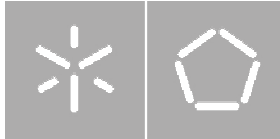


Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Civil

Raphael Rezende da Silva

Comportamento de argamassa com incorporação de
Materiais de Mudança de Fase e Cascas de Moldes
Cerâmicos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Civil

Raphael Rezende da Silva

**Comportamento de argamassa com incorporação de
Materiais de Mudança de Fase e Cascas de Moldes
Cerâmicos**

Mestrado Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho realizado sob a orientação da
Professor Doutor José Barroso de Aguiar
Doutora Sandra Raquel Leite da Cunha

Abril 2023

DIREITOS DE AUTOR

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações

CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor José Luís Barroso de Aguiar pela atenção, orientação, disponibilidade prestada ao longo de todos os trabalhos, contribuindo assim com conhecimento e conselhos a fim de enriquecer este trabalho.

À Doutora Sandra Cunha, minha coorientadora nesta dissertação, por toda a ajuda, disponibilidade, ensinamentos, atenção e por todos os momentos de motivação durante a realização do trabalho, tendo sido uma mais-valia para a elaboração deste trabalho.

A todo o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho o meu agradecimento por todo o conhecimento partilhado comigo ao longo destes anos.

Ao Eng. Carlos Jesus, por toda a disponibilidade, boa disposição e simpatia durante a realização dos trabalhos no Laboratório de Materiais de Construção.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e esforço durante esta percurso e a todos meus amigos que me apoiaram em todo este trajeto.

A todos o meu muito obrigado, sem vocês não teria conseguido atingir este objetivo.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A utilização de subprodutos industriais em materiais de construção, nomeadamente provenientes da indústria de fundição, tais como as cascas de moldes cerâmicos e as ceras parafínicas irá permitir diminuir o consumo a matérias-primas-naturais e aumentar a eficiência energética dos edifícios, uma vez que estes podem ser utilizados como substitutos do agregado natural (cascas de moldes cerâmicos) e possuem capacidade de armazenamento térmico (cera parafínica).

A utilização de Cascas de Moldes Cerâmicos em argamassas vem sendo estudado com o objetivo de complementar ou substituir os agregados convencionais já utilizados na construção civil, devido à sua resistência quando incorporados à argamassa, obtendo resultados semelhantes à areia natural, solução que se torna interessante por incentivar a economia circular.

A incorporação de PCMs (Phase Change Materials) em argamassas têm sido estudados com o objetivo de regular a temperatura no interior dos edifícios, devido à sua capacidade de absorção e libertação de energia, o que permite uma melhoria da eficiência energética nos edifícios.

A partir desta incorporação, que já conta com alguns estudos realizados, surgiu o interesse de estudar o comportamento da argamassa quando incorporada junto com as ceras parafínicas, solução que se torna interessante pela possibilidade de reaproveitamento de resíduos em uma argamassa que pode permitir a regulação das temperaturas e um custo significativamente menor.

O objetivo desta dissertação consiste em apresentar os materiais a serem estudados e apresentar uma proposta para avaliar a incorporação de resíduo parafínico, como material de mudança de fase, e cascas de moldes cerâmicos, em substituição ao agregado natural em argamassas, desenvolvendo diferentes tipos de formulações de argamassa, verificando seu comportamento mecânico, físico e durabilidade.

Assim sendo, no final desta dissertação foi possível avaliar que esta, é uma solução viável tanto a incorporação das cascas de moldes cerâmicos em substituição do agregado natural, como a incorporação de cera parafínica, ambas resíduos provenientes da indústria de fundição, em argamassas.

Palavras-chave: Cascas de Moldes Cerâmicos, Materiais de Mudança de Fase, argamassa, resíduos de fundição, cimento

ABSTRACT

The use of industrial by-products in building materials, namely from the foundation industry, such as cascades of ceramic molds and paraffin waxes, will make it possible to reduce the consumption of natural raw materials and increase the energy efficiency of buildings, since these can be used as substitutes for natural aggregate (ceramic mold shells) and have thermal storage capacity (paraffin wax).

The use of Ceramic Mold Shells in mortars has been studied with the aim of complementing or replacing the conventional aggregates already used in civil construction, due to their resistance when incorporated into the mortar, obtaining results similar to natural sand, a solution that becomes interesting due to encourage a circular economy.

The incorporation of PCMs (Phase Change Materials) in mortars has been studied with the aim of regulating the temperature inside buildings, due to their ability to absorb and release energy, which allows an improvement in energy efficiency in buildings.

From this incorporation, which already has some studies carried out, the interest arose in studying the behavior of the mortar when built together with paraffin waxes, a solution that becomes interesting due to the possibility of reusing waste in a mortar that can allow the regulation of the temperatures and a significantly lower cost.

The objective of this dissertation is to present the materials to be considered and to present a proposal to evaluate the incorporation of paraffinic receiving, as a phase change material, and ceramic mold shells, replacing the natural aggregate in mortars, developing different types of formulations of mortar, verifying its mechanical, physical behavior and durability.

Therefore, no final dissertation was able to assess whether this is a viable solution for both the incorporation of ceramic mold shells in place of natural aggregate, and the incorporation of paraffinic wax, both residues from the foundry industry, in mortars.

Keywords: Ceramic Mold Shells, Phase Change Materials, mortar, foundry residues, cement

INDICE

1	CAPÍTULO I: Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia de Investigação	4
1.4	Organização e descrição dos capítulos	5
2	CAPÍTULO II – Estado da Arte	6
2.1	Desenvolvimento Sustentável	6
2.2	Economia Circular	7
2.3	Indústria de fundição	10
2.3.1	Indústria de fundição de precisão	12
2.4	Materiais de Mudança de Fase (PCM)	15
2.4.1	Classificação do PCM	16
2.4.2	Incorporação do PCM	18
2.4.3	Problemas associados a aplicação do PCM	20
2.4.4	Melhorias do desempenho do PCM	21
2.5	Aplicação de PCM em argamassas	21
2.6	Aplicação de resíduos de fundição e PCM em argamassas e betões	22
3	CAPÍTULO III – Procedimento Experimental	24
3.1	Materiais utilizados na preparação das argamassas	24
3.1.1	Cimento	24
3.1.2	Areia Natural	24
3.1.3	Cascas de moldes cerâmicos	25
3.1.4	Cera Parafínica	26
3.1.5	Superplastificante	28
3.1.6	Água	29
3.2	Massa Volúmica dos materiais	29
3.3	Composições e Formulações da Argamassa	29
3.4	Procedimentos e Ensaio	30
3.4.1	Preparação da matéria-prima	30
3.5	Análise granulométrica	34
3.5.1	Caracterização das argamassas	34

4	CAPÍTULO IV – Análise e discussão de resultados	43
4.1	Trabalhabilidade.....	43
4.2	Massa volúmica	44
4.3	Absorção de água por capilaridade.....	45
4.4	Absorção de água por imersão	45
4.5	Resistência a flexão.....	46
4.6	Resistência a compressão	47
4.7	Comportamento de durabilidade face ao gelo degelo	48
5	CAPÍTULO V – Conclusão e trabalhos futuros	50
5.1	Conclusão.....	50
5.2	Trabalhos Futuros	51
6	CAPÍTULO VI - Bibliografia	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama da metodologia de investigação	4
Figura 2 – Esquema de funcionamento da EC [22]	8
Figura 3 - Os diferentes sectores de um processo de fundição com moldação em areia. [28].....	11
Figura 4 – Etapas do processo de fundição [35] [24].	13
Figura 5 - - Classificação dos materiais de mudança de fase. [44]	16
Figura 6 – Aplicação de PCM nos edifícios. [51].....	22
Figura 7 - CIMPOR CEM II/BL-32.5N [55].....	24
Figura 8 – Curva granulométrica da areia natural.....	25
Figura 9 - Cascas já lavadas com a granulometria pretendida.....	25
Figura 10 - Curva granulométrica das cascas de moldes cerâmicas.....	26
Figura 11 - Grãos de resíduos de moldes cerâmicos (cascas): a) Ampliação 100x; b) Ampliação 1000x [43].....	26
Figura 12 - Grãos provenientes de cera parafínica moídos em diferentes granulometrias.	27
Figura 13 Grão de cera parafínica: a) Ampliação 100x; b) Ampliação 1000x [44]	28
Figura 14 - Curva granulométrica dos grãos de cera parafínica utilizada no estudo	28
Figura 15 - Superplastificante MasterGlenium Sky 617 da BASF.....	28
Figura 16 - PCM e CMC: Processamento das cascas de moldes cerâmicos e da cera parafínica para granulometria pretendida.....	30
Figura 17 - Granulometria dos materiais durante o processo de peneiração: a) cera parafínica; b) cascas moldes cerâmicos	31
Figura 18 - Procedimentos para obtenção de massa volúmica segundo a NP 954 [57].	31
Figura 19 – Ensaio de trabalhabilidade por etapas.	34
Figura 20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Moldagem dos provetes b) Revestimento com silicone; c) Ensaio em curso.	36
Figura 21 - Ensaio de absorção de água por imersão.	37

Figura 22 - Ensaio para determinação da resistência à flexão – Marcação da distância entre apoios. .	38
Figura 23 - a) Lloyd LR50 K Plus em preparação; b) Lloyd LR50 K Plus após rotura do provete.	38
Figura 24- Máquina de compressão ELE após rotura do provete.....	39
Figura 25 - Ciclo de temperaturas no ensaio gelo-degelo, Cunha et al. [44]	40
Figura 26 - Colocação dos provetes no equipamento de ensaio.	41
Figura 27 - – Relação Água/Ligante das argamassas	43
Figura 28- Massa volúmica das argamassas	44
Figura 29 Resultados da absorção de água por capilaridade.....	45
Figura 30 – Absorção média de água por imersão	46
Figura 31 – Resistência aos 28 dias.	47
Figura 32 – Resistência à compressão.....	48
Figura 33 – Comportamento de durabilidade face ao gelo degelo	48
Figura 34 – Provetes após os 56 ciclos do ensaio face ao gelo degelo.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de PCM orgânicos [42].....	17
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens de PCM inorgânicos [42].....	18
Tabela 3 - - Vantagens e desvantagens de misturas eutéticas [42].....	18
Tabela 4 - Constituintes minoritários das ceras parafínicas [53].....	27
Tabela 5 – Massa volúmica dos materiais.....	29
Tabela 6 - Formulação das argamassas (kg/m ³).	29
Tabela 7 - Planificação das medições do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	36
Tabela 8 - Planificação das medições do ensaio de gelo-degelo.	42
Tabela 9 – Perda de massa em % das argamassas.	49

CAPÍTULO I: Introdução

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu na segunda metade do século XX, quando o ser humano começou a ter consciência do estado de degradação do meio ambiente, em função das suas políticas de atuação. O contínuo crescimento da população mundial, o aumento do consumo de matérias-primas, os impactos produzidos pela poluição e a crescente degradação do meio ambiente, são fatores responsáveis pela condução a um desenvolvimento social, ambiental e económico com baixo valor de sustentabilidade [1]. Em 1987, surge pela primeira vez a expressão de desenvolvimento sustentável, no relatório de Brundtland [2]. No qual, o Desenvolvimento Sustentável foi definido como, o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades. Esta definição tem por base o princípio de que o Homem deve gastar os recursos naturais de acordo com a capacidade de renovação dos mesmos, de modo a evitar o seu esgotamento.

O desenvolvimento sustentável encontra-se assim intimamente ligado a três dimensões: económica, social e ambiental. Devendo existir um equilíbrio entre as três dimensões, procurando desta forma, uma harmonia entre as mesmas. Atualmente, a dimensão económica apresenta uma maior robustez, seguida da dimensão social e em detrimento da dimensão ambiental. Desta forma, torna-se urgente uma mudança no comportamento humano, visando uma maior preocupação com as dimensões desfavorecidas [3].

A introdução desta nova filosofia na indústria da construção, originou uma mudança de pensamento, existindo agora uma preocupação com a qualidade e funcionalidade dos edifícios. A introdução destas problemáticas, levou o setor da construção a caminhar no sentido de obter essencialmente uma construção de qualidade, proporcionando conforto aos seus utilizadores.

Neste estudo, pretende-se valorizar dois resíduos industriais (ceras parafínicas e cascas de moldes cerâmicos) atualmente depositados em aterro. Sendo que, se pretendem utilizar como substitutos do agregado natural, contudo é importante referir que a cera parafínica possui capacidade de armazenamento térmico. A possibilidade de utilizar estes resíduos em argamassas para aplicações exteriores pode ser vista como uma possibilidade para o caminho

para uma construção mais ecológica, devido à reutilização de resíduos de fundição e com potencialidade de melhoria do desempenho das argamassas desenvolvidas do ponto de vista da redução do consumo de energia e de recursos naturais.

1.1 Enquadramento e motivação

A gestão de resíduos continua a ser um enorme desafio para as indústrias produtoras, mas é também uma enorme oportunidade para a indústria da construção, que pode reutilizar estes resíduos para produzir materiais de construção novos e funcionais, com baixo custo e impacto ambiental. Atualmente, os regulamentos ambientais são cada vez mais rigorosos, sendo que pode ser exigido que os resíduos sejam depositados em aterros cada vez mais distantes do local onde são gerados, aumentando assim os custos envolvidos nesta ação [4] [5].

Mais do que nunca, a sustentabilidade da construção e a proteção do meio ambiente são uma questão prioritária, que tem estado sob a atenção do governo e das autoridades. Assim, a indústria da construção começou a adotar medidas adequadas e responsáveis relativamente ao consumo de matérias-primas e ao tratamento e reutilização de subprodutos industriais [6] [7].

Por outro lado, nos dias de hoje assistimos também ao elevado ritmo de crescimento das áreas urbanas, a uma maior preocupação com o meio ambiente, a uma maior exigência no desempenho dos edifícios, nomeadamente no que diz respeito ao conforto térmico. Muitas vezes, este aumento de conforto térmico encontra-se relacionado com a utilização maioritária de fontes de energia não renováveis, que provocam graves impactos no meio ambiente. Recentemente, temos vindo a assistir a um aumento contínuo no custo da eletricidade e gás natural, sendo estas as principais fontes energéticas utilizadas para a climatização dos edifícios, que representam grande parte dos consumos energéticos verificados durante o período de utilização dos edifícios.

Nos dias que correm é reconhecido que a indústria da construção é uma grande consumidora de matérias-primas naturais, que acarretam não só o consumo de recursos naturais como também enormes consumos energéticos para a extração das mesmas.

Tendo em conta o exposto anteriormente, a utilização de subprodutos industriais em materiais de construção, nomeadamente provenientes da indústria de fundição, tais como as cascas de

moldes cerâmicos e as ceras parafínicas irá permitir diminuir o consumo a matérias primas-naturais e aumentar a eficiência energética dos edifícios, uma vez que estes podem ser utilizados como substitutos do agregado natural (cascas de moldes cerâmicos) e possuem capacidade de armazenamento térmico (cera parafínica). Desta forma, as ceras parafínicas provenientes da indústria de fundição podem ser consideradas um material de mudança de fase, de natureza orgânica.

Contudo, é importante referir que a possibilidade de desenvolver argamassas com elevado valor de sustentabilidade devido à incorporação de resíduos e à funcionalização das mesmas pela presença de materiais funcionais, deve ser acompanhada de um estudo do seu comportamento físico, mecânico e durabilidade, de modo a não comprometer o seu desempenho nos edifícios. Pois apenas argamassas com um bom desempenho poderão ter potencial para uma futura aplicação.

Mesmo tendo conhecimento da capacidade de armazenamento térmico da cera parafínica, e que esta pode ser considerada um material de mudança de fase, a avaliação do desempenho térmico das argamassas desenvolvidas não será âmbito desta dissertação.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consistiu no desenvolvimento de argamassas de revestimento exterior e interior com elevado valor de sustentabilidade, contribuindo para energia reutilização de resíduos de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, provenientes da indústria de fundição.

Para atingir este objetivo principal, foram delineados objetivos específicos, sendo estes:

- Avaliação da viabilidade técnica da incorporação de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica (PCM) em argamassas de revestimento exterior;
- Formulação das argamassas com incorporação de resíduos;
- Avaliação das propriedades físicas das argamassas desenvolvidas;
- Avaliação das propriedades mecânicas das argamassas desenvolvidas;
- Avaliação do comportamento face a ações de gelo-degelo das argamassas desenvolvidas.

A dissertação terá assim, um elevado contributo quer para o desenvolvimento do estado da arte quer para a evolução prática desta área de investigação e para a indústria da construção no geral, uma vez que permitirá reforçar a base científica do desenvolvimento de argamassas com incorporação de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, sendo esta uma área ainda muito pouco desenvolvida.

1.3 Metodologia de Investigação

A metodologia de investigação adotada neste projeto foi baseada em trabalhos experimentais. As várias propriedades dos materiais e argamassas foram determinadas através de normas portuguesas e europeias.

Inicialmente fez-se uma caracterização das matérias-primas constituintes das argamassas, sendo eles agregados (areia natural e cascas de moldes cerâmicos), ligantes e superplastificante.

Posteriormente, foram desenvolvidas as formulações das argamassas com incorporação de resíduos de fundição, moldagem dos provetes e após 28 dias iniciar os ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Foram sempre realizadas argamassas de referência, sendo elas 0%CMC, 100% CMC e argamassas com diferentes teores de cascas, tais como CM80PW20, CM60PW40, CM40PW60 e CM20PW80, sendo PW-Materiais de mudança de fase (PCM). Na figura 1 é possível verificar as o diagrama da metodologia de investigação.

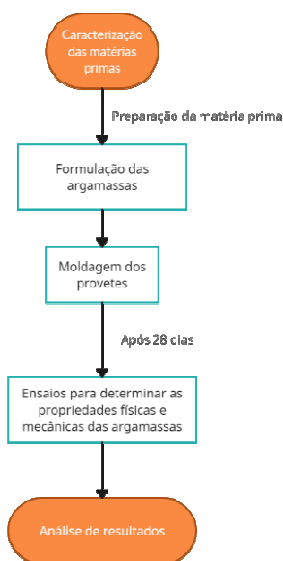


Figura 1- Diagrama da metodologia de investigação

1.4 Organização e descrição dos capítulos

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, nos quais serão abordados os conteúdos que se seguem:

- **Capítulo 1 - Introdução.** Neste capítulo é feito um breve enquadramento do tema e enunciados os objetivos desta dissertação, assim como a apresentação da metodologia de investigação e organização da dissertação;
- **Capítulo 2 - Estado de Arte.** Neste capítulo será descrito uma breve introdução sobre sustentabilidade, economia circular, indústria de fundição, o resíduo das cascas de moldes cerâmicos, materiais de mudança de fase e uma abordagem relacionada com a possibilidade de incorporação de resíduos de fundição em argamassas.
- **Capítulo 3 - Materiais utilizados e dimensionamento das composições. Procedimentos experimentais.** Aqui serão abordados os materiais utilizados, o processo de dimensionamento e a metodologia utilizada no fabrico das argamassas. Também serão abordados os diferentes ensaios realizados nas argamassas;
- **Capítulo 4 - Análise e discussão de resultados.** Os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados serão apresentados e analisados neste capítulo;
- **Capítulo 5 - Conclusão e trabalhos futuros a desenvolver.** Considerações finais sobre o estudo realizado e sugestões sobre futuros trabalhos a desenvolver nesta temática.

CAPÍTULO II – Estado da Arte

Este capítulo descreve uma breve introdução sobre sustentabilidade, economia circular, pobreza energética e os três grandes temas que este estudo aborda, sendo eles, argamassas, PCM e resíduos de fundição, que são materiais provenientes da indústria de fundição de precisão, sendo, portanto, um estudo que pretende acrescentar conhecimento à temática da valorização de resíduos e materiais de mudança de fase, uma vez que um dos resíduos que se pretende valorizar tem capacidade de armazenamento térmico.

2.1 Desenvolvimento Sustentável

A procura de uma construção com maior valor de sustentabilidade tem sido alvo de pesquisas e estudos na comunidade científica e da indústria da construção. O contínuo crescimento da população mundial, o aumento de consumo na matéria-prima, as severas degradações do meio ambiente e impactos de poluição refletem o baixo valor de sustentabilidade à medida que o desenvolvimento social e económico se vai estabelecendo.

O desenvolvimento sustentável encontra-se ligado a três dimensões: Económica, Social e Ambiental. Atualmente, a dimensão económica apresenta a liderança, seguido a social e em detrimento da ambiental, tornando-se urgente uma mudança no comportamento humano.

A sensibilização para as alterações climáticas é uma questão importante para a União Europeia (UE) e que sempre esteve sob discussão por governos e autoridades durante as últimas décadas. Os edifícios na União Europeia podem emitir cerca de 36% dos gases com efeito de estufa (GEE) [8], e consomem 41% do total de energia final, tornando-se a indústria da construção o maior consumidor de energia da Europa. O elevado consumo de matérias-primas tem seu contributo por ser, algumas das quais raras e/ou não renováveis. Estima-se que aproximadamente 30 a 50% da utilização de materiais na Europa seja dedicada à construção de habitações, sendo que as principais são o ferro, alumínio, cobre, argila, cascalho, calcário, madeira e pedra [9].

Devido ao constante crescimento populacional mundial, atualmente, 7,9 mil milhões de habitantes e com a projeção de chegarmos a 9,6 mil milhões em 2050, previsão associada também a um aumento da esperança de vida [10]. As tendências de consumo para 2050 indicam para uma necessidade de extração de 180 mil milhões de toneladas de matérias-primas do planeta, oito vezes maior que as

extrações necessárias para o ano de 1970 [11], sendo que este valor representa o equivalente a quase três planetas Terra em recursos naturais [12] [13].

O Dia de Sobrecarga da Terra está relacionado com a necessidade da humanidade por recursos e serviços ecológicos, fornecendo-nos a data em que a humanidade utilizou e excedeu todos os recursos biológicos que consegue regenerar naquele ano. De 1971 a 2022 verificou-se que a Dia de Sobrecarga da Terra surgiu cada vez mais cedo, sendo que em 1971 foi em 25 de dezembro e em 2022 foi em 28 de julho [14]. Assim, ao longo dos últimos 51 anos, o Dia de Sobrecarga da Terra está a recuar apropriadamente 1 mês por década, o que nos leva a que atualmente sejam necessários cerca de 1,75 planetas Terra para satisfazer as necessidades anuais da humanidade.

O atual modelo de economia linear apresenta um elevado e ineficiente consumo de matérias-primas gerando uma grande quantidade de resíduos ao longo de toda a sua cadeia de valor, provocando altos custos para a gestão dos resíduos gerados e inutilizados [15], dificuldades para o alcance de metas ambientais. Por seu lado, o modelo circular de economia – que hoje representa apenas 9,1% da economia mundial [16] - objetiva preservar o capital natural ao manter os produtos e materiais em circulação por mais tempo, além de fomentar um sistema mais eficaz e também otimizar a produção de recursos através da reciclagem, reutilização, etc. [17] [13]. Espera-se que a libertação de GEE e o consumo de energia aumente devido à atual tendência de crescimento populacional e urbanização.

Uma vez que o sector da construção tem impactos económicos, ambientais e sociais, sua baixa pegada ecológica aumenta as preocupações. Desta forma, vários esforços têm sido feitos para mudar e melhorar o setor, que depende principalmente de sistemas de controle climático e construção com o uso de materiais que contribuam para a economia circular.

2.2 Economia Circular

O conceito da Economia Circular (EC) propõe um modelo com uma serie de princípios e práticas destinados fundamentalmente à economia, e que visam “fechar os ciclos”, reduzindo exponencialmente a necessidade de entrada de novos recursos naturais na linha de produção de alguns materiais, e a redução significativa das ineficiências e da eliminação permanente de resíduos e subprodutos. [13]

A EC surgiu por volta dos anos 1970 por meio da fusão das várias teses económicas, científicas e filosóficas (pensamento regenerativo, biomimética, *cradle to cradle*, economia de partilha e

upcycling, entre outras). Por isso, o seu desenvolvimento não pode ser atribuído apenas a um autor ou grupo de autores [13]. A economia circular foi mencionada pela primeira vez em 1977, no relatório de pesquisa para a Comissão Europeia, elaborado por W. Stahel e G. Reday, “The Potential for Substituting Manpower for Energy”, onde é abordada a visão de uma economia cíclica (“economy in loops” ou economia circular) e o seu impacto na criação de emprego, competitividade económica, poupança de recursos, prevenção do desperdício e geração de resíduos. [13].

Estes autores, embora reconhecendo a ausência de uma definição abrangente de Economia Circular, propuseram um conjunto de 4 grandes objetivos para mapear a sua definição, como um novo modelo económico baseado em ciclos regenerativos e restaurativos, visando principalmente dissociar o crescimento económico do esgotamento de recursos e degradação ambiental, aumentando a resiliência global do sistema, criando e preservando valor económico, ambiental e social para maximizar o bem-estar humano [18] [19].

Esta discussão aborda aspetos relativos à escassez de recursos, ao aumento das emissões de gases com efeito de estufa, à produção e acumulação de resíduos [18] [20].

A economia circular é uma temática emergente que tem sido amplamente reconhecida como tendo um imenso potencial de circularidade de recursos e desenvolvimento sustentável. Compreende estratégias de processamento de recursos sustentáveis que se centram num paradigma de “produzir, utilizar e reciclar”. O conceito integra atividades económicas com fatores ambientais de forma sustentável [21].

A economia circular procura imprimir na economia outros aspetos igualmente importantes para inspirar funcionamentos e processos mais circulares como demonstra a Figura 2.

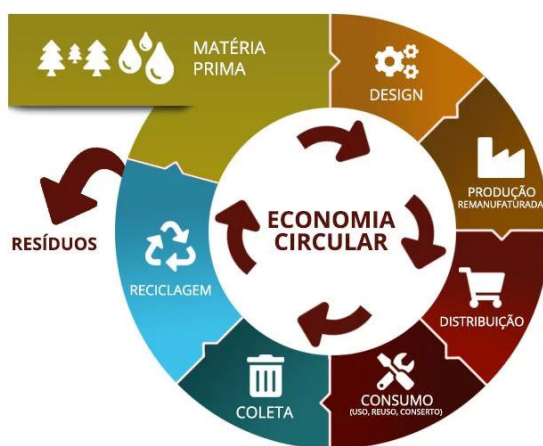


Figura 2 – Esquema de funcionamento da EC [22]

No entanto, é válido ressaltar que para a implementação bem-sucedida da economia circular, é necessário aprimorar, devido a alguns obstáculos e “barreiras”, pois requer muito mais do que apenas a diminuição dos resíduos através da reciclagem. Os principais obstáculos são [18], [23]:

- a deficiência de um modelo comercial claro;
- os encargos administrativos na mudança para um modelo comercial de economia circular;
- o fraco apoio da cadeia de fornecimento;
- a falta de conhecimentos técnicos e tecnológicos;
- as deficiências da cultura ambiental da empresa;
- a ausência de informação e a falta de troca de informação entre empresas,
- os inadequados fluxos e transportes de materiais;
- a falta de apoio governamental e legislativo adequado.

A escolha deste modelo, pode ser mais complexa logisticamente e dispendiosa de gerir, e as práticas ambientais podem aumentar a carga de trabalho administrativo devido a atividades mais exigentes de monitorização e comunicação de dados de desempenho ambiental [24]. Deste modo, exige possivelmente o envolvimento de peritos da empresa e novas abordagens de colaboração com outros intervenientes no mercado.

Com o objetivo de promover a economia circular, a União Europeia (EU) promoveu um plano que tem estratégias e políticas precisas, desde à área do consumo como na gestão de resíduos, salientando a possibilidade existente de utilização de resíduos, até à matéria-prima no mesmo ou noutros processos de produção.

Portugal, no âmbito da União Europeia e das suas políticas, desenvolveu um plano de ações para promover a economia circular - o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR) - implementado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Uma vez que o principal objetivo do PNGR é o desenvolvimento ambientalmente sustentável, torna-se importante caracterizar e estudar a implementação da economia circular no tecido industrial português, e compará-lo com indústrias semelhantes em países europeus [24] [20].

No entanto, há falta de investigação sobre as motivações, os conhecimentos, a adoção e as sugestões para promover a economia circular nas empresas portuguesas. Por se tratar de um processo que tem que ser incorporado nos costumes já tradicionalmente estabelecidos, este conceito é aplicado em Portugal principalmente para a gestão de resíduos, embora existam alguns modelos de negócio que aplicam conceitos de reutilização (por exemplo, a indústria da cortiça).

A Economia Circular é apoiada por organizações portuguesas e os resultados mostram que é considerada como uma questão estratégica e relevante para a sua rentabilidade e criação de valor. Além disso, o seu potencial pode ser melhorado através de uma abordagem multidisciplinar, considerando outras dimensões que têm impacto no desempenho organizacional, tais como Qualidade, Saúde e Segurança no Trabalho [24].

A indústria da construção devido às grandes quantidades de betão e de argamassas que aplica na construção e reabilitação dos edifícios tem uma enorme capacidade de reutilizar resíduos, sejam estes provenientes da própria indústrias (resíduos de construção e demolição) ou provenientes de outras indústrias, podendo estes substituir parte do agregado ou parte do ligante. Sabe-se que atualmente são necessários mais de 48 bilhões de toneladas de agregados na indústria da construção, associados à produção de betão e argamassas [25]. Por outro lado, a continua exploração de agregado naturais não é sustentável [26]. Pelo que a indústria deve cada vez mais necessita de apostar na reutilização de subprodutos industriais, como matérias-primas para a produção de materiais de construção.

2.3 Indústria de fundição

A fundição é um processo metalúrgico para fabrico de peças sólidas, a partir do metal em estado líquido e solidificação num processo de moldagem. Neste processo industrial existem vários sectores produtivos bem diferenciados: a moldagem, a fusão, o vazamento do metal fundido, a desmoldagem e os acabamentos (decapagem, rebarbagem, etc.) [27]. Na figura 3 é possível identificar os diferentes processos de fundição.

Em Portugal, os resíduos mais comuns das indústrias de fundição são as areias de fundição, as escórias de fundição e as poeiras de forno a arco elétrico. Um resíduo fundido também abundante, mas com menos conhecimento dos investigadores são as cascas de moldes cerâmicos. É comprovado ao decorrer dos anos que este setor gera uma grande quantidade de resíduos sólidos. Devido à sua

complexidade, representam enormes perdas económicas e impactos ambientais, uma vez que as reutilizações desses resíduos são bastante complexas.

O incentivo da utilização de subprodutos e resíduos industriais, tais como areia de fundição, escória de fundição e cascas de moldes cerâmicos, pode apresentar melhorias significativas no consumo energético relacionado com a exploração de matérias-primas naturais e na melhoria do desenvolvimento ambiental.

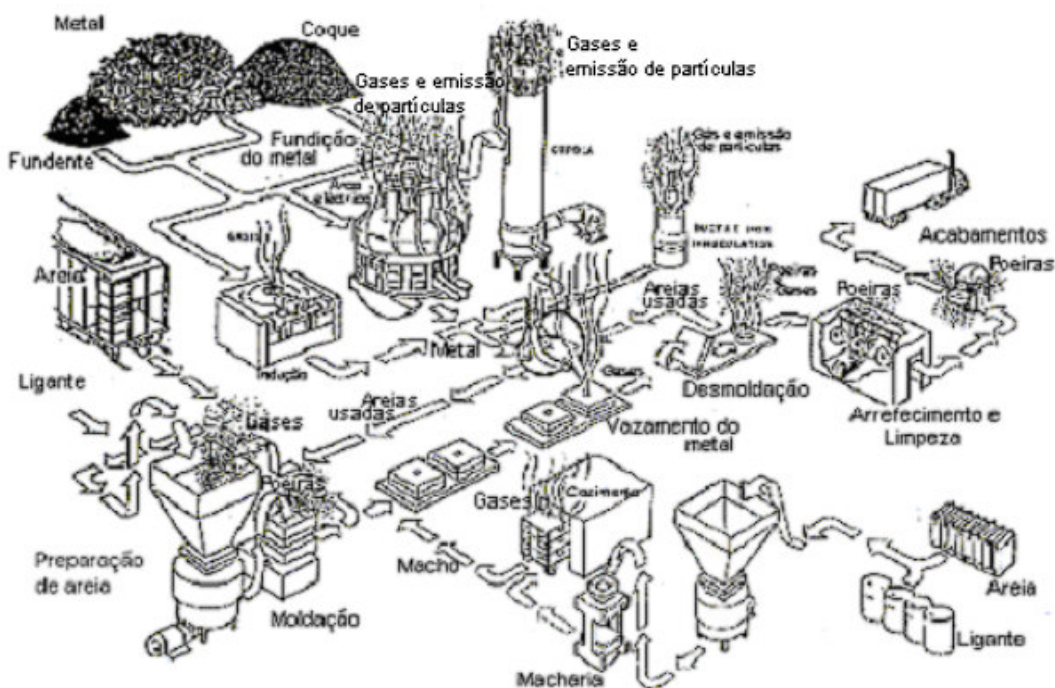


Figura 3 - Os diferentes sectores de um processo de fundição com moldação em areia. [27]

A nível mundial, estima-se que existam aproximadamente 35000 indústrias de fundição em funcionamento, com uma produção anual de 90 milhões de toneladas de resíduos de fundição. Prevê-se que mais de 10 milhões de toneladas de resíduos de fundição sejam descartados em todo o mundo, causando graves problemas ambientais, sociais e económicos. Neste momento, menos de 30% dos resíduos de fundição são reciclados sendo o restante depositado em aterros [28]. No passado, a sua deposição em aterro foi bem-sucedida, mas devido ao aumento destes custos e às preocupações ambientais e políticas, esta medida tem vindo a tornar-se também um grave problema [29]. Assim,

tendo em consideração o enorme consumo de matérias-primas na indústria da construção, é essencial a exploração, até ao esgotamento de todas as possibilidades, da utilização de subprodutos industriais como matéria-prima para a produção de materiais de construção.

2.3.1 Indústria de fundição de precisão

O processo de fundição de precisão está em crescente evolução, principalmente por dar importância aos desafios tecnológicos na área de qualidade e redução de custos de fabricação, assim como acompanhada pela crescente necessidade de peças metálicas de design mais complexo e elevados requisitos de acabamento. Com base neste tipo de fundição é possível obter peças metálicas com excelente precisão dimensional, alta qualidade superficial, elevada liberdade de desenho e detalhes numa variável gama de metais e ligas metálicas ferrosas e não-ferrosas, eliminando uma série de operações de soldagem e encaixes [30], [31]. Estas vantagens permitem oferecer peças com exigências para o mercado da indústria automóvel, ferroviária, aeronáutica, têxtil, alimentícia, agrícola, médica, odontológica, entre outras [32]– [33]. As etapas do processo de fundição de precisão, são representadas na (Figura 4) [34], [30], [35], [24].

As etapas podem ser caracterizadas por [24]:

1. Produção da matriz do modelo: O projeto da peça e a fabricação da matriz consiste num molde bipartido da peça no qual a cera é injetada;
2. Injeção dos modelos em cera: A injeção de cera fundida é realizada em uma matriz, geralmente de metal, com a cavidade da peça. A matriz é um molde onde a cera é injetada numa temperatura entre 40 e 80 °C a uma pressão entre 3 e 100 kgf/cm²;
3. Montagem da árvore: Realiza-se a colagem dos modelos em um canal de descida de cera, pelo método de soldagem da cera onde é usado uma espátula ou metal aquecido ou através de chama gasosa. As peças em cera solidificadas, quando pequenas são montadas em árvore/cacho;
4. Fabricação do molde ou casca cerâmica: A aplicação de camadas de material cerâmico sobre molde, inicia-se com a ocorrência da imersão do cacho no banho de lama cerâmica. Em seguida, é drenada para retirar o excesso e formar uma camada uniforme. Posteriormente, ocorre a imersão em uma cama com partículas fluidizadas ou é estucada com partículas refratárias granuladas na camada

molhada de material cerâmico. A camada cerâmica fina forma a superfície do molde reproduzindo seus detalhes. A operação de revestimento e endurecimento é repetida até que atinja a dureza pretendida para o molde;

5. Remoção da cera e calcinação: Quando o molde cerâmico estiver pronto, deve ser pré-aquecido em fornos com temperatura entre 900 e 1200 °C, durante 1 a 3 horas. A cera deve ser retirada do interior do molde em material cerâmico, tornando-se oco, essa remoção pode realizar-se pelo método de autoclave e queima ao fogo. Posteriormente, o molde é aquecido para a sua sinterização e calcinação. A calcinação ocorre para a remoção de umidade e resíduos de material orgânico presente na lama;

6. Fusão e vazamento: Ocorre a fusão do material, logo o molde cerâmico é preenchido. Em seguida, realiza-se o ajuste de composição, em forno de indução, elétrico ou a gás. O vazamento do metal fundido no interior do molde, é feito por gravidade ao ar, sob vácuo ou centrifugado.

7. Limpeza das peças, acabamento e inspeção: o molde é quebrado manualmente ou mecanicamente por um equipamento vibratório após solidificação do metal. Posteriormente, realiza-se a limpeza com jato de areia ou limpeza química, para eliminar os restos do molde. Por último, as peças são removidas do canal central/árvore por meio de corte em serra ou disco abrasivo, qualquer saliência restante deixada pelos canais é removida por lixamento [34], [24].

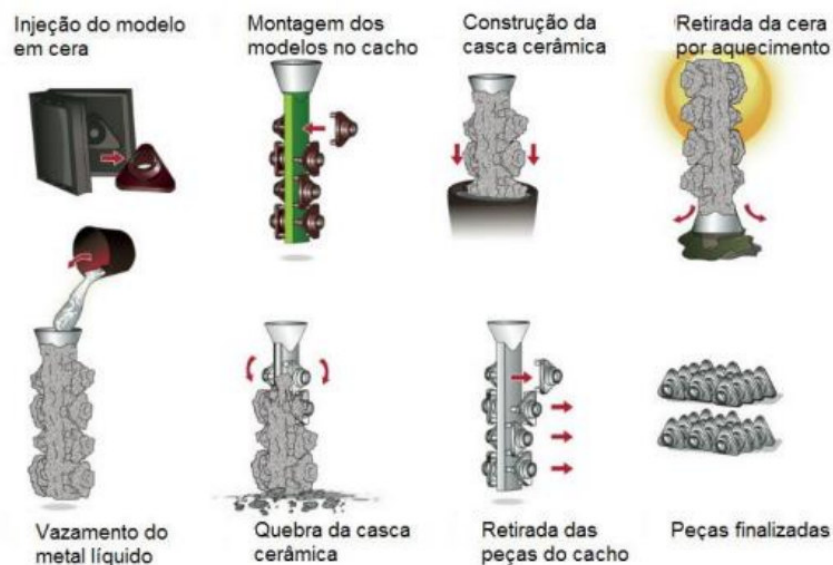


Figura 4 – Etapas do processo de fundição [34] [24].

Em suma, a fundição de precisão consiste em aplicar lama com pó cerâmico e partículas de material refratário granulado, em volta de um modelo consumível, usualmente de cera [36]. Ou seja, inicialmente as peças a serem fabricadas são produzidas em cera parafínica, sendo posteriormente revestidas com várias camadas de materiais cerâmicos. Após a conclusão do molde cerâmico este é colocado em fornos para permitir a cozedura do molde e retirar a cera parafínica do interior do mesmo. Desta forma, a cavidade para receber o metal fundido fica livre no interior do molde e a peça a produzir pode ser finalmente moldada. É de notar que, durante o processo produtivo a cera parafínica e o molde cerâmico apenas são utilizados uma única vez, sem qualquer possibilidade de reincorporação num processo produtivo seguinte. Assim, o resíduo de cera parafínica é obtido durante a cozedura do molde cerâmico e o resíduo de cascas de moldes cerâmicos são obtidos no processo de desmoldagem das peças metálicas. É de notar que neste tipo de fundição podem ser produzidas de pequenas dimensões, com cerca de 1,5 mm, a peças de grandes dimensões com um comprimento superior a 1000 mm e peso superior a 300 Kg [36]. É estimado que por cada tonelada de material fundido segundo este método se produza uma tonelada de cascas de moldes cerâmicos [37] e o volume correspondente às peças moldadas em cera parafínica.

A fundição de precisão também é conhecida como fundição por cera perdida, microfusão, *investment casting* ou *lost wax* [24].

Os moldes de cerâmica do processo de cera perdida, são produzidos por uma série de camadas feitas de diferentes materiais cerâmicos. [24], devido à grande quantidade de materiais que as compõem existe uma enorme dificuldade na sua separação [30], [38], [24].

A cascas de moldes cerâmicos pode chegar a ter mais de 15 camadas, dependendo do tamanho do cacho e do metal vazado. A espessura da casca varia de 5 a 16 mm [36] [24]. A última camada, normalmente denominada como camada de vedação, é deixada sem reboco (estruque) para evitar perdas de partículas da superfície do molde. Por causa disso, as cascas cerâmicas normalmente geradas no processo de fundição de precisão são visualmente um resíduo que tem coloração clara na parte externa da casca e uma fina camada escura na sua parte interna [39] [24].

Os materiais utilizados neste processo suportam o metal fundido a altas temperaturas e são totalmente inertes. Os materiais utilizados para a produção da casca são: refratários, aglomerantes, agentes de molhagem, antiespumantes, agentes nucleantes e outros aditivos [36], [30], [24].

Alguns estudos indicam que os principais constituintes das cascas de moldes cerâmicos resultantes do processo de fundição de precisão são a sílica- SiO₂ (49,22%), alumina- Al₂O₃ (40,92%) e zircônio- Zr (4,82%) [24], [36], [39], [38].

Foram desenvolvidos poucos estudos sobre a utilização de cascas de moldes cerâmicos do processo de cera perdida como substituto dos agregados naturais nas argamassas [24] [40].

No primeiro estudo realizado a incorporação de cascas de moldes cerâmicos, adotou-se o método de lavagem das cascas de moldes cerâmicos e a incorporação de fibras de poliamida. A seleção destes métodos de tratamento foi baseada na eliminação de possíveis componentes químicos capazes de alterar as propriedades das argamassas no estado fresco e no aumento do desempenho das propriedades mecânicas das argamassas no estado endurecido. Com base nos resultados experimentais, foi possível concluir que é possível realizar com sucesso a incorporação de cascas de moldes cerâmicos lavadas em argamassas com superplastificante. [24]

Portanto, este estudo contribui para um avanço no conhecimento. Uma vez, que grande parte dos estudos ligados aos materiais de construção se centram nas areias de fundição.

2.4 Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Os materiais de mudança de fase, denominados na língua inglesa de “Phase Change Materials” (PCM), possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta, o material atinge o seu ponto de fusão e transita de estado, neste caso do estado sólido para estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Por outro lado, quando a temperatura ambiente diminui e atinge o ponto de solidificação do PCM, muda novamente de estado, sendo neste caso do estado líquido novamente para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada. [41].

Existem diferentes processos de mudança de fase. Os materiais de mudança de fase podem ter uma transição da fase sólida para a líquida, da fase líquida para a fase sólida e da fase líquida para gasosa [42] [41]. A mudança de fase por evaporação possui uma elevada entalpia, contudo apresenta alguns problemas de aplicação, como uma elevada variação de volume e de pressão durante a transição de fase. Os materiais de mudança de fase com transição sólido-líquido são os preferidos para o armazenamento de energia térmica, uma vez que a sua alteração de volume não é tão significativa [41]. Por último, a transição sólido-sólido possui características muito semelhantes aos materiais de

mudança de fase com transição sólido-líquido, mas com uma capacidade de armazenamento de energia significativamente inferior [42] [41].

2.4.1 Classificação do PCM

Em 1983, surgiu a primeira classificação das substâncias utilizadas para armazenamento térmico. Estas são classificadas como orgânicas, inorgânicas e misturas eutéticas [41]. A Figura 5 representa esquematicamente os vários tipos de materiais de mudança de fase existentes, que são orgânicos, Inorgânicos e misturas eutéticas, com variações entre elas em ser ou não parafínicas, com sais hidratados e sais metálicos, e variações de misturas entre orgânico e inorgânico.



Figura 5 -- Classificação dos materiais de mudança de fase. [41]

A maioria dos estudos realizados utilizam materiais de mudança de fase orgânicos do tipo parafina, embora alguns tenham usado grânulos e muito poucos sais hidratados [41].

Levando em consideração a existência de vários tipos de materiais de mudança de fase, há uma variedade de vantagens e desvantagens associadas à utilização destes materiais. A Tabela 1 resume as vantagens e desvantagens do PCM de natureza orgânica. A Tabela 2 sintetiza as vantagens e desvantagens da utilização de PCM de natureza inorgânica e a Tabela 3 sintetiza as vantagens e desvantagens da utilização de misturas eutéticas. [41]

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de PCM orgânicos [41].

PCM ORGÂNICO

Vantagens	Desvantagens
Disponibilidade de uma ampla gama de temperaturas	Baixa condutibilidade térmica
Elevado calor latente de fusão	Menor densidade
Baixa capacidade de sub-arrefecimento da fase líquida	Menor capacidade volumétrica de armazenamento (menor entalpia)
Mudança de fase congruente	Inflamável (possível de utilizar aditivos anti-fogo)
Propriedades de auto-nucleação	Incompatível com recipientes plásticos
Baixa segregação	Variação de volume considerável
Boa taxa de nucleação	Custo considerável (as parafinas comerciais são baratas e acessíveis, as parafinas puras podem ser dispendiosas)
Estabilidade térmica e química	-
Não reativo e não corrosivo	-
Compatível com materiais de construção	-
Reciclável	-

No que diz respeito às suas propriedades químicas os materiais de mudança de fase não devem apresentar degradação após um grande número de ciclos, devem ser não corrosivos para os materiais de construção, não inflamáveis, não tóxicos e não explosivos, por razões ambientais e de segurança [41].

No que confere às suas propriedades ambientais os materiais de mudança de fase devem apresentar baixo consumo de energia incorporada, facilidade de separação de outros materiais, elevado potencial de reciclagem e baixo impacto ambiental [41].

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens de PCM inorgânicos [41]

PCM INORGÂNICO

Vantagens	Desvantagens
Maior capacidade volumétrica de armazenamento (maior entalpia)	Problemas de sub-arrefecimento da fase líquida
Elevado calor latente de fusão	Baixas propriedades de nucleação
Baixo custo	Mudança de fase incongruente
Facilmente disponível	Baixa estabilidade térmica
Elevada condutibilidade térmica	Problemas de separação do material durante a transição de fase
Não inflamável	Aplicação com possível necessidade de agentes de nucleação
Baixa variação de volume	Decomposição
Compatível com recipientes plásticos	Incompatível com alguns materiais de construção
Baixo impacto ambiental	Corrosivo para a maioria dos metais

Tabela 3 - - Vantagens e desvantagens de misturas eutéticas [41]

MISTURA EUTÉTICAS

Vantagens	Desvantagens
Temperatura de fusão adequada às necessidades	Propriedades termofísicas limitadas
Capacidade volumétrica de armazenamento (entalpia) superior aos PCM orgânicos	Odor forte
Mudança de fase congruente	-

No que confere o ponto de vista económico, este deve ser abundante, disponível e com baixo custo de aquisição, de forma a tornar-se uma solução competitiva com outros sistemas construtivos [41].

2.4.2 Incorporação do PCM

O PCM pode ser incorporado em materiais de construção através de diferentes métodos, sendo estes a incorporação direta, imersão, encapsulamento e estabilização [43], [41].

2.4.2.1 Incorporação direta

A incorporação direta, a escolhida para este estudo de dissertação, é o método mais simples e econômico para a utilização do PCM, sendo que o material é diretamente misturado com os materiais de construção durante a sua produção [41]. Contudo, pressupõe-se que apresente algumas desvantagens tais como a afetação dos produtos de hidratação, diminuição da resistência da ligação entre a pasta e agregado, diminuição das propriedades mecânicas e durabilidade [44] [41].

2.4.2.2 Encapsulamento

A incorporação por encapsulamento consiste em um pré-preparo por encapsulamento do PCM, garantindo-se que este não se desloca do local em que foi aplicado durante a fase líquida. A contenção do PCM deve atender a requisitos de resistência mecânica, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica, assim como agir como uma barreira de proteção. Deve também possuir superfície suficiente para a transferência de calor, assegurar a estabilidade estrutural e o fácil manuseio do material [41]. Existem duas principais formas de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento.

2.4.2.3 Imersão

Na incorporação por imersão, os produtos de construção são mergulhados em PCM líquido, de forma a absorver o material por capilaridade. No entanto, tal como na incorporação direta o PCM pode interferir com os produtos de hidratação dos materiais de construção e afetar as propriedades mecânicas e de durabilidade [41].

2.4.2.4 Estabilização

Neste método, o PCM e o material de apoio são fundidos e misturados a uma temperatura elevada seguida por um arrefecimento do material de suporte, até que a mistura se torne sólida. A estabilização do PCM é realizada com recurso a polietileno de alta densidade, estireno e butadieno. As principais vantagens deste método consistem no elevado calor específico, adequada condutibilidade térmica e manutenção da estabilização do PCM durante o processo de transição de fase, sem necessidade de recipiente de contenção [41], [43].

2.4.3 Problemas associados a aplicação do PCM

Mesmo efetuando uma seleção rigorosa do material de mudança de fase a aplicar, nem sempre este consegue cumprir todos os requisitos. Como problemas mais frequentes na aplicação dos materiais de mudança de fase podemos referir a separação de fases, o super-arrefecimento e a resistência ao fogo [41].

2.4.3.1 Separação da fase

Este é o tipo de problema que pode levar ao mau funcionamento dos materiais de mudança de fase. No caso das misturas eutéticas é importante verificar que a transição de fase acontece na mesma temperatura, pois caso contrário pode acontecer que um dos materiais constituintes esteja ainda no estado sólido e o outro no estado líquido, originando-se desta forma a separação de fases. Sendo assim, a composição original do material deixa de existir e o material não apresenta as propriedades de transição [41]. O aumento da viscosidade acontece devido a aplicação de materiais espessantes, mantendo desta forma os vários constituintes do conjunto [45].

2.4.3.2 Super-arrefecimento

Este consiste na solidificação do material uma temperatura inferior à temperatura de transição de fase [46], ou seja, durante o aquecimento o material de mudança de fase possui um bom comportamento, contudo no arrefecimento não consegue libertar a energia armazenada, sendo assim necessário que a temperatura exterior baixe significativamente para que o material complete o seu ciclo de funcionamento [41].

Este é o problema mais frequente em materiais de mudança de fase inorgânicos, os PCM orgânicos sobretudo com base em parafinas não apresentam o super-arrefecimento. No entanto, uma forma de amenizar este problema, consiste em adicionar agente de nucleação [41].

2.4.3.3 Resistência ao fogo

Os materiais de mudança de fase orgânicos, mais concretamente as ceras de parafina, apresentam alguns riscos de inflamabilidade o que levanta algumas preocupações com a resistência ao fogo dos produtos onde este material for aplicado [41]. Tem vindo a ser estudada uma solução que consiste na introdução de um material estabilizador com propriedades de retardador de chama, como por exemplo o hidróxido de magnésio e a sílica [41], [46], [47].

2.4.4 Melhorias do desempenho do PCM

Muitas vezes a aplicação de materiais de mudança de fase em placas, tubos ou outros elementos com baixa condutividade térmica, podem comprometer a eficiência do material [45] [41]. Existem algumas formas de se melhorar o desempenho dos materiais de mudança de fase tais como a adição de agentes de nucleação e espessantes, incorporação de aditivos de alta condutividade térmica, aditivos anti-fogo, aumento da superfície de contacto, impregnação de matrizes porosas e utilização de múltiplos PCM [41], [45], [46].

2.5 Aplicação de PCM em argamassas

A necessidade de aquecimento e arrefecimento de um determinado edifício, pode ser determinada com base na diferença obtida entre a temperatura de conforto e a temperatura efetiva no interior do edifício. Quanto menor for esta diferença, menores serão as necessidades de aquecimento e arrefecimento para o edifício em causa [48].

A utilização de materiais de mudança de fase para armazenamento térmico, surge pela primeira vez em 1975 [49]. Algumas das vantagens associadas à utilização desta tecnologia são a uniformização na solicitação da energia da rede, diminuindo assim a carga e eventual colapso dos sistemas de fornecimento; diminuição dos gastos com a fatura elétrica, pela deslocalização temporal do consumo energético para períodos de vazio; contribuição para o aumento do conforto térmico no interior dos edifícios, pelo armazenamento e utilização do calor associado à energia solar (em particular para o aquecimento durante o inverno) e do fresco associado à ventilação natural noturna (em particular para o arrefecimento durante o verão) reduzindo assim o recurso quer a aquecedores quer a sistemas de ar condicionado [50] [51]. A utilização de PCM em edifícios pode suavizar a flutuação da temperatura no interior dos edifícios, diminuindo assim o recurso a equipamentos de climatização. [48]

Na figura 6 é possível identificar a esquematicamente várias aplicações de PCM nos edifícios.

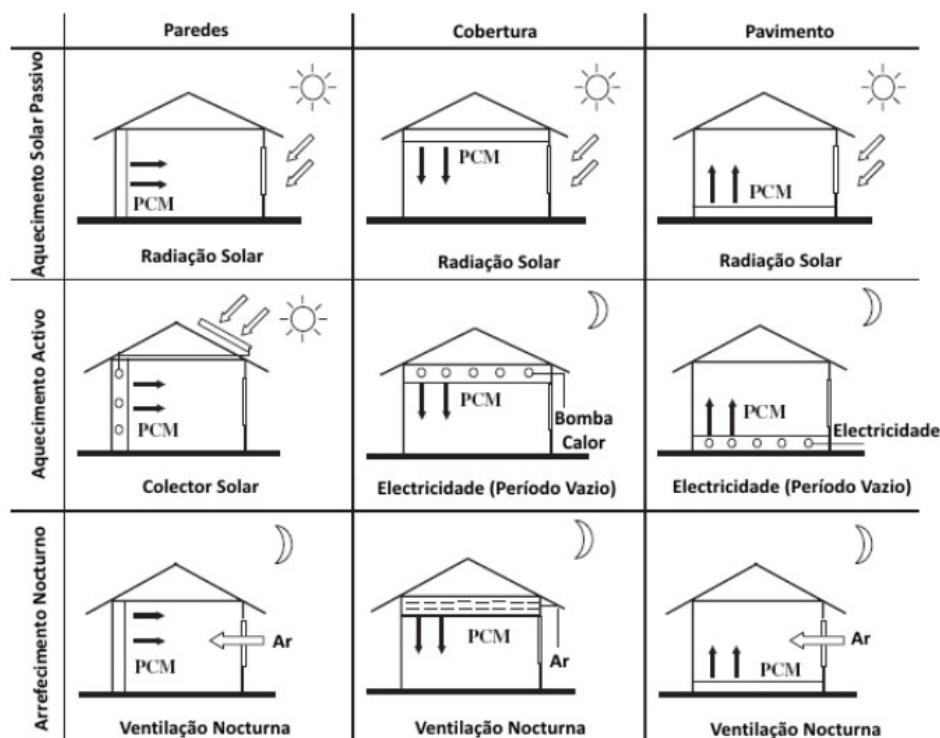


Figura 6 – Aplicação de PCM nos edifícios. [48]

2.6 Aplicação de resíduos de fundição e PCM em argamassas e betões

Estudos vem sendo desenvolvidos sobre a incorporação de cascas de moldes cerâmicos e materiais de mudança de fase nas argamassas e betões, apresentando as vantagens e desvantagens desta opção ao agregado natural.

Nas argamassas, o primeiro estudo realizado pelo Tavares et al. [52], onde foi avaliado a incorporação de cascas de moldes cerâmicos não lavados e cera parafínica, provenientes da indústria de fundição por precisão, observou-se uma ligeira redução da relação água/ligante à medida que se incorpora um teor mais elevado de cera parafínica. Relativamente à absorção de água por capilaridade e imersão foi possível observar uma redução das mesmas, com a incorporação de um maior teor de cera parafínica, podendo esta ser considerada um PCM, em substituição do agregado proveniente das cascas de moldes cerâmicos. Verificou-se ainda, que a incorporação de um maior teor de cera parafínica originou uma diminuição da resistência à flexão e compressão das argamassas estudadas, assim como o desenvolvimento de microfissuras na matriz das argamassas devido à ocorrência de reações alcalis-agregado.

Nos betões, concluiu-se por Jia Zhiyou [37] que a quantidade de resíduos de fundição tem grande influência no desempenho de trabalhabilidade do betão leve. Quando a quantidade de resíduos de fundição aumenta, a densidade do betão leve aumenta, assim como a resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Em termos de durabilidade, com a elevação da quantidade de resíduos, a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão e o coeficiente de difusão no estado não estacionário reduzem, e a probabilidade de corrosão e a taxa de corrosão do betão leve diminuem em relação ao betão leve de tradicional.

Considerando o objetivo desta dissertação, que é de avaliar o potencial de resíduos de fundição como agregados para argamassas, é necessário ter conhecimento dos problemas associados à utilização destes resíduos. No que diz respeito à incorporação das cascas de moldes cerâmicos existem alguns problemas, tais como a expansibilidade e consequente formação de microfissuras nas argamassas, que podem prejudicar a sua durabilidade devido à diminuição do desempenho mecânico e heterogeneidade das matérias-primas [24]. Como mencionado anteriormente, no estudo publicado pelo Tavares et al. [52], foi possível detetadas microfissuras na microestrutura das argamassas relacionadas com uma ligeira expansão durante o período de cura das argamassas. A existência deste fenómeno é justificada pela presença de sódio, potássio, cálcio e magnésio no agregado proveniente das cascas cerâmicas, devido a uma reação alcali-silica. Este fenómeno, solucionado pela lavagem das cascas, no qual apresentou resultados positivos após a técnica de lavagem avaliado por Costa et al. [24]. Em estudos, Costa et al. [24] afirma que o método de tratamento da lavagem das cascas de moldes cerâmicos demonstra ser muito eficaz e promissor, através da redução da absorção de água por capilaridade e imersão das argamassas, devido ao menor teor de vazios nas argamassas. A operação de lavagem permitiu eliminar vários compostos químicos que levaram à elevada expansibilidade das argamassas, conseguindo eliminá-las e resultando num aumento do desempenho mecânico das argamassas.

Neste trabalho, foi aplicada a técnica de lavagem das cascas de moldes cerâmicos, para o desenvolvimento das diferentes argamassas.

CAPÍTULO III – Procedimento Experimental

3.1 Materiais utilizados na preparação das argamassas

Neste capítulo são apresentados os constituintes das argamassas presentes neste estudo, sendo apresentados os valores decorrentes da caracterização das matérias-primas: Cimento Portland, resíduos de fundição (cascas dos moldes cerâmicos lavados sendo denominados no estudo como cascas e também cera parafínica utilizados nos procedimentos para a produção de produtos provenientes da indústria da fundição), superplastificante e água.

3.1.1 Cimento

O cimento usado no fabrico das argamassas foi o CIMPOR Cinza CEM II/B-L 32.5N, (Figura 7) que se caracteriza por um cimento de Calcário, constituído por clínquer e filer calcário, com massa volúmica de 3049 kg/m³.



Figura 7 - CIMPOR CEM II/BL-32.5N [53]

3.1.2 Areia Natural

Para os ensaios, escolheu-se uma areia de origem natural, com uma massa volúmica de 2569 kg/m³ e uma absorção de água de 1,19%. A informação da sua distribuição granulométrica é de extrema importância, uma vez que pode influenciar algumas propriedades das argamassas, tais como a porosidade, permeabilidade e resistências mecânicas. A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica da areia, tendo sido possível observar partículas com dimensões compreendidas entre 0,063 mm e a sua dimensão máxima corresponde a 4 mm.

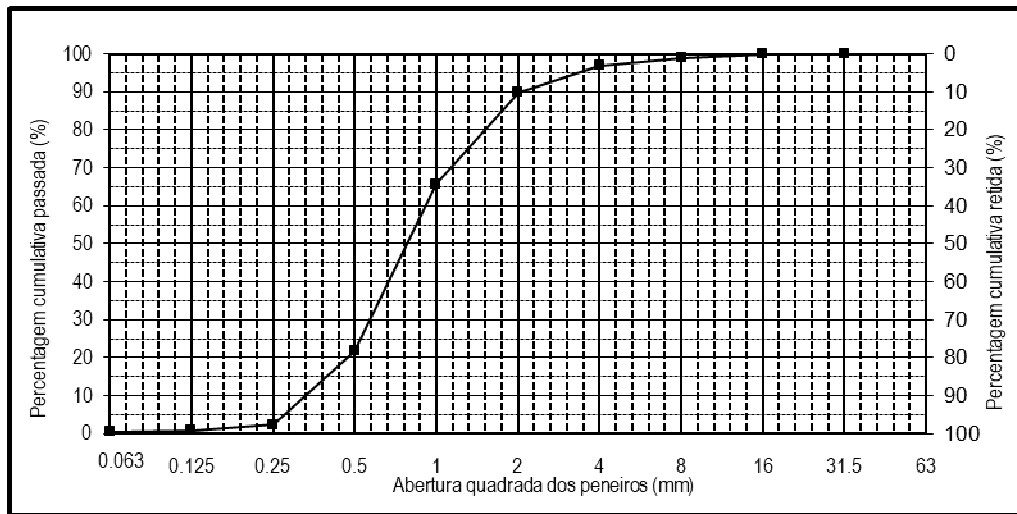


Figura 8 – Curva granulométrica da areia natural

3.1.3 Cascas de moldes cerâmicos

Para desenvolver as argamassas foram usados resíduos de fundição (cascas de moldes cerâmicos) que foram moídos com recurso a um triturador de pés de carneiro de modo a conseguir uma dimensão de grãos inferior a 4 mm, como pode ser identificado na Figura 9, com uma massa volúmica de 2630 kg/m³, tendo sido posteriormente lavados e apresentando uma absorção de água de 6,6 %.



Figura 9 - Cascas já lavadas com a granulometria pretendida.

A Figura 10 apresenta a distribuição granulométrica das cascas de moldes cerâmicos com lavagem, segundo NP EN 933-1-2014 [54], tendo sido possível observar uma dimensão de partícula compreendida entre 0,063 mm, com D10 corresponde a 187,5 µm, D50 corresponde a 1,25 mm e D90 corresponde a 3,8 mm.

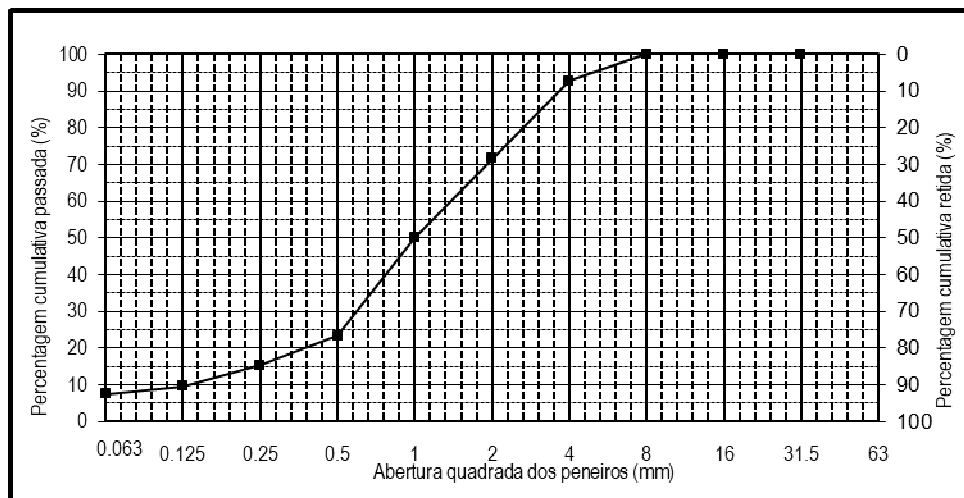


Figura 10 - Curva granulométrica das cascas de moldes cerâmicos

Com recurso ao microscópio eletrónico foi possível visualizar em pormenor os grãos das cascas (Figura 11). [52]

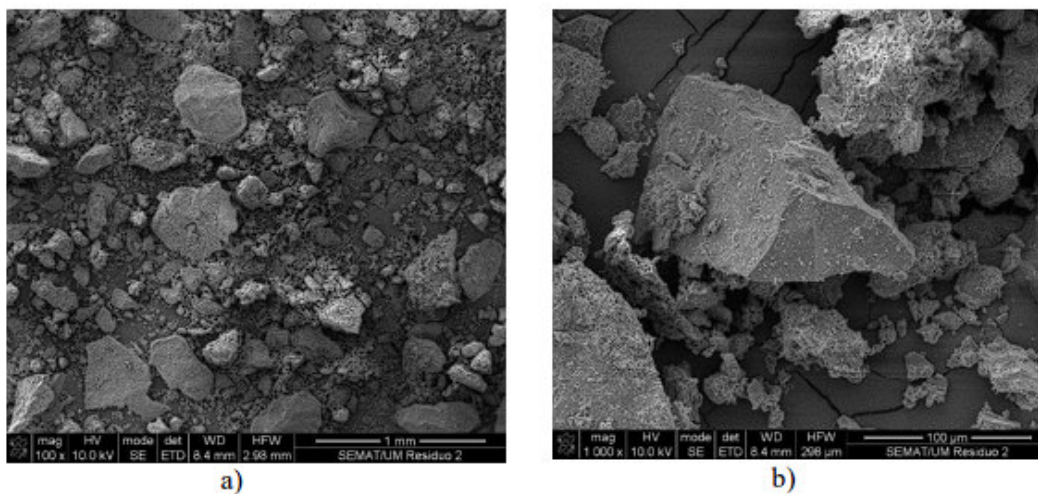


Figura 11 - Grãos de resíduos de moldes cerâmicos (cascas): a) Ampliação 100x; b) Ampliação 1000x [52].

3.1.4 Cera Parafínica

Para o desenvolvimento das argamassas, foi utilizada uma cera parafínica, proveniente da indústria da fundição, que posteriormente foi moída por um triturador de pés de carneiro para conseguir uma dimensão de grãos com dimensões inferiores a 4 mm, com uma massa volúmica de 1013 kg/m³ e absorção de água de 1,6 %. Esta parafina é um nanocosano, C₂₉H₆₀. A cera utilizada é pode ser

considerado um PCM de natureza orgânica (Figura 12), com temperatura de transição de cerca de 60°C.



Figura 12 - Grãos provenientes de cera parafínica moídos em diferentes granulometrias.

A tabela 4 exhibe os constituintes minoritários das ceras, obtidos por espectrometria eletrônica dispersiva, com recurso a um microscópio eletrônico de varredura, sendo que os componentes maioritários são o carbono e hidrogênio.

Tabela 4 - Constituintes minoritários das ceras parafínicas [52]

Elementos	(%)
Cálcio (Ca)	0,9
Sódio	0,4
Alumínio (Al)	0,2

Com recurso ao microscópio eletrônico foi possível visualizar em pormenor os grãos de cera parafínica (Figura 13) [41].

As ceras utilizadas, possuem capacidade de armazenamento térmico ao transitar do estado sólido para líquido e vice-versa. A Figura 14 apresenta a distribuição granulométrica da cera utilizada na realização das argamassas do estudo. As dimensões da partícula compreendida entre 0,003mm e 4mm.

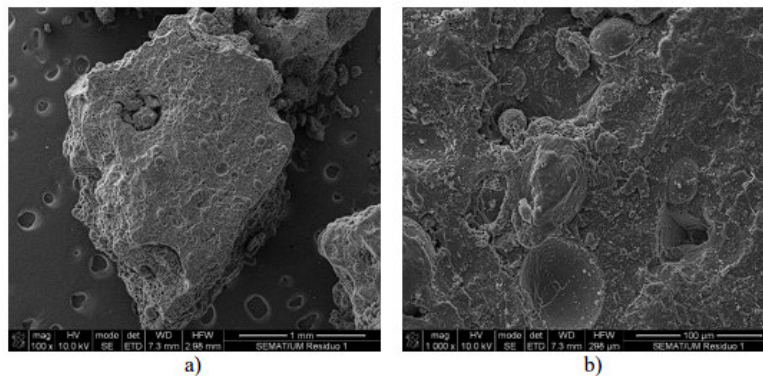


Figura 13 Grão de cera parafínica: a) Ampliação 100x; b) Ampliação 1000x [41]

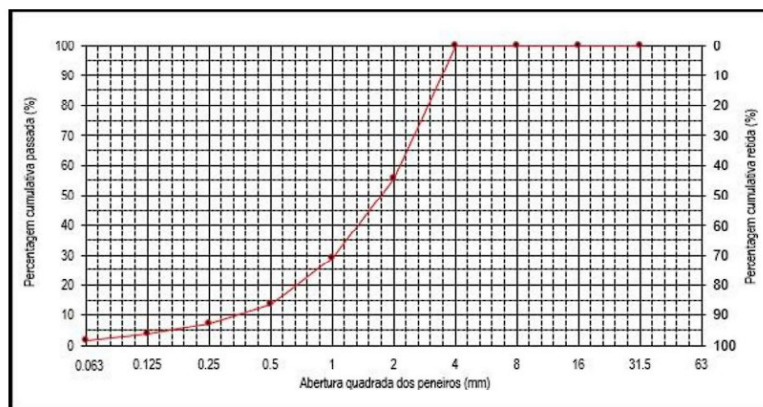


Figura 14 - Curva granulométrica dos grãos de cera parafínica utilizada no estudo

3.1.5 Superplastificante

Para o estudo da argamassa, foi utilizado um superplastificante MasterGlenium Sky 617 (Figura 15), comercializado pela BASF, com uma massa volúmica de 1041 kg/m^3 .



Figura 15 - Superplastificante MasterGlenium Sky 617 da BASF

3.1.6 Água

No fabrico de todas as argamassas e da lavagem das CMC, a água utilizada proveio da rede de abastecimento pública da Universidade do Minho, em Guimarães.

3.2 Massa Volúmica dos materiais

Na tabela 5 é possível identificar as massas volúmica dos materiais utilizados neste trabalho.

Tabela 5 – Massa volúmica dos materiais

Materiais	Massa Volúmica (kg/m³)
Materias de Mudança de Fase (PCM)	1013
Cascas de Moldes Cerâmicos (CMC)	2630
Areia Natural	2569
Cimento	3049
Superplastificante (Master Glenium Sky 617)	1041

3.3 Composições e Formulações da Argamassa

As composições formuladas apresentam-se na Tabela 6. Foram desenvolvidas 6 composições diferentes, sendo uma composição de referência (AN100) com incorporação de 100% de agregado natural, uma composição com incorporação de 100% de agregado constituído por cascas de moldes cerâmicos (CM100) e 4 composições com incorporação simultânea de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica (CM80PW20, CM60PW40, CM40PW60 e CM20PW80). Foram estudados diferentes teores cascas de moldes cerâmicos, sendo estes 20%, 40%, 60% e 80% de volume de agregado total e diferentes teores de cera parafínica sendo estes também 20%, 40%, 60% e 80% de volume de agregado total.

Foi fixada uma dosagem de ligante em 750 kg/m³ e de superplastificante de 7.5 kg/m³ tendo como base outros trabalhos de investigação já desenvolvidos de forma a dar continuidade aos mesmos [24].

Tabela 6 - Formulação das argamassas (kg/m³).

Composição	Cimento	Cascas	PCM	Areia	SP	Água
AN100	750	-	-	1225	7,5	273,7
CM100	750	1136	-	-	7,5	315,2
CM80PW20	750	699	175	-	7,5	305
CM60PW40	750	427	284	-	7,5	303
CM40PW60	750	234	351	-	7,5	285
CM20PW80	750	103	412	-	7,5	280

3.4 Procedimentos e Ensaio

Os trabalhos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

3.4.1 Preparação da matéria-prima

3.4.1.1 Preparação inicial

Neste estudo foram utilizados resíduos que carecem de transformação para poderem ser incorporados em argamassas. Os resíduos foram usados com a menor transformação possível, de modo, a tentar minimizar os custos necessários para o seu tratamento e utilização.

Para o estudo da argamassa pretendia-se, substituir o agregado natural por resíduos com uma granulometria similar. Assim, tanto as cascas de moldes cerâmicos (Figura 16, a), como as ceras parafínicas (Figura 16, b) foram processados para essa dimensão com recurso a uma trituradora pés-de-carneiro (Figura 16, c).

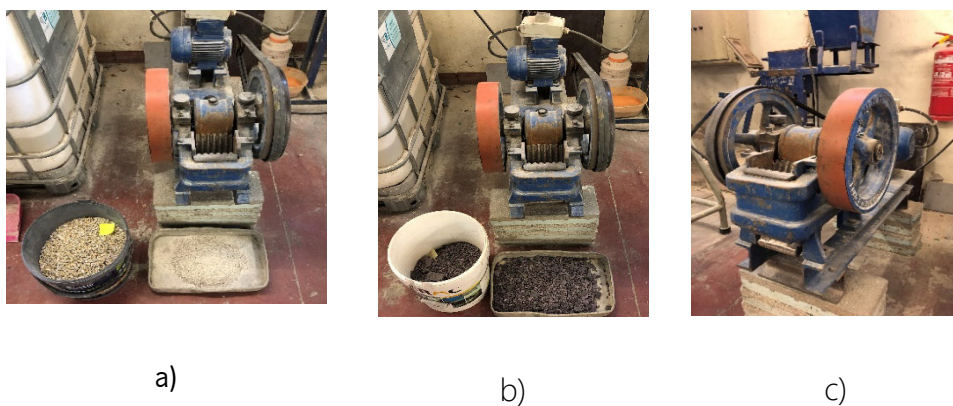


Figura 16 - PCM e CMC: Processamento das cascas de moldes cerâmicos e da cera parafínica para granulometria pretendida

Na Figura 17 é possível perceber as diferentes granulometrias das cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica a medida que o processo de trituração e peneiração.



Figura 17 - Granulometria dos materiais durante o processo de peneiração: a) cera parafínica; b) cascas moldes cerâmicos

3.4.1.2 Massa Volúmica

Para o estudo da massa volúmica, foi considerada a norma NP 954 [55] para as cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, sendo que para o cimento foi utilizada a especificação do LNEC E 64. [56] Relativamente à massa volúmica real do cimento, obtida de acordo com a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) E 64 [56]. Inicialmente, foi colocada uma amostra do cimento em estufa, a uma temperatura constante de 105°C, até se atingir a massa constante, ou seja, até eliminar qualquer humidade existente na amostra em estudo. Posteriormente, recorrendo à utilização de um funil encheu-se a ampola do voluminímetro com o líquido auxiliar, evitando molhar as paredes do balão graduado. Seguidamente, introduziu-se aos poucos a amostra de cimento com o auxílio ainda do funil. Por último, foi medido o volume de líquido auxiliar deslocado. Na Figura 18 ilustra-se parte do ensaio realizado.



Figura 18 - Procedimentos para obtenção de massa volúmica segundo a NP 954 [55].

Com base na expressão 1 foi calculada a massa volúmica real do cimento.

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

Em que:

γ - Massa volúmica real (kg/m³);

m - Massa do provete seco (kg);

V_1 - Valor lido no voluminímetro contendo somente o líquido auxiliar (m³);

V_2 - Valor lido no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e o provete (m³).

Para as cascas de moldes cerâmicos, a massa volúmica real foi determinada de acordo com a norma NP 954 [55]. Inicialmente, foi colocada uma amostra das cascas de moldes cerâmicos em estufa a uma temperatura de 105°C até se atingir a massa constante. De seguida, foi adicionada água à temperatura ambiente durante 24 h. Retirou-se a água e espalhou-se a amostra num tabuleiro metálico, secando a mesma com recurso a um secador, remexendo a amostra de modo que a secagem fosse uniforme. Posteriormente, encheu-se completamente o molde troncocónico com agregados, sem fazer pressão nas sucessivas camadas de enchimento. Seguidamente compactou-se o material com 25 pancadas do pilão, uniformemente distribuídas e sem exercer pressão além da resultante do seu peso próprio. De seguida, removeu-se o molde verticalmente, de modo que não se tocou com o mesmo no material moldado. Após obter a primeira moldagem, considerou-se que o provete tem as partículas saturadas sem água superficial, é então interrompido o processo de secagem, retira-se cerca de 500 g de amostra e submete-se a amostra sem perda de tempo ao ensaio. Introduziu-se a amostra no balão graduado, preenchendo-se o balão com água até próximo de 90 % da sua capacidade e agitando-se para libertar o ar retido pelo agregado. Completou-se o enchimento do

balão até ao traço de referência com água, anotando-se a sua massa. Seguidamente, forrou-se o peneiro com papel de filtro e colocou-se a água e agregado. Secou-se o material na estufa a 105 °C até massa constante, registando-se o valor. A diferença entre esta massa e a massa inicial do peneiro resulta na massa do provete seco. Por último, encheu-se o balão graduado com água até ao traço de referência registando-se a sua massa.

A massa volúmica do material impermeável das partículas, em gramas por centímetro cubico, foi calculada tendo em conta expressão 2:

$$\frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2} \quad (2)$$

A massa volúmica das partículas saturadas, em gramas por centímetro cubico, é calculada através da expressão 3:

$$\frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (3)$$

A massa volúmica das partículas secas, em gramas por centímetro cúbico, é obtida através da expressão 4:

$$\frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (4)$$

A absorção de água das cascas de moldes cerâmicos, em percentagem, foi obtida tendo em conta a expressão 5, segundo a especificação NP EN 1097-5 [57].

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

m_1 - Massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial (g);

m_2 - Massa do balão com o provete e água (g);

m_3 - Massa do provete seco (g);

m_4 - Massa do balão com água (g).

3.5 Análise granulométrica

O ensaio de determinação da curva granulométrica do agregado, foi realizado com base na norma portuguesa NP EN 933-1 [58].

3.5.1 Caracterização das argamassas

Após a preparação das argamassas, as várias composições foram sujeitas a diferentes ensaios, com vista à avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente: a trabalhabilidade, massa volúmica, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à flexão, resistência a compressão e comportamento face a ações de gelo-degelo.

3.5.1.1 Trabalhabilidade

O método da mesa de espalhamento, NP EN 1015-3 [59], é um ensaio de controlo de qualidade de argamassas frescas fundamental para garantir uma boa aplicação em obra tendo como objetivo determinar a consistência das argamassas desenvolvidas. Inicialmente, encheu-se um molde troncocónico com a argamassa, em duas camadas, compactando cada uma com 10 pancadas. Seguidamente, retirou-se o excesso do material no topo do molde e o próprio molde, tendo-se aplicado 15 pancadas, na razão de 1 pancada por segundo. Sendo o último passo, medir o diâmetro de espalhamento em duas direções perpendiculares entre si (Figura 19). O valor do diâmetro de espalhamento corresponde à média das duas medições, sendo que o ensaio foi considerado válido quando o valor resultante se encontrou compreendido entre 200 ± 5 mm.



Figura 19 – Ensaio de trabalhabilidade por etapas.

3.5.1.2 Massa volúmica

A massa volúmica das argamassas foi determinada tendo em consideração a sua massa e volume, segundo a expressão 6.

$$\gamma = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Em que:

γ - Massa volúmica da argamassa (kg/m³);

m - Massa da argamassa (kg);

v - Volume da argamassa (m³).

3.5.1.3 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi efetuado com base na norma europeia EN1015-18 [60], assim sendo foram moldados provetes prismáticos com dimensões 40×40×160 mm³ (Figura 20- a)) das várias composições em estudo. Após a moldagem, todos os provetes foram conservados durante 2 dias em sacos de polietileno, dentro da sala húmida, sendo posteriormente retirados dos sacos e desmoldados, mantidos na mesma sala durante mais 26 dias. Seguidamente, os elementos de ensaio foram colocados em estufa a uma temperatura constante de 60°C, até atingirem uma variação de massa inferior a 0.2% da massa total. Posteriormente, os provetes foram partidos, resultando duas metades. Em cada uma das metades dos provetes realizou-se a impermeabilização das faces laterais, com silicone, para assim limitar o contacto da água apenas na face inferior dos mesmos (Figura 20 b)). Por fim, colocaram-se todas as amostras em contacto com uma lâmina de água com altura de 5 a 10 mm. Em todos os provetes decidiu-se colocar em contacto com água as faces resultantes de operações de corte, para garantir desta forma que a face em contacto com a água possuía os canais capilares realmente presentes na argamassa em estudo, eliminando-se desta maneira o contacto da água com uma face mais rica em finos e conseqüentemente, com menos vasos capilares (Figura 20 c)), ou seja, permite

uma maior representatividade da matriz da argamassa. Na tabela 7 é possível verificar a planificação das medições do ensaio de absorção de água por capilaridade.

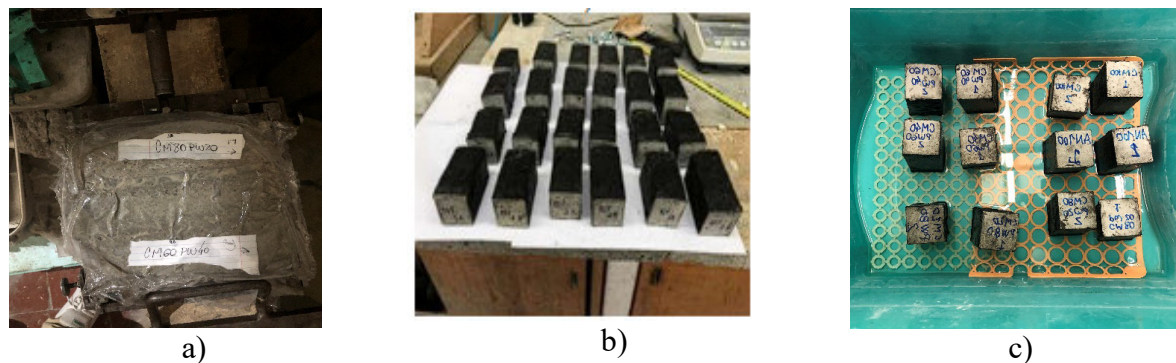


Figura 20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Moldagem dos provetes b) Revestimento com silicone; c) Ensaio em curso.

Tabela 7 - Planificação das medições do ensaio de absorção de água por capilaridade

Medição	Instante (min)	Instante (h)
1	0	0
2	10	0,17
3	30	0,5
4	60	1
5	90	1,5
6	159	2,65
7	240	4
8	414	6,9
9	1440	24

Os resultados obtidos permitem determinar o coeficiente de absorção capilar das diferentes argamassas em estudo. Este procedimento permitiu elaborar gráficos representativos da absorção capilar, expressando a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo. O coeficiente de absorção capilar foi determinado de acordo com a expressão 7.

$$C = 0.1 * (M_2 - M_1) \quad (7)$$

Em que:

C – Coeficiente de absorção capilar ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$);

M_2 – Massa do provete em contacto com a água no instante 90 minutos (g);

M_1 – Massa do provete em contacto com a água no instante 10 minutos (g).

3.5.1.4 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão das argamassas foi determinada segundo a especificação do LNEC E 394 [61]. Os ensaios foram realizados tendo por base provetes prismáticos com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, os quais foram submetidos ao corte, aos 28 dias (Figura 21). Numa primeira fase os provetes foram secos em estufa até chegar à massa constante. Seguidamente, os provetes foram colocados num recipiente, no qual se juntou água, até estarem completamente submersos. Foram realizadas medições sucessivas, intercaladas de 24 horas, até atingirem mais uma vez a massa constante, que é analisada quando a variação de massa é inferior a 0.1 % em 2 medições consecutivas, num intervalo de tempo de 24 horas. Antes de cada pesagem, o provete foi limpo com um pano humedecido, para assim remover a água superficial.

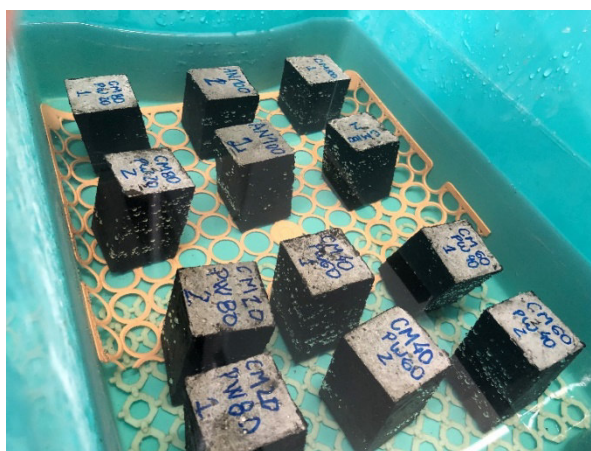


Figura 21 - Ensaio de absorção de água por imersão.

A absorção de água por imersão foi calculada segundo a expressão 8:

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

A – Absorção de água por imersão (%);

m_1 - Massa do provete saturado ao ar (g);

m_2 - Massa hidrostática do provete saturado (g);

m_3 - Massa do provete seco (g).

3.5.1.5 Resistência a flexão

Para determinar a resistência à flexão foram realizados em provetes prismáticos com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, segundo a norma EN 1015-11 [62]. Após a sua moldagem, todos os provetes foram conservados na sala húmida até à idade de cura de 28 dias. A resistência à flexão provém da aplicação de uma carga a meio vão do provete, até à sua rotura (Figura 23b). Os ensaios foram realizados com recurso à máquina universal LLOYD LR50K Plus (Figura 23a). Na Figura 22, observa-se a marcação da distância entre apoios etapa necessária conforme a norma EN 1015-11 [63].

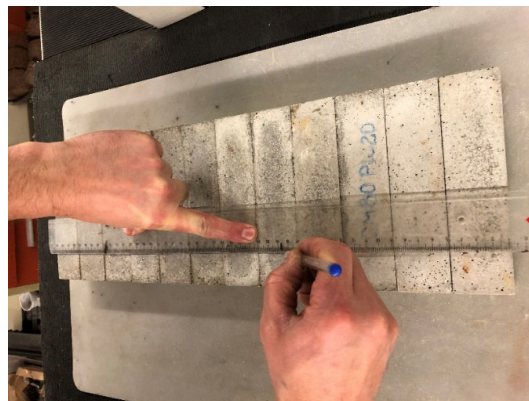


Figura 22 - Ensaio para determinação da resistência à flexão – Marcação da distância entre apoios.



(a)



(b)

Figura 23 - a) Lloyd LR50 K Plus em preparação; b) Lloyd LR50 K Plus após rotura do provete.

A determinação da resistência à flexão foi efetuada com controlo de força, a uma velocidade de 50N/s.

A grandeza foi determinada com base na expressão 9:

$$R_f = \frac{F \times l}{b \times d^2} \times 1,5 \quad (9)$$

Onde:

R_f – Resistência à flexão (MPa)

F – Carga de rotura (N)

l – Distância entre apoios (mm)

b, d – Altura e largura da base do provete (mm)

3.5.1.6 Resistência a compressão

Para obtenção da resistência à compressão foram realizados com as metades resultantes dos ensaios de flexão. Os mesmos foram ensaiados usando a máquina universal de compressão *ELE* Snº 1547-6-1419 (Figura 24), sendo realizado com controlo de força e a uma velocidade de 500 N/s, recorrendo a uma peça metálica, capaz de uniformizar a carga vertical.



Figura 24- Máquina de compressão ELE após rotura do provete.

A resistência à compressão foi determinada com base na expressão 10:

$$R_c = \frac{F}{b \times d} \quad (10)$$

Em que:

R_c - Resistência à compressão (MPa):

F – Carga de rotura (N)

b, d – Altura e largura da base do provete (mm).

3.5.1.7 Comportamento de durabilidade face ao gelo degelo

Os ensaios de gelo-degelo foram realizados com base na especificação europeia CEN/TS 12390-9 [64]. Para tal, foram moldados 5 provetes prismáticos, com dimensões 50×50×50 mm³ de cada composição em estudo. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi programado com uma lei de temperaturas em que, cada ciclo de gelo-degelo tem uma duração de 24h (Figura 25), tendo sido realizados um total de 56 ciclos. Durante cada ciclo de gelo-degelo a temperatura varia entre 24°C e -18°C.

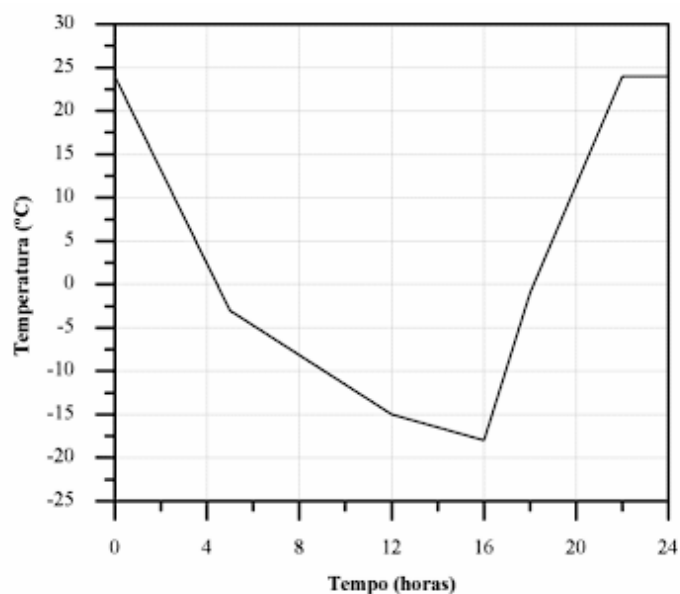


Figura 25 - Ciclo de temperaturas no ensaio gelo-degelo, Cunha et al. [41]

Os elementos de teste foram saturados e posteriormente submetidos aos ciclos de temperatura. Durante o ensaio cada provete foi colocado em contacto com uma lâmina de água, com o objetivo de o provete absorver a água perdida por evaporação e também pela ventilação do próprio equipamento, garantindo-se desta forma que os poros dos provetes estariam sempre saturados. O equipamento foi também programado com uma humidade relativa constante de 90%, de forma a evitar grandes perdas de massa por evaporação da água. Na Figura 26 é possível observar a colocação dos provetes no equipamento para a realização do ensaio.



Figura 26 - Colocação dos provetes no equipamento de ensaio.

A quantificação da perda de massa dos provetes sujeitos aos ciclos de temperatura foi realizada através da realização de sucessivas pesagens. Estas pesagens foram feitas de acordo com um plano de pesagens previamente estabelecido, com início no primeiro ciclo gelo-degelo, o que levou ao cumprimento dos intervalos de tempo definidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Planificação das medições do ensaio de gelo-degelo.

Medição	Ciclo	Instante (h)
1	0	0
2	1	24
3	6	144
4	16	384
5	22	528
6	30	720
7	37	880
8	44	1056
9	48	1152
10	56	1344

CAPÍTULO IV – Análise e discussão de resultados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos referentes às propriedades físicas das argamassas, sendo elas, a trabalhabilidade, a massa volúmica, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência a flexão, resistência a compressão e comportamento face ao gelo-degelo.

4.1 Trabalhabilidade

Estes ensaios tiveram como objetivo determinar para cada argamassa produzida a quantidade de água de amassadura, ou seja, a determinação da razão água/ligante necessária para se atingir o diâmetro de espalhamento especificado de acordo com os procedimentos descritos no procedimento de ensaio 3.3.2.1, tendo apenas sido considerado válido quando este se apresentou compreendido entre 200 ± 5 mm. Na Figura 27, apresentam-se os resultados obtidos.

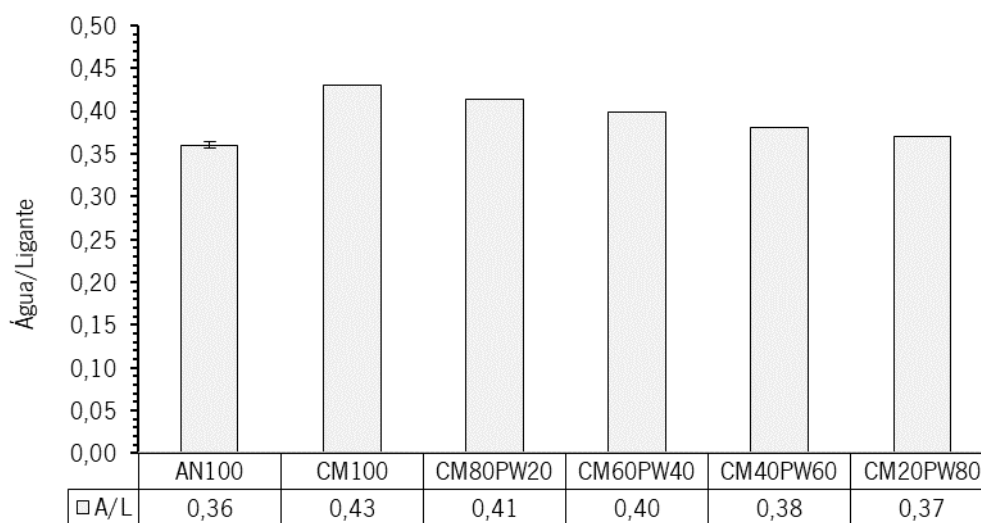


Figura 27 - - Relação Água/Ligante das argamassas

É possível observar que as argamassas com de cascas cerâmicas lavadas apresentam uma maior necessidade de água, de modo a apresentar uma boa trabalhabilidade, o que se encontra justificado com a maior capacidade de absorção das cascas de moldes cerâmicos, comparativamente com o agregado natural e com a cera parafínica. A incorporação de cacas de moldes cerâmicos e cera parafínica resultou num aumento na relação água/ligante em relação à argamassa com 100% de agregado natural (AN100), em 3,7% para a mistura CM20PW80, 4,1% para a mistura CM40PW60,

6,5% para a mistura CM60PW40 e 11,38% para a mistura CM80PW20. A incorporação de 100% de CMC lavadas apresenta um aumento de 15,73% na relação água/ligante em relação à argamassa AN100 (areia natural). Este comportamento mais uma vez, pode ser justificado pela maior capacidade de absorção das cascas de moldes cerâmicos comparativamente ao agregado natural. Contudo, verifica-se que a substituição de cascas de moldes cerâmicos por cera parafínica origina uma diminuição na relação água/ligante, sendo este comportamento justificado pela menor absorção da cera parafínica em relação às cascas de moldes cerâmicos.

4.2 Massa volúmica

A massa volúmica das diferentes composições de argamassas foi determinada conforme representado na Figura 28. Foi possível verificar uma diminuição da massa volúmica das argamassas com o aumento do teor de cascas de moldes cerâmicos em comparação a composição com incorporação de 100% de areia natural. Sendo possível constatar que, em comparação a argamassa de referência (AN100), a composição CM100 sofreu uma redução de 8%, a composição CM80PW20 de 17%, a composição CM60PW40 de 26%, a composição CM40PW60 de 31% e a composição CM20PW80 de 34%. O comportamento observado é expectável e é motivado pela baixa massa volúmica das ceras parafínicas, as cascas de moldes cerâmicos possuem valores semelhantes há argamassa de referência.

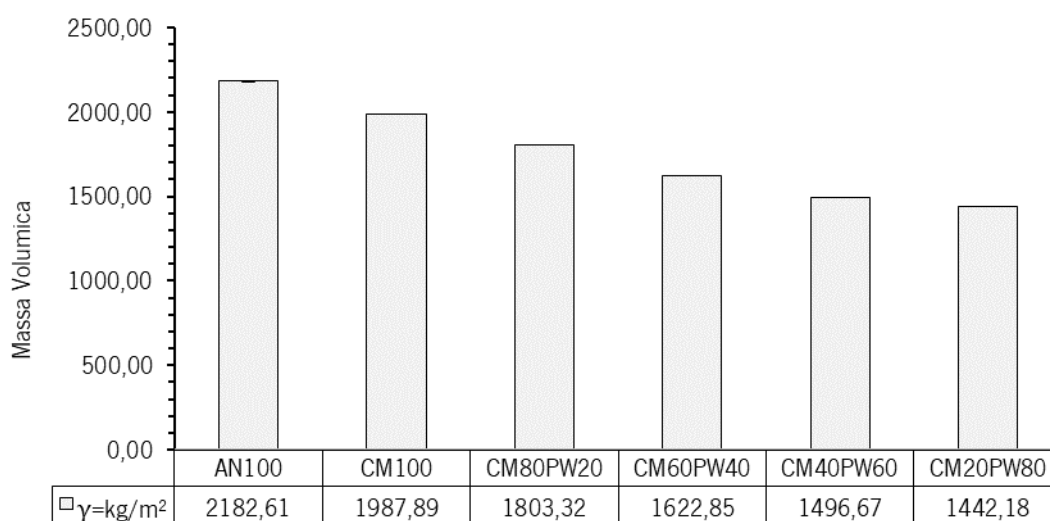


Figura 28- Massa volúmica das argamassas

4.3 Absorção de água por capilaridade

A capacidade de absorção de água das argamassas possui uma grande influência na sua durabilidade, sendo esta característica capaz de determinar a facilidade de penetração de agentes agressivos no seu interior. Este fenómeno depende de vários fatores, dos quais se destacam a relação água-ligante, finura do ligante, idade, condições de cura e trabalhabilidade [24]. A absorção de água por capilaridade encontra se essencialmente relacionada com a quantidade de poros de pequenas dimensões.

Na Figura 29 apresenta a de absorção de água por capilaridade durante 24 horas, tendo sido possível observar as alterações de acordo com a incorporação de moldes cerâmicos.

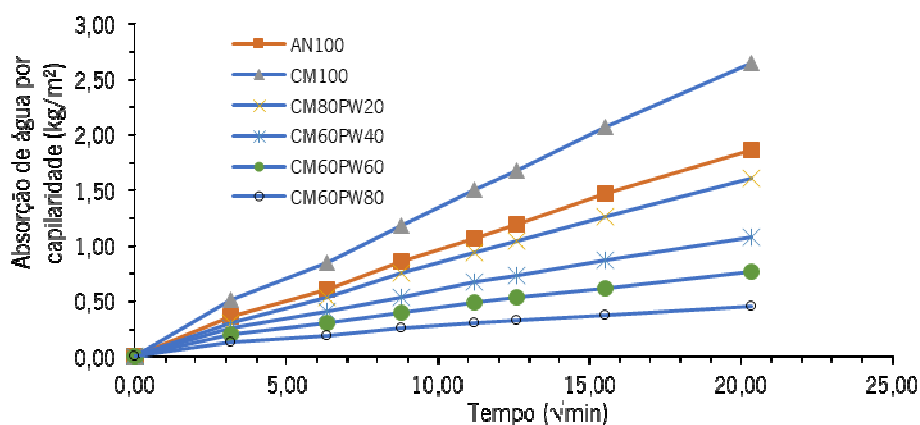


Figura 29 Resultados da absorção de água por capilaridade.

Este coeficiente de absorção de água por capilaridade foi determinado com base na expressão da EN 1015-18 [60] (expressão 7). Em comparação a argamassa de referência (AN100) com o valor de 1,86 kg/m², a argamassa com CMC100 absorveu 2,65 kg/m² de água, este aumento está relacionado a porosidade das cascas. Seguido as demais composições que obtiveram os valores de 1,60 kg/m² para mistura CM80PW20, de 1,08 kg/m² para a composição CM60PW40, de 0,76 kg/m² para a composição CM40PW60 e de 0,45 kg/m² para a composição CM20PW80. Esta diminuição de absorção é devido a cera parafínica ter uma menor capacidade de absorção, diferente das cascas de moldes cerâmico que há uma maior absorção.

4.4 Absorção de água por imersão

Pode-se relacionar a absorção de água por imersão com a existência de poros de maiores dimensões. Segundo os resultados obtidos na Figura 30 foi possível verificar que em comparação a argamassa de

referência AN100, a argamassa com incorporação de 100% de agregado reciclado (CMC100) obteve um aumento de 44% na absorção de água por imersão, mais uma vez justificado pela maior absorção de água do agregado. Contudo, a incorporação de cera parafínica originou uma diminuição na absorção de água por imersão, sendo que a argamassa CM80PW40 apresentou uma diminuição de cerca de 9%, a argamassa CM60PW40 apresentou uma diminuição de 43%, a argamassa CM40PW60 apresentou uma diminuição de 60% e por último a argamassa CM20PW80 apresentou uma diminuição de cerca de 75%, comparativamente à argamassas com 100% de cascas de moldes cerâmicos. Este fenómeno encontra-se também associado à presença de uma menor quantidade de água utilizada na amassadura para as argamassas com maior teor de incorporação de cera parafínica, também neste trabalho identificado como um PCM de natureza orgânica e maior quantidade de água utilizada na amassadura para as argamassas com maior teor de incorporação de cascas de moldes cerâmicos.

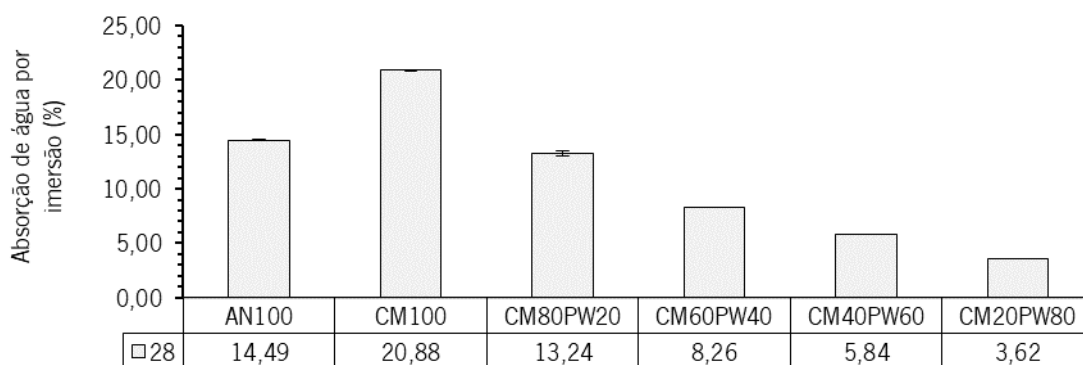


Figura 30 – Absorção média de água por imersão

4.5 Resistência a flexão

O comportamento à flexão foi determinado segundo a norma EN 1015-11 [63]. De acordo com os valores obtidos foi possível observar um comportamento distinto das distintas argamassas estudadas. A incorporação de cera parafínica e cascas de moldes cerâmicos, originou uma diminuição da resistência à flexão. A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para a resistência à flexão aos 28 dias das argamassas com as composições AN100, CM100, CM80PW20, CM60PW40, CM40PW60 e CM20PW80.

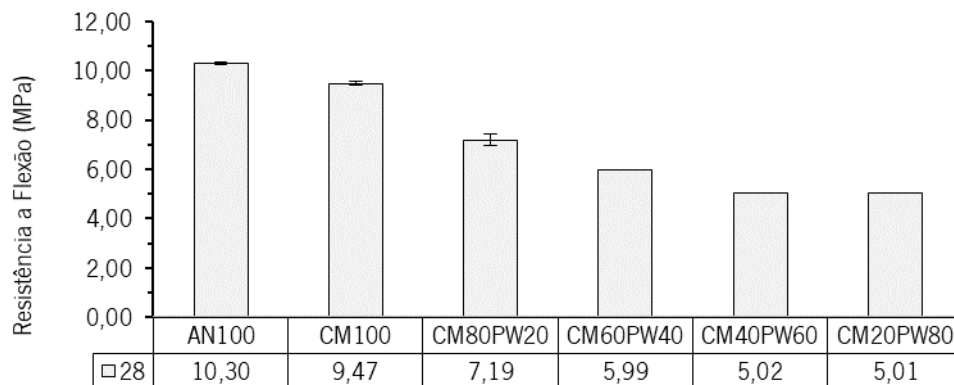


Figura 31 – Resistência aos 28 dias.

Os resultados obtidos para a resistência à flexão da composição CM100, é 7,6% inferior em relação à argamassa de referência AN100. No que diz respeito à incorporação de diferentes teores de cera parafínica observou-se uma diminuição da resistência à flexão de cerca de 30% para a argamassas CM80PW20, 42% para a argamassa C60PW40, 51% para a argamassa CM40PW60 e cerca de 51 para a argamassa CM20PW80. Este comportamento pode ser justificado pela menor resistência das partículas de cera de parafina comparativamente às partículas de areia natural ou cascas de molde cerâmico.

4.6 Resistência a compressão

A resistência à compressão foi determinada aos 28 dias de cura dos elementos de ensaio, sendo estes provenientes das metades provenientes do ensaio da resistência à flexão.

Na Figura 32 encontram-se representados os valores obtidos para a resistência à compressão das diferentes argamassas estudadas.

No que diz respeito aos valores obtidos da resistência à compressão destas argamassas, conclui-se que o aumento do teor de cera parafínica nas argamassas originou uma diminuição da resistência à compressão. Sendo que a composição CM80PW20 apresentou uma diminuição da resistência à compressão de cerca de 49%, a composição CM60PW40 uma diminuição de cerca de 60%, a composição CM40PW60 uma diminuição de cerca de 68% e a composição CM20PW80 uma diminuição de cerca de 71%. Por outro lado, efetuando uma comparação entre a argamassa com incorporação de agregado 100% natural (AN100) foi possível verificar que a incorporação de 100% de cascas de moldes cerâmicos (CM100) originou também uma diminuição da resistência à compressão

de cerca de 17%. Os comportamentos apresentados encontram-se associados à maior necessidade de água das argamassas com incorporação de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, relativamente à argamassa com incorporação de agregado natural. Por outro lado, a menor resistência mecânica das argamassas com um maior teor de cera parafínica pode ser justificada pela menor aderência das partículas de parafina à matriz cimentícia, assim como pela menor resistência destas partículas comparativamente com o agregado natural e com as cascas de moldes cerâmicos.

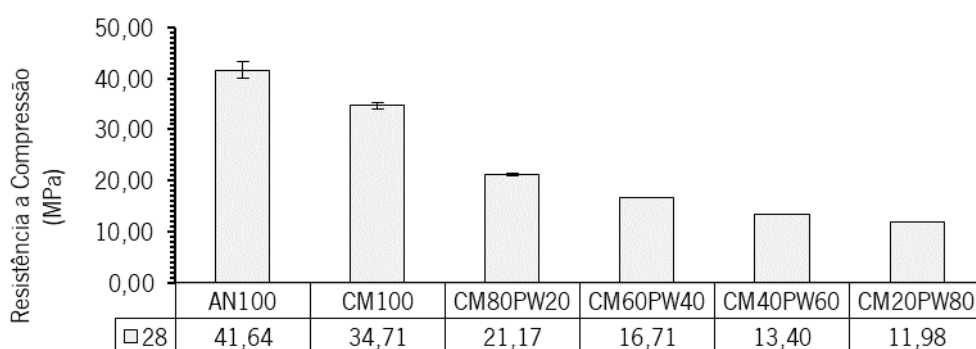


Figura 32 – Resistência à compressão

4.7 Comportamento de durabilidade face ao gelo degelo

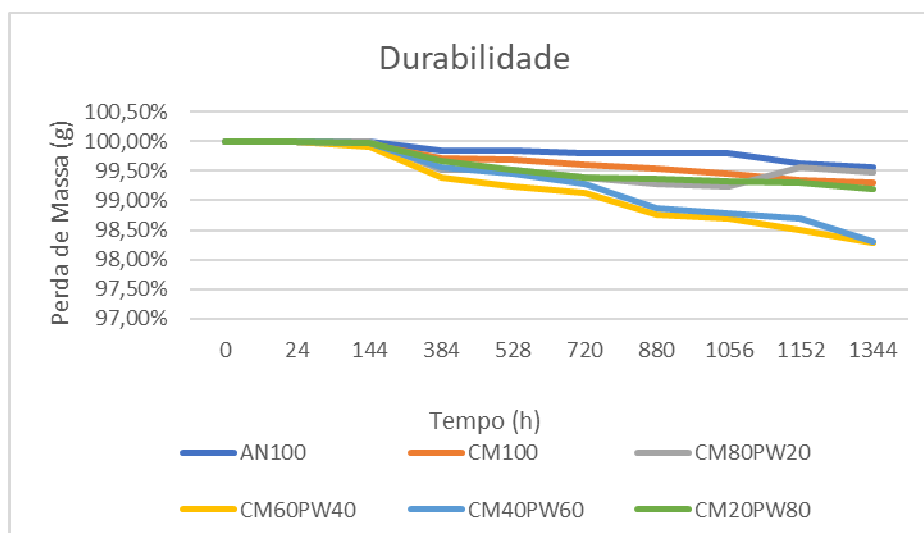


Figura 33 – Comportamento de durabilidade face ao gelo degelo

Como é possível observar (Figura 33), ao fim dos 56 ciclos, em comparação a argamassa de referência AN100 as composições CM100 obteve uma perda final de 0,10%, a argamassa CM80PW20 de 0,10%, a argamassa CM60PW40 de 1,27%, a argamassa CM40PW60 de 1,29% e a argamassa CM20PW80 de 0,37%. Este resultado e variações encontram-se relacionadas com o menor desempenho mecânico das

argamassas com maior teor de cera parafínica. É de notar que ao longo dos ciclos do ensaio, se verifica, tal como expectável, um aumento na perda de massa dos provetes, ou seja, na degradação sofrida. É possível avaliar a massa dos provetes desde o início dos ciclos até o fim do último ciclo na Tabela 9.

		Composições					
tempo (h)		AN100	CM100	CM80PW20	CM60PW40	CM40PW60	CM20PW80
	0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	24	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	144	100,00%	99,96%	100,00%	99,91%	99,97%	99,97%
	384	99,85%	99,71%	99,53%	99,39%	99,56%	99,68%
	528	99,84%	99,70%	99,52%	99,23%	99,45%	99,52%
	720	99,80%	99,61%	99,40%	99,12%	99,28%	99,40%
	880	99,80%	99,53%	99,29%	98,75%	98,87%	99,37%
	1056	99,80%	99,46%	99,23%	98,70%	98,79%	99,32%
	1152	99,63%	99,35%	99,57%	98,50%	98,69%	99,30%
1344	99,57%	99,30%	99,47%	98,28%	98,30%	99,20%	

Tabela 9 – Perda de massa em % das argamassas.

As composições que tiveram a maior influência desta avaliação de durabilidade foram as CM40PW60 e CM60PW40, devido a trabalhabilidade da cera influenciar na resistência mecânica das cascas.

Como é possível observar, em comparação as argamassas com 100% de cascas de moldes cerâmicos e 100% de areia natural, praticamente não houveram degradações, ou seja, possui comportamentos semelhantes, portanto, o comportamento face ao gelo degelo a substituição do agregado natural pelas cascas de moldes cerâmicos, é viável, assim como a incorporação das ceras parafínicas.

Em modo geral, as perdas sofridas não foram muito significativas (Figura 34).



Figura 34 – Provetes após os 56 ciclos do ensaio face ao gelo degelo.

CAPÍTULO V – Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

Como objetivo, esta dissertação teve o propósito de desenvolver argamassas com substituição de agregado natural, por resíduos provenientes da indústria da fundição, sendo eles as cascas de moldes cerâmico e cera parafínica foi possível avaliar a sua viabilidade para aplicação no setor da construção civil, mais concretamente no revestimento de paredes exteriores, estudando as suas propriedades físicas e mecânicas. Este é o segundo estudo realizado sobre incorporação de resíduos de fundição, no entanto, esta dissertação comprometeu-se em desenvolver um método aprimorado de incorporação, contribuindo para o estado de conhecimento da temática. Foi possível concluir que a reutilização de ceras parafínicas e resíduos de moldes cerâmicos lavadas resultaram em alterações nas propriedades endurecidas das argamassas desenvolvidas. É importante referir que os resíduos de ceras parafínicas incorporadas nas argamassas podem ser considerados PCM orgânicos, e os mesmos podem ser adquiridos por um valor residual, incentivando a aplicação da economia circular, o que torna o estudo atraente como uma argamassa com grande potencial, tal como acontece com as cascas de moldes cerâmicos

Quanto à trabalhabilidade, observou-se uma ligeira redução da relação água/ligante à medida que se incorpora um teor mais elevado de cera parafínica e se reduz a incorporação de cascas, sendo possível afirmar que este fenómeno acontece devido à capacidade inferior de absorção de água da cera.

Relativamente à absorção de água por capilaridade e imersão foi possível observar uma redução das mesmas com a incorporação de um maior teor de cera em substituição do agregado proveniente das cascas, devido à diferença na absorção dos dois materiais, sendo que a absorção de água da cera parafínica é aproximadamente quatro vezes inferior à absorção de água apresentada pelas cascas de moldes cerâmicos.

No que diz respeito ao comportamento mecânico das argamassas, observou-se uma diminuição da resistência à flexão para as argamassas com maior teor de incorporação de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, o que se encontra associado ao aumento da quantidade de água devido a elevada quantidade de partículas presentes nas cascas, originando uma maior microporosidade nas argamassas, o que pode ser comprovado pela maior absorção de água por capilaridade e imersão destas argamassas. Com o aumento da incorporação da cera parafínica, ocorre uma diminuição na

resistência mecânica, o motivo desta diminuição está relacionada à microporosidade, absorção de água e atraso no processo de endurecimento da argamassa. No entanto, os valores obtidos em seu considerável nível de resistência, tornando atrativo sua substituição ao agregado natural.

No que diz respeito aos valores obtidos da resistência à compressão destas argamassas, conclui-se que por mais que incorporações das cascas demonstrem perdas de resistência à compressão, as composições têm um elevado nível de resistência com valores semelhantes a argamassa de referência. Relativamente às argamassas com cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica, verificou-se que quanto maior a quantidade de cascas cerâmicas incorporadas e menor de ceras parafínica, maior a resistência à compressão das argamassas.

No que diz respeito ao comportamento face ao gelo e degelo, é possível observar que as diferentes argamassas demonstraram ter comportamentos semelhantes quando sujeitas aos ciclos de gelo-degelo. De uma forma geral, pode concluir-se que a argamassa com incorporação maior por cascas de moldes cerâmicos tem uma resistência às ações de gelo-degelo idêntica à argamassas com agregados naturais, não se tendo observado perdas significativas de massa. Contudo, a incorporação de um maior teor de cera parafínica, resultou em uma maior perda de massa, justificada também pelo menor desempenho mecânico das argamassas.

Assim sendo, no final desta dissertação é possível afirmar que esta, é uma solução viável à incorporação das cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica em substituição do agregado natural, podendo assim mitigar o problema da deposição destes materiais em aterros sanitários. Uma solução que torna atraente por potencializar uma construção mais ecológica, visando assim atingir uma redução do consumo de energia e de recursos naturais.

5.2 Trabalhos Futuros

Foi possível observar a partir do desenvolvimento desta dissertação, alguns comportamentos da que não puderam ser aprofundados e que deveriam ser estudados em trabalhos futuros, sendo os mais importantes:

- Estudo da aderência das argamassas contendo resíduos provenientes do setor da fundição;
- Substituição da lavagem das cascas de moldes cerâmicas com água reciclada, para verificar se mantém seu desempenho;

- Avaliação do comportamento das argamassas desenvolvidas quando expostas a elevadas temperaturas;
- Avaliação do comportamento térmico das argamassas com incorporação de cascas de moldes cerâmicos e cera parafínica.

CAPÍTULO VI – Bibliografia

- [1] R. Mateus e L. Bragança, *Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção*, Porto: Edições Ecopy, 2006.
- [2] agreements e U. D. global, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*, Vols. %1 de %2Development and International Co-operation: Environment, 1987, p. A/42/427.
- [3] F. Torgal e S. Jalali, *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, Universidade do Minho, Escola de Engenharia: Edição TecMinho, 2010.
- [4] *Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Setembro, "Regime geral de gestão de resíduos*, Lisboa, 2006.
- [5] Portaria, "209/2004, Lista Europeia de Resíduos," Lisboa, 2004.
- [6] A. Oliveira, C. Martins e F. Castro, *"WASTES – Solutions, Treatments and Opportunities II, Incorporation of metallurgical wastes as inorganic fillers in resins"*, CRC Press, 2017.
- [7] J. Rivera, J. Coelho, R. Silva, T. Miranda, F. Castro e N. Cristelo, *"Compressed Earth Blocks Stabilised with Glass Waste and Fly Ash Activated with a Recycled Alkaline Cleaning Solution"*, *Journal of Cleaner Production*, nº e247832020, p. 284, 2021.
- [8] I. Focus, "Energy Efficiency In Buildings European Commission," 17 Fevereiro 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17>. [Acedido em 29 Dezembro 2021].
- [9] S. Medonça., *"Caracterização do Consumo de Energia no Sector Residencial em Portugal*, Lisboa: Técnico Lisboa, Novembro-2015.

- [10] UNRIC, “United Nations Regional Information Centre , The 2018 Revision of the World Urbanization,” 2018. [Online]. Available: <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>. [Acedido em Dezembro 2022].
- [11] UNEP, “Global Material Flows and Resource Productivity - Assessment Report for the UNEP International Resource Panel,” 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11822/21557>. [Acedido em Janeiro 2023].
- [12] N. Unidas, “Goal #11: Sustainable Cities and Communities.,” 2018a. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-11.pdf>. [Acedido em Janeiro 2023].
- [13] B. Konstantinovas, N. Ventura e T. Sanches, “Economia Circular no Setor da Construção Civil I - Ciclo dos materiais,” Fevereiro 2019. [Online]. Available: <https://www.ccdr-lvt.pt/>. [Acedido em Janeiro 2023].
- [14] <https://www.overshootday.org/>. [Online]. [Acedido em 15/12/2022].
- [15] s. Ellen MacArthur Foundation (EMF), “. Economia Circular.,” 2013. [Online]. Available: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito>. [Acedido em Dezembro 2023].
- [16] C. Economy, “The circularity GAP report.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.legacy.circularity-gap.world/2018>. [Acedido em Janeiro 2023].
- [17] Portugal, “Smart Waste, A transição para a economia circular: a colaboração entre entidades e as,” 2017. [Online]. Available: https://www.gppq.fct.pt/h2020/_docs/eventos/7464_apresentacao-smart-waste-portugal.pdf. [Acedido em Janeiro 2023].
- [18] L. Fonseca, J. Domingues, M. Pereira, F. Martins e D. Zimon, “*Assessment of circular economy*”

- within Portuguese organizations,*”, vol. 10, Sustainability (Switzerland), 2018.
- [19] D. Masi, S. Day e J. Godsell, “*Supply chain configurations in the circular economy: A systematic*”, vol. 9, S. (Switzerland), Ed., MDPI, 2017.
- [20] A. Ferreira, M. Fraga, R. Godina, M. Barreiros e H. Carvalho, “*A proposed index of the implementation and maturity of circular economy practices-the case of the pulp and paper industries of Portugal and Spain,*”, vol. 11, Sustainability (Switzerland), 2019.
- [21] T. Phiri, P. Singh e A. Nikoloski, “*The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part I,*”, vol. 180, M. Engineering, Ed., Elsevier Ltd, 2022.
- [22] C. Augusto, “*Terraço Econômico,*” [Online]. Available: <https://terracoeconomico.com.br/economia-circular-por-que-importa-e-onde-nos-levara/>.
- [23] D. Ramos, L. Fonseca, J. Gonçalves, R. Carvalho, S. Carvalho e G. Santos, “*Cost-Benefit Analysis of Implementing Circular Economy in a Portuguese Company: From a Case Study to a Model,*”, Quality Innovation Prosperity ed., vol. 26, 2022, pp. 52 - 69.
- [24] D. Costa, S. Cunha e J. Barroso, *Avaliação do potencial de resíduos de fundição como agregados para argamassas*, Universidade do Minho, 2022.
- [25] M. Shmls, M. Abed, T. Horvath e D. Bozsaky, *Multicriteria based optimization of second generation recycled aggregate concrete*, Case Stud. Constr. Mater., 2022.
- [26] K. Yan., H. Lan., Q. Li., D. Ge. e Y. Li., *Optimum utilization of recycled aggregate and rice husk ash stabilized base material*, Constr. Build. Mater, 2022, p. p. e128627..
- [27] M. Moreira, *CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL ASSOCIADA*, Porto: UNIVERSIDADE DO PORTO, 2004.
- [28] A. Torres, L. Bartlett e C. Pilgrim, “*Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete*”, *Construction and Building Materials*, 2017, pp. 674-681.

- [29] B. Bhardwaj e P. Kumar, *“Waste foundry sand in concrete: A review”*, *Construction and Building Materials.*, 2017, pp. 661-674.
- [30] M. Tedesco, *“Estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural,”*, 2016.
- [31] A. Luisa, D. Camacho, A. M. Moraes, R. Célia e E. Modolo, *“Caracterização da casca cerâmica no processo de fundição de precisão,”*, 2016.
- [32] Y. Venkat, K. Choudary, D. Das, A. Pandey e S. Singh, *“Alumina-zircon filler based ceramic shell moulds for directionally solidified cast shrouded low pressure turbine blades,”*, vol. 47, 2021, pp. 27395-27405.
- [33] V. Odinkov, E. Dmitriev, A. Evstigneev, A. Sviridov e E. Ivankova, *“Modelling selection of structure and properties of monolayer electrophoretic shell molds during investment casting,”*, vol. 38, i. M. T. Proceedings, Ed., 2021, pp. pp. 1672-1676.
- [34] H. G. Soares, *“Aproveitamento do resíduo cerâmico do processo de fundição de precisão em,* 2019.
- [35] D. Adamatti, Borges, Tedesco, S. Chies e Tubino, *“Avaliação dos Efeitos da Substituição do Agregado Miúdo por Rejeito Cerâmico de Fundição por Microfusão Evaluation of the Replacement Effects of Fine Aggregate by Investment Casting Ceramic Residue,”*, 2014.
- [36] H. Grison Soares, *“Aproveitamento do resíduo cerâmico do processo de fundição de precisão em concretos de alta resistência,”*, 2019.
- [37] J.Zhiyou, S. Cunha e J. Barroso, *Betão Leve com resíduos de fundição*, Universidade do Minho, 2021.
- [38] H. Soares e C. Lima, *“Substituição da brita pelo resíduo cerâmico do processo de fundição de precisão em concretos de alta resistência,”*, vol. 18, *Tecnol Metal Mater Min*, 2021, p. e2140.

- [39] A. Luisa, D. Camacho, C. A. M. Moraes, R. Célia e a. E. Modolo, *“Caracterização da casca cerâmica no processo de fundição de precisão,”*, 2016.
- [40] A. Tavares, S. Cunha, J. B. Aguiar e F. Castro, *“Cement mortars with ceramic molds shells and paraffin waxes wastes: Physical and mechanical behavior,”*, vol. 342, Constr Build Mater, 2022, p. 127949.
- [41] S. Cunha e B. Aguiar, *Eficiência Energética dos Edifícios: Contributo dos Materiais de Mudança de Fase,*, Silabas & Desafios, 2021.
- [42] S. Hasnain, ; *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy Conversion and Management*, vol. 39, 1998, pp. 1127-1138.
- [43] S. A. Memon, ; *Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, Renew-able and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, 2014, pp. 870-906.
- [44] D. Hawes, D. Banu e D. Feldman, *Latent heat storage in concrete, Solar Energy Materials,*, vol. 19, 1989, pp. 335-348.
- [45] L. S., *Argamassas funcionais para uma construção sustentável, Tese de Doutoramento,* Universidade de Aveiro: Departamento de Engenharia Civil, 2011.
- [46] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. Garcia e A. Fernández, *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable*, vol. 15, 2011, pp. 1675-1695.
- [47] G. Song, S. Ma, G. Tang, Z. Yin e X. Wang, *Preparation and characterization of flame retardant form-stable phase change materials composed by EPDM, paraffin and nano magnesium hydroxide*, vol. 35, Energy, 2010, pp. 2179-2183.
- [48] S. Cunha, *Tese de Doutoramento - Desenvolvimento e Caraterização de argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase,* Universidade do Minho, 2018.

- [49] M. Telkes, *Thermal storage for solar heating and cooling, Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings,*, Charlottesville, USA, 1975.
- [50] S. Shaikh e K. Lafdi, *Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage, Energy Conversion and Management*, vol. 47, 2006, pp. 2103-2117.
- [51] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano., G. Pérez e L. Cabeza, *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, Energy and Buildings,*, vol. 42, 2010, pp. 534-540.
- [52] A. Tavares e S. Cunha, "Caracterização de argamassas com incorporação direta de PCM," Universidade do Minho, 2022.
- [53] MAGUIR, "CIMENTO CIMPOR CINZA CEM II/B-L 32.5N," [Online]. Available: https://www.maguir.com/product/cimento-cimpor-cinza-cem-ii-b-l-32-5n/?utm_source=Google%20Shopping&utm_campaign=Maguir_&utm_medium=cpc&utm_term=23857&gclid=Cj0KCQiAIKmeBhCkARIsAHy7WVuPHS_eEm6vBQta7u6irSeNorCLPNxnT2umnPGaR2civSWIiKISV8gaAi4dEALw_wcB.
- [54] IPQ, *NP EN 933-1-2014 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração.*, 2014-09-15 ed., 2014.
- [55] (LNEC), ("), *NP 954 - "Inertes para argamassas e betões - Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias"*, 1974.
- [56] (LNEC), *Especificação E 64, Cimentos - Determinação da massa volúmica*, 1979.
- [57] (IPQ), *NP EN 1097-5, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa*, 2002.
- [58] (IPQ), *NP EN 933-1, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica, Método da peneiração*, 2000.

- [59] (CEN), *EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, 1999.
- [60] (CEN), *EN 1015-18, Methods of test for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar (2002)*, 2002.
- [61] (LNEC), “Especificação E-394 - Betões: Determinação da absorção de água por imersão”.,” 1993.
- [62] (CEN), “EN 1015-11, Methods of test for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar,” 1999.
- [63] (CEN), *EN 1015-11, Methods of test for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, 1999.
- [64] (CEN), “CEN/TS 12390-9, Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance,” 2006.
- [65] J. Ferreira, *Tecnologia da fundição*, Lisboa: Fundação Calouste, 1999, pp. 1 - 140.
- [66] Ellen MacArthur Foundation (EMF), “Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar,” 2015. [Online]. Available: https://ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-a-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf. [Acedido em Janeiro 2023].
- [67] M. Tedesco, “*Estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural*,” 2016.
- [68] H. Zhao, “*Effects of CaO-based and MgO-based expansion agent, curing temperature and restraint degree on pore structure of early-age mortar*,” vol. 257, Constr Build Mater, 2020.
- [69] H. Zhao, *I.*, “*Microstructure evolution of cement mortar containing MgO-CaO blended expansive agent and temperature rising inhibitor under multiple curing temperatures*,” vol. 278, Constr Build Mater, 2021.

- [70] J. Coutinho, *“Materiais de Construção 1- Agregados para argamassas e betões,”* 1999.
- [71] G. Tovar-Rodríguez, M. Barra, S. Pialarissi, D. Aponte e E. Vázquez, *“Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates,”* vol. 38, *Constr Build Mater*, 2013, p. 1211–1220.
- [72] D. Ribeiro, A. Silva, J. Labrincha e M. Morelli, *“Expansibilidade de argamassas de cimento Portland como consequência das reações alcali-silica (RAS) associadas ao uso da ama vermelha,”* 2011.
- [73] P. Grattan-Bellew, J. Beaudoin e V. Vallée, *“Effect of aggregate particle size and,”* vol. 28, *Cem Concr Res*, 1998, p. 1147–1156.
- [74] (IPQ), *NP EN 998-1, Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1:Argamassas para rebocos interiores e exteriores*, 2010.
- [75] (IPQ), *“NP EN 998-1, Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1:Argamassas para rebocos interiores e exteriores.”* 2010.
- [76] F. Teixeira e T. Castro, *“Incorporation of industrial wastes from thermal processes in cement mortars,”* 2014.
- [77] W. Wang, T. Noguchi e I. Maruyama, *“Mitigation effect of lithium nitrate on the alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars,”* vol. 130, *Cem Concr Compos*, 2022.
- [78] N. Gaibor, D. Leitão, T. Miranda, N. Cristelo, E. Pereira e V. Cunha, *““Effect of polyacrylonitrile fiber on the properties of alkali-activated ceramic/slag-based mortar,”,”* *Journal of Building Engineering*, vol. 44, 2021.
- [79] N. Gaibor, J. Coelho, D. Leitão, T. Miranda, P. Tavares e N. Cristelo, *“Alkali activation of recycled ceramic aggregates from construction and demolition wastes,”* vol. 70, *Materiales de Construcción*, 2020.

- [80] (IPQ), "NP EN 12620, "Agregados para betão", 2002.
- [81] T. Oliveira e R. Lima, "Reações expansivas em concretos com agregados," *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693*, vol. 12, pp. 165-167, Nov. 2020.
- [82] P. Moreira, *CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL ASSOCIADA*, Porto: UNIVERSIDADE DO PORTO, 2004.