “cidades e território”, “mar” e o “turismo”. O contributo mais importante, o da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), em 2012, consistiu na organização de uma conferência, Rio+20, no Brasil, com o objetivo de procurar que todos os países envolvidos cumpram “ (...) o compromisso com o desenvolvimento sustentável (...) para o nosso planeta e para as gerações presentes e futuras (...) integrando aspetos económicos, sociais e ambientais e reconhecendo as interligações entre estas três dimensões” (Crescimento Verde, 2014). Em Portugal, as iniciativas tiveram lugar a partir da apresentação de proposta por parte do ministério do ambiente, ordenamento do território e energia, expostas no Compromisso para o Crescimento Verde, emitido em 2014, que consiste na apresentação de um conjunto de medidas que incentivam o “desenvolvimento económico” e “crescimento sustentável”.

Este estudo foca-se, em particular, nas iniciativas apresentadas que promovem a valorização de resíduos e integração dos mesmos em materiais de construção.

Reconhecidamente, a indústria de construção é uma das atividades humanas com maior impacto na produção de resíduos. Atendendo a vários estudos recentemente desenvolvidos, detalhados no subcapítulo 2.3, é possível incorporar em materiais de construção, resíduos que não resultaram de atividades provenientes do sector da construção civil. Esta integração nos materiais de construção é feita através da substituição/adição de um ou mais constituintes tendo como vantagens: (i) a diminuição da produção de resíduos da construção e (ii) o reaproveitamento de outros resíduos (atividade doméstica, industrial e agrícola).

Assim, é possível a conceção de materiais de construção mais sustentáveis que incentivem a evolução de uma indústria de construção mais sustentável e preservação do meio ambiente,

assente em políticas que visam a reciclagem e a valorização de resíduos com potencial de reaproveitamento. A relevância e contemporaneidade do tema abordado são acompanhados de um crescente interesse científico espelhado no aumento de publicações e estudos relevantes para o desenvolvimento de materiais de construção com incorporação de subprodutos, nomeadamente, a integração de resíduos na produção de betões e a incorporação de subprodutos na constituição de argamassas.

O subcapítulo que se segue pretende dar continuidade ao desenvolvimento do reaproveitamento de resíduos.

2.2 Consciência ambiental e aproveitamento de resíduos

De acordo com a área de intervenção do presente trabalho, este teve como ponto central a valorização de resíduos e as medidas implementadas nesta vertente foram: “incentivar a utilização de resíduos na produção de novos produtos”, tendo como objetivo o aumento da incorporação de resíduos na economia, 68% em 2020 e 87% em 2030 e “*promover o aumento da valorização das lamas de Etar através da promoção e potenciação da diversificação dos seus destinos finais*” (Crescimento verde, 2014).

É essencial a elaboração de medidas que visem a “prevenção e gestão de resíduos”, de modo a valorizar e encontrar soluções para a sua correta eliminação.

De acordo com o apresentado no Plano nacional de gestão de resíduos, foi elaborado o Princípio para a hierarquização do reaproveitamento de resíduos, o qual estabelece que os resíduos devem atender à “ordem de prioridades” que se encontra apresentada na Figura 2.1. No topo da hierarquização encontra-se presente a redução de resíduos, cujo propósito passa pela redução da sua produção, procurando diminuir as suas quantidades com a implementação de políticas de reutilização ou de prolongamento do seu tempo de vida. A fase que se segue é o encaminhamento de resíduos para a reciclagem onde estes são vistos como recursos, e não como “lixo” e desta forma possam ser valorizados e utilizados para outros fins. A eliminação é a última das opções a considerar, depois de esgotadas as hipóteses de reutilização, reciclagem e valorização. Nesta fase os resíduos são colocados em aterros, a céu aberto, incinerados ou coincinerados (Plano nacional de gestão de resíduos, 2014).



Figura 2.1 – Hierarquização de resíduos (imagem adaptada Plano nacional de gestão de resíduos, 2014)

Neste contexto, é fundamental que cada resíduo seja separado convenientemente e classificado logo na fase inicial, para que o seu “destino final seja o mais adequado e o menos nefasto para a saúde pública e para o ambiente”, assim a sua classificação processa-se segundo o exposto no Decreto 2014/955/UE e no regulamento UE nº 1357/2014, em duas fases:

1. “Classificação do resíduo de acordo com a Lista Europeia de Resíduo, LER”
2. “Avaliação da perigosidade” que o resíduo apresenta (Guia de classificação de resíduos, 2014).

Ou seja, os resíduos em primeira estância são enquadrados segundo a LER, de acordo com a entrada que melhor os caracteriza: “entrada absoluta ou entrada espelho”. Se o resíduo se enquadrar na entrada absoluta deverá ser classificado de acordo com a designação do código das LER, não havendo necessidade de prosseguir à segunda fase do processo. Quando não se conhecem as características de perigosidade deverá prosseguir-se com a segunda fase do processo, esta fase é desenvolvida segundo três vertentes: (i) “caraterização do resíduo”, (ii)

“determinação das características de perigosidade” e (iii) “determinação da presença de poluentes orgânicos persistentes” (Guia de classificação de resíduos, 2014).

2.3 Construção sustentável

Ao longo das últimas décadas foram realizadas diversas investigações na vertente de valorização dos resíduos, na constituição de argamassas, sendo estes resíduos incorporados ora como substituintes de agregados, ligantes, aditivos ou até como substituintes da água de amassadura.

(Yan et al, 2012), estudaram o comportamento da água de destintagem de papel reciclado, proveniente de fábricas de papel, na substituição de água da amassadura na composição de argamassas de cimento. Os valores mais elevados para o parâmetro de trabalhabilidade foram registados nas argamassas compostas por adição de água de destintagem de papel reciclado, no entanto, este resíduo induziu mudanças nas propriedades mecânicas no material endurecido. Com o aumento de percentagem de água de destintagem verificou-se uma redução na resistência à compressão, na densidade e também na secagem. Por outro lado, a absorção de água e o volume de vazios aumentaram.

(Ribeiro et al, 2013), incorporaram plásticos reciclados reforçados com fibra de vidro, obtidos através de processos de trituração e moagem, como agregado, na substituição parcial de areia e filer, na constituição de argamassas de resina de poliéster. Os resultados experimentais foram promissores, uma vez que se verificou melhorias significativas nas propriedades mecânicas das argamassas compostas por este resíduo em relação aos valores de referência.

(Baeza et al, 2014), analisaram o comportamento de argamassas cimentícias realizando combinações binárias e ternárias, de lodo de águas residuais com pó de mármore, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz como substituto parcial de cimento de Portland. Em geral, a resistência à compressão atinge ou excede a classe de resistência do cimento, e a combinação que obteve maior resistência mecânica foi a combinação constituída por lodo de águas residuais, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz.

(Al-Jabri e Shoukry, 2014), estudaram o comportamento de minerais com nano-estruturas ultrafinas, como aditivo na formulação de argamassas cimentícias. Quatro subprodutos foram submetidos a dois processos, numa primeira fase os resíduos foram moídos e depois numa segunda fase calcinados a 750°C. Foram preparadas argamassas com substituição parcial de cimento pelas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% de catalisador gasto, escórias de cobre e pó de clinquer, respetivamente. Os resultados mostraram que a resistência à compressão da

argamassa composta pelos resíduos de nano-estruturas ultrafina é superior aos valores obtidos de referência. O parâmetro de absorção de água capilar diminui com o aumento das substituições de cimento pelos materiais nano-estruturados ultrafinas.

(Horgnies et al, 2014), estudaram o comportamento de resíduos de pó de poliamida na substituição parcial de areia em argamassas cimentícias. Os valores de densidade aparente, resistências mecânicas, permeabilidade e análises termogravimétricas são caracterizados de acordo com a percentagem de resíduos de pó de poliamida usados nas misturas. O aumento progressivo da quantidade de poliamida influenciou as propriedades da argamassa, diminuindo os parâmetros de densidade e resistência mecânicas e aumentou o parâmetro de porosidade. Estes resultados permitem a valorização e o controlo de resíduos de pó de poliamina no fabrico de argamassas leves.

(Afshinnia e Poursaee, 2015) avaliaram o comportamento da borracha fragmentada para diminuir as reações expansivas álcalis-sílica em amostras de argamassas cimentícias preparadas como agregado de substituição. Os resultados deste estudo indicaram que as argamassas que contêm borracha triturada como substituto de agregados finos diminuíram as reação expansivas álcalis-sílicas. No entanto, a resistência à compressão dos cubos de argamassa contendo borracha fragmentada reduziu. O estudo permitiu confirmar que a borracha reduz o impacto de amortecimento das partículas na redução das reações álcalis-sílicas.

(Janh e So, 2015) analisaram o comportamento de isoladores utilizados para transmissão de energia de alta tensão, compostos por cerâmicos, vidro, porcelana e composto de polímeros, como aditivo pozolânico na constituição de argamassas e betões. Os isoladores podem ser substituídos como aditivo na mistura, devido as suas características pozolânicas, e como agregado reciclado na produção de betões. Os resultados indicam que o uso de isoladores em pó, a longo prazo aumenta o valor para a resistência à compressão, sendo muito superior a argamassa de referência. Entre as argamassas testadas, a que apresentou melhor desempenho foi a argamassa que continha 5% de resíduos de isoladores.

(Valensca, S., Barros et al, 2016) estudaram o comportamento da integração de adição de resíduos de quartzito em argamassas cimentícias, com o objetivo de analisar a reação dos agregados alcalinos e o comportamento mecânico. A reciclagem de resíduos de rochas ornamentais para a integração em argamassas tem sido uma técnica difundida em todo o mundo, no entanto a maioria dos estudos não verificou se estes resíduos, usados como agregados, podem manter a sua integridade quando submetidos a ações provocadas por agentes agressivos. A caracterização dos resíduos de quartzito foi executada através do método acelerado de barras de argamassa de acordo com a norma ASTM C1260,. Os resultados obtidos mostram que os

resíduos de quartzito não são reativos quando incorporados em argamassas e apresentam um comportamento mecânico adequado

(Lucas et al, 2016) utilizaram cerâmicas de louças sanitárias e resíduos, como agregado de substituição de areia em argamassas cimentícias. A utilização destes resíduos como agregados conduz à diminuição de impactos ambientais uma vez que reduz a extração da areia natural e a deposição desses resíduos em aterro. Este estudo revela que os resíduos sanitários podem ser utilizados como agregados, pois não afetam o comportamento das argamassas. A maioria das propriedades analisadas são muito semelhantes às obtidas para a argamassa de referência. As argamassas incorporando este resíduo mostraram melhorias ao nível da resistência mecânica e permeabilidade ao vapor de água. A introdução deste resíduo, não biodegradável, como substituição de areia natural é viável e benéfica para o meio ambiente e em termos de desempenho a nível mecânico.

(Silva et al, 2016) apresentam uma investigação levada a cabo, durante 39 anos (no período de 1977 a 2015), com o objetivo de avaliar o comportamento da integração de agregados reciclados, de resíduos de construção e demolição, no desempenho de argamassas cimentícias. Foram avaliadas várias propriedades ao nível mecânico, higrotérmico e físico, e na generalidade pode concluir-se que as argamassas que contêm resíduos reciclados apresentam desempenho análogo ao obtido para a argamassas de referência.

(O.López-Zaldivar et al, 2017) estudaram o comportamento de cinzas volantes resultantes do processo de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Assim foram desenvolvidas argamassas de cimento de aluminato de cálcio (CAC) com adição de 10% (em peso do agregado) de cinzas volantes tratadas (TFA). As argamassas testadas mostraram ser tecnicamente aceitáveis, com um período de trabalhabilidade mais curto do que as argamassas de referência. A integração de cinzas tratadas reduz a porosidade e o tamanho dos poros nas argamassas CAC, e ainda apresentam um comportamento a nível mecânico superior ao das argamassas de referência.

(Mashaly et al, 2018) estudaram o comportamento da integração de lodo de granito, produzido durante os processos de fabricação de rochas ornamentais, como substituinte do cimento em argamassas e betão. Para tal foram realizados ensaios a nível físico, mecânico e de durabilidade. Verificou-se que a integração de lodo de granito é uma solução viável. Os resultados dos testes mostraram claramente que as misturas de argamassa e betão com lodo de granito até 20% de substituição de cimento apresentaram um declínio insignificante nas propriedades físicas e mecânicas, além de maior resistência à abrasão, congelamento e descongelamento e ataque de sulfato.

A Universidade de Coimbra em parceria com o Instituto de Investigação e Desenvolvimento em Ciências da Construção (IteCons) também desenvolveu, nos últimos anos, alguns estudos acerca da integração de resíduos em argamassas de cal aérea, hidráulica e cimentícia. (Ferreira, 2011), avaliou o comportamento de resíduos de cerâmica em argamassas de cal aérea, na substituição de agregado (areia) e concluiu que a sua integração melhorou o seu desempenho global, em termos higrotérmicos. (Tomás, 2012), também estudou a integração de resíduos cerâmicos na substituição de partes de agregado em argamassas de cal aérea, concluindo que o teor de resíduos introduzidos melhorou o comportamento mecânico e a permeabilidade ao vapor de água. (Monteiro, 2015), analisou o comportamento da casca de palha de arroz na integração de argamassas cimentícias na obtenção de uma argamassa com requisitos de isolamento térmico, aferindo que a incorporação deste resíduo nas argamassas contribuiu para a melhoria do comportamento térmico das mesmas. (Pereira, 2015), estudou o comportamento de fibras de acácia como aditivo em argamassas cimentícias e de cal hidráulica, concluindo que a integração deste resíduo diminuiu significativamente as propriedades mecânicas, e diminuiu as propriedades higrotérmicas, à exceção da porosidade que aumentou com a percentagem de fibra de acácia introduzida. Mais recentes (Silva, 2017a; Silva, 2017b), avaliaram o comportamento de argamassas cimentícias e de cal hidráulica com integração de casca de ovo como substituinte de agregado, através dos resultados obtido, concluíram que a incorporação deste subproduto melhorou o comportamento higrotérmico das argamassas, este foi indubitavelmente um dos pontos positivos da investigação.

Seguidamente são também apresentados alguns estudos no âmbito da reintrodução de resíduos na constituição de betões.

(Wada, 2010) analisou o comportamento de betões com introdução de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) em substituição parcial de areia natural Após a realização de ensaios concluiu-se que o reaproveitamento de RCV melhorou as características físicas e mecânicas do betão.

(Correia et al, 2011) incorporaram resíduos gerados durante a fabricação de compósitos de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) em misturas de betão. Os testes foram conduzidos para avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido de misturas de betão nas quais entre 0% e 20% de areia foram substituídas por resíduos finos de GFRP. Embora a incorporação de GFRP tenha piorado o desempenho ao nível mecânico e durabilidade, parece viável incorporar baixas proporções e reutilizar resíduos finos de GFRP no betão.

(Tafarel, 2016), avaliou o comportamento do betão com adições de diferentes teores de lodo de estação de tratamento de água (ETA) de modo a diminuir este passivo ambiental gerado pelas

empresas de saneamento. Foram produzidos betões com teores de 5% e 10% de lodo de ETA em substituição de areia. Somente a amostra de 5% de lodo de ETA apresentaram bom comportamento a nível de resistência à compressão axial quando comparado com a amostra de referência, a perda de resistência apresentada foi de 11%. Assim, o betão produzido com 5% de agregado miúdo de lodo de ETA pode ser utilizado com finalidade não estrutural se considerarmos apenas as propriedades mecânicas do material

(Borges et al, 2017), estudaram o comportamento de incorporação de lã de vidro em dois estados distintos. Na primeira fase o resíduo foi moído para ser introduzido na mistura e no segundo processo o resíduo foi introduzido no seu estado natural, sem sofrer nenhum tratamento. Os resultados obtidos permitiram mostrar que a resistência mecânica com incorporação de 2,5% de resíduo no betão provocou redução no parâmetro de resistência mecânica de apenas 1% com 28 dias de cura. Assim a integração deste resíduo parece ser uma boa alternativa para o seu destino final.

(Wong et al, 2018), apresentam um estudo sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos que resultaram de atividades de construção e demolição, sendo um dos principais resíduos o lixo dos tijolos. Assim o estudo passou por avaliar o comportamento da integração de 20% de tijolos em pó na substituição de cimento, para produção de betão. Os resultados de ensaio permitiram concluir que a incorporação deste resíduo em pó permite aumentar a resistência e as propriedades de durabilidade do betão, devido à potencial reatividade pozolânica das partículas de pó de tijolo. No entanto, a integração de tijolos reciclados como agregado não melhora as propriedades do betão, devido à natureza porosa do material. Portanto, o uso de tijolo reciclado como substituto parcial do agregado deve ser limitado a níveis de reposição de baixo volume e quando a consideração ambiental exigir seu uso.

(Saxena et al, 2018), avaliaram o comportamento das garrafas e latas de PET (polietileno tereftalato) que são normalmente descartadas na maioria das vezes após um ciclo de uso único, criando preocupações ambientais e de gestão de resíduos. Estes resíduos foram triturados e usados como agregados (fino e grossos) na produção de betões. De seguida estas amostras foram submetidas à realização de vários ensaios para a determinação da resistência à compressão, resistência a impacto e capacidade de absorção de energia do betão sendo ainda realizada uma avaliação da resistência à compressão residual do betão, sendo as amostras expostas a temperaturas elevadas de 300°C e 600°C. A análise dos resultados dos testes indicou menor resistência à compressão das amostras que contem resíduos de plástico de PET, no entanto mostraram melhor resistência ao impacto do que a amostra de referência.

3 ARGAMASSAS COM INTEGRAÇÃO DE LAMAS DE ETARs

3.1 Introdução

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes: (i) “Caraterização dos constituintes das argamassas” onde são descritos, detalhadamente, os materiais que constituem as argamassas de estudo. (ii) “Lamas de ETAR” onde são apresentadas as problemáticas ambientais que lhe estão associadas; alguns estudos da sua incorporação em argamassas; descrição de processos de tratamento de efluentes utilizados na ETAR do Choupal, em Coimbra; composição das lamas.

3.1.1 Aplicações e funções das argamassas

Existem várias aplicações possíveis para as argamassas, do mesmo modo que são diversas as técnicas para a sua utilização em obra, tendo sempre presente para cada uma delas as suas exigências funcionais. Assim, as suas principais aplicações são: (i) unir os elementos de alvenaria, (ii) revestimento (emboço e reboco), (iii) regularização de pisos e (iv) juntas de revestimento cerâmico (ligação entre elementos).

Estes elementos construtivos encontram-se expostos a diversos agentes agressores externos, nomeadamente, a ações climáticas, mecânicas e ataque químico, desta forma, o reboco torna-se um elemento vulnerável a sofrer degradação e é de extrema importância garantir que as argamassas de revestimento detenham bom desempenho relativamente aos elementos de construção em que são aplicados (Pinto et al,2006; Silva, 2017b). Assim, é evidente que uma argamassa de revestimento deve possuir diferentes propriedades em relação a uma argamassa de assentamento, cujas principais funções são garantir proteção contra intempéries e impermeabilização do suporte.

Seguidamente, são expostos resumidamente alguns dos requisitos para os diferentes tipos de argamassas. Para o estado fresco: adesão, coesão, densidade, plasticidade, consistência, trabalhabilidade e retenção de água. No estado endurecido: aderência, elasticidade/deformabilidade, permeabilidade/capilaridade, abrasão, retração e resistência mecânica.

3.2 Caracterização dos constituintes das argamassas

As argamassas são misturas homogêneas, constituídas por agregados, um ou mais ligantes (de origem orgânica ou inorgânica), e eventualmente podem conter adjuvantes e/ou aditivos, que adicionados à mistura potencializam algumas das suas características quer no estado fresco e/ou endurecido. (Margalha et al, 2005; Garcia, 2011). As propriedades das argamassas só podem ser convenientemente analisadas quando considerada a interação entre este elemento e o material com o qual estarão em contato, uma vez que as argamassas têm comportamentos diferentes quando aplicadas sobre distintos materiais porosos (como por exemplo blocos térmicos ou o betão).

Ao proceder-se à preparação da confeção das argamassas deve misturar-se primeiramente os elementos sólidos e só depois adicionar a água de amassadura (Silva,2017b), este elemento assume um papel fundamental pois ao reagir com o ligante, promove a sua hidratação evidenciando as suas características aglutinantes. Assim, a quantidade de água deve ser a mínima indispensável para hidratar o ligante com o intuito de respeitar os requisitos exigidos às argamassas, (Almeida, 2010). Se a quantidade de água for em excesso poderá promover um aumento de vazios, o que incrementa a retração do ligante como demonstra a Figura 3.1, potenciando a ocorrência de fissuração dos revestimentos, fenómeno que deve ser evitado uma vez que uma das funções de revestimentos de paramentos exteriores é precisamente a impermeabilização do suporte (Silva, 2017b), o mesmo acontece com a introdução de água insuficiente, a mistura final é pouco homogênea e igualmente prejudica a qualidade do revestimento (Silva, 2017a).



Figura 3.1 - Fissuração potenciada pelo fenómeno de retração (retirada
www.mapadaobra.com.br,2016)

As características de resistência e de compacidade são asseguradas com a introdução de agregados na mistura, uma vez que o ligante assegura somente a coesão e a homogeneização

da mistura e promove a sua ligação aos suportes em que é aplicada. É impossível obter-se uma mistura de compacidade perfeita, pelo que na mistura ficará sempre retido ar, razão pela qual se pode afirmar que este elemento é também um dos constituintes das argamassas (Pinto et al., 2006).

A designação de cada argamassa é definida de acordo com o tipo de ligante introduzido, assim as argamassas podem ser divididas em dois tipos, as argamassas de um só ligante, composta somente por um ligante introduzido, tal como as argamassas de cimento e as argamassas bastardas, as que têm na sua constituição mais do que um ligante, como por exemplo o caso do estuque composto por gesso e cal (Pinto, et al.,2006).

Nas secções que se seguem são descritas detalhadamente as características dos elementos que constituem as argamassas.

3.2.1 Agregado

O agregado funciona como esqueleto da argamassa composto pela mistura de partículas compostas por uma extensa gama de tamanhos (Almeida, 2010). Estes elementos podem ser classificados de acordo com a sua dimensão (grossos ou finos/areias), constituição química e mineralógica (siliciosos, calcários ou argilosos) e de acordo com a sua origem; natural – areias e seixos, artificial – britas, pó de pedra, argila expandida, granalha de aço ou reciclada – tijolos moídos ou resíduos provenientes de pedreira (Matias, 2014; Paulo, 2006). No entanto, na produção das argamassas, é comum utilizar-se agregados de granulometria mais fina – as areias, cuja dimensão máxima é 4,75 mm (Faria-Rodrigues, 2004). A incorporação destes elementos na mistura permite diminuir a retração e a quantidade de ligante aplicado, potenciando desta forma a resistência à compressão, porosidade e permeabilidade ao vapor de água. Para além destas propriedades, promovem também o aumento da resistência ao gelo-degelo e aos sais (Agostinho, 2008; Tomas, 2012).

Segundo (Faria-Rodrigues, 2004) os agregados incorporados em argamassas, influenciam o comportamento e as características das argamassas, pelo que neste caso as areias, devem respeitar as condições expostas em (Veiga, 1990).

A norma NP EN 13139:2005 (IPQ, 2005) especifica as propriedades dos agregados envolvidos na aplicação dos diferentes tipos de argamassa, como são exemplo as argamassas de alvenaria e as argamassas de revestimento de paramentos interiores e exteriores, sendo estas últimas o objeto de estudo, de maior interesse para este trabalho. Os requisitos que constam para cada uma delas, e que se apresentam referidos na respetiva norma são: requisitos geométricos

(dimensão e granulometria do agregados, formato das partículas, teor de conchas e finos), requisitos químicos (teor de cloretos e enxofre, fazem ainda referência a compostos que alteram o tempo de presa e resistências da argamassas), requisitos físicos (massa volúmica dos elementos e absorção de água) e requisitos complementares (para agregados artificiais e durabilidade) (Almeida, 2010).

3.2.2 Ligante

O ligante é um material, que na presença de água, forma uma pasta que endurece e ganha presa através de reações de hidratação e carbonatação. Estes fenómenos dependem do tipo de ligante que lhes estão associados, os ligantes hidráulicos e os ligantes aéreos, respetivamente; têm ainda a função de aglutinar materiais sólidos (areias), preenchendo os espaços vazios existente entre estes, oferecendo resistência e coesão à argamassa (Almeida, 2010; Agostinho, 2008).

Os ligantes podem ser classificados de acordo com a sua origem, em orgânica (resinas, gomas vegetais, óleos, ceras), sintética (resinas epoxídicas, polímeros, silicones) e mineral. Os ligantes minerais estão divididos em aéreos e hidráulicos e são estes o grupo de ligantes que constitui maior interesse para este trabalho. Assim, os ligantes hidráulicos (cimento e cal hidráulica) são aqueles que têm a capacidade de ganhar presa, endurecer mesmo em contacto com a água, já os ligantes aéreos (gesso e cal aérea) são elementos que só ganham presa e mantêm as suas propriedades de resistência somente na presença de ar (Agostinho, 2008).

Neste estudo foram utilizados três ligantes, o cimento CEM II/B-L 32,5N, a lama de ETAR seca, (não calcinada) e a lama de ETAR calcinada.

3.2.2.1 Cimento

O cimento de Portland é o ligante mais utilizado na produção de argamassas, tendo como vantagens as seguintes características: alta resistência mecânica, baixa porosidade e fácil trabalhabilidade, apresentando como principais inconvenientes a incompatibilidade de suporte, a baixa permeabilidade ao vapor, etc (o que não permite que seja utilizado em obras de reabilitação) é por isso utilizado em construção novas de edifícios, onde esta última desvantagem não se reflete (Monteiro,2015). Por outro lado, a indústria cimentícia é responsável por gerar grande impacto na extração de recursos naturais e conseqüentemente emissões de CO₂, havendo, portanto, necessidade de encontrar soluções alternativas para minimizar o seu impacto ambiental, que serão alvo de estudo no subcapítulo 3.3.1.

A produção do cimento é realizada através de quatro fases: (i) extração da rocha calcária, que posteriormente passa pelo processo de britagem e secagem até atingir uma humidade residual máxima de 2%; (ii) trituração do calcário até se atingir um pó fino (iii) adição de outras matérias-primas: argilas, alumínio, magnésio e ferros, dando origem a uma mistura homogénea que é igualmente moída e reduzida a pó fino (iv) processo de clínquerização, onde a mistura resultante do processo anterior é introduzida em fornos rotativos até atingir uma temperatura de 1450°C, formando-se o clínquer, que é composto por: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico. Assim, o cimento é constituído essencialmente por clínquer (calcário e em menores quantidades argilas, óxidos de ferros e alumínio) e pode conter adições de gesso (que controla a presa), escórias (aumenta a durabilidade e a resistência) e materiais pozolânicos (conferem maior impermeabilidade ao betão). Estas adições fazem parte integrante de alguns tipos de cimentos, pois permitem conferir determinadas propriedades, de acordo com a aplicação a que se destinam.

O cimento pode classificar-se de acordo com o seu tipo e classe de resistência. Sendo constituído por quatro tipos de cimento (Portland, Portland composto, Alto-Forno e Pozolânico) e três classes de resistência (32,5; 42,5 e 52,5 MPa) (Leal, 2012).

A norma NP EN 197-1:2012 (IPQ, 2012) apresenta os requisitos (mecânicos, físicos, químicos, classes de resistência e durabilidade), especificações técnicas e critérios de conformidade para cada tipo de cimento comercializado.

3.2.3 Água

A água da amassadura é essencial para promover a ligação química entre os agregados e o ligante, funciona como catalisador nas reações químicas de hidratação, processo que ocorre em ligantes hidráulicos (cimento de Portland e cal hidráulica natural), e como catalisador nas reações químicas de carbonatação, para o caso dos ligantes aéreos (Tomas, 2012; Silva, 2017a).

A quantidade de água de amassadura para o fabrico de argamassas deve ser tanto quanto possível isenta de impurezas (nomeadamente sais nocivos que a longo prazo originam patologias no revestimento), límpida e incolor (Almeida, 2010).

3.3 Lamas da ETAR do Choupal

3.3.1 Introdução

Com o crescente aumento de produção de lamas, nos últimos anos, é cada vez mais questionada a sua deposição final, devido às restrições cada vez maiores para a sua descarga e à viabilidade de estabilização e saneamento. Em Portugal a solução para o destino final das lamas deverá passar por valorizar estes resíduos aumentando a sua incorporação em diversos produtos/sectores (Crescimento verde, 2014).

Os possíveis destinos finais que as lamas podem seguir são: (i) valorização agrícola, (ii) valorização energética (incineração) e (iii) deposição em aterro. Na área de intervenção agrícola a aplicação de lamas está condicionada por diversos fatores, nomeadamente as características do solo e lamas, o tipo de solo e a profundidade do nível freático. Assim, para que as lamas possam ser utilizadas em aplicações agrícolas é fundamental que estas cumpram os requisitos que se encontram apresentados no Decreto de lei nº276/2009 que expõe normas para a sua correta utilização. É igualmente fundamental que as lamas e os solos detenham requisitos de qualidade sendo estes apresentados na Diretiva nº86/278/CEE. A finalidade do decreto de lei citado anteriormente está assente na necessidade de regularizar a utilização das lamas, reunindo dois objetivos principais: a fiabilidade no processo de valorização das lamas e a proteção do ambiente. A deposição de lamas em aterros deverá ser feita apenas quando não é possível proceder-se à valorização, ou seja, quando as lamas têm na sua constituição metais pesados ou substâncias tóxicas. As lamas também podem ser incineradas, este processo tem a capacidade de eliminar substâncias patogénicas e perigosas, transformando as lamas em cinzas (Leonardo, 2012). Estas cinzas podem ser incorporadas em alguns produtos, nomeadamente na construção civil.

Na área da indústria cimentícia, a integração de lamas constitui uma alternativa bastante favorável devido à constituição química e elevada finura das lamas (Garcia, 2011). Segundo (Garcés et al, 2008), as cinzas de lama de esgoto exibem moderada atividade pozolânica, que na prática, com a sua integração na matriz cimentícia aumenta os parâmetros de resistência e reduz a porosidade. (Garcés et al, 2008) avaliaram também a presença de sulfatos na composição de cinzas de lama de esgoto, e concluíram que a presença de sulfatos em argamassas compostas por este subproduto não são reativas com o cimento. O desenvolvimento de argamassas cimentícias com a integração destes subprodutos permite a sua reutilização uma vez que na maioria dos casos, pouco valor seria acrescentado, e na prática permitem reduzir à sua deposição em aterros e à incineração.

Alguns estudos foram realizados no âmbito do reaproveitamento de lamas de ETAR, mostrando o potencial deste produto, sob o ponto de vista mecânico, para os parâmetros de resistência mecânica à compressão (Shih.P.Y. et al, 2013). Mais recentemente, o processo de calcinação em lamas de ETAR, também tem sido testado e têm mostrando bons resultados uma vez que é apontado como uma mais-valia na substituição do cimento, diminuindo os custos ambientais relacionados com o custo de produção de cimento, consumos energéticos, esgotamento de recursos naturais e poluição atmosférica, sendo uma alternativa mais sustentável na valorização destes resíduos na indústria cimentícia. A campanha experimental levada a cabo por (Garcia, 2011), consistiu no tratamento térmico de lamas de ETAR às temperaturas de 500, 700, 900 e 950 °C não tendo sido ultrapassado este último valor. Para as lamas calcinadas a 500, 700 e 900°C durante duas horas constatou-se, com o aumento da temperatura, uma diminuição significativa de carbono e de matéria orgânica, mas, no entanto, estes resultados foram pouco expressivos face à amostra inicial e somente a amostra composta por lama de ETAR calcinada a 950 °C durante 5 horas é que apresentou eliminação total de carbono e matéria orgânica (Garcia, 2011). O processo de calcinação foi também analisado em lamas provenientes de pasta de papel, e concluiu-se que as lamas que foram submetidas a este processo térmico à temperatura de 700°C durante duas horas produziram um produto com elevada atividade pozolânica (Garcia et al, 2008). (Manfroi et al, 2010) também avaliou o potencial pozolânico da lama vermelha seca e calcinada, a diferentes temperaturas 600,700, 800 e 900°C, na substituição parcial por cimento. A atividade pozolânica, a resistência á compressão e o coeficiente de absorção de água por capilaridade foram parâmetros avaliados, e foi possível considerar que as argamassas compostas por lama calcinadas a 600°C apresentaram melhores propriedades pozolânicas, e a argamassas com lama calcinada a 900°C foi a que apresentou melhor comportamento a nível mecânico.

No estudo agora realizado foram utilizadas lamas de ETAR, a sua valorização passa pela sua integração em argamassas, funcionando como resíduo em substituição parcial do cimento. Assim, são abordadas duas problemáticas atuais de uma forma sustentável: por um lado é proposto um destino final para a valorização das lamas de ETAR, por outro lado, é diminuída a utilização do cimento e, conseqüentemente, os resíduos e os poluentes relacionados com a produção do mesmo, como referido no subcapítulo 3.2.2.1. Assim, optou-se por utilizar as lamas, quer no estado natural, quer no estado submetido a calcinação. Este processo endotérmico consiste na eliminação de água, CO₂, hidratos e carbonatos, e é usado essencialmente para produção de óxidos. Como foi referido anteriormente a calcinação constitui uma mais-valia segundo as fontes anteriormente citadas, na medida em que este processo não compromete a integração de lamas de ETAR nas propriedades do cimento.

3.3.2 Funcionamento da ETAR do Choupal

As lamas do presente estudo são provenientes da ETAR do Choupal (Figura 3.2), localizada na zona centro litoral, em Coimbra, que capta os afluentes da região norte e uma parte da região sul de Coimbra, e que se encontra em funcionamento desde 1992.



Figura 3.2 – Vista aérea da ETAR do Choupal, Coimbra (retirada www.aguasdocentrolitoral.pt, 2015)

A ETAR compreende três linhas de tratamento: a linha de água, a de lamas e a de gás. Neste contexto propõe-se analisar o tratamento da linha de lamas, esta linha de tratamento depende dos resíduos resultantes da linha de água, sendo estas lamas primárias e secundárias.

O processo de tratamento de linha de água inicia-se através da entrada dos afluentes na estrutura representada na Figura 5.3 (a). As lamas primárias são provenientes da decantação primária (Figura 5.3 (b)) resultantes do encaminhamento gravítico, e apresentam na sua constituição sólidos mais densos, que também são posteriormente depositadas em leitos percoladores (Figura 3.3 (c)) onde são alvo de tratamento biológico, já as lamas secundárias apresentam uma capacidade de sedimentação inferior necessitando de um espessamento distinto (decantação secundária) (Barbosa, 2008; Leonardo, 2012). As lamas resultado do tratamento de linha de água são misturadas num fosso de lamas dando origem a lamas mistas, e o efluente resultante deste processo, é conduzido através de condutas até ao rio Mondego.

De seguida, as lamas que resultaram do tratamento de linha de água são sujeitas ao tratamento da linha de lamas, compreendido em três fases: (i) espessamento, (ii) digestão e (iii) desidratação. Na fase do espessamento as lamas são conduzidas para um espessador (semelhante a um decantador) onde se vai proceder à separação entre as lamas, que são mais pesadas, e a água, sendo que esta fica à superfície do espessador, a digestão anaeróbica (Figura 3.3 (d)) é o processo que se segue onde as lamas entram no digestor onde são aquecidas e

misturadas mantendo-se durante 25 dias, nesta fase dá-se a estabilização das lamas, onde são eliminados organismos patogénicos, seguidamente as lamas que resultaram do processo anterior são desidratadas utilizando uma centrifugadora (Figura 3.3 (e)), sendo mais tarde encaminhadas para valorização agrícola.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.3 – Etapas do funcionamento de uma ETAR do Choupal (a) obra de entrada, (b) decantadores primários, (c) leitos percoladores, (d) digestores anaeróbios (e) centrifuga (retirado Leonardo, 2012)

3.3.2 Composição das lamas residuais

As lamas de ETAR têm, geralmente, na sua composição microrganismos patogénicos (bactérias, vírus, protozoários), nutrientes (azoto, carbono, fosforo, potássio e em pequenas quantidades cálcio, enxofre e magnésio), metais pesados e, essencialmente, matéria orgânica (hidratos de carbono, aminoácidos, proteínas e lípidos em quantidades mais reduzidas). De acordo com a decisão da comissão 2014/955/UE, as lamas são classificadas de acordo com o código 190805 (Lamas do tratamento de águas residuais urbanas) atribuído pela LER.

Quadro 3.1 – Boletim de ensaio lamas da ETAR do Choupal

Ensaio	Resultados	Exp. Resultados
Azoto amoniacal	2,90E+03	mg/L NH4
Azoto nítrico	<2,0	mg/kg N
Azoto total	35	g/kg N
Cálcio	3,10E+04	mg/kg Ca
Escherichia coli	1,00E+06	células/g
Fósforo total	0,7	g/kg P
Magnésio	3,30E+03	mg/kg Mg
Matéria orgânica	73	%
Matéria seca	56	%
pH	7,2	unidades/pH
Potássio	1,70E+03	mg/kg K
Salmonelas	Presente	em 50 g

3.3.4 Alguns estudos desenvolvidos

Foram realizados vários estudos de investigação que se encontram apresentados no Quadro 2.1 que permitem desenvolver soluções mais sustentáveis, para a reintegração de lamas, na produção de argamassa.

Quadro 3.2 – Resumo de alguns trabalhos de investigação no âmbito da valorização e reaproveitamento de lamas na constituição de argamassas

Resíduo	Função do resíduo	Produto final	País	Referências
Lama de Etar (Caldeirão)	Ligante (substituição parcial do cimento)	Argamassas auto-compactável	Portugal (Minho)	Garcia, 2011
Lama de Pedreira (Guimarães)	Agregado (substituição parcial ou total)	Argamassas de cimento	Portugal (Guimarães)	Machado, 2012
Lama granítica de pedreira	Ligante (substituição parcial do cimento)	Argamassas de cimento	Portugal	Ramos et al, 2013
Lama vermelha	Ligante (substituição parcial do cimento)	Argamassa de cimento	Brasil (São Carlos)	Ribeira et al, 2013
Lama vermelha	Ligante (substituição total do cimento)	Argamassa de cimento	Brasil (Florianópolis)	Manfroi, 2010
Lama de vidro residual	Ligante (substituição parcial do cimento)	Argamassa de cimento	USA	Kim et al, 2014
Lama de tinta	Agregado (substituição total)	Argamassa de cimento e cal	Turquia	Avci et al, 2017
Cinzas de lama de papel	Adição	Argamassa de cimento	Reino unido	Ferrándiz-Mas et al, 2014
Lama ETA e RCD	Adição conjunta ou exclusiva de lama de etar e RCD	Argamassas de cimento e cal	Brasil (São Carlos)	Sales et al, 2008
Lodo de água residual	Substituição água	Argamassas de cimento	Reino unido	Hamood et al, 2017

4 DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS

4.1 Introdução

O presente capítulo está estruturado em duas partes: (i) “Materiais e técnicas de preparação” onde é descrita com detalhe a seleção e caracterização da matéria-prima e preparação das argamassas. (ii) “Caraterização das argamassas” onde são descritos os vários procedimentos aplicados para cada ensaio realizado.

Todo o programa experimental foi realizado nas instalações da instituição ITeCons- Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, com o objetivo de caracterizar e estudar o comportamento de argamassas cimentícias - com a incorporação de Lamas de ETAR.

4.2 Materiais e técnicas de preparação

4.2.1 Caraterização dos materiais constituintes

Para a produção das argamassas foi utilizada areia de rio (agregado), lama de ETAR (resíduo), cimento de Portland como ligante e água.

Relativamente à lama utilizada neste trabalho, esta foi cedida pela ETAR do Choupal, localizada na Zona Centro de Portugal, em Coimbra, como mencionado, no subcapítulo 3.3.

Ao longo da campanha experimental as lamas foram aplicadas em dois estados distintos:

1. Lama de ETAR (LE) seca, não calcinada (Figura 4.1 (a));
2. Lama de ETAR calcinada (LEC) (Figura 4.1 (b)).

As lamas no estado bruto apresentam uma coloração cinzenta, com uma consistência semelhante à de um líquido espesso. Como contêm elementos que pela sua composição podem ser prejudiciais ao comportamento das argamassas, realizou-se um processo compreendido em duas fases: (i) secagem das amostras durante 24h, à temperatura de 120°C, de modo a eliminar a quantidade de água que poderia afetar o cálculo de quantidades na mistura. (ii) efetuou-se a moagem manual, para desagregação de grumos, uma vez que nesta fase as lamas apresentam

partículas com dimensões variadas e significativas. Na fase seguinte, parte do material resultante do processo (i) foi submetido à calcinação, numa mufla a 1000°C, até atingir massa constante, obteve-se uma perda de 39,4% da sua massa inicial.



(a)



(b)

Figura 4.1 - Fases de aplicação da Lama de ETAR (a) Lama de ETAR seca, não calcinadas
(b) Lamas de ETAR calcinada

Como ligante utilizado foi o cimento de Portland do tipo CEM II/B-L 32,5. As baridades do cimento e da areia, utilizados na preparação das argamassas, foram determinadas em (Monteiro, 2015; Martins, T. 2015). No Quadro 4.1 são apresentados os valores das baridades destes constituintes.

Quadro 4.1 – Baridade dos constituintes

Constituinte	Baridade (g/cm ³)
Cimento de Portland CEM II/B-L 32,5 N	1,0798
Areia de rio	1,4250

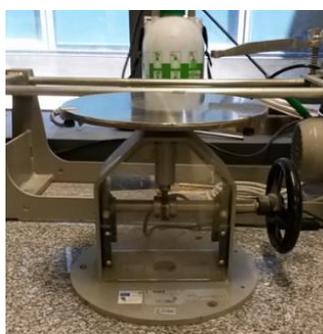
4.2.2 Equipamentos utilizados

A Figura 4.2 mostra os equipamentos e utensílios usados para a preparação das amassaduras. Na preparação da mistura, foi utilizado um balde, para a pesagem dos agregados utilizou-se uma balança digital com rigor ao centígrama e ao milígrama. Os moldes dos provetes são de natureza metálica e plástica, com características prismáticas ou circulares, de acordo com o tipo de ensaio pretendido. Para além destes equipamentos, foi necessário o uso de outros utensílios de igual importância, tais como:

- colher de pedreiro
- régua
- berbequim com vareta helicoidal
- mesa de medição do espalhamento
- balde
- tabuleiros
- moldes prismáticos e circulares
- ferramentas para o desmolde.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.2 - Equipamentos utilizado no procedimento laboratorial (a) balança digital (b) mesa de espalhamento (c) tanque com suporte de rede metálica (d) aquecedor parafina e utensílios (e) molde prismáticos

4.2.3 Preparação das argamassas

Neste subcapítulo, dedicado à preparação das argamassas, é descrita a metodologia utilizada para incorporar as lamas de ETAR nas misturas. Foram preparadas 5 argamassas, 3 delas incorporando lama de ETAR seca (sem calcinação) e as outras 2 incorporando lama de ETAR calcinada, como se explica de seguida. Todas as misturas realizadas apresentam um traço volumétrico 1:3 (cimento:areia) e uma razão inicial de água/cimento de 0,5. Nas três primeiras misturas efetuou-se uma substituição parcial de cimento, em massa, por 5% , 10% e 15% de lama de ETAR seca (sem calcinação), e nas restantes substituiu-se o cimento por 5% e 10% de lama de ETAR calcinada (Figura 4.3) Utilizou-se como argamassa de referência uma argamassa já caracterizada anteriormente (Silva, 2017a), que apresenta as mesmas características de traço e componentes das formulações de argamassas produzidas.

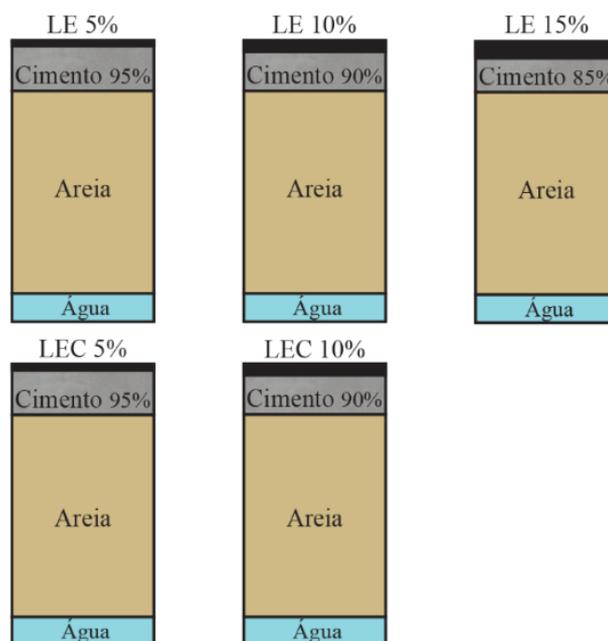


Figura 4.3 – Representação esquemáticas das formulações produzidas (adaptado Veiga et al,2012)

A tabela 4.2 apresenta a composição das argamassas analisadas. A descrição adotada para cada argamassa segue uma notação utilizada para facilitar a leitura e a identificação das misturas: primeiro surge o tipo de ligante (CI), seguido da percentagem (5, 10 ou 15%) e descrição do resíduo incorporado (LE – lamas de ETAR, LEC – lamas de ETAR calcinadas), em substituição parcial do cimento, (por exemplo: _5LE ou _5LEC).

Quadro 4.2 – Caracterização das argamassas produzidas

Designação	Composição	Traço volumétrico	Relação água/ligante
CI_R	(Cimento:Areia)	1:3	0,7
CI_5LE	(Cimento:Areia:Lama ETAR seca)	0,95:3:0,05	0,6
CI_10LE	(Cimento:Areia:Lama ETAR seca)	0,9:3:0,10	0,6
CI_15LE	(Cimento:Areia:Lama ETAR seca)	0,85:3:0,15	0,5
CI_5LEC	(Cimento:Areia:Lama ETAR calcinada)	0,95:3:0,05	0,7
CI_10LEC	(Cimento:Areia:Lama ETAR calcinada)	0,9:3:0,10	0,6

Após a pesagem de todos os constituintes numa balança digital deu-se início a um processo compreendido por três fases: (i) colocou-se num recipiente metade da água da amassadura para dissolver as lamas, este processo torna mais fácil a dissociação de partículas, (ii) com o auxílio do berbequim com vareta helicoidal, juntou-se os restantes constituintes secos, (iii) acrescentou-se a restante água até a argamassa apresentar um aspeto homogéneo. Dado que a relação inicial de 0,5 água/ligante não se mostrou suficiente para obter uma mistura com trabalhabilidade adequada, foi-se acrescentando água até se atingir um espalhamento adequado, parâmetro determinado através do ensaio de espalhamento, exposto no subcapítulo 4.3.1.1.

4.3 Caracterização das argamassas

4.3.1 Estado fresco

4.3.1.1 Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento vai de encontro ao exposto na norma EN 1015-3:1999 (CEN, 1999), que pretende avaliar as características das argamassas no seu estado fresco, de forma que se as quantidades dos constituintes forem rigorosas é possível reproduzir as mesmas sempre que necessário (Silva, 2017b). De acordo com a norma anteriormente referida a “*consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez e/ou grau de molhagem das argamassas frescas e fornece uma indicação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão*” (CEN:1999).

Para este ensaio recorreremos à mesa de espalhamento, constituída por um molde tronco cónico, tendo sido estes utensílios humedecidos antes do início do ensaio. Colocou-se o molde tronco cónico normalizado (Figura 4.3 (a)) no centro do disco da mesa de espalhamento, o molde foi

preenchido até metade da sua capacidade com argamassa e foram aplicadas 10 pancadas com a ajuda de um pilão normalizado. Após este procedimento, preencheu-se a restante metade do molde até ultrapassar a sua capacidade (Figura 4.3 (b)) e repetiu-se o processo anterior, isto permite assegurar uma eficaz compactação do material. Recorrendo-se a uma rasoira metálica retirou-se o excesso de argamassa superficial no topo do cone. De seguida, foi retirado o molde metálico, e posteriormente rodou-se a manivela da mesa 15 vezes consecutivas (corresponde a uma pancada por minuto durante quinze minutos), com a ajuda do paquímetro digital mediu-se o diâmetro do material espalhado (Figura 4.3 (d)) em duas direções perpendiculares, registaram-se os valores e determinou-se o espalhamento que é obtido a partir da média aritmética das medições efetuadas.

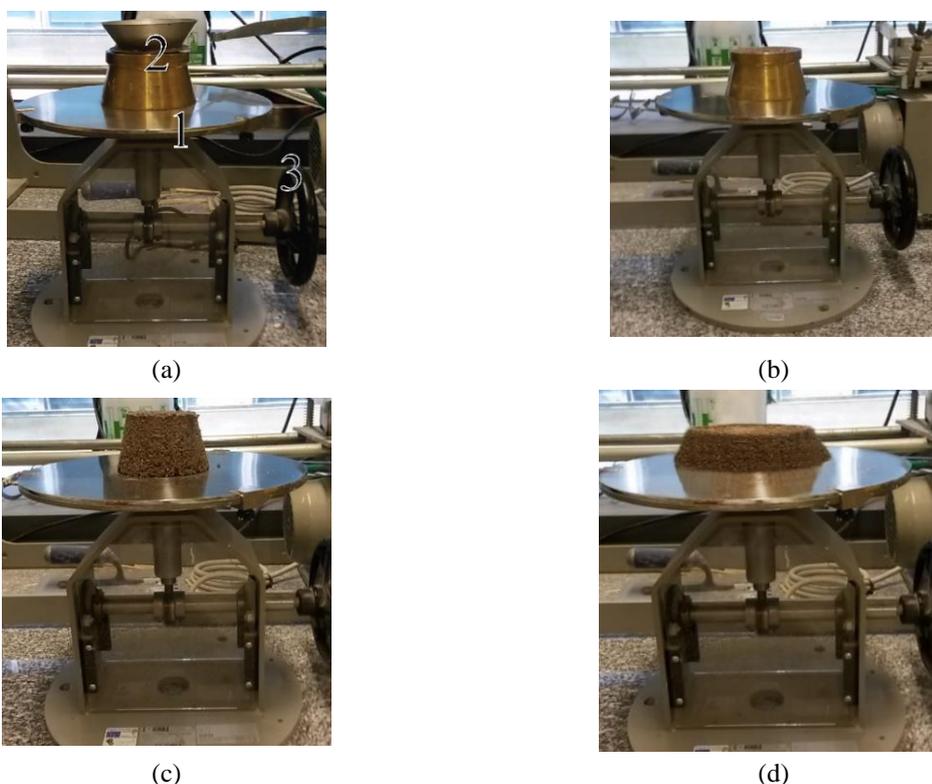


Figura 4.4 - Ensaio de Consistência por Espalhamento (a) Utensílios do ensaio: 1- mesa de espalhamento, 2- molde tronco-cónico e 3- manivela (b) preenchimento do cone com argamassa (c) remoção do cone (d) espalhamento da argamassa

4.3.2 Moldagem, desmoldagem e condições de cura

Para a fase experimental que se seguiu, foram efetuados os seguintes provetes:

- 15 provetes prismáticos, três para cada formulação de argamassa, com dimensão de 160×40×40 mm, executados em moldes metálicos triplos. No início colocou-se óleo desmoldante nos moldes, e retirou-se o excesso com papel absorvente. Os moldes foram inicialmente preenchidos até meia altura, compactados, e repetiu-se este processo para a restante totalidade.
- 15 provetes circulares, três para cada formulação de argamassa, com cerca de 106 mm de diâmetro e 15 mm de altura. Inicialmente, procedeu-se à colagem dos moldes com silicone, numa superfície lisa de madeira, forrada com película aderente. Foi aplicado óleo desmoldante e retirou-se o excesso com papel absorvente. De seguida, encheram-se os moldes na sua totalidade com argamassa, tendo-se procedido à sua compactação com a ajuda de um pilão de pequenas dimensões. Por fim nivelou-se a superfície, retirando-se o excesso de argamassa usando uma régua metálica

Após o 28º dia de cura de cada argamassa, em condições de temperatura e humidade relativa controladas, estas foram submetidas aos ensaios de caracterização. Até ao 7º dias provetes foram mantidos e acondicionados, dentro de sacos de plástico convenientemente fechados, à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de 95 ± 5 %. Após este período e até à data de realização dos ensaios, os provetes foram retirados dos sacos e colocados em condições de temperatura de 20 ± 2 °C e de humidade relativa de 65 ± 5 %.

4.3.3 Estado endurecido

Nesta fase são descritos os ensaios que caracterizam mecanicamente as argamassas no estado endurecido (Figura 4.5), para tal realizaram-se os ensaios de resistência à flexão, à compressão e módulo de elasticidade, de modo a avaliar as propriedades mecânicas das argamassas.

Também para caraterizar física e higrotérmicamente as argamassas, foram realizados os ensaios de determinação da massa volúmica, absorção da água por capilaridade, secagem e permeabilidade ao vapor de água.



Figura 4.5 - Provetes no estado endurecido (a) provetes prismáticos (b) provetes circulares

4.3.3.1 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Este ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 14146:2006 (IPQ,2006), para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para pedra natural. Neste ensaio foram utilizados os provetes prismáticos de dimensões 40×40×160 mm. O módulo de elasticidade permite avaliar a deformabilidade existente em argamassas de revestimento, quando estas são submetidas a ações causadas por alterações térmicas, e por ações provocadas por cargas excessivas (Pereira, 2005). Assim, o seu estudo contribui para diminuir a ocorrência de fissuras, um fenómeno patológico muito comum em fachadas de edifícios, esta anomalia aparece através do “efeito de tensões que ocorrem em revestimentos que não possuem elasticidade necessária” (Bastos et al, 2010).

O ensaio foi realizado a partir de um sistema analisador Pulse TM, onde foram registados os resultados para cada formulação de argamassa, utilizaram-se dois transdutores (acelerómetro) um recetor e outro emissor, e um martelo de impacto.

Para garantir uma boa adesão entre as extremidades do provete e o transdutor, utilizou-se massa consistente, e para limitar ao máximo as vibrações exteriores que se pudessem fazer sentir entre o provete e a superfície onde se encontrava apoiado, utilizou-se uma peça metálica de secção quadrada onde se apoiou o provete (Figura 4.6 (b)).

Os valores obtidos para a ressonância foram registados pelo sistema analisador Pulse TM, sendo que para cada provete foram realizadas três medições. O valor final para a ressonância fundamental é a média aritmética das três medições realizadas.

Uma vez obtido o valor da ressonância fundamental longitudinal, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{dL}), em MPa, através da expressão,

$$E_{dL}=4 \times 10^{-6} \times l^2 \times \rho \times T \text{ [MPa]} \quad (1)$$

onde E_{dL} é o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, l é o comprimento do provete em mm, F_L é a frequência de ressonância fundamental expressa em Hz, ρ é a massa volúmica aparente do provete em g/mm^3 e T é o fator de correção e pode ser descrito por

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

dependendo do comprimento do provete (l), do coeficiente de Poisson (ν) e do raio de giração da secção do provete (i) que é calculado da seguinte forma,

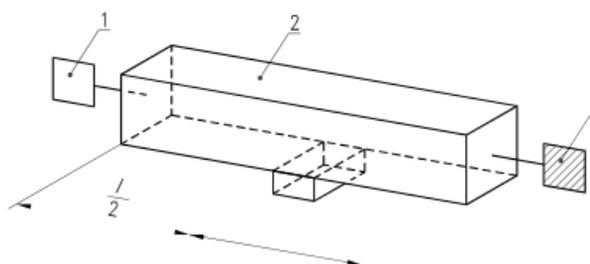
$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

raiz quadrada da razão da inércia (I) do provete pela área da secção transversal do mesmo (A). Já a área (A) pode ser calculada utilizando a expressão da densidade em que a massa referida é a do provete seco (m_d):

$$\rho = \frac{m_d}{l \times A} \quad (4)$$



(a)



(b)

Figura 4.6 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico (a) montagem do provete prismático (b) esquema representativo de ensaio retirado da norma NP EN 14146:2006, onde 1- emissor, 2- provete prismático e 3- recetor

4.3.3.2 Resistência mecânica á tração por flexão

Este ensaio realizou-se de acordo com o descrito na norma EN 1015-11: 1999 (CEN, 1999), e foram utilizados os provetes prismáticos, com dimensões $40 \times 40 \times 160$ mm, os mesmos que foram utilizados para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico descrito

no subcapítulo 4.3.3.1, uma vez que este ensaio é não destrutivo e, por isso, os provetes não sofreram qualquer alteração.

O ensaio de resistência mecânica à tração por flexão utiliza um provete prismático, simplesmente apoiado em dois pontos e num terceiro ponto, a meio do vão, é aplicada uma carga vertical gradualmente crescente e de modo constante, transmitida através de um rolete instalado na face superior do provete, como podemos observar no esquema de montagem da Figura 4.7 (a), o ensaio fica concluído quando o provete entra em rotura (Figura 4.7 (b)) e tem como objetivo determinar a carga máxima que o material suporta.



Figura 4.7 - Ensaio de resistência mecânica á tração por flexão (a) provete prismático (40×40×160 mm) no estado inicial (b) provete prismático (40×40×160 mm) submetido a rotura

A figura que segue, retirada da própria norma, permite exemplificar o ensaio de forma mais pormenorizada.

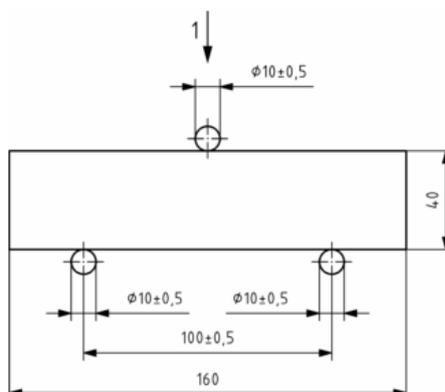


Figura 4.8 - Esquema representativo da disposição dos roletes nas faces de um provete prismático (imagem retirada da norma EN 1015-11:2006)

A resistência mecânica à tração por flexão do provete é obtida utilizando a seguinte expressão:

$$R_F = 1,5 \times \frac{F \times l_r}{b \times d^2} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

onde R_F é a resistência à tração por flexão, F é a carga máxima aplicada em N, l_r é a distância entre os roletes de apoio (considerada 100 mm), b e d correspondem à espessura e largura do provete, em mm.

4.3.3.3 Resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência mecânica à compressão, que tem como objetivo determinar a resistência da argamassa à compressão foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11: 1999 (CEN, 1999), também utilizada no procedimento de ensaio anterior. Do ensaio de resistência à tração por Flexão, resultaram duas metades, uma parte foi utilizada para este ensaio e a outra foi utilizada para o ensaio de absorção por capilaridade, sendo as suas dimensões de aproximadamente 40×40×80 mm.

Inicia-se o ensaio (Figura 4.9 (a)), colocando o provete entre o prato de apoio da prensa, e o prato superior. Através de um atuador uma carga gradualmente crescente e constante, é transmitida ao provete, até se observar a sua rotura (Figura 4.9 (b)).

A resistência mecânica à compressão (R_C) é calculada através da razão entre a força máxima (F) e a área da secção longitudinal do provete (A_C) (considerada 1600 mm):

$$R_C = \frac{F}{A_c} [\text{MPa}] \quad (6)$$

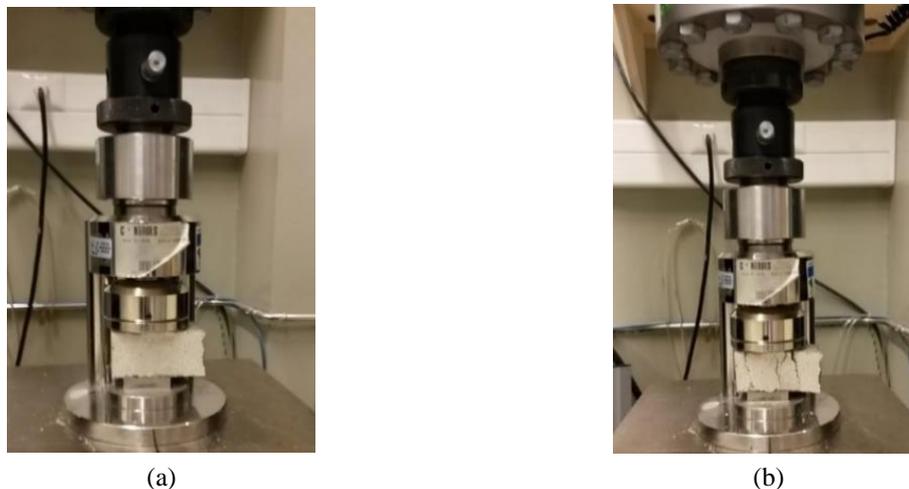


Figura 4.9 – Ensaio de resistência á compressão (a) provete prismático (40×40×80 mm) no estado inicial (b) provete prismático (40×40×80 mm) após a aplicação de uma força de compressão

4.3.3.4 Massa volúmica aparente seca

A massa volúmica aparente seca representa a relação entre a massa seca de um provete e o volume que este ocupa. O parâmetro foi determinado de acordo com o exposto na norma EN 1015-10:1999 (CEN, 1999), e para o efeito foram utilizados os provetes prismáticos, de dimensão 40×40×160 mm.

4.3.3.5 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-18:2002 (CEN, 2002), habitualmente utilizada para determinar a absorção da água por capilaridade em argamassas cimentícias, como é o caso das argamassas em estudo. Foi ainda utilizada, a norma EN 15801: 2009 (CEN,2009) onde estão indicados os intervalos de tempo utilizados para a determinação da massa dos provetes ensaiados, e a respetiva equação para o seu cálculo. Para a preparação do ensaio foram utilizados as metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência mecânica à flexão.

Inicialmente colocaram-se os provetes numa estufa ventilada, à temperatura de $60^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24h, até atingir massa constante, isto é, até se verificar entre duas pesagens consecutivas a variação em massa inferior a 0,1%. De seguida, deu-se início a um processo compreendido por quatro fases:

- (i) retirar os provetes da estufa;
- (ii) colocar os provetes num tabuleiro metálico até arrefecerem, de modo a não afetarem as condições iniciais do ensaio;
- (iii) revestir, lateralmente os provetes, com película aderente (Figura 4.10 (a)), de forma a se garantir o movimento unidirecional da água.
- (iv) pesar todos os provetes e registar os valores, que correspondem à massa dos provetes no instante inicial (m_0).

Posteriormente, colocou-se água num recipiente (ver Figura 4.10 (b)), composto por uma rede metálica (ver Figura 4.10 (c)), que apoia os provetes de forma a permitir que toda a sua base de suporte esteja em contacto com a água. O nível da água, que se manteve constante durante todo o ensaio, foi tal que a base dos provetes estivesse imersa entre os 5 e 10 mm.

A norma EN 1015-18:2002 (CEN,2002) refere que a base de apoio em contacto com água deveria ser a que sofreu rotura, mas neste caso optou-se por colocar a base regular em contacto com água pois as irregularidades que se verificavam na face que sofreu rotura dificultaram o apoio. Foram efetuadas pesagens para todos os provetes, em intervalos de tempo compreendidos entre: 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos, após imersão dos provetes na água, registaram-se os valores obtidos para todos os provetes, e após estas contagens, realizaram-se nos dias seguintes pesagens de 24 em 24h até se atingir massa constante. O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi determinado a partir da norma EN 1015-18: 2002 (CEN,2002), a expressão apresentada na referida norma, permite relacionar o tempo com a quantidade de água absorvida entre o intervalo de 10 a 90min, sendo esta expressão frequentemente utilizada para argamassas cimentícias, uma vez que para este tipo de argamassas a absorção de água inicial não é tão significativa.

No decurso de todo o ensaio cumpriram-se algumas recomendações, tais como: (i) entre pesagens consecutivas, ao retirar os provetes um a um teve-se o cuidado de não salpicar de água os restantes provetes que se encontravam na vizinhança; (ii) fechar sempre o recipiente entre pesagens para não haver influência das condições ambientais exteriores que influenciam a evaporação da água no interior do recipiente, e (iii) foi verificado o nível inicial de água, para que o seu valor seja constante ao longo de todo o ensaio.

O cálculo para a determinação da quantidade de água absorvida (M_i) por unidade de superfície é obtida pela equação:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (7)$$

onde m_i é a massa do provete no instante de tempo i em minutos, m_0 refere-se à massa do provete no instante inicial e A é a área da secção do provete em contacto com a água. O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C) é definido por:

$$C = 0,1 \times (M_{90} - M_{10}) \quad (8)$$

onde M_{90} e M_{10} são consideradas as massas dos provetes nos instantes.

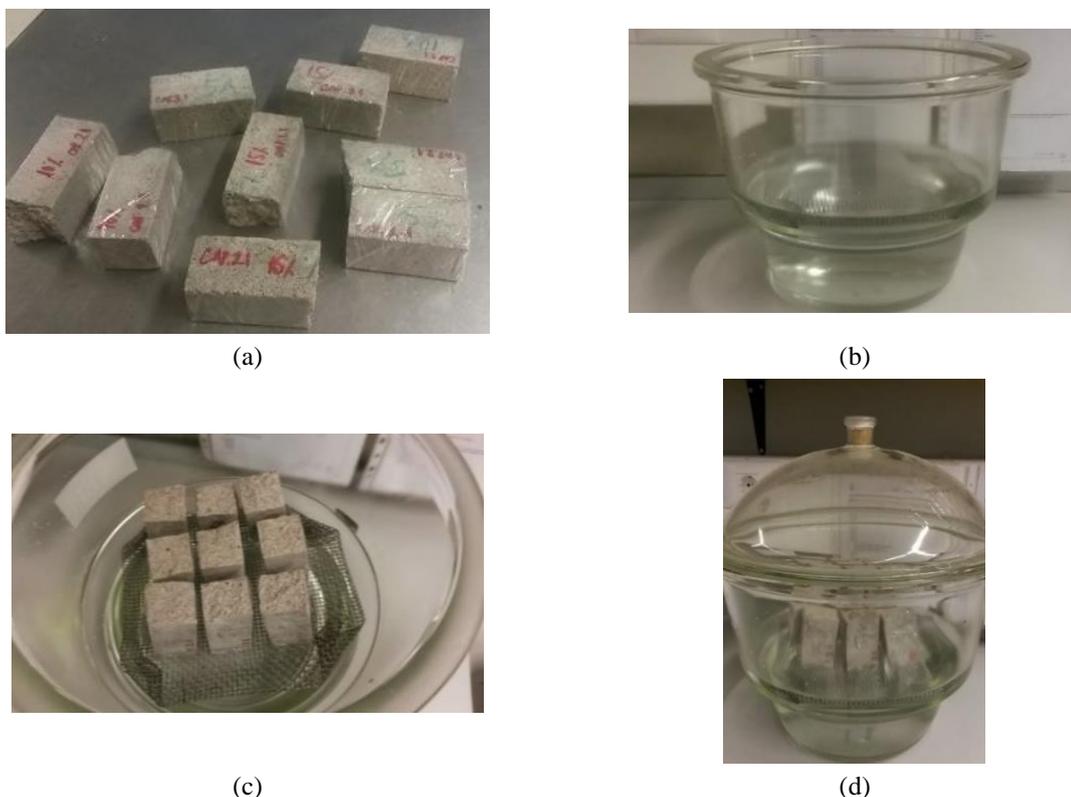


Figura 4.10 - Ensaio de absorção por capilaridade (a) provetes envolvidos em película aderente (b) tanque com nível de água entre os 5-10 mm (c) provetes prismáticos colocados no tanque apoiados no suporte de rede metálico (d) colocação de uma tampa no tanque de vidro

4.3.3.6. Secagem

O ensaio para determinação do índice de secagem segue as recomendações que constam no RILEM nº II.5 (RILEM, 1980), e estabeleceu-se que a secagem seria iniciada logo após a conclusão do ensaio de absorção por capilaridade, visto que os provetes estavam saturados. Foram utilizados os mesmos provetes obtidos a partir do ensaio mencionado anteriormente, no estado saturado. Pretende-se obter a máxima quantidade de água existente nos poros, assim o ensaio de secagem permite avaliar a capacidade de uma argamassa eliminar a água existente no interior (Páscoa, 2012). Para que o ensaio ocorresse mais rapidamente, optou-se por retirar a película aderente que envolvia lateralmente os provetes, e de seguida efetuaram-se as pesagens numa balança com rigor ao miligrama.

Após este procedimento, os provetes foram colocados numa câmara climática à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$, realizaram-se pesagens de hora a hora até se perfazerem 6h desde o início do ensaio, e registaram-se os seus valores. Posteriormente, foram realizadas pesagens de 24 em 24h até atingir massa constante, ou seja, o ensaio fica concluído quando a variação de massa entre pesagens consecutivas é inferior a 1%. No caso das argamassas secas (LE) a última pesagem verificou-se às 48h, já nas argamassas que sofreram calcinação (LEC) o valor da última pesagem foi registado às 144h, após o instante inicial.

A partir dos valores obtidos anteriormente foi possível determinar o índice de secagem para cada argamassa, através da sua análise concluiu-se que quanto menor for o índice de secagem maior será a capacidade de secagem dos provetes. O índice de secagem (IS) é definido por

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{n=i} (t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_i + W_{i-1}}{2}}{t_f \times W_{\max}} \quad (8)$$

em que t_i é o tempo decorrido entre o início do ensaio e o instante de tempo i , em minutos, t_{i-1} refere-se ao instante anterior ao considerado, t_f é o tempo total do ensaio, em minutos, W_i é o teor de humidade no instante i , em %, W_{\max} é o teor de humidade total no final do ensaio. O teor de humidade é determinado pela diferença entre a massa da amostra no instante i (m_i) e a massa do provete seco (m_d):

$$W_i = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100 \quad (9)$$

4.3.3.7. Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma de ensaios ISO 12572:2001 (ISO, 2001), os provetes utilizados neste ensaio foram os provetes cilíndricos de diâmetro 106 mm e altura de 15 mm. O ensaio de permeabilidade ao vapor de água permite quantificar o fluxo de vapor de água que se difunde através de uma argamassa, quando se estabelece uma variação de pressões entre as duas faces (Páscoa, 2012).

Para a realização deste ensaio, foram utilizados três provetes para cada formulação de argamassa. Começou-se por aplicar nas laterais dos provetes duas camadas de material impermeabilizante (Figura 4.11 (b)), após a sua secagem, colocou-se fita adesiva de papel por cima da camada de material impermeabilizante. Depois desta fase inicial, foram preparadas as tinas para colocar o provete, para tal encheram-se as tinas de água, com nível de água de (aproximadamente) 15 mm em relação à base da tina.

O ensaio realizou-se após a colocação dos provetes em cima das tinas de vidro (Figura 4.11 (c)), sendo o conjunto tina-provete acoplado através de fita adesiva de papel e parafina (Figura 4.11 (d)), esta última foi aplicada para garantir boa selagem entre os materiais, assegurando que o fluxo de água ocorresse através da superfície unidireccionalmente.

De seguida, realizaram-se as pesagens dos provetes numa balança com rigor à miligrama e estes foram colocados numa câmara climática com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50\pm 5\%$. Assim, foram criados dois ambientes diferentes, causados pela diferença de pressões parciais, que ocorre do interior da tina-provete, com humidade relativa de 100%, para o ambiente no interior da camara climática, o que corresponde a humidade relativa de 50%, permitindo assim calcular o vapor de água dissipado através das argamassas.

Foram realizadas pesagens de 24 em 24h, até atingir um fluxo de vapor de água constante. Segundo a norma, o ensaio fica concluído quando a taxa de variação de fluxo de vapor de água entre 5 pesagens consecutivas for inferior a 5%. Com os dados obtidos através deste ensaio podemos calcular a variação de massa (G_i), do conjunto tina-provete definido por:

$$G_i = \frac{m_i - m_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \text{ [kg/s]}, \quad (10)$$

em que m_i é a massa no instante i e m_{i-1} é a massa no instante anterior ao considerado em kg, t_i refere-se ao tempo no instante i e t_{i-1} ao instante anterior ao considerado, em segundos. Ainda neste contexto foram determinados os seguintes parâmetros; a densidade do fluxo de difusão de vapor de água (g), e a permeância ao vapor de água (W), obtidos através das expressões:

$$g = \frac{G}{A} \text{ [kg.m}^2\text{/s]} \quad (11)$$

$$W = \frac{g}{A \times \Delta p_v} \text{ [kg/m}^2\text{.s.Pa]} \quad (12)$$

em que G é a variação de massa por unidade tempo, A é a área de exposição do provetes e Δp_v é a diferença de pressões de vapor de água interior e exterior. O cálculo para a pressão de vapor de saturada, (p_{sat}) é determinado por:

$$p_{sat} = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{237,3 + \theta}} \text{ [Pa]}, \quad (13)$$

em que θ é a temperatura do ensaio em °C. Para a determinação da diferença de pressões de vapor de água do interior e exterior da tina, (Δp_v) é obtido por:

$$\Delta p_v = p_{sat} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100\%} \text{ [Pa]}, \quad (14)$$

em que $\phi_1 - \phi_2$ é a diferença entre as humidades relativas no interior da tina de ensaio (%)

Uma vez que o ensaio ocorre a uma temperatura de 20 °C, recorrendo à equação 13, determinou-se o valor da p_{sat} que é igual a 2337 Pa. Sendo que a humidade relativa no interior e exterior da tina é de 100% e 50% respetivamente, através da equação 14, obtêm-se o valor para Δp_v de 1168 Pa.

A permeabilidade ao vapor de água, (δ) é definida por:

$$\delta = W \times d \text{ [(kg/m.s.Pa)],} \quad 14$$

em que d é a espessura do provete. Para concluir determinou-se a resistência á difusão de vapor de água (μ) e a espessura da camada de ar equivalente (s_d), obtidas através das expressões:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad 15$$

$$s_d = \mu \times d \text{ [m],} \quad 16$$

em que δ_a é o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, μ é o fator de resistência ao vapor de água.

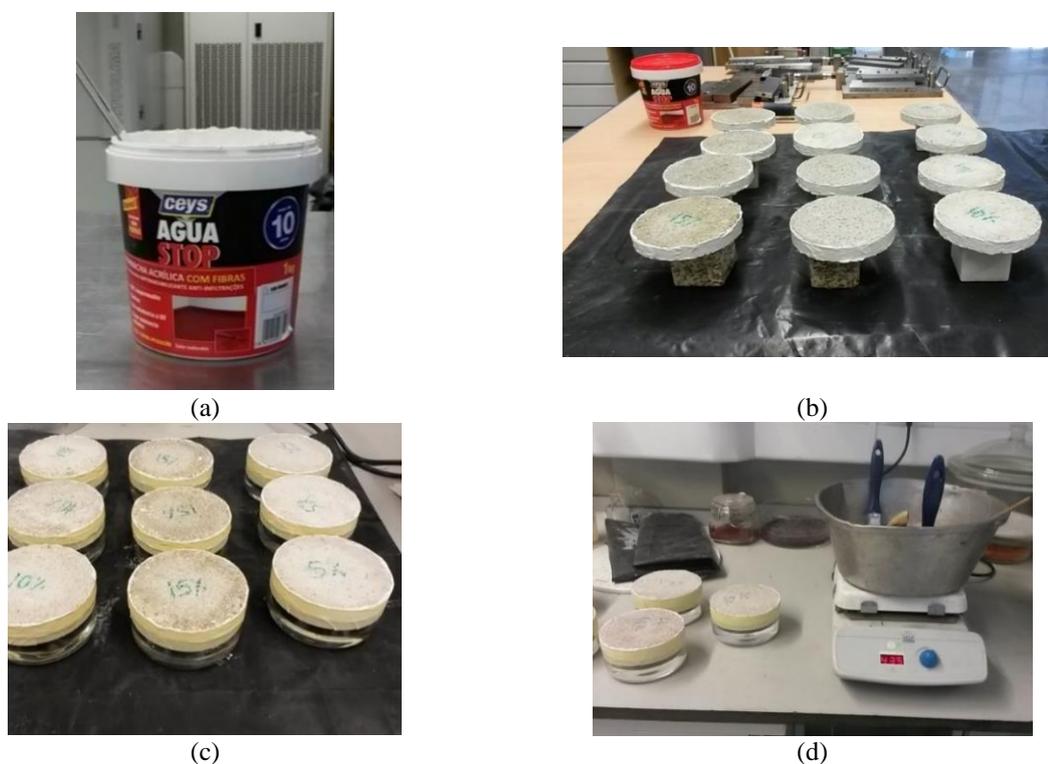


Figura 4.11 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água (a) tinta impermeabilizante marca Ceys (b) aplicação da tinta impermeabilizante (c) colocação dos provetes circulares apoiado em tinas de vidro (d) colocação de parafina em volta do conjunto provete – tina

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Este capítulo encontra-se dividido em quatro partes: (i) “Análise das argamassas no estado fresco” onde se apresenta os resultados obtidos para o ensaio de consistência por espalhamento, após o processo de amassadura. (ii) “Análise das argamassas no estado endurecido “onde se expõe os resultados obtidos na campanha experimental, para todas as formulações de argamassas, passados 28 dias de cura. (iii) “Considerações finais” destinado à apresentação e justificação detalhada de resultados. (iv) “Classificação normativa” onde se analisam as formulações de argamassas produzidas, segundo os requisitos estabelecidos pela norma EN 998-1:2010 (CEN, 2010).

5.2 Análise das argamassas no estado fresco

5.2.1 Consistência por espalhamento

Como já foi referido no subcapítulo 4.3.1.1, o ensaio de espalhamento é fundamental para avaliar a trabalhabilidade de argamassas. Assim, o Quadro 5.1, apresenta os valores do espalhamento obtido para cada argamassa e respetivas relações de água/ ligante e água/finos.

Quadro 5.1 - Espalhamento, relação água/ligante, relação água/ finos das argamassas em LE e LEC (adaptado de Silva, 2017b)

Designação	Espalhamento [mm]	Relação	
		água /ligante	água /finos
CI_R	161,00	0,7	0,2
CI_5LE	148,91	0,6	0,1
CI_10LE	161,69	0,6	0,1
CI_15LE	153,48	0,5	0,1
CI_5LEC	153,38	0,7	0,2
CI_10LEC	154,00	0,6	0,1

Analisando o Quadro 5.1, verifica-se que os valores obtidos para o ensaio de espalhamento encontram-se dentro dos valores recomendados, compreendidos entre 140 e 160 ± 10 mm, para definir boas condições de trabalhabilidade.

Podemos ainda verificar que a relação água/ligante diminuiu com o aumento da percentagem de lamas de ETAR introduzida, para as argamassas LE e LEC, isto significa que a quantidade de água necessária diminui para se obter boas condições de trabalhabilidade, o mesmo é constatável para a relação água/finos.

5.3 Análise das argamassas no estado endurecido

5.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 5.1 apresenta os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, correspondente à média aritmética dos valores admitidos para cada um dos provetes ensaiados, e o desvio padrão.

Através da observação do gráfico, verificamos que as argamassas LE apresentam decréscimo do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, o contrário é observável para as argamassas LEC, em que, quando maior é a percentagem de resíduo introduzido, maior é o módulo de elasticidade dinâmico. Note-se que os valores obtidos para todas as argamassas são superiores quando comparados com o valor obtido para a argamassa de referência, à exceção da argamassa CI_15LE onde há uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico.

De acordo com os dados expostos, a argamassa CI_10LEC, apresenta um valor de módulo de elasticidade 62% superior ao valor de referência, para a incorporação de 5% os valores obtidos são muito análogos para as argamassas LE e as LEC, aumentam o módulo de elasticidade dinâmico 31% e 33%, respetivamente, em relação à argamassa referência.

Assim, é possível concluir que a introdução de lamas de ETAR não calcinadas nas argamassas é uma alternativa vantajosa, uma vez que minimiza a ocorrência de fenómenos de fendilhação, para a introdução de lamas de ETAR, calcinadas observa-se o oposto a este fenómeno.

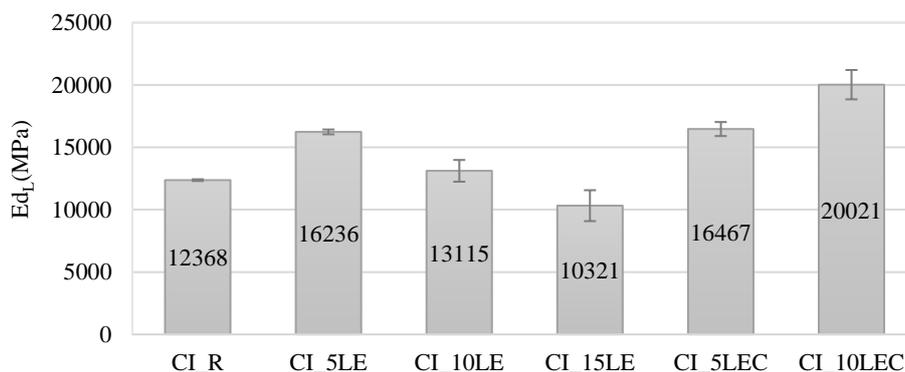


Figura 5.1 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas LE e LEC

5.3.2 Resistência mecânica à tração por flexão

Na Figura 5.2, encontram-se dispostos os valores obtidos para a resistência mecânica à tração por flexão, que correspondem à média aritmética para os provetes ensaiados, e o desvio padrão. De acordo, com a Figura 5.2, observa-se que a incorporação de lama de ETAR, seca (sem calcinação) provocou diminuição da resistência à flexão, com o aumento da percentagem de resíduos, o mesmo não aconteceu para o grupo das argamassas LEC.

Os valores obtidos para todas as argamassas, são superiores à argamassa de referência, à exceção da argamassa CI_5LE, onde o valor é 2,05 MPa, sendo que as argamassas LE tiveram piores resultados com o aumento da percentagem de resíduo introduzido, mas quando comparados com os valores obtidos para a incorporação de apenas 5% observou-se um valor muito superior à argamassa de referência. A argamassa CI_15LE corresponde ao valor mínimo obtido para o parâmetro de resistência à tração por flexão, para a argamassa CI_10LEC, o valor registado aumentou 43% em relação à argamassa de referência.

Pode concluir-se que a incorporação de lama de ETAR nas argamassas é vantajosa uma vez que melhora as características de resistência à tração por Flexão.

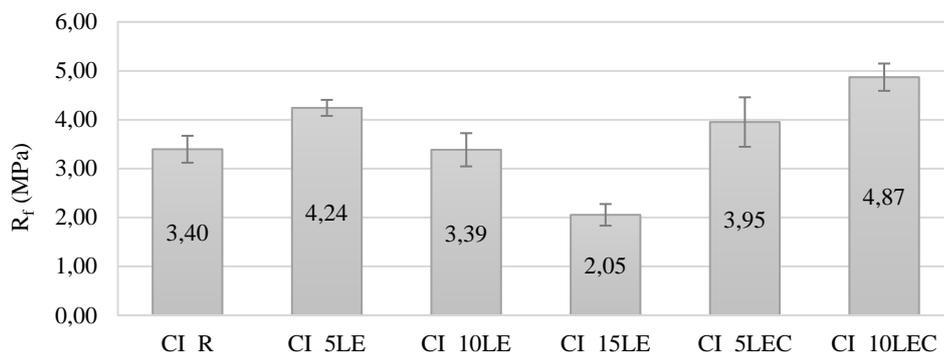


Figura 5.2 – Resistência mecânica à tração por flexão para as argamassas LE e LEC

5.3.3 Resistência mecânica à compressão

Na Figura 5.3 encontram-se apresentados os resultados obtidos para o ensaio de resistência mecânica à compressão, e o desvio padrão.

Na Figura 5.3, nota-se uma clara redução do valor da resistência mecânica à compressão, com o aumento da introdução de lama de ETAR seca (sem calcinação), o oposto é constatável para as argamassas compostas por lama de ETAR calcinada, à semelhança do que aconteceu para a resistência à tração por flexão. Quando comparamos os valores obtidos para as argamassas LEC com o valor obtido para a argamassa de referência é notório que os valores registados para as argamassas LEC são superiores, até mesmo quando comparados com os valores obtidos para o restante grupo de argamassas. As argamassas com melhor comportamento são as CI_10LEC e CI_5LEC, o valor obtido aumentou 37% e 6% em relação à argamassa de referência, respetivamente, no grupo correspondente às argamassas LE, a que apresenta igualmente uma boa solução é a argamassa CI_5LE, cujo valor obtido aumentou 6% em relação ao valor apresentado para a argamassa de referência.

Pode concluir-se que quanto maior for a quantidade de lama de ETAR calcinada introduzida, melhor é a capacidade da argamassa resistir a fenómenos de compressão, o oposto verifica-se para as argamassas compostas por lama de ETAR seca (sem calcinação), uma vez que o aumento da percentagem de resíduo, afeta negativamente as características mecânicas de compressibilidade.

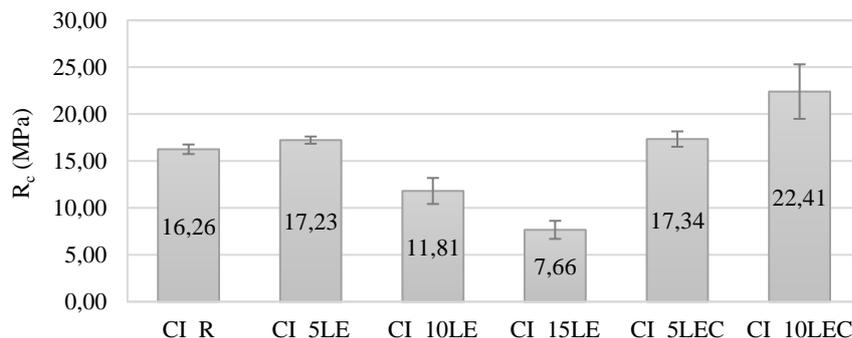


Figura 5.3 – Resistência mecânica à compressão, para argamassas LE e LEC

5.3.4 Massa volúmica aparente seca

A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos para a massa volúmica seca, no estado endurecido, os valores diminuem com o aumento da percentagem de lama de ETAR, seca (não calcinada), o oposto é observável para as argamassas LEC.

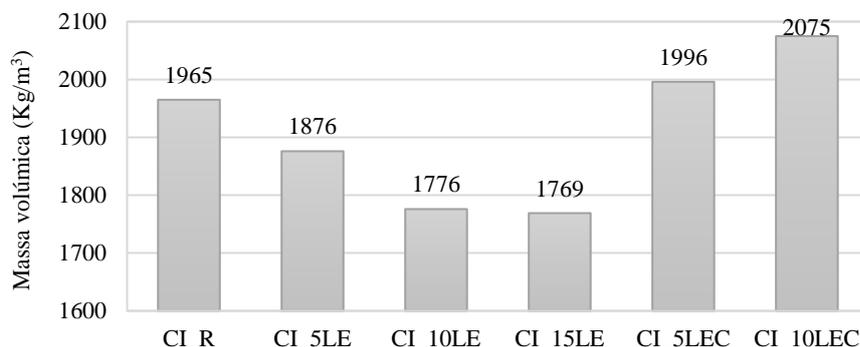


Figura 5.4 – Massa volúmica aparente seca, após 28 dias de cura, das argamassas LE e LEC

De uma maneira geral, as argamassas LE produzem argamassas mais leves, o que permite concluir que poderão ter um melhor comportamento térmico (que não foi analisado neste trabalho). As argamassas CI_10LEC e CI_5LEC apresentam valores superiores para a massa volúmica seca, ultrapassando o valor obtido para a argamassa de referência.

5.3.5 Absorção de água por capilaridade

Os resultados para o coeficiente de absorção por capilaridade, C , e o valor de desvio padrão respetivo, são apresentados no Quadro 5.2. Na Figura 5.5, é apresentada a relação entre a quantidade de massa de água absorvida por capilaridade por unidade de área da superfície do

provete, em kg/m^2 , e o tempo decorrido, t , com t em horas. (Veiga, 1998). Genericamente verifica-se que a introdução de lamas de ETAR diminui o valor do coeficiente de absorção.

Quadro 5.2 – Coeficiente de absorção por capilaridade, e desvio padrão, das argamassas LE e LEC

Designação	28 dias	
	C [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$]	StD [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$]
CI_R	0,389	0,075
CI_5LE	0,068	0,012
CI_10LE	0,071	0,020
CI_15LE	0,151	0,047
CI_5LEC	0,352	0,277
CI_10LEC	0,232	0,042

A Figura 5.5 apresenta a evolução das curvas de absorção por capilaridade ao longo do decorrer do ensaio, sendo que as curvas de absorção de água por capilaridade para as argamassas LEC se posicionam acima das curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas LE, o que permite concluir que as argamassas LEC absorvem mais rapidamente água por capilaridade do que as argamassas LE.

Na Figura 5.5 (a), as argamassas CI_5LE e CI_15LE comportam-se de forma muito análoga, estabilizando no mesmo instante, no entanto na CI_10LE a estabilização ocorreu ao fim de 120 horas, ou seja, passados cinco dias. Para o grupo de argamassas LEC, a argamassa CI_10LEC foi a primeira a estabilizar, ao fim de 144 horas após o início do ensaio, como é observável na Figura 5.5 (b).

O aumento da percentagem de incorporação de lamas de ETAR, seca (sem calcinação), aumenta o coeficiente de absorção por capilaridade, no entanto, quando comparada com o valor da argamassa de referência os valores são inferiores., Dentro deste grupo a argamassa que absorve menos quantidade de água é a argamassa CI_5LE, podendo esta solução ser uma boa alternativa, pois conduz à diminuição do coeficiente de absorção por capilaridade.

Nas argamassas LEC, o coeficiente de absorção de capilaridade diminui, com o aumento da percentagem de introdução de lama de ETAR calcinada, tal facto pode ser devido às características químicas das lamas, uma vez que estas foram submetidas ao processo químico

de calcinação, tratamento de remoção de água, dióxido de carbono, matéria orgânica e hidróxidos, CI_10LEC é a argamassa que absorve menos quantidade de água.

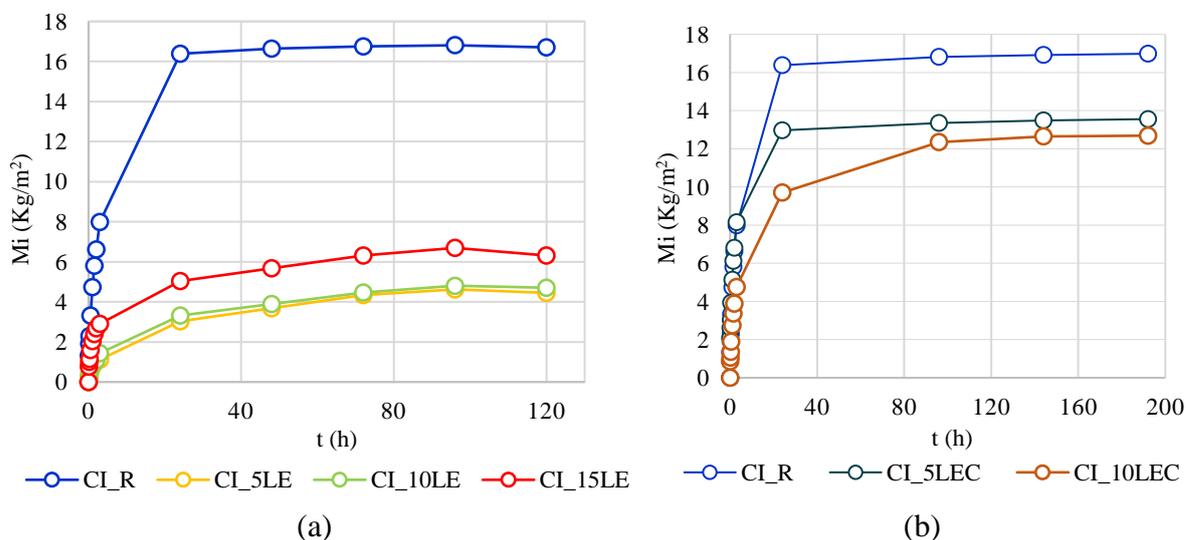


Figura 5.5 – Curva de absorção por capilaridade no tempo total do ensaio (a) argamassas LE (b) argamassas LEC

5.3.6 Secagem

As curvas de secagem, que representam a variação do teor de humidade ao longo do tempo (valor percentual que está relacionado com a massa de água contida nas argamassas) são apresentadas na Figura 5.6 (a) e (b) e o Quadro 5.3 expõe os resultados obtidos para o índice de secagem e respetivo desvio padrão.

Quadro 5.3 – Índice de secagem (IS) (a) argamassas LE (b) argamassas LEC

Designação	28 dias		Designação	28 dias	
	IS [-]	StD		IS [-]	StD
CI_R	0,836	0,034	CI_R	0,775	0,046
CI_5LE	0,613	0,016	CI_5LEC	0,489	0,080
CI_10LE	0,532	0,039	CI_10LEC	0,559	0,012
CI_15LE	0,488	0,024			

Na Figura 5.6, podemos observar que nas primeiras horas as argamassas têm valores de teor de humidade muito elevados e estes são relativamente inferiores ao valor obtido para a argamassa de referência. De entre todas as argamassas, as que apresentam maior e menor teor de humidade são CI_5LEC e CI_5LE, respetivamente. Pode concluir-se que as argamassas LEC, apresentam teores de humidade mais elevados, do que o restante grupo de argamassas. Na Figura 5.6 (b) verifica-se que a argamassa que estabilizou mais rapidamente foi a CI_10LEC, ao fim de 72 horas do início do ensaio, contudo, através da Figura 5.6 (a) é observável que dentro deste grupo a primeira a estabilizar foi a CI_5LE, no período de 48 horas.

Através da observação do Quadro 5.3 (a) e (b) verifica-se uma diminuição do índice de secagem, com o aumento da percentagem de resíduo incorporado nas argamassas LE, neste grupo a que tem pior comportamento é a argamassa CI_5LE com 0,613, no entanto, para a argamassa LEC o oposto é constatável, o índice de secagem aumentou com a incorporação de lama de ETAR calcinada, e a argamassa que apresenta melhor comportamento é CI_5LEC com IS de 0,489.

Relacionando os valores obtidos para o coeficiente de absorção por capilaridade, e o índice de secagem podemos concluir que as argamassas CI_15LE e CI_5LEC absorvem maior quantidade de água por capilaridade, sendo o IS na primeira significativamente superior quando comparada com o valor obtido na segunda, pode considerar-se que CI_5LEC, tem mais dificuldade em expulsar a água dos poros.

De uma maneira geral, nas argamassas LE, quanto maior for a percentagem de resíduo introduzido, maior é a capacidade de absorção de água por capilaridade e mais rápida é a secagem dos provetes. Para as argamassas LEC, quanto maior a quantidade de resíduo incorporado, menor é a capacidade de absorção de água por capilaridade, assim como também são as que demoram mais tempo a secar, sendo estes valores inferiores aos valores de referência.

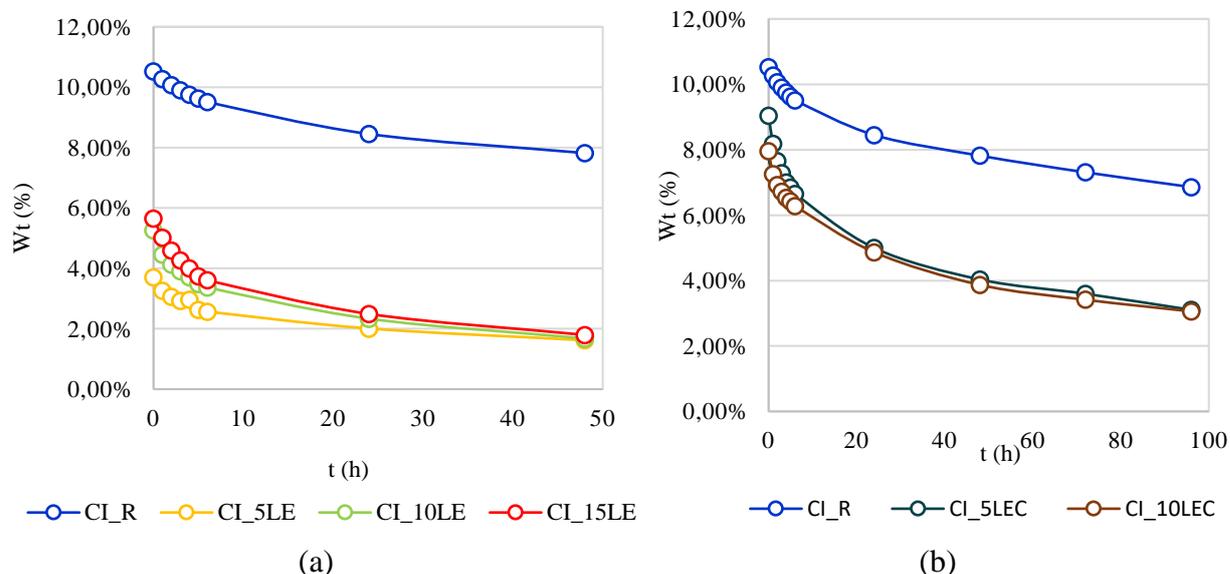


Figura 5.6 – Curva de secagem no tempo total do ensaio (a) argamassas LE (b) argamassas LEC

5.3.7 Permeabilidade ao vapor de água

No Quadro 5.4 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, para as argamassas LE e LEC.

A permeabilidade ao vapor de água reflete a capacidade que um dado material poroso tem para se deixar atravessar por um fluido, quando está sujeito a uma diferença de pressões entre as suas faces. Desta forma, quanto maior for a permeabilidade ao vapor de água, melhor é a capacidade da argamassa “expulsar” o vapor de água contido no seu interior (Veiga, 1998).

Quadro 5.4 – Permeabilidade ao vapor de água, fator de resistência à difusão do vapor de água e espessura de ar equivalente das argamassas, para as argamassas LE e LEC

Designação	Permeabilidade ao vapor de água		Fator de resistência ao vapor de Água		Espessura da camada de ar equivalente	
	δ [kg/(m.s.Pa)]	StD	μ [-]	StD	S_d [m]	StD
CI_R	7,24E-12	5,68E-13	27,03	2,05	0,44	0,03
CI_5LE	5,79E-12	1,31E-13	33,69	0,74	0,56	0,01
CI_10LE	6,25E-12	4,35E-13	31,22	2,45	0,55	0,07

CI_15LE	9,33E-12	5,87E-13	20,91	1,34	0,35	0,02
CI_5LEC	5,94E-12	7,15E-14	32,84	0,40	0,55	0,02
CI_10LEC	6,13E-12	1,33E-13	31,80	0,67	0,53	0,0035

De acordo com o Quadro 5.4, a CI_15LE é a argamassa que apresenta um valor mais elevado para a permeabilidade ao vapor de água, todas as outras argamassas têm valores inferiores ao valor da argamassa de referência, podendo concluir-se que a permeabilidade ao vapor de água é tanto maior quanto maior é a percentagem de lama de ETAR introduzida.

Pode concluir-se que a espessura de camada de ar equivalente diminui à medida que se aumenta a percentagem de lama de ETAR seca (sem calcinação), como é observável na mesma imagem. Os valores apresentados para as restantes argamassas, têm comportamento análogo, e quando compararmos estes valores com CI_15LE, a espessura de camada de ar equivalente é maior, dificultando desta forma a velocidade de percolação de água.

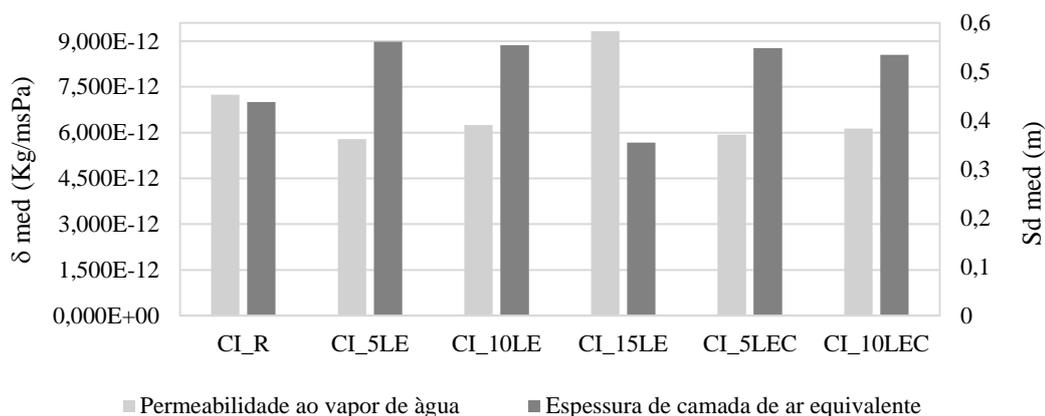


Figura 5.7 – Relação entre a permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente, aos 28 dias, das argamassas cimentícias

5.4 Considerações finais

De um modo geral, avaliando as argamassas sob o ponto de vista mecânico, podemos concluir que as argamassas LEC obtiveram resultados bastante elevados, como era espectável, face aos valores obtidos para as argamassas LE. A resistência é inversamente proporcional a relação em massa, entre a quantidade de água e cimento na mistura, assim pode concluir-se que é tanto menor quanto mais resistente é o material, o que permite concluir que as argamassas LEC são menos porosas do que as argamassas LE, uma vez que o processo envolvido de calcinação

elimina a presença de água, assim as lamas de ETAR calcinadas assemelham-se às propriedades do ligante.

Relacionando os resultados obtidos entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica à flexão, podemos considerar que quanto maior for a relação existente entre estes dois parâmetros, maior é a tendência para o material sofrer fendilhação. Através da Figura 5.8, a argamassa que apresenta menor variação entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica à tração por flexão é a argamassa CI_15LE, desta forma as argamassas CI_R e CI_5LE apresentam uma variação mais acentuada favorecendo desta forma a ocorrência deste fenómeno.

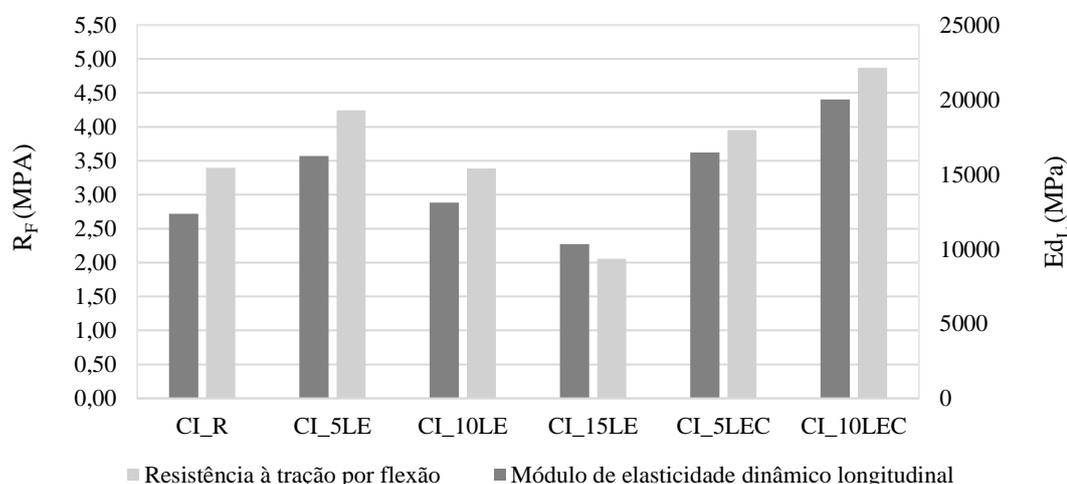


Figura 5.8 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e resistência mecânica à tração por flexão, aos 28 dias, das argamassas de cimento

Segundo o ponto de vista higrotérmico, o coeficiente de absorção por capilaridade diminuiu com a incorporação deste resíduo nas argamassas LEC, o oposto é constatável para as argamassas LE, sendo os valores obtidos neste último grupo muito inferiores face às argamassas LEC, isto poderá estar relacionado com as características químicas das lamas de ETAR apresentarem uma estrutura porosa, conferindo-lhe assim a “propriedade de proteção contra a penetração de água, ao mesmo tempo que permite trocas gasosas” (Silva, 2017b).

Outro parâmetro higrotérmico analisado foi a secagem, onde se verificou que a introdução deste resíduo melhorou a capacidade de secagem das argamassas, uma vez que os valores registados foram superiores ao obtido para a argamassa de referência, no entanto parece que a tendência observada para as argamassas LEC prejudicou as suas características, o que poderá concluir-se que o processo de calcinação afeta a capacidade de secagem dos provetes.

Por fim, o último parâmetro avaliado foi a permeabilidade ao vapor de água, sendo os valores obtidos para as argamassas LE e LEC muito análogos, o que permite considerar que este parâmetro é tanto maior quanto maior a incorporação deste resíduo, desta forma a incorporação de lamas de ETAR é uma solução vantajosa, uma vez que a sua presença nas argamassas parece facilitar a velocidade de percolação da água.

Os quadros 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os resultados obtidos para todos os ensaios realizados para a análise do comportamento de argamassas com incorporação de LE e LEC.

Quadro 5.5 – Caracterização das argamassas em estudo, para os ensaios mecânicos, ao 28º dia de cura

Designação	Espalhamento [mm]	Ensaio Mecânicos		
		Ed _L [Mpa]	R _F [Mpa]	R _C [Mpa]
CI_R	161,00	12368	3,40	16,26
CI_5LE	148,91	16236	4,24	17,23
CI_10LE	161,69	13115	3,39	11,81
CI_15LE	153,48	10321	2,05	7,66
CI_5LEC	153,38	16467	3,95	17,34
CI_10LEC	154,00	20021	4,87	22,41

Ed_L - módulo de elasticidade dinâmica; R_F- resistência á tração por flexão; R_C- Resistência á compressão

Quadro 5.6 – Caracterização das argamassas LE, para os ensaios físicos e higrotérmicos, ao 28º dia de cura

Designação	Ensaio Físicos e Higrotérmicos					
	ρ_d [kg/m ³]	C (EN 1015-18) [kg(m ² .min ^{0,5})]	IS [-]	δ [kg/(m.s.Pa)]	μ [-]	Sd [m]
CI_R	1965	0,389	0,836	7,24E-12	27,03	0,44
CI_5LE	1876	0,068	0,613	5,79E-12	33,69	0,56
CI_10LE	1776	0,071	0,532	6,25E-12	31,22	0,55
CI_15LE	1769	0,151	0,488	9,33E-12	20,91	0,35

ρ_d - massa volúmica aparente seca; C- coeficiente de absorção por capilaridade, IS- índice de secagem; δ -permeabilidade ao vapor de água; μ - fator de resistência ao vapor de água; Sd- espessura da camada de ar equivalente

Quadro 5.7 – Características das argamassas LEC, para os ensaios físicos e higrotérmicos, ao 28º dia de cura

Designação	Ensaio Físicos e Hidrotérmicos					
	ρ_d	C (EN 1015-18) [kg(m ² .min ^{0,5})]	IS [-]	δ [kg/(m.s.Pa)]	μ [-]	Sd [m]
CI_R	1965	0,389	0,775	7,24E-12	27,03	0,44
CI_5LEC	1996	0,352	0,489	5,94E-12	32,84	0,55
CI_10LEC	2075	0,232	0,559	6,13E-12	31,80	0,53

ρ_d - massa volúmica aparente seca; C- coeficiente de absorção por capilaridade, IS- índice de secagem; δ -permeabilidade ao vapor de água; μ -fator de resistência ao vapor de água; Sd- espessura da camada de ar equivalente

5.5 Classificação normativa

Na constituição das argamassas em estudo apenas foram considerados agregados água e ligantes, pelo que as conclusões obtidas servem para caracterizar as argamassas no seu estado mais elementar, sem a introdução de aditivos e/ou adjuvantes, tal como já foi referido no subcapítulo 3.2, assim estes compostos podem alterar as propriedades das argamassas, potenciando algumas características tais como a trabalhabilidade, resistência mecânica e/ou minimizando outras características menos desejáveis como a absorção de água por capilaridade (Silva, 2017b).

Atualmente, e face às exigências impostas no mercado é imprescindível garantir um padrão de qualidade elevado, pelo que as argamassas industriais detêm vantagens sobre as argamassas tradicionais, uma vez que estas apresentam inconvenientes no manuseamento e condicionamento inapropriado de recursos e matérias-primas, o que pode levar à perda de algumas propriedades, e principalmente, à dificuldade em conseguir dosagens rigorosas para cada amassadura (Silva, 2017b).

Face ao exposto atrás, as argamassas têm de obedecer a padrões de qualidade que são garantidos através da marcação CE que é aplicada obrigatoriamente a todos os produtos incluídos pelo Regulamento (UE) N° 05/2011 (Regulamento Produtos de Construção (RPC)), emitido a 9 de março de 2011, “que determina condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção” e que revoga e substitui a Diretiva 89/106/CEE (Diretiva Produtos de construção (DPC)).

A marcação CE para as argamassas industriais de reboco interior e exterior, é estabelecida através dos requisitos exigidos pela norma NP EN 998-1:2010 (IPQ, 2010), tendo como objetivo o controlo de produção e qualidade por parte dos fabricantes, a partir dos quais se obtém a declaração de conformidade e se efetua a marcação CE. Assim, a marcação CE permite a livre circulação dos produtos de construção dentro do Espaço Económico Europeu, “conferindo durante um período de vida economicamente razoável”, os seguintes requisitos: “resistência mecânica e estabilidade; segurança contra incêndio; Higiene, saúde e ambiente; segurança e acessibilidade na utilização; proteção contra o ruído; Economia de energia e isolamento térmico e utilização sustentável dos recursos naturais” (www.sgs.pt, 2017).

De acordo com a norma EN 998-1:2010 (IPQ,2010), as argamassas para rebocos exteriores e interiores são definidas segundo:

- a conceção em, argamassas de desempenho ou argamassas de formulação;
- o processo construtivo em, argamassas industriais, argamassas industriais semi-acabadas ou argamassas feitas em obras;
- as propriedades e/ou utilização em, argamassas de uso geral para rebocos exteriores/interiores (GP), argamassas leves para rebocos exteriores/interiores (LW), argamassas coloridas para rebocos exteriores (CR), argamassas monomassas para rebocos exteriores (OC), argamassas de drenagem para rebocos interiores/interiores (R), argamassas de isolamento térmico para rebocos interiores/exteriores (T)

A respetiva norma é composta por 12 parâmetros de ensaio, sendo que na presente dissertação apenas foram determinados 4, a massa volúmica aparente seca, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e coeficiente de permeabilidade ao vapor de água. Os quadros 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam os respetivos parâmetros de ensaio para cada tipo

de argamassa e o quadro 5.9 encontram-se resumidamente as propriedades que as mesmas devem cumprir para adquirirem essa classificação.

Através dos Quadros 5.10, 5.12 e 5.13, as argamassas GP, CR e OC cumprem totalmente os requisitos exigidos para todas as argamassas, o oposto se verifica nos quadros 5.11 e 5.14 para as argamassas LW e R, uma vez que os parâmetros de resistência à compressão não são cumpridos. No quadro 5.15 são apresentados os requisitos para as argamassas de isolamento térmico, onde se observa total incumprimento para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e o parâmetro de absorção de água por capilaridade é cumprido para as argamassas CI_R, CI_5LEC e CI_10LEC, importa ainda referir que o parâmetro de condutibilidade térmica não foi determinado no presente estudo.

Podemos concluir que as argamassas em estudo podem ser classificadas em GP, CR e OC.

Quadro 5.8 – Requisitos aplicado às argamassas endurecidas, para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, segundo a norma NP EN 998-1:2010 (IPQ, 2010)

Propriedades	Categoria dos requisitos	Valores
Gama de resistência à compressão após 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 MPa
	CS II	1,5 a 5,0 MPa
	CS III	3,5 a 7,5 MPa
	CS IV	≥6 MPa
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não especificado
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

Quadro 5.9 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa de uso geral para rebocos interiores/exteriores (adaptada Monteiro, 2015)

Designação	GP			
	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado	Categoria CS I a CS IV	Categoria W0 a W2	$\mu \leq$ {5;15;20;35}
CI_R	1965	CSIV	W1	Sim
CI_5LE	1876	CSIV	W2	Sim
CI_10LE	1776	CSIV	W2	Sim
CI_15LE	1769	CSIV	W2	Sim
CI_5LEC	1996	CSIV	W1	Sim
CI_10LEC	2075	CSIV	W1	Sim

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Quadro 5.10 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa leves para rebocos exteriores/interiores (adaptada Monteiro, 2015)

Designação	LW			
	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado ≤ 1300 Kg/m ³	Categoria CS I a CS III	Categoria W0 a W2	$\mu \leq$ {5;15;20;35}
CI_R	1965	Não	W1	Sim
CI_5LE	1876	Não	W2	Sim
CI_10LE	1776	Não	W2	Sim
CI_15LE	1769	Não	W2	Sim
CI_5LEC	1996	Não	W1	Sim
CI_10LEC	2075	Não	W1	Sim

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Quadro 5.11 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa coloridas para rebocos exteriores (adaptada Monteiro, 2015)

CR				
Designação	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado	Categoria CS I a CS IV	Categoria W0 a W2	$\mu \leq$ {5;15;20;35}
CI_R	1965	CSIV	W1	Sim
CI_5LE	1876	CSIV	W2	Sim
CI_10LE	1776	CSIV	W2	Sim
CI_15LE	1769	CSIV	W2	Sim
CI_5LEC	1996	CSIV	W1	Sim
CI_10LEC	2075	CSIV	W1	Sim

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Quadro 5.12 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa monomassa para rebocos exteriores (adaptada Monteiro, 2015)

OC				
Designação	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado	Categoria CS I a CS IV	Categoria W1a W2	$\mu \leq$ {5;15;20;35}
CI_R	1965	CSIV	W1	Sim
CI_5LE	1876	CSIV	W2	Sim
CI_10LE	1776	CSIV	W2	Sim
CI_15LE	1769	CSIV	W2	Sim
CI_5LEC	1996	CSIV	W1	Sim
CI_10LEC	2075	CSIV	W1	Sim

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Quadro 5.13 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassas de drenagem para rebocos interiores/exteriores (adaptada Monteiro, 2015)

Designação	R			
	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado	Categoria CS II	$\geq 0,3$ kg/m ² após 24h	$\mu \leq 15$
CI_R	1965	Não	W1	Sim
CI_5LE	1876	Não	W2	Sim
CI_10LE	1776	Não	W2	Sim
CI_15LE	1769	Não	W2	Sim
CI_5LEC	1996	Não	W1	Sim
CI_10LEC	2075	Não	W1	Sim

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Quadro 5.14 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassas de isolamento térmico (adaptada Monteiro, 2015)

Designação	T			
	ρ_d [kg/m]	R_c	C	μ
	Valor médio declarado	Categoria CS I a CS IV	Categoria W1	$\mu \leq 15$
CI_R	1965	CS IV	W1	Não
CI_5LE	1876	CS IV	Não	Não
CI_10LE	1776	CS IV	Não	Não
CI_15LE	1769	CS IV	Não	Não
CI_5LEC	1996	CS IV	W1	Não
CI_10LEC	2075	CS IV	W1	Não

ρ_d – massa volúmica aparente seca; R_c – resistência mecânica à compressão; C – absorção de água por capilaridade, μ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

6 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Introdução

Ao longo do presente trabalho experimental foi possível caracterizar as argamassas com integração de lamas de ETAR, provenientes da ETAR Choupal, sob o ponto de vista mecânico, físico e higrotérmico, sujeita a processos de secagem em estufa e à calcinação. Os resultados obtidos para a caracterização de argamassas que incorporaram este resíduo, permitiram uma avaliação das suas potencialidades como substituinte parcial do cimento, na procura de argamassas mais sustentáveis.

O presente capítulo encontra-se dividido em duas fases: (i) “CONCLUSÕES” onde se apresentam as principais conclusões deste trabalho de investigação. (ii) “PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS” onde serão apresentadas algumas propostas para possíveis trabalhos futuros nesta área.

6.1.1 Conclusões

Como conclusão final, deste trabalho de investigação, é de salientar, em primeiro lugar, que o objetivo principal deste trabalho foi atingido, na medida em que foi possível contribuir para um melhor conhecimento sobre a incorporação de resíduos de lama de ETAR (estado seco e no estado calcinado) em argamassas cimentícias, foi possível ainda verificar, se efetivamente o processo de calcinação constitui uma mais-valia neste estudo, sob os parâmetros de ensaio realizados, nomeadamente a nível mecânico. Os resultados obtidos neste estudo permitem não só a comparação com os dados obtidos para a argamassa de referência que integra o trabalho de (Silva, 2017a), mas também como ponto de partida para trabalhos futuros, concebendo uma metodologia específica assente em normas e procedimentos aplicados.

A incorporação do resíduo após o processo térmico de calcinação poderá não ter interesse, na medida em que a melhoria dos parâmetros avaliados neste estudo não foi significativa, é importante ainda referir que o processo de calcinação envolvido apresenta custos elevados, não só associados a energia libertada durante o processo, mas também pelos danos ambientais provocados. No entanto, estudos revelam que se pode reduzir o impacto ambiental, com a implementação destes resíduos na indústria de construção.

Da caracterização realizada às argamassas com incorporação de lamas de ETAR destacam-se as seguintes conclusões:

- Sob o ponto de vista mecânico as argamassas LEC apresentam valores bastante superiores aos valores registados para as argamassas LE, sendo que para ambos os grupos, os valores são igualmente superiores à argamassa de referência, à exceção da argamassa CI_15LE.
- Sob o ponto de vista higrotérmico, os valores registados para o coeficiente de absorção de água por capilaridade, é inferior aos valores obtidos para as argamassas de referência, o mesmo é verificado para o índice de secagem, o que permite concluir que a argamassa com melhor comportamento para estes dois parâmetros é a argamassa CI_15LE. Relativamente ao coeficiente de permeabilidade ao vapor de água os valores obtidos ficaram aquém do esperado, uma vez que apresentam valores inferiores ao obtido para a argamassa de referência, à exceção da argamassa CI_15LE.

Como nota final, considerando a quantidade de lamas de ETAR produzidas e os aspetos positivos da sua integração em argamassas, podemos concluir que constitui uma boa alternativa para diminuir o impacto ambiental, causado pela incineração e deposição em aterros, destes resíduos.

6.1.2 Propostas para trabalhos futuros

De seguida são listados alguns trabalhos futuros que podem ser levados a cabo para dar sequência ao trabalho experimental aqui apresentado:

- Segundo os requisitos expostos na norma NP EN 998-1:2013, apenas foram analisados os parâmetros para massa volúmica seca, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, assim a campanha experimental deverá ser alargada, nomeadamente através da realização de ensaios complementares, e da realização do ensaio de aderência, com o objetivo de analisar o comportamento das argamassas em contexto próximo do real.
- Avaliar o comportamento das argamassas a longo prazo, sujeitando os provetes a envelhecimento acelerado em câmaras climáticas.
- Analisar o custo-benefício do processo térmico de calcinação.

-
- Outros estudos deveriam ser realizados, tal como ensaios químicos de caracterização química das lamas de ETAR para uma melhor compreensão da sua influência na incorporação em argamassas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afshinnia, K., & Poursaee, A. (2015). The influence of waste crumb rubber in reducing the alkali-silica reaction in mortar bars. *Journal of Building Engineering*, 4, 231–236.

aguasdocentrolitoral@ (2015). <http://www.aguasdocentrolitoral.pt/pt/comunicacao/galeria/detalhe-galeria-imagens/?id=61&img=16&bl=1>, Portugal

Agência Portuguesa do Ambiente. (2017). Guia de Classificação de Resíduos, 121. Retrieved from https://www.apambiente.pt/_zdata/Politicar/Residuos/Classificacao/Manual de Classificacao de residuos_20170316.pdf

Agostinho, C. S. (2008). "Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Al-Jabri, K., & Shoukry, H. (2014). Use of nano-structured waste materials for improving mechanical, physical and structural properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 73, 636–644.

Almeida, J. (2010). "Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edificios". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Avci, H., Ghorbanpoor, H., Topcu, I. B., & Nurbas, M. (2017). Investigation and recycling of paint sludge with cement and lime for producing lightweight construction mortar. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 861–869.

Baeza, F., Payá, J., Galao, O., Saval, J. M., & Garcés, P. (2014). Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 66, 645–653.

Bastos, P., Lemonge, A., Sigiliano, V., & Resende, S. (2010). Estudo do módulo de elasticidade de argamassas de revestimento sujeitas à sucção de água pela base. 3 o Congresso Português de Argamassas de Construção, CD.

Barbosa, J. A. (2008). “Valorização de Lamas Provenientes do Tratamento de Águas Residuais”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Sanitária, Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Borges, P. R., Junca, E., Grillo, F. F., Telles, V. B., José Roberto de Oliveira, & Tenório, J. A. S. (n.d.). Incorporação de resíduo de lã de vidro em concreto, 373–379.

Correia, J. R., Almeida, N. M., & Figueira, J. R. (2011). Recycling of FRP composites : reusing fi ne GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1745–1753.

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

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

CEN, (1999). “EN 1015-10:1999+EN 1015-10:1999/A 1:2006 - Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”, CEN, Brussels, Belgium.

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

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

CEN, (2010). “EN 998-1:2010 - Specification for mortar for masonry; Part 1: Rendering and plastering mortar”, CEN, Brussels, Belgium.

Faria-Rodrigues, M. P. (2004). "Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. R. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285–292

Ferreira, T.A.F. (2011). “Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos com resíduos cerâmicos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Garcia, S. S. (2011). Caraterização de argamassas auto-compactáveis com adição de lamas provenientes de uma ETA, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior. Covilhã.

Garcés, P.; Carrión, M.; García-alcocel, E.; Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, M. – “Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash”, *Waste Management* 28, 2008, p. 2495-2502.

García, R.; Vigil de la Villa, R.; Vegas, I.; Frías, M.; Sánchez de Rojas, M.I., 2008. “The pozzolanic properties of paper sludge waste”. *Construction and Building Materials* 22, 1484–1490.

Hamood, A., Khatib, J. M., & Williams, C. (2017). The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed Fly Ash (u-FA). *Construction and Building Materials*, 147, 27–34.

Horgnies, M., Gutiérrez-González, S., Rodríguez, A., & Calderón, V. (2014). Effects of the use of polyamide powder wastes on the microstructure and macroscopic properties of masonry mortars. *Cement and Concrete Composites*, 52, 64–72.

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

ISO, 2001, “ISO 12572:2001 - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties”, ISO, Geneva, Switzerland.

Jang, H. S., & So, S. Y. (2015). The properties of cement-based mortar using different particle size of grinding waste insulator powder. *Journal of Building Engineering*, 3, 48–57.

Kim, J., Yi, C., & Zi, G. (2015). Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. *Construction and Building Materials*, 75, 242–246.

Leal, M. (2012). "Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado". Tese de Mestrado em Construção Civil, Instituto Politécnico de Setúbal.

Leonardo, S.M.F. (2012). "Caraterização do Digestor Anaeróbico de Lamas Biológicas da ETAR do Choupal em Coimbra", Dissertação de Mestrado em Processos Químicos e Biológicos, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Lucas, J., de Brito, J., Veiga, R., & Farinha, C. (2016). The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. *Materials and Design*, 91, 155–164.

Machado, R. (2012). "Incorporação de Lamas de Pedreira em Argamassas". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho. Minho.

Manfroi, E.P.; Cheriaf, M.J.; Rocha, C., 2010. "Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas"; 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.

Margalha, M. G. (2011). "Argamassas". Conservação e Recuperação do Património, Engenharia Civil, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

mapadaobra@ (2016). <http://www.mapadaobra.com.br/inovacao/entendendo-as-trincas-e-fissuras/>,Portugal.

Mashaly, A. O., Shalaby, B. N., & Rashwan, M. A. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 169, 800–818.

Matias, G., Torres, I., Matias, G., Torres, I., & Fonseca, S. (2018). Estudo de argamassas com incorporação de lamas de ETAR, 14–16.

Matias, G. M. (2014). "Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

MAOTE. (2014). Compromisso para o crescimento verde, 1–11.

Monteiro, M. (2015). "Caraterização de Argamassas com Incorporação de Resíduos de Casca e Palha de Arroz". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

NP EN 13139:2005, Agregados para argamassas, IPQ, 2005

NP EN 197-1:2012, Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, IPQ, 2012

O.López-Zaldivar.R.V.Lozano-Díez, A.Verdú-Vázquez, N. L.-P. (2017). Effects of the addition of inertized MSW fly ash on calcium aluminate cement mortars, 157, 1106–1116.

Páscoa, L.S. (2012). "Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.

Paulo, R. (2006). "Caracterização de Argamassas Industriais". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Pereira, M. F. P. (2005). "Anomalias Em Paredes De Alvenaria Sem Função Estrutural". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Universidade do Minho, Guimarães.

Pereira, D.M.P. (2015). "Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos com resíduos cerâmicos". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Pinto, A. P., Gomes, A., & Pinto, J. B. (2006). "Argamassas". Materiais de Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Ramos, T., Matos, A. M., Schmidt, B., Rio, J., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001–1009.

Ribeiro, D. V. (2013). Estudo das reações alcalis-sílica (ras) associadas ao uso da lama vermelha em argamassas de cimento portland, 07, 1–16.

Ribeiro, M. C. S., Fiúza, A., Castro, A. C. M., Silva, F. G., Dinis, M. L., Meixedo, J. P., & Alvim, M. R. (2013). Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials. *Composite Structures*, 105, 300–310.

Sales, A., & de Souza, F. R. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2362–2370.

Saxena, R., Siddique, S., Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2018). Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 176, 415–421.

sgs@ (2017). <https://www.sgs.pt/pt-pt/news/2017/12/marcacao-ce>, Portugal.

Silva, C. (2017b). “Aproveitamento de resíduos de Casca de Ovo para incorporação em argamassas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Silva, P. (2017a). “Estudo de Argamassas com Incorporação de Resíduos de Casca de Ovo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra.

Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*.

Shih, P.-Y., Lee, P.-H., Nian, K.-J., & Lee, T.-C. (2013). Characterization of a mortar made with cement and slag vitrified from a MSWI ash-mix and CMP sludge. *Construction and Building Materials*, 38, 22–30.

Tafarel, N. F., Macioski, G., Carvalho, K. Q. De, Nagalli, A., Freitas, D. C. De, & Passig, F. H. (2016). Evaluation of concrete properties due to the incorporation of sludge from Water Treatment Plant, 974–986.

Tomás, A. (2012). "Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos Cerâmicos em Substituição de Parte do Agregado". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Torres, I., Matias, G., & Fonseca, S. (2018). Efeito da calcinação de lamas de ETAR no comportamento de argamassas, 14–16.

Valensca, S., Barros, A., Emanuell, J., Marciano, A., Carlos, H., Rodrigues, R., & Araújo, G. De. (2016). Addition of quartzite residues on mortars : Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, 118, 344–351

Veiga, Rosário; FÁRIA, Paulina - Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética. Lisboa: LNEC, 1990. Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes – 1ºMódulo.LNEC, Novembro 1990, p.40-173.

Veiga, M. (1998). “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Wada, P. H. (2010). “Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas In Loco”, Universidade Estadual Paulista Mestrado, Ilha Solteira.

Wong, C. L., Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J., & Ling, T. (2018). Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production*.

Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., & Shapiro, G. (2012). Properties of cement mortar incorporating de-inking waste-water from waste paper recycling. *Construction and Building Materials*, 29, 51–55.

Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., & Shapiro, G. (2012). Properties of cement mortar incorporating de-inking waste-water from waste paper recycling. *Construction and Building Materials*, 29, 51–55.