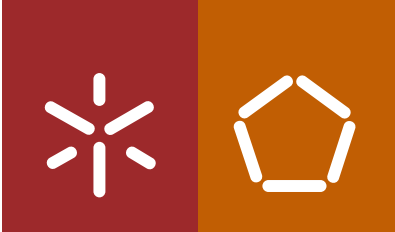




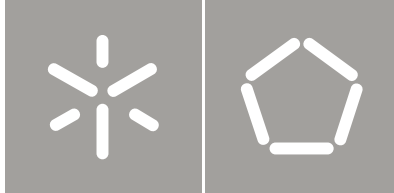
Hélène da Costa Figueiredo

Contribuição do betão para a neutralidade carbónica 2050 através da captura de CO2

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Hélène da Costa Figueiredo

Contribuição do betão para a neutralidade  
carbónica 2050 através da captura de CO<sub>2</sub>

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Aires Fernando F. L. Camões Azevedo  
Doutora Raphaele Lira Meireles Castro Malheiro

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

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.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição-SemDerivações CC BY-ND**

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

## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o valioso apoio de várias pessoas que, ao longos destes anos, foram fundamentais para o meu crescimento pessoal, académico e profissional. Deste modo, deixo aqui o meu profundo agradecimento a todos se cruzaram comigo.

À Escola de Engenharia da Universidade do Minho, aos seus docentes e funcionários, que acompanharam o meu percurso académico e que contribuíram para me tornar na engenheira que hoje sou.

Ao Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões Azevedo e à Doutora Raphaele Lira Meireles Castro Malheiro pela orientação, pelo apoio e disponibilidade incondicional, pela compreensão por algumas dilações, pelo aconselhamento assertivo, pelo estímulo permanente e, claro, pela vossa amizade.

Ao Engenheiro Carlos Jesus pelo excecional apoio laboratorial e as sábias elucidações que permitiram solucionar problemas ao longo deste projeto.

Quero expressar a minha gratidão a todos os meus amigos, que sempre me incentivaram a perseguir os meus objetivos e ajudaram a manter a motivação em momentos difíceis.

À minha família, em especial aos meus pais, Abílio e Arminda, pelo exemplo de vida que sempre me transmitiram. Por nunca me deixarem desistir deste sonho. Pelo apoio, compreensão e ilimitada paciência nos momentos menos bons, e por todo o carinho e amor que me oferecem todos os dias da minha vida. Obrigado. Aos meus irmãos mais velhos, Luís e João, por me mostrarem que com trabalho e dedicação tudo é possível. À minha cunhada Ana, pelas constantes risadas e desabafos, e por ser a irmã que eu nunca tive. Deixo, também, o meu agradecimento especial ao meu primo Diogo, que se tornou um irmão nesta viagem que foi a vida académica.

Com especial gratidão e amor, quero agradecer ao Paulo, por ter entrado na minha vida no momento certo. Obrigado por toda a motivação, a compreensão, o imenso carinho e amor que me presenteia todos os dias. Obrigado por sempre estar ao meu lado, por me encorajar a superar os meus próprios limites e por ser sempre o meu porto seguro. Serei eternamente grata por todos os momentos partilhados contigo.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico 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 neutralidade carbónica e a redução de consumos energéticos representam as principais metas ambientais que a Europa e o Mundo definiram para combater os efeitos do aquecimento global. Sendo o betão um dos maiores responsáveis pela emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), têm sido cada vez mais procuradas estratégias que reduzam o impacto ambiental causado pelo setor da construção, de forma a alcançar a neutralidade carbónica até 2050.

A redução das emissões de  $\text{CO}_2$ , através da substituição parcial do cimento por resíduos, e a captura do mesmo já emitido, através da cura por carbonatação acelerada (CCA), são exemplos de estratégias sustentáveis utilizadas no setor da construção. Sendo o pó de vidro (PV), proveniente de embalagens de vidro, um exemplo de resíduo com potencial para substituir parcialmente o cimento - tanto no que diz respeito à resistência mecânica quanto à durabilidade - importa investigar o seu comportamento face a CCA.

Para tal, foram desenvolvidas duas campanhas experimentais onde foram moldadas argamassas com substituição de 25% e 50% de cimento, em volume, por PV de granulometria similar. Foram também moldados provetes com substituição de cimento por cinzas volantes (CV), com 25% de substituição, para comparar resultados entre as CV e PV. Estes provetes passaram por processos de cura que se sintetiza em três etapas: pré-cura (câmara húmida, 24 horas ou 48 horas), CCA (câmara de carbonatação, 5%  $\text{CO}_2$ , 24 horas), cura tradicional (saturados em água durante 28 dias ou 90 dias). A resistência mecânica destes provetes foi avaliada ao longo do tempo e indicadores de durabilidade foram estudados aos 28 e 90 dias.

Os resultados de ambas as campanhas permitiram concluir sobre as vantagens e inconvenientes da utilização da CCA em argamassas sustentáveis. Neste sentido os resultados foram promissores pois ocorreu penetração de  $\text{CO}_2$  durante a CCA, confirmando a captura de  $\text{CO}_2$  como uma estratégia viável. No que se refere ao impacto da CCA nas propriedades das argamassas, é preciso um pouco mais de cautela. As resistências mecânicas obtidas para os provetes submetidos à CCA foram, de maneira geral, inferiores às aquelas obtidas para situação de referência. Os resultados dos ensaios de absorção de água corroboram estes valores, apresentando maiores absorções para os provetes submetidos à CCA.

### Palavras-Chave:

Captura de carbono; Carbonatação acelerada; Cura por Carbonatação Acelerada, Pó de Vidro; Argamassa; Materiais Cimentícios; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Carbon neutrality and the reduction of energy consumption represent the main environmental goals that Europe and the world have defined to combat the effects of global warming. As concrete is one of the biggest contributors to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, strategies have been increasingly sought to reduce the environmental impact caused by the construction sector, in order to achieve carbon neutrality by 2050.

The reduction of CO<sub>2</sub> emissions, through the partial replacement of cement with waste, and the capture of the same already emitted, through accelerated carbonation curing (CCA), are examples of sustainable strategies used in the construction sector. As glass powder (PV), coming from glass bottles, is an example of waste with the potential to partially replace cement - both in terms of mechanical resistance and durability - it is important to investigate its behavior in relation to CCA.

For this purpose, two experimental campaigns were developed in which mortars were molded with 25% and 50% replacement of cement, by volume, by PV of similar particle size. Specimens were also molded with replacement of cement by fly ash (CV), with 25% replacement, to compare results between PV and CV. These specimens underwent curing processes that can be summarized in three stages: pre-curing (humid chamber, 24 hours or 48 hours), CCA (carbonation chamber, 5% CO<sub>2</sub>, 24 hours), traditional curing (saturated in water for 28 days or 90 days). The mechanical resistance of these specimens was evaluated over time and durability indicators were studied at 28 and 90 days.

The results of both campaigns allowed us to conclude on the advantages and disadvantages of using CCA in sustainable mortars. In this sense, the results were promising, since CO<sub>2</sub> penetration occurred during CCA, confirming CO<sub>2</sub> capture as a viable strategy. Regarding the impact of CCA on the properties of mortars, a little more caution is needed. The mechanical resistance obtained for the specimens subjected to CCA were, in general, lower than those obtained for the reference situation. The results of the water absorption tests corroborate these values, showing higher absorptions (capillary and by immersion) for the specimens subjected to RHA.

### Key words:

Carbon Capture; Accelerated Carbonation; Accelerated Carbonation Curing; Glass Powder; Mortars; Cementitious Materials; Sustainability.

# ÍNDICE

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS.....                                       | iii |
| RESUMO.....                                               | v   |
| ABSTRACT .....                                            | vi  |
| ÍNDICE.....                                               | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                   | ix  |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                   | xi  |
| ACRÓNIMOS E NOMENCLATURAS .....                           | xii |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                       | 14  |
| 1.1. Enquadramento.....                                   | 14  |
| 1.1.1. Políticas ambientais mundiais .....                | 14  |
| 1.1.2. Impacto ambiental da indústria do cimento.....     | 15  |
| 1.2. Motivação .....                                      | 16  |
| 1.3. Objetivos.....                                       | 18  |
| 1.4. Descrição dos capítulos .....                        | 19  |
| 1.5. Limitações da pesquisa .....                         | 19  |
| 2. ESTADO DO CONHECIMENTO .....                           | 21  |
| 2.1. Indústria do cimento e a sua sustentabilidade .....  | 21  |
| 2.1.1. O cimento como produto.....                        | 22  |
| 2.2. Utilização de adições em materiais cimentícios ..... | 22  |
| 2.2.1. Cinzas volantes (CV).....                          | 26  |
| 2.2.2. Pó de vidro (PV) .....                             | 27  |
| 2.3. Carbonatação dos materiais cimentícios.....          | 30  |
| 2.3.1. Carbonatação em CV e PV .....                      | 33  |
| 2.4. Cura por Carbonatação Acelerada (CCA) .....          | 34  |
| 2.4.1. Breve exposição sobre cura tradicional .....       | 34  |

|        |                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2. | Cura por carbonatação acelerada (CCA).....                       | 35 |
| 3.     | METODOLOGIA .....                                                | 39 |
| 3.1.   | Apresentação e caracterização dos materiais escolhidos.....      | 40 |
| 3.1.1. | Apresentação dos materiais.....                                  | 40 |
| 3.1.2. | Caracterização dos materiais.....                                | 43 |
| 3.2.   | Produção das argamassas .....                                    | 45 |
| 3.2.1. | Composição das argamassas .....                                  | 51 |
| 3.2.2. | Condições de exposição de CO <sub>2</sub> dos provetes .....     | 53 |
| 3.3.   | Procedimentos de ensaio .....                                    | 57 |
| 4.     | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....                     | 64 |
| 4.1.   | Apresentação dos resultados da 1º campanha .....                 | 65 |
| 4.1.1. | Análise da profundidade de carbonatação .....                    | 65 |
| 4.1.2. | Análise de resultados de ensaios aos 28 dias .....               | 68 |
| 4.2.   | Apresentação dos resultados da 2º campanha .....                 | 75 |
| 4.2.1. | Análise da profundidade de carbonatação .....                    | 75 |
| 4.2.2. | Análise de resultados de ensaios aos 28 dias e aos 90 dias ..... | 78 |
| 4.3.   | Discussão dos resultados .....                                   | 84 |
| 5.     | CONCLUSÕES .....                                                 | 88 |
| 5.1.   | Trabalhos Futuros .....                                          | 90 |
| 6.     | REFERÊNCIAS.....                                                 | 91 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Alguns constituintes do cimento .....                                                                                                                                             | 24 |
| Figura 2 - Resistência à compressão dos cimentos compostos por 25% de pó reciclado de RDC's (Risson et al. 2023).....                                                                        | 25 |
| Figura 3 - Resistência à compressão com diferentes temperaturas e diferentes percentagens de substituição por CV (Medeiros, R. 2018) .....                                                   | 27 |
| Figura 4 - Composição do vidro reciclado .....                                                                                                                                               | 28 |
| Figura 5 - Resistência média à compressão aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias (Moreira, 2023).....                                                                                                  | 30 |
| Figura 6 - Cura química.....                                                                                                                                                                 | 35 |
| Figura 7 - CarbonCure: Estratégias de captura de CO <sub>2</sub> (CarbonCure).....                                                                                                           | 37 |
| Figura 8 - Procedimentos para moagem de vidro (Moreira, O. 2023).....                                                                                                                        | 42 |
| Figura 9 - Distribuição granulométrica dos materiais utilizados (Moreira, O. 2023) .....                                                                                                     | 43 |
| Figura 10 - Misturadoras no LMC - 1º campanha e 2º campanha, respetivamente .....                                                                                                            | 47 |
| Figura 11 – Equipamentos utilizados na etapa de compactação .....                                                                                                                            | 48 |
| Figura 12 - Processo de desmoldagem e Identificação .....                                                                                                                                    | 49 |
| Figura 13 - Alguns provetes na 1º campanha.....                                                                                                                                              | 49 |
| Figura 14 - Provetes fabricados na 2º campanha .....                                                                                                                                         | 50 |
| Figura 15 - Cura tradicional de todos os Provetes .....                                                                                                                                      | 50 |
| Figura 16 - Câmara de carbonatação .....                                                                                                                                                     | 53 |
| Figura 17 - Mecanismo para simulação de vácuo, 100% de concentração de CO <sub>2</sub> : a) Exsicador; b) Monitor de pressão; c) Botija de CO <sub>2</sub> ; d) Bomba de extração de ar..... | 55 |
| Figura 18 - Efeito da condensação no exsicador .....                                                                                                                                         | 56 |
| Figura 19 - Mesa de espalhamento - ensaio de trabalhabilidade .....                                                                                                                          | 58 |
| Figura 20 - Equipamento RESIPOD, da marca Proceq .....                                                                                                                                       | 58 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 - Prensa universal Lloyd utilizada para realização do ensaio de resistência à flexão.....                                       | 59 |
| Figura 22 - Prensa Universal ELE utilizada para realização do ensaio de resistência à compressão .....                                    | 61 |
| Figura 23 - Isolamento para absorção de água por capilaridade.....                                                                        | 62 |
| Figura 24 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....                                                                              | 62 |
| Figura 25 - Ensaio para absorção de água por imersão .....                                                                                | 63 |
| Figura 26 - 1º campanha: Carbonatação 28 Dias.....                                                                                        | 67 |
| Figura 27 - PV-C1(controlo): Teste de fenolftaleína após 28 cura tradicional + 7 dias ambiente natural ...                                | 68 |
| Figura 28 - 1º campanha: Resistividade elétrica, 28 Dias .....                                                                            | 69 |
| Figura 29 - 1º campanha - Resistência à flexão, 28 Dias .....                                                                             | 70 |
| Figura 30 - 1º campanha - Resistência à compressão, 28 Dias .....                                                                         | 70 |
| Figura 31 - 1º campanha - Absorção por capilaridade, 28 Dias .....                                                                        | 73 |
| Figura 32 – 1º campanha - Absorção por imersão, 28 Dias.....                                                                              | 74 |
| Figura 33 - 1º campanha: Comparação entre porosidade aberta e resistência à compressão. ....                                              | 75 |
| Figura 34 - 2º campanha: Resistividade elétrica, 28 dias.....                                                                             | 78 |
| Figura 35 - 2º campanha: Resistividade elétrica, 90 dias.....                                                                             | 78 |
| Figura 36 - 2º campanha: Resistência à flexão, 28 dias .....                                                                              | 79 |
| Figura 37 - 2º campanha: Resistência à flexão, 90 dias.....                                                                               | 80 |
| Figura 38 - 2º campanha: Resistência à compressão, 28 dias.....                                                                           | 80 |
| Figura 39 - 2º campanha: Resistência à compressão, 90 dias.....                                                                           | 81 |
| Figura 40 - 2º campanha: Absorção de água por capilaridade, 90 dias .....                                                                 | 82 |
| Figura 41 - 2º campanha: Absorção de água por imersão, 90 dias .....                                                                      | 83 |
| Figura 42 - Resistência à compressão de misturas à base de PC submetidas à cura por carbonatação e cura a vapor (Zhang et al. 2017) ..... | 86 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Caracterização física dos materiais com características pozolânicas (Moreira, O. 2023)..... | 44 |
| Tabela 2 - Composição química dos materiais com características pozolânicas (Moreira, O. 2023) .....   | 44 |
| Tabela 3 - Quantidade de materiais - 1º campanha .....                                                 | 52 |
| Tabela 4 - Quantidade de materiais - 2º campanha .....                                                 | 52 |
| Tabela 5 - Perdas de pressão em vácuo.....                                                             | 55 |
| Tabela 6 - Condições de exposição de pré-cura e cura - 1º campanha .....                               | 56 |
| Tabela 7 - 1º campanha: Registo fotográfico da carbonatação nos provetes de controlo. ....             | 65 |
| Tabela 8 - 1º campanha: Médias de profundidade de carbonatação em mm .....                             | 66 |
| Tabela 9 - 2º campanha: Profundidade de carbonatação, 28 Dias.....                                     | 76 |
| Tabela 10 - 2º campanha: Profundidade de carbonatação, 90 Dias.....                                    | 76 |
| Tabela 11 - 2º campanha: Médias de profundidade de carbonatação em mm.....                             | 77 |

## ACRÓNIMOS E NOMENCLATURAS

°C – graus centígrados

A/L – Razão água/ligante

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials

C1 - Condições 1 de CAA

C2 – Condições 2 de CAA

CA – Corrente alternada

Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de cálcio

CaCO<sub>3</sub> - Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio (Cal)

CCA – Cura por carbonatação acelerada

CEMBUREAU – The European Cement Association

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

COP - Conference of the Parties (Conferência das Partes)

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CV – Cinzas volantes

DEC – Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de ferro

GEE – Gases de efeito de estufa

GEE – Gases de efeito de estufa

HR -Humidade Relativa

K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio

Kg – Quilograma

LER – Lista Europeia de Resíduos

LMC – Laboratório de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

M – Massa

m – Metro

MCS – Materiais cimentícios suplementares

MgO – Óxido de magnésio

mm – milímetro

MnO – Óxido de manganês

MPa – Mega Pascal

Na<sub>2</sub>O – Óxido de sódio

PCA – Portland Cement Association

PV – Pó de vidro

R – Provetes Referência

RAS – Reação álcali-sílica

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício

SO<sub>3</sub> – Trióxido de enxofre

TiO<sub>2</sub> – Dióxido de titânio

UE – União Europeia

V – Volume

$\rho$  – Densidade aparente

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Ao longo dos anos tem se verificado um crescimento na preocupação com as mudanças climáticas que se tornam cada vez mais visíveis no mundo. O aquecimento global causado por massivas emissões de gases de efeito de estufa (GEE), resultantes da intervenção do Homem na natureza (desde a queima de combustíveis fósseis ao desmatamento das florestas) tornou-se cada vez mais prejudicial para o ambiente e para o Homem, no decorrer das últimas décadas. Estes fatores têm contribuído para um aumento significativo da temperatura da Terra e, consequentemente, ameaçando a vida no planeta.

Esta dissertação foi desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, e foi desenvolvida no âmbito do projeto “GlassCON - Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes?”, com a ref.<sup>a</sup> 2022.03197.PTDC, financiado por Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

### 1.1.1. Políticas ambientais mundiais

Durante as últimas décadas têm sido debatidos mundialmente as alterações climáticas verificadas no planeta e estes debates têm resultado em planos de intervenção com objetivos ambiciosos. Para ajudar a atingir estes objetivos têm se realizado cimeiras mundiais como forma de analisar o andamento dos planos traçados e propor novas intervenções. Em 1997 foi assinado o Protocolo de *Kyoto*, que delineava medidas mais rígidas para a redução da emissão dos GEE. Posteriormente, em 2015, durante a COP21 (21<sup>a</sup> Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas) em Paris foi deliberado e assinado o Acordo de Paris, que representa o compromisso mundial com políticas ambientais que conduzam a redução da emissão de GEE a partir de 2020 e vem substituir as linhas orientadoras do Protocolo de *Kyoto*. Neste tratado mais de 180 países comprometeram-se a adotar medidas que travem o aumento da temperatura média global.

No final de 2021, ocorreu em Glasgow a COP26, onde os países envolvidos no Acordo de Paris se voltaram a reunir e avaliar os progressos alcançados até ao momento. Confirmou-se uma redução de 25% das emissões de GEE, que era o objetivo para 2020. Como forma de alcançar as metas delineadas para 2030 e 2040, correspondentes a reduções de 55% e 60%, respetivamente, os países presentes no Acordo

de Paris tiveram que definir medidas para tornar a economia mais sustentável e “amigas do ambiente” (*eco friendly*) nos setores mais críticos (indústria, transporte, energia e construção).

No final de 2023, a ONU realizou a COP28 no Dubai onde foi reiterado e impulsionada a transição energética, através de um apelo explícito ao abandono dos combustíveis fósseis para acelerar a ação climática nesta década e atingir as emissões líquidas zero até 2050. Além disso, os participantes estabeleceram uma meta de triplicar a capacidade de energia renovável e dobrar as melhorias de eficiência energética até 2030. Todos estes avanços serão analisados na COP30 que acontecerá no Brasil.

A nível mundial verifica-se que várias empresas e associações já apresentam propostas e soluções para reduzir o impacto ambiental do setor da construção, mais concretamente do setor do cimento, pois representa um dos maiores contribuintes nas emissões de CO<sub>2</sub>. Uma dessas organizações é a PCA, *Portland Cement Association*, que, em outubro de 2021, divulgou o *Roadmap to Carbon Neutrality* (Mapa para Neutralidade Carbónica). Em março de 2021, também a CEMBUREAU, *The European Cement Association*, divulgou o *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. Nesta análise para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> surge o conceito dos 5C's, sendo eles o Clínquer, o Cimento, o Betão (Concrete), a Construção e a Carbonatação. Seguem algumas alternativas relativas ao 5C's:

- Clínquer: matérias-primas alternativas descarbonatadas; combustíveis alternativos, clínquer de baixo conteúdo carbónico, eficiência térmica;
- Cimento: redução da incorporação de clínquer, redução de consumo de energia e utilização de energia renovável e neutralidade carbónica do transporte.
- Concrete (betão): redução da incorporação de cimento no betão e transporte neutro em carbono.
- Construção: eficiência na utilização de betão, reutilizar e reciclar;
- Carbonatação: sequestro de CO<sub>2</sub> no betão, nos RCD's e nos finos de betão reciclado.

#### 1.1.2. Impacto ambiental da indústria do cimento

O impacto ambiental negativo da indústria do cimento é enorme, estando relacionado, principalmente, com as elevadas emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia (International Energy Agency, 2024). É responsável pelo consumo de 50% a 75% dos recursos naturais do mundo e 40% da energia mundial é

consumida pelos edifícios. O setor da construção consome 15% dos recursos hídricos e é responsável por 30% a 40% das emissões de CO<sub>2</sub>. Este impacto é causado tanto pelo uso de energia, ou de combustíveis fósseis, para as necessidades de aquecimento e arrefecimento, como pelo processo todo envolvido na construção dos edifícios (SustentArqui, 2019).

Este impacto pode ser atenuado com a utilização da cura por carbonatação acelerada (CCA) e, simultaneamente, com a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituto parcial do cimento nos materiais cimentícios. Betões e argamassas produzidos com MCS e curados pelo procedimento CCA contribuirão duplamente para os objetivos sustentáveis, proporcionando menor emissão de CO<sub>2</sub>, através da redução do consumo de cimento, e capturando o CO<sub>2</sub> já emitido, através da CCA.

A fim de contribuir para esta importante discussão rumo à neutralidade carbónica, este trabalho experimental exploratório tem como objetivo avaliar o comportamento de argamassas sustentáveis submetidas à CCA. Serão estudadas argamassas com 100% de cimento (CEM), argamassas com substituição de 25% de cimento por CV e com substituição de 25% e 50 % de cimento por PV. Os resultados obtidos nos ensaios realizados, aos 28 dias e aos 90 dias, contribuirão para a avaliação das vantagens e inconvenientes associados à utilização destes materiais em contexto de CCA.

## 1.2. Motivação

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos principais gases com efeito de estufa e sendo o betão um dos maiores emissores de CO<sub>2</sub>, é fundamental encontrar e aprimorar estratégias de sustentabilidade que reduzam o impacto ambiental do setor da construção, de forma a atingir a neutralidade carbónica 2050, tanto através da redução de emissões de CO<sub>2</sub> como pela captura do mesmo.

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> através da substituição parcial do cimento por resíduos, é uma estratégia que tem sido bastante investigada em todo o mundo. Em Portugal, as cinzas volantes (CV) eram, até bem pouco tempo, o subproduto mais utilizado na produção do betão. Contudo, com vista à neutralidade carbónica 2050, o governo português optou pelo encerramento das duas centrais termoelétricas a carvão existente no país, em Sines e no Pego, em 2021. Sendo as CV um subproduto destas centrais, houve uma queda abrupta na disponibilidade de CV e a produção de betão no país deparou-se com um novo desafio, ainda sem solução.

Assim, há a necessidade de procurar e estudar alternativas sustentáveis que sejam capazes de substituir parcialmente o cimento (produto derivado de clínquer e onde o processo de fabrico resulta em grandes quantidades de emissões de  $\text{CO}_2$ ) que não prejudiquem nem a resistência mecânica nem a durabilidade do betão. A utilização de resíduos, além de contribuir para a redução de emissões de  $\text{CO}_2$ , promove a economia circular. O pó de vidro, proveniente da reciclagem do vidro, é um exemplo de resíduo com potencial para substituição parcial do cimento (Moreira, B. 2022).

Estudos mostram que quando o vidro é usado como um pó finamente moído, as partículas de vidro fino se comportam como um material pozolânico, reagindo com os hidratos do cimento para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário, aumentando a resistência e a durabilidade do betão a longo prazo (Olofinnade *et al.* 2017; Nassar *et al.* 2021). Além disso, a publicação da ASTM C1866 (2020), que aborda os requerimentos para utilização do PV no betão, tem impulsionado seu uso.

A captura de  $\text{CO}_2$  é um tema relativamente recente sendo que se encontra em constante desenvolvimento e atualização.

Uma das formas de capturar  $\text{CO}_2$  da atmosfera é através de um processo químico conhecido como carbonatação, um exemplo disso é CCA de materiais cimentícios. Este tipo de cura consiste na difusão de alta concentração de  $\text{CO}_2$  no betão nas fases iniciais da cura, resultando na melhoria das propriedades físico-mecânicas pela redução da porosidade. O sucesso da sua utilização está relacionado com o sucesso de todas as etapas do processo, nomeadamente, pré-cura, exposição ao  $\text{CO}_2$  e pós-cura. Estas etapas têm sido estudadas individualmente (Zhang e Shao, 2016; Zhang *et al.*, 2017) e a evolução do conhecimento tem levado a uma maior utilização. Atualmente, a produção de pré-fabricados cimentícios é o setor onde a cura acelerada por carbonatação (CCA) é mais utilizada, devido ao controlo do processo produtivo.

Sendo o  $\text{CO}_2$  um dos principais GEE e a indústria do cimento uma das grandes responsáveis por estas emissões, a redução das emissões de  $\text{CO}_2$  da indústria do cimento é um fator de elevada importância na luta contra as alterações climáticas. Globalmente, a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões de  $\text{CO}_2$  e espera-se que o setor da construção reduza as suas emissões de  $\text{CO}_2$  em 16% até 2030, contribuindo para a neutralidade carbónica em 2050 (Hanifa *et al.*, 2023).

A redução das emissões de CO<sub>2</sub> e a captura do CO<sub>2</sub> já emitido é um duplo ganho que pode ser obtido através da cura acelerada por carbonatação no betão e da substituição parcial do cimento por resíduos.

Neste sentido, este trabalho de investigação pretende contribuir para o avanço do conhecimento sobre o processo de cura por carbonatação acelerada (CCA) aplicado aos materiais cimentícios com incorporação de resíduos, nomeadamente, CV e PV.

### 1.3. Objetivos

O principal objetivo deste tema é contribuir para o desenvolvimento da área da cura por carbonatação acelerada em materiais cimentícios com incorporação de resíduos reciclados, especificamente CV e PV.

Para este estudo obter resultados promissores, será necessário realizar diversas fases de trabalho que integram os seguintes objetivos específicos:

- Efetuar uma extensa e enriquecedora pesquisa bibliográfica sobre os diferentes tópicos presentes ao longo deste estudo (descrito no subcapítulo seguinte), que permita planejar um trabalho laboratorial eficaz;
- Efetuar uma campanha experimental com incorporação de dois resíduos (CV e PV) com uma variação das condições de cura;
- Avaliar o impacto da CCA no comportamento mecânico das diferentes argamassas;
- Avaliar o efeito da captura de CO<sub>2</sub> através do uso da CCA analisando os efeitos de carbonatação resultantes;
- Avaliar, numa primeira campanha laboratorial, diferentes condições de pré-cura e cura para avaliar o efeito desse fator e prosseguir com as condições mais vantajosas;
- Avaliar, numa segunda campanha laboratorial, diferentes argamassas (CEM, CV e PV, com 2 quantidades de PV) expostas a condições de referência (cura tradicional) e CCA selecionada após a primeira campanha laboratorial;
- Avaliar se o PV pode ser uma alternativa viável para substituição das CV.

## 1.4. Descrição dos capítulos

A estrutura da presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos distintos, seguindo uma organização correspondente ao que foi descrito nos objetivos. Os principais tópicos abordados em cada uns destes capítulos estão apresentados nos seguintes parágrafos:

No Capítulo 1, Introdução, foi exposto a motivação e as considerações gerais sobre enquadramento global e nacional desta temática, assim como o papel da indústria do cimento no meio ambiente. Foram descritos os objetivos e as limitações laboratoriais deste projeto.

No Capítulo 2, Estado do Conhecimento, realiza-se uma revisão bibliográfica que abrange que visa maioritariamente os três temas seguintes: o uso de resíduos e materiais reciclados como substituição do cimento, a carbonatação dos materiais cimentícios e os diferentes tipos de cura, tradicional e CCA, assim como o efeito da captura de carbono. Encontram-se descritos neste capítulo as definições teóricas e os alguns estudos práticos efetuados até aos dias de hoje.

No Capítulo 3, Metodologia, apresentam-se os materiais escolhidos para a componente laboratorial da dissertação, assim como a sua caracterização. De seguida está descrita a composição e produção dos provetes, e as condições de exposição de CO<sub>2</sub>, sendo devidamente justificadas as opções selecionadas ao longo do projeto, para cada campanha. Introduce-se, também, uma breve descrição dos ensaios específicos realizados e os seus resultados.

No Capítulo 4, Apresentação e discussão de resultados, apresenta-se uma análise crítica, justificada através da revisão bibliográfica efetuada, dos resultados obtidos após a execução do trabalho laboratorial.

No Capítulo 5, Conclusão, são expostas as principais conclusões gerais sobre o comportamento observado em argamassas sustentáveis submetidas à CCA, em comparação à cura tradicional. Neste capítulo são apresentados possíveis trabalhos futuros, dentro desta temática, que se encontrem integrados na valorização da sustentabilidade, especificamente, no setor da construção.

## 1.5. Limitações da pesquisa

Ao longo de todo o processo, principalmente durante a pesquisa bibliográfica dos diferentes ensaios que têm sido realizados, a nível internacional, foi facilmente visível que estamos perante um assunto com inúmeras variáveis, sendo algumas delas: o tipo de ligante utilizado, a taxa de concentração, a forma e o

tempo de exposição de CO<sub>2</sub>, assim como temperatura, a humidade relativa (HR) (Zhang *et al.*, 2017). Assim sendo, a primeira limitação encontra-se relacionada com as condições possíveis de serem usadas ou recriadas no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), inserido no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade do Minho.

Para possibilitar a temática desta dissertação, o LMC encontra-se equipado com uma câmara de carbonatação (características do equipamento expostas no capítulo 3), que não permite gerar taxas de concentração de CO<sub>2</sub> superiores a 5%, sendo esta a maior limitação encontrada. Como forma de combater esta limitação, optou-se por fixar o tempo de exposição de CO<sub>2</sub> dos provetes em 24h para tentar contrariar o efeito resultante que uma baixa concentração de CO<sub>2</sub> poderia causar, considerando que na maioria dos estudos efetuados é utilizado quase 100% de CO<sub>2</sub> (Zhang *et al.*, 2017).

## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

Atualmente o conceito de “Neutralidade Carbónica 2050” encontra-se presente em qualquer setor e estabelece a visão e trajetória para atingir a neutralidade carbónica até 2050, ou seja, para tornar o balanço entre as emissões e as remoções de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito de estufa (GEE) da atmosfera.

O impacto ambiental negativo da indústria do cimento está relacionado principalmente com as elevadas emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia. Este impacto pode ser atenuado com a utilização da Cura por Carbonatação Acelerada (CCA) e, simultaneamente, com a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS). Indo ao encontro do tema deste trabalho, nos próximos subcapítulos abordam-se a utilização de resíduos em materiais cimentícios, a carbonatação dos materiais cimentícios, uma breve história relativa ao processo de cura tradicional, o aparecimento e evolução da CCA e finalmente, o efeito da CCA em argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos, nomeadamente, cinzas volantes (CV) e pó de vidro (PV).

### 2.1. Indústria do cimento e a sua sustentabilidade

Atualmente, os objetivos da indústria do cimento a nível de investigação são tornar-se mais *eco-friendly*, nomeadamente através da redução das emissões de CO<sub>2</sub> no processo de fabrico de cimento, por exemplo; através da promoção da economia circular e da sustentabilidade; ou pela investigação acerca do emprego de resíduos e subprodutos com potencial aplicação sobretudo em betão, o material de construção mais usado no mundo.

A prática de ecologia industrial implica reciclar os resíduos produzidos por uma indústria para que substituam matérias-primas necessárias a outras indústrias reduzindo assim o impacto ambiental de ambas. Além disso, uma boa parte dos resíduos gerados, possui valor comercial se forem adequadamente tratados e, portanto, poderão ser considerados matéria-prima potencial noutros processos de produção, isto é, subprodutos. (Alonso, A. 2016)

Uma das formas para promover a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, melhorar as características de durabilidade do betão e reduzir o consumo de matérias-primas, consiste na substituição parcial de cimento por resíduos de diversas indústrias.

### 2.1.1. O cimento como produto

O cimento consiste, segundo a NP EN 197-1 (2012), num “material inorgânico bastante moído, resultante das reações químicas e dos processos de hidratação, quando adicionada água, que endurece e mantém a sua resistência mesmo debaixo de água”.

O fabrico do cimento consiste na junção de matérias-primas moídas, em proporções apropriadas, cozidas num forno rotativo, com uma temperatura de cerca de 1450°C para que ocorra a fusão entre os constituintes. Obtendo-se de seguida um material com dimensão de grãos entre 10 e 30 mm, chamado de clínquer. O fabrico do cimento exige um alto consumo de energia, seja ela térmica (pela queima de combustíveis para aquecer os fornos rotativos), seja ela elétrica (através da movimentação dos moinhos). Porém, apesar de este não ser o fator mais negativo para o meio ambiente, e de não serem produzidos resíduos sólidos, ocorre uma elevada emissão de GEE (Moreira, B. 2022).

O cimento Portland mais comum na construção resulta da mistura do clínquer moído com gesso e com outras adições. Estas adições foram implementadas, inicialmente, para reduzir o consumo de cimento e consequentemente reduzir o custo. Atualmente, o uso destas adições é claramente mais amplo e visa promover a sustentabilidade ambiental e económica. (Aguilar, J.B. 2009).

O cimento é composto maioritariamente por clínquer. O clínquer é o principal elemento na composição de cimentos Portland. Estes compostos traduzem numa acentuada característica de ligante hidráulico e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação. A produção do clínquer é o núcleo do processo de fabricação de cimento, sendo a etapa mais complexa e crítica em termos de qualidade e custo. O processo de fabrico de cimento atual, apesar das melhorias entretanto verificadas, torna-se insustentável do ponto de vista ambiental, mesmo sendo as matéria-prima abundantemente encontradas em jazidas de diversas partes do planeta, sendo de 80% a 95% de calcário, 5% a 20% de argila e pequenas quantidades de minério de ferro (Alonso, A. 2016).

## 2.2. Utilização de adições em materiais cimentícios

Perante o aumento na preocupação com o meio ambiente, e visando a sustentabilidade, a procura constante de alternativas ao cimento Portland é evidente. Com isto em mente, estudos tem sido realizado sobre a utilização de materiais que possam oferecer melhorias no desempenho do betão (as adições apresentadas podem se caracterizar como materiais cimentícios), reduzindo assim a quantidade de

cimento necessária, e consequentemente, ao reduzir-se a procura, reduz-se o impacto ambiental causado pela indústria do cimento.

Estes materiais são conhecidos como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e podem atuar no aprimoramento do betão e até conjugar determinadas qualidades consoante a sua finalidade e são, em geral, subprodutos que, assim, contribuem para a circularidade da economia circular. Alguns desses exemplos de MCS são a sílica de fumo, as cinzas volantes, escórias granuladas de alto-forno, cinzas de casca de arroz, resíduos de mármore, resíduos de construção e demolição (RCD), pó de vidro através da reciclagem, entre outros.

A NP EN 206-1 (2007) define adição como “material finamente dividido utilizado no betão com a finalidade de lhe melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais”. A utilização de adições está regulamentada, apenas podendo ser utilizadas na produção de um cimento, argamassa ou betão as adições que cumprem as respetivas exigências normativas.

É importante referir que, segundo a mesma norma, as adições podem ser classificadas em dois tipos: Tipo I e Tipo II. As adições tipo I consistem em adições quase inertes, ou seja, não apresentam propriedades hidráulicas latentes, nem pozolânicas. Nas adições de Tipo II essas mesmas propriedades (hidráulicas e pozolânicas) encontram-se presentes. Como exemplos das tipo I pode ser referido o filler calcário e como tipo II as cinzas volantes, as sílicas de fumo, as pozolanas naturais, as escórias granuladas de alto-forno moídas, as cinzas de casca de arroz. As adições tipo II podem minimizar a quantidade de hidróxido de cálcio, C-H, resultante da hidratação do cimento, contribuindo assim, para um acréscimo da quantidade de silicato de cálcio hidratado, C-S-H, com consequentes vantagens do ponto de vista da resistência e da durabilidade. (Camões, A. 2002)

De acordo com a NP EN 197-1 (2012), algumas das adições que podem ser utilizadas como constituintes de um cimento são escória de alto forno, sílica de fumo, pozolana natural, pozolana calcinada, cinza volante e filler calcário. Na Figura 1 encontram-se alguns constituintes do cimento.



*Figura 1 – Alguns constituintes do cimento*

Filler calcário é a matéria-prima obtida através da moagem fina de calcário, basalto, materiais carbonáticos. Este material possui uma granulometria muito fina, o que faz dele uma favorável escolha para aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade de argamassas e betões.

A escória, de aparência semelhante a areia grossa, é um subproduto de alto-forno. Entre diversas impurezas como outros metais, concentram-se na escória silicatos, que apesar de rejeitados no processo de metalização, proporcionam características de ligante hidráulico. Sendo um subproduto, este material tem menor custo em relação ao clínquer e é utilizado também por elevar a durabilidade do cimento, principalmente em ambientes com presença de sulfatos. Porém, a partir de certo grau de substituição de clínquer a resistência mecânica passa a diminuir.

As pozolanas reagem espontaneamente com a cal, óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), em fase aquosa, por conterem elevado teor de sílica ativa  $\text{SiO}_2$ . Assim são um material silicoso ou sílico-aluminoso que, quando finamente moído e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) formando compostos com propriedades cimentícias. Originalmente, as pozolanas são rochas de origem vulcânica, embora, o termo também englobe os materiais produzidos industrialmente, ou derivados de CV de processos de queima industrial. As principais vantagens resultantes da adição de pozolana ao cimento comum é a hidratação lenta, possibilitando baixo calor de hidratação e que leva ao aumento da resistência do betão aos sulfatos e a outros agentes agressivos ácidos. Existem no mercado os cimentos pozolânicos que são uma mistura de pozolanas naturais e industriais com cimento Portland.

A sílica de fumo é um subproduto que se obtém no processo de fabricação de metais e ligas de silício e ferrossilício. No forno, ao produzir-se a redução do quartzo, são libertados gases que contêm um pó extremamente fino, cuja composição química contém uma percentagem muito elevada (em geral superior

a 90%) de dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$  (Camões, A. 2002). Também é possível utilizar a sílica ativa, específica da produção de ferro silício.

Outro resíduo que pode ser incorporado no cimento é a cinza de casca de arroz. Este é um subproduto gerado pela agroindústria e é oriundo do processo da queima da casca de arroz. Este resíduo pode apresentar altas percentagens de sílica reativa ou amorfa após o processo da queima controlada da casca de arroz e é normalmente usado em argamassas e betões por apresentar propriedades pozolânicas (Bezerra *et al.* 2011). Mehta e Monteiro (1992) afirmam que basta uma substituição de 10% a 20% de cinza de casca de arroz (em massa), pelo cimento, para que o betão se beneficie com ganho de resistência mecânica e diminuição de permeabilidade com relação a sulfatos e cloretos. Entretanto, a grande absorção da água da cinza de casca de arroz pode diminuir a trabalhabilidade do betão no estado fresco, se um elevado teor de cinza for adicionado.

Os RDC são resíduos gerados em grandes quantidades durante todo o processo construtivo, manutenção, remodelação e principalmente na demolição de edifícios. Estes foram desde sempre enviados para aterros/lixeiros e maior parte das vezes, sem separação por tipologia. Nas últimas décadas começaram a surgir preocupações sobre a gestão dos RDC's, sendo em Portugal, um dos maiores fluxos de resíduos. De forma a uniformizar e facilitar a identificação dos RDC's na União Europeia existe a Lista Europeia de Resíduos, LER, (Alonso, A. 2016). Já Risson *et al.* (2023) avaliaram o uso do pó de RDC's tratados com  $\text{CO}_2$  e Verificam que o tratamento com  $\text{CO}_2$  aumentou a massa específica e diminuiu a absorção de água dos pós reciclados de RCD, sem influenciar o desempenho mecânico (resistência à compressão obtida pelos autores na Figura 2), quando utilizado como MCS.

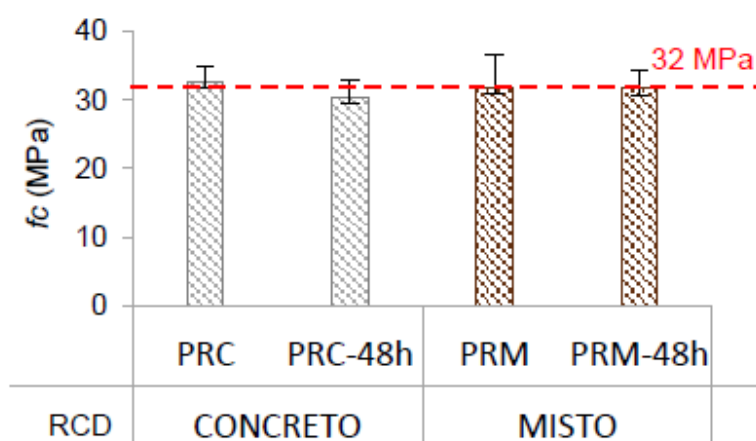


Figura 2 - Resistência à compressão dos cimentos compostos por 25% de pó reciclado de RDC's (Risson *et al.* 2023)

Além disso, o potencial de captura de  $\text{CO}_2$  associado ao uso do pó como MCS, podem vir a contribuir para mitigar as emissões de carbono associadas à indústria do cimento, além de ser uma alternativa à economia circular no setor da construção.

### 2.2.1. Cinzas volantes (CV)

A incorporação de CV, resultantes da queima de carvão, iniciou-se nos anos 30, quando as CV começaram a estar disponíveis em grandes quantidades, e assim foram usadas como uma substituição parcial de cimento, para reduzir o fator económico do betão. Atualmente, a aplicação de CV era justificada por diversas razões, sendo de destacar a redução de custos, a melhoria da trabalhabilidade, a redução do calor de hidratação, a melhoria na resistência aos sulfatos, a redução da expansão devida à reação álcalis-sílica e as contribuições relativamente à resistência e durabilidade do betão endurecido (Camões, A. 2002).

A norma NP EN 450-1 (2012) define as cinzas volantes como pó fino que apresenta uma constituição essencialmente baseada em partículas vítreas e esféricas, com propriedades pozolânicas e quimicamente ricas em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

A norma americana ASTM C618 (2022) agrupa as CV em duas classes conforme a sua origem. As CV resultantes da queima de antracite ou carvão betuminoso, de baixo teor em cálcio, são da classe F e apresentam propriedades pozolânicas, mas não têm propriedades aglomerantes e hidráulicas. As cinzas volantes provenientes da queima de carvões sub-betuminosos ou de lenhites, de alto teor de  $\text{CaO}$ , são da classe C e têm propriedades pozolânicas e aglomerantes.

Uma vez que, nesta dissertação, se irá proceder à comparação entre CV e PV, é importante referenciar algumas propriedades físicas e químicas desses materiais. Quanto às CV, as propriedades físicas traduzem-se em partículas irregulares ou angulares, com um diâmetro que pode variar entre menos de  $1\text{ }\mu\text{m}$  e  $150\text{ }\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro médio, em geral, entre  $7\text{ }\mu\text{m}$  e  $12\text{ }\mu\text{m}$ . Estas semelhanças nas propriedades físicas irá tornar a mistura mais homogênea, melhorando especialmente a trabalhabilidade da mesma. Quanto à sua superfície específica, varia entre os 250 e os  $500\text{ m}^2/\text{kg}$ . Relativamente às características químicas, as CV são genericamente compostas por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Uma propriedade fundamental das CV é a sua pozolanicidade e esta encontra-se diretamente relacionada com o teor em sílica amorfa (Moreira, B. 2022).

Quanto aos resultados no desempenho de betões com CV foi comprovado que CV com alto teor de cal traduz-se num comportamento semelhante ao cimento Portland na formação de ligações hidráulicas; a finura das partículas aumenta a compactação; temperaturas de cura elevadas aumentam a resistência para idades de cura precoces, mas afetam negativamente para idades de cura tardias

Medeiros (2018), utilizou CV em argamassas, com dimensão inferior a 45  $\mu\text{m}$ , e substituições de cimento por CV de 10%, 20%, 30% e 35%, estudadas em temperaturas de cura de 23°C e 38°C (Figura 3), comprovando que quanto mais elevada a temperatura, mais elevado será o seu desempenho.

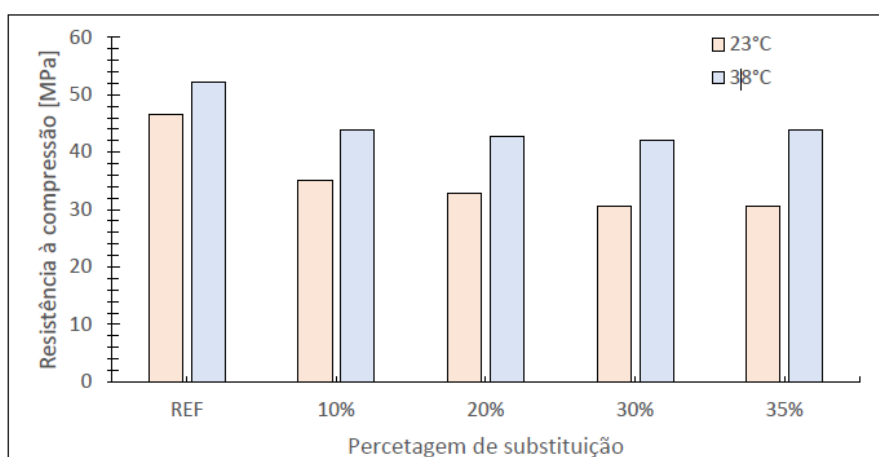


Figura 3 - Resistência à compressão com diferentes temperaturas e diferentes percentagens de substituição por CV (Medeiros, R. 2018)

No entanto, como descrito no capítulo 1, uma grande quantidade de CV usadas em Portugal era proveniente das centrais termoeléctricas do Pego e de Sines, e uma vez que estas encerraram a sua produção no ano de 2021, estudos atuais focalizam na descoberta e/ou aprofundamento da utilização de MCS como substituto parcial do cimento, que possa replicar o efeitos das CV. Tanto no Mundo, como em Portugal, com a implementação das metas para alcançar a Neutralidade Carbónica 2050, tornou-se imperativo investigar alternativas sustentáveis que possam substituir este tipo de adição e evitar ter de aumentar as quantidades de clínquer (material cujo processo é bastante negativo para o meio ambiente, como apontado anteriormente) para manter o desempenho do betão.

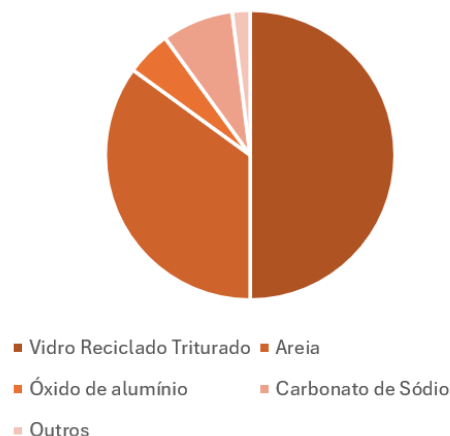
### 2.2.2. Pó de vidro (PV)

O Pó de Vidro, PV, é um dos diversos resíduos ou materiais reciclados que podem ser utilizados como substituto parcial do cimento e que se encontram, atualmente, em grande foco na comunidade científica da construção civil.

O vidro é um material proveniente da aglomeração de matérias-primas naturais (maioritariamente por areia, mas também por calcário, carbonato de sódio, óxido de alumínio (alumina) e corantes ou descorantes), o que possibilita uma grande variedade de vidro. O processo de fabrico de vidro é fundamental para garantir boa resistência ao material. Resumidamente, as matérias-primas são levadas a um misturador, para depois serem inseridas num forno de fusão, onde a transformação para vidro ocorre, através do efeito do calor. De seguida, são levados para as máquinas de conformação (para obterem as morfologias desejadas). Finalmente a peça de vidro é resfriada lentamente até à temperatura ambiente. Este processo irá aliviar as tensões normalmente criadas na conformação, tornando a peça mais resistente (Neto, K.,2017).

Sendo o vidro um material com potencialidade para ser 100% reciclável, e sendo usado das mais diversas maneiras nos dias de hoje, é pertinente pensar na implementação deste material na indústria da construção, e verificar as vantagens e desvantagens, tanto ambientais como económicas.

A reciclagem do vidro na indústria vidraceira ocorre com o vidro utilizado/partido, que depois é triturado. Este material triturado é misturado novamente com areia e outros minerais, aproximadamente nas quantidades demonstradas na Figura 4, para posteriormente, ser novamente fundido e arrefecido para formar novos vidros, sem ocorrer perda de qualidade ou de pureza (Recicloteca, 2024).



*Figura 4 - Composição do vidro reciclado*

No contexto da descarbonização e da neutralidade carbónica 2050, a reciclagem do vidro representa uma mais-valia neste panorama, pois exhibe um conjunto de vantagens, entre elas; a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e de SO<sub>2</sub>; reduz o consumo de energia; diminui o volume de lixo depositado nos aterros; a extração de areia para produção de vidro é reduzida, contribuindo para a preservação dos recursos naturais.

O vidro sodo-cálcico, vidro à base de cálcio, sódio e sílica, é atualmente o vidro mais comum (garrafas, frascos e janelas), e pode ser dividido por três cores, caracterizados pelos seus diferentes componentes (branco, âmbar e verde, constituídos parcialmente por trióxido de enxofre,  $\text{SO}_3$ , óxido de ferro,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e óxido de cromo,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , respetivamente para obtenção das cores que os distinguem). Estudos mostram que quando o vidro é usado como pó finamente moído, as partículas de vidro fino se comportam como um material pozolânico, reagindo com os hidratos do cimento para formar silicato de cálcio hidratado secundário, aumentando a resistência e a durabilidade do betão a longo prazo (Olofinnade *et al.* 2017; Nassar *et al.* 2021).

Após uma pesquisa bibliográfica sobre as campanhas experimentais que têm sido feitos com PV, é plausível assegurar que consoante a finura do PV aumenta, o tamanho das partículas diminui, o que leva a um aumento da resistência à compressão.

A incorporação de vidro nas argamassas pode levar à ocorrência de reações álcalis-sílica (RAS), que consistem em reações químicas que causam expansão do agregado através da formação de um gel solúvel e viscoso de silicato de sódio, no qual este gel higroscópico incha e aumenta de volume ao absorver água, comprometendo o potencial do betão ou argamassa. Estes géis são responsáveis pela expansão que ocorre nos materiais à base de cimento devido à chegada tardia dos iões de cálcio (Stark *et al.* 1993). Porém estudos anteriores indicam que a RAS não ocorre quando o tamanho das partículas é inferior a  $75\ \mu\text{m}$  (Matos e Sousa-Coutinho, 2012; ASTM C1866 (2022)).

Quanto aos estudos relativos às percentagens de substituição de cimento por PV, Moreira (2023), elemento integrante do grupo de investigação GlassCON, avaliou o desempenho de betão com grandes incorporações de PV. Assim como no presente trabalho o autor também sujeitou os seus provetes ao processo de carbonatação, mas nesse caso a carbonatação foi realizada até aos dias de ensaio (7, 14, 28, 90 e 180 dias) após 28 dias de cura tradicional e mais 14 dias, a temperatura ambiente ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), a uma humidade relativa controlada de  $57 \pm 3\%$ . Na Figura 5 é possível observar a melhoria obtida ao longo do tempo, quando comparado com a composição produzida com 100% de cimento (300C), aos betões com 50% e 70% de substituição de cimento por PV.

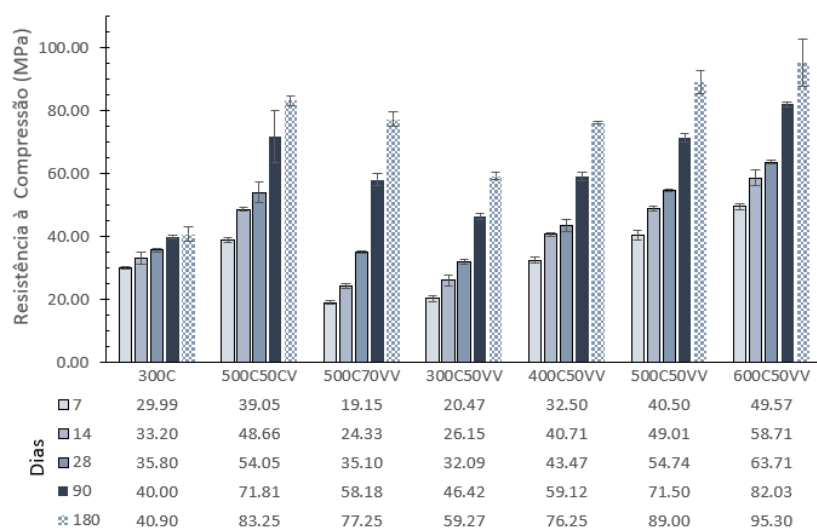


Figura 5 - Resistência média à compressão aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias (Moreira, 2023)

### 2.3. Carbonatação dos materiais cimentícios

A carbonatação é um dos mecanismos mais correntes de deterioração do betão armado. O  $\text{CO}_2$  presente no ar penetra nos poros do betão e reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e água (reação exposta na Equação (1)). Este processo é acompanhado pela redução da alcalinidade do betão (Spybuilding, 2011).



Através da equação (1) pode-se afirmar que decorrem duas características que podemos considerar relevantes. Primeiramente, a porosidade do betão diminui devido à diferença de volume molecular dos reagentes e dos produtos de reação. Este fenómeno pode desencadear a deterioração do betão, a partir da sua superfície para o interior. Em segundo lugar, o pH do betão sofre uma redução. Em condições normais, o pH do betão deve encontrar-se na faixa de 12 a 13 e a carbonatação resulta na baixa desse valor para menos de 9, mais ácida. A carbonatação pode resultar na destruição da camada passivante que envolve os varões de aço. Consequentemente, reagindo com o oxigénio e a água, o processo de corrosão inicia-se, reduzindo a vida útil da estrutura de betão armado. O principal produto formado pelas reações de carbonatação é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), o qual é insolúvel (Camões, A.,2019).

Na segunda metade do século XX numerosos estudos revelaram que o silicato de cálcio hidratado pode ser submetido a carbonatação e relata-se que essa reação ocorre num segundo momento, quando a maior parte do  $\text{Ca(OH)}_2$  já foi consumido (Morandeu *et al.*, 2014).

Desde o início do século XX diversos autores estudaram o efeito da carbonatação de hidratos de cimento. A carbonatação precoce envolve a utilização de  $\text{CO}_2$  na produção de betão levando às reações de carbonatação ocorrerem juntamente com a hidratação precoce do cimento, por meio de uma exposição deliberada do cimento fresco ao  $\text{CO}_2$ . A carbonatação ocorre rapidamente e pode contribuir para um material mais denso, uma vez que o produto formado dessa reação irá preencher mais eficazmente os poros, melhorando a matriz do material, resultando num aumento da resistência mecânica. A duração e o método de aplicação do  $\text{CO}_2$  variam dependendo do processo, mas podem ser tão curtos quanto alguns segundos de exposição ou tão longos quanto a cura acelerada inicial, em que a reação ocorre em idades muito precoces no betão fresco.

De acordo com Maries (1985), o mecanismo da reação de carbonatação ocorre sequencialmente conforme descrito abaixo:

- 1) Difusão de  $\text{CO}_2$  no ar;
- 2) Permeação de  $\text{CO}_2$  através do sólido;
- 3) Solvatação de  $\text{CO}_2$  (gasoso) para  $\text{CO}_2$  (aquoso);
- 4) Hidratação de  $\text{CO}_2$  (aquoso) para  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ;
- 5) Este é um passo lento e determinante da taxa;
- 6) Ionização de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  para  $\text{H}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ . Ocorre quase instantaneamente, fazendo com que o pH caia tipicamente de 11 para 8;
- 7) Dissolução das fases mais solúveis do cimento hidratado, sendo um deles o Hidróxido de Cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- 8) Nucleação de  $\text{CaCO}_3$ , Carbonato de Cálcio. A nucleação é favorecida por temperaturas ligeiramente elevadas e pela presença de material finamente dividido;
- 9) Precipitação de fases sólidas. No começo, vaterita e aragonita podem ser formadas, mas são revertidos em calcita. Carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ , quase insolúvel para um pH superior a 5, amorfo pode ser encontrado no produto final;

10) Carbonatação Secundária. O gel, silicato de cálcio hidratado (C-S-H) se forma e é progressivamente descalcificado, convertendo-se em última análise em  $\text{CaCO}_3$ , Carbonato de cálcio.

A forma como a carbonatação nas primeiras idades atua nos materiais cimentícios será aprofundada no subcapítulo 2.5, relativo à CCA.

A reação de carbonatação sofre uma influência direta do meio ambiente envolvente e da composição química do material. Uma vez que o mecanismo de transporte mais comum para a ação da carbonatação é por difusão (Camões, A., 2019) então os fatores relacionados com a difusividade e a reatividade de  $\text{CO}_2$  são os que mais influenciam o processo de carbonatação. Sendo eles a temperatura, a concentração de  $\text{CO}_2$  e a pressão, o teor de água, a humidade relativa (HR).

Quanto à temperatura, pode-se afirmar que a taxa de difusão e a taxa de reação de carbonatação aumentam com a temperatura. Segundo Haselbach e Thomle (2014) o sequestro de  $\text{CO}_2$  à pressão atmosférica é crescente até alcançar a temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , a partir daí ele começa a diminuir. Observou-se que o aumento da temperatura até  $60^\circ\text{C}$  promove o aumento da difusão do  $\text{CO}_2$  para o interior dos poros e da quantidade lixiviada de íons  $\text{Ca}^{2+}$ , ocasionando o aumento da carbonatação; já temperaturas maiores que  $60^\circ\text{C}$  reduzem a solubilidade do  $\text{CO}_2$  na água, diminuindo assim a taxa de carbonatação (Benitez, L. 2019).

Os ambientes com taxas de concentração de  $\text{CO}_2$  e de pressão elevadas tornam-se propícios para aumentar a velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$ , favorecendo a carbonatação.

O teor de água é fundamental para desencadear a reação de carbonatação pois a água é necessária para que os iões se formem, reajam e produzam  $\text{CaCO}_3$ . Em condições saturadas a carbonatação torna-se lenta devido à redução da velocidade de difusão do gás (Lagerblad, 2005).

A HR do meio envolvente, nomeadamente da câmara de carbonatação, interfere diretamente na difusão do  $\text{CO}_2$  e na cinética da reação de carbonatação.

Voltando à temática desta dissertação torna-se fundamental abordar como ocorre a carbonatação quando incorporado CV e PV.

### 2.3.1. Carbonatação em CV e PV

As argamassas e betões com substituição parcial de cimento por CV ou PV, tendencialmente resultam em maiores profundidades de carbonatação, isto deve-se ao fato de estarmos perante materiais com características pozolânicas que resultam em reações pozolânicas que provocam a diminuição do hidróxido de cálcio.

Quanto à incorporação de CV e PV, como substituto parcial de cimento, diversos estudos atentam aos efeitos e melhorias que pode acrescentar ao betão e alguns autores analisaram o efeito da carbonatação acelerada quando conjugado com a substituição parcial de cimento por adições, como é o caso de Matos (2010).

Matos A. (2010) analisou as propriedades relacionadas com a durabilidade, incluindo a carbonatação de diferentes tipos de argamassas com substituição parcial de cimento por 10% e 20% de PV. Nos seus resultados, a carbonatação foi maior nas argamassas com PV, como é habitual quando são utilizados materiais pozolânicos, pois é esperado que as reações pozolânicas, pela criação de uma microestrutura mais densa. Após 2 meses de cura húmida, os provetes foram inseridos durante 2 meses numa câmara de carbonatação acelerada (HR de 65%, temperatura aproximadamente igual 20°C e concentração de CO<sub>2</sub> de 5%). Nos seus resultados, a carbonatação foi menor nos provetes de controlo, sem PV, em todas as idades e as argamassas com PV tiveram profundidades de carbonatação médias semelhantes após 2 meses na câmara de carbonatação acelerada.

Também Guo *et al.* (2020) obtiveram maiores profundidades de carbonatação, quando ensaiadas composições com 10% e 20% e com uma relação água/ligante (A/L) de 0,5. Quando comparada a profundidade de carbonatação obtida, entre a composição sem vidro e a composição com 20% de vidro, os autores observaram um aumento de 3 mm para 8 mm. Estes resultados corroboram com o investigado por Reis R. (2022) onde a utilização de SCM's também provocou um aumento na profundidade de carbonatação.

Uma vez abordado a ação da carbonatação como uma das principais causas de deterioração do betão, nos subcapítulos seguintes abordam-se o estado do conhecimento relativo a cura tradicional e a cura por carbonatação acelerada (CCA).

## 2.4. Cura por Carbonatação Acelerada (CCA)

### 2.4.1. Breve exposição sobre cura tradicional

Indo ao encontro da temática deste trabalho, apontam-se algumas considerações gerais sobre o processo de cura do cimento. Sendo este processo fundamental para garantir a durabilidade do material, é importante referir como se processa, os diferentes tipos que são aplicados nos dias de hoje assim como algumas consequências resultantes de uma má execução no processo de cura.

A cura do betão refere-se ao tratamento do betão recém-colocado, através de um conjunto de práticas que visam manter o betão húmido para assegurar que a hidratação do cimento, processo químico que permite ao betão adquirir resistência e durabilidade, ocorra de forma eficiente. Esta hidratação é contínua ao longo do tempo. Para que essa reação ocorra de maneira eficiente, é essencial que o betão permaneça húmido durante um período prolongado após a colocação.

Uma cura eficiente apresenta inúmeras vantagens, uma delas é a melhoria na resistência à compressão e à tração. A durabilidade também é melhorada, pois uma boa cura resulta num material com estrutura porosa mais vantajosa, devido a eficácia das reações no interior, em preencher os poros. Quanto às fissuras, a humidade presente numa boa cura, impede a formação de fissuras devido à retração plástica e térmica. Um bom processo de cura resulta, também, num betão mais denso e, consequentemente, menos permeável à água e outros agentes agressivos.

Uma cura eficiente envolve uma combinação de fatores como tempo, temperatura e humidade. Para uma determinada relação água/cimento (A/C), quanto maior o período de cura, maior será a resistência final obtida, com peças de betão submetidas a uma cura húmida contínua, mostrando resistência três vezes maior que as alcançadas ao ar livre (Metha e Monteiro, 2008)

Existem vários métodos para curar o betão sendo os mais comuns a cura húmida (ou tradicional), cura química e cura térmica.

A cura húmida envolve manter a superfície constantemente húmida, normalmente através da rega constante. Pode-se referir como boa técnica de construção é proceder à betonagem de elementos construtivos, nas alturas do ano em que a precipitação ajude a este processo de rega e assim melhorar o processo de cura.

A cura química consiste na aplicação de produtos à base de resinas, acrílicos ou ceras, formando uma barreira protetora na superfície e desta forma, preservar a humidade interna, melhorando as características finais do betão. Esta técnica é usualmente usada em pavilhões, parques de estacionamento e pátios. Na Figura 6 representa-se duas formas possíveis deste tipo de cura: por aspersão e por pintura.



*Figura 6 - Cura química*

A cura térmica (ou a vapor) promove a aceleração da reação de hidratação, uma vez que a alta temperatura e a atmosfera saturada de vapor reduzem o período de latência entre o cimento e a água, fazendo com que a reação de hidratação ocorra mais cedo, promovendo o rápido endurecimento do betão (Glanville e Neville, 1997).

Esta prática baseia-se em submeter o betão a altas temperaturas de forma controlada e programada. Uma das formas de proceder a este tipo de cura consiste em cobrir os elementos a serem curados e injetar vapor até a temperatura de, aproximadamente de 65°C, gradualmente subindo a temperatura de 20°C a 20°C por hora. A cura deve ser iniciada após 2 horas do término da betonagem, mantendo a temperatura máxima por um período de +/- 4h. Esse método de cura é muito utilizado na indústria de pré-fabricados.

#### 2.4.2. Cura por carbonatação acelerada (CCA)

A ação de carbonatação, como vista anteriormente neste capítulo, resulta na degradação do betão e é vista como um grande problema na indústria da construção. Apesar de ser um fenómeno responsável pela redução da vida útil e da durabilidade das estruturas, a carbonatação ainda não é compreendida de maneira abrangente, por se tratar de um assunto complexo, afetado por diversos fatores.

O conceito de aplicar CO<sub>2</sub> durante a cura foi inicialmente proposta na década de 1970 e não houve grandes avanços no seu desenvolvimento ou investigação até recentemente. O principal entrave para tal devia-se à produção dispendiosa de CO<sub>2</sub> puro e nos aparentes efeitos negativos conhecidos procedentes da carbonatação ambiental. A urgência de mitigar as emissões de GEE, no entanto, reacendeu o interesse

na cura por carbonatação, principalmente após os anos 2000. Como frisado no Capítulo 1, a consciencialização mundial para o meio ambiente e a sustentabilidade são os principais motores que regem as investigações realizadas nas últimas décadas (Malheiro, R., 2018).

Deste modo os recentes estudos sobre carbonatação, focam no sentido benéfico, ou seja, de estudar as possíveis vantagens que resultam da cura por carbonatação acelerada (CCA). Estudos recentes de Shao *et al.* (2006), Jang *et al.* (2016) e Zhang *et al.* (2017) têm analisado e demonstrado que a reação de carbonatação, quando utilizada como cura não provoca a deterioração do materiais cimentícios, pelo contrário, pode provocar melhorias nas propriedades mecânicas, na porosidade, permeabilidade e consequentemente na durabilidade do material. Uma das mais-valias do uso deste tipo de cura é a capacidade potencial do betão absorver CO<sub>2</sub>, ou seja, capturar carbono.

#### *2.4.2.1. Métodos de CCA aplicados atualmente*

O uso do tratamento com CO<sub>2</sub> logo após a moldagem do betão permite que os compostos C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S, presentes no cimento Portland, reajam rapidamente, promovendo a formação de carbonato de cálcio e o rápido ganho de resistência mecânica. Esse processo é especialmente benéfico para o ganho de resistência precoce, mas deve ser bem controlado para garantir a durabilidade e o desempenho em profundidade ao longo do tempo. A carbonatação acelerada é uma técnica eficaz para aumentar a produtividade em situações que exigem rápida liberação dos elementos estruturais.

A carbonatação com CO<sub>2</sub> seco sob pressão, carbonatação a vácuo, carbonatação a alta pressão e a carbonatação supercrítica são alguns métodos de carbonatação e as suas principais características apresentam-se seguidamente.

Na carbonatação com CO<sub>2</sub> seco sob pressão as amostras solidas são desidratadas pelo fluxo do gás seco, acarretando a falta de água necessária para ocorrer carbonatação (Bertos *et al.*, 2004).

A carbonatação a vácuo é realizada a pressões próximas do vácuo, na presença de um exsicador, por exemplo. Estas condições diminuem a resistência do transporte de água do sólido carbonante para o exsicador, criando um excesso de água dentro do equipamento, ou seja, originando condensação devido ao grande espaço livre médio deixado para as moléculas de vapor de água (Venhuis, 2001).

A carbonatação a alta pressão consiste num ambiente com elevada pressão, a promover a maior difusidade de CO<sub>2</sub> para o interior dos poros do material cimentício. Desta forma, grandes quantidades de

CO<sub>2</sub> serão introduzidas na amostra antes do fecho dos poros, aumentando assim a carbonatação (Bukowsk, 1979).

Na carbonatação supercrítica, o CO<sub>2</sub> comporta-se como um gás denso, sem tensão superficial, facilitando e aumento a penetração nos poros de menores dimensões. Este método vai resultar num produto com propriedades mecânicas aperfeiçoadas assim como uma mudança morfológica considerável (Jones, 1996).

Durante a revisão bibliográfica sobre esta temática, reparou-se que submeter materiais cimentícios a CCA tem acrescido benefícios de grandes valor ambiental devido à absorção de CO<sub>2</sub>, além de ganhos relativos à resistência mecânica e à durabilidade (Hanifa *et al*, 2023).

Este tipo de cura apoia também o pensamento da captura de carbono. Com o intuito de reduzir as emissões de GEE e alinhar com as estratégias para atingir a Neutralidade Carbónica 2050, encontram-se em constante desenvolvimento tecnologias de sequestro de CO<sub>2</sub>. No Canadá, a indústria *CarbonCure*, tem desenvolvido variadas estratégias de captura de carbono através da CCA (Figura 7).

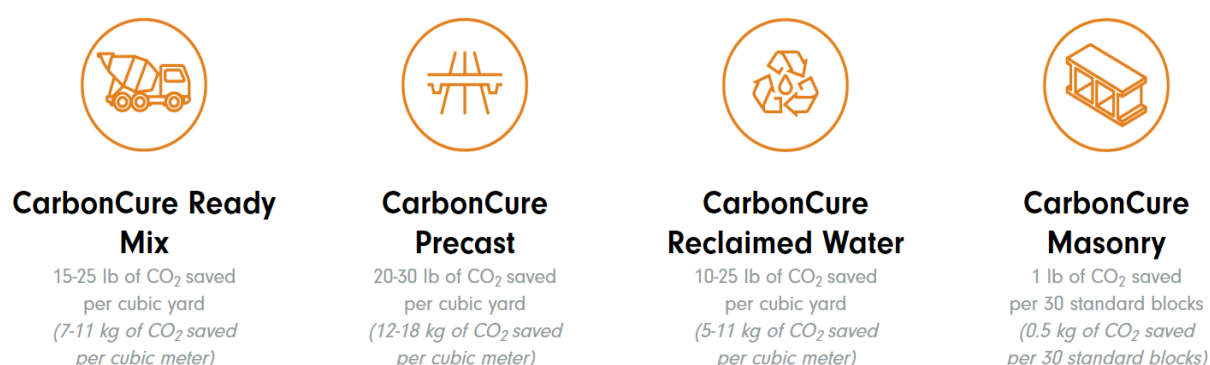


Figura 7 - CarbonCure: Estratégias de captura de CO<sub>2</sub> (CarbonCure)

A CarbonCure tem desenvolvido tecnologias para viabilizar a captura de CO<sub>2</sub> e alcançar melhorias no desempenho do betão. Por exemplo, a Ready Mix consiste na injeção de CO<sub>2</sub> na mistura pronta, onde se irá converter num mineral, melhorando a resistência.

De seguida apresentam-se algumas linhas de pensamentos sobre as vantagens deste tipo de cura em materiais cimentícios, focando na incorporação de CV e PV especificamente

#### *2.4.2.2. CCA em materiais cimentícios com resíduos de CV e PV*

O aprofundamento do desenvolvimento do processo de cura de produtos cimentícios por meio da carbonatação acelerada vem ao encontro da necessidade industrial atual, da procura de estratégias que ajudem a reduzir impacte ambiental negativo da indústria do cimento, de forma a alcançar a neutralidade carbónica 2050.

Quanto à influência da CCA na resistência mecânica, estudos conduzidos por Neves, J. (2014), Jang *et al* (2015), Bertos *et al*. (2004), D. Zhang *et al*. (2017), demonstraram que a referida cura além de capturar CO<sub>2</sub> promove a densificação da microestrutura e alterações nas ligações químicas dos produtos cimentícios, levando ao aumento de resistência mecânica, como já referido anteriormente, Estes autores concluíram que, obedecendo as condições necessárias de HR, pressão, concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura, a CCA em poucas horas produz maiores valores de resistência à compressão do que se sujeitos a cura convencional. Isto acontece uma vez que o CaCO<sub>3</sub> resultante da carbonatação acelerada, irá preencher mais rapidamente os poros, logo reduzindo a porosidade. Também é sabido que o processo de hidratação de materiais, com propriedades pozolânicas, possibilita a criação de uma microestrutura mais densa, levando a acreditar que a substituição parcial de cimento, por CV e PV, resulta num aumento no desempenho a nível de densidade e resistência do material cimentício.

### 3. METODOLOGIA

O seguinte capítulo tem como objetivo mostrar as especificações laboratoriais das duas campanhas práticas realizadas, para aprofundamento do uso de CCA, assim como a substituição parcial do cimento por resíduos com características pozolânicas, nomeadamente CV e PV, como estratégia de redução de emissões de CO<sub>2</sub> e de captura de CO<sub>2</sub>.

As escolhas dos materiais para as diferentes misturas, assim como a sua preparação, a escolha das diferentes condições (de pré-cura, exposição ao CO<sub>2</sub> e cura) encontram-se descritas, no subcapítulo seguinte.

Para a primeira campanha exploratória, optou-se por estudar 4 formas de exposição a CO<sub>2</sub>, contabilizando um total de três composições de argamassas distintas. Foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação, (também foi preparado um provete-teste de cada situação para verificação da possível profundidade de carbonatação, antes dos 28 dias de cura tradicional, em água).

Após a exposição ao CO<sub>2</sub> das condições experimentadas, procedeu-se a uma cura tradicional em água e realizou-se ensaios aos 28 dias, para avaliar as propriedades físico-mecânicas dos provetes produzidos, que permitisse uma perceção dos melhores resultados, e qual o caminho a seguir para a segunda campanha.

Para a segunda campanha escolheu-se as condições de exposição (de pré-cura, exposição ao CO<sub>2</sub> e pós-cura, que apresentaram os melhores resultados e procedeu-se ao estudo de 4 composições de argamassas diferentes para as condições escolhidas da primeira campanha.

Seguidamente à exposição do trabalho laboratorial executado, encontra-se uma breve descrição dos ensaios concretizados após 28 dias, para a primeira campanha, e aos 28 e aos 90 dias na segunda campanha

Foi necessário ter em atenção as limitações colocadas, referidas no primeiro capítulo, que irão influenciar maioritariamente o processo de CCA, e que será especificado no subcapítulo “Condições de Exposição de CO<sub>2</sub> dos provetes”.

### 3.1. Apresentação e caracterização dos materiais escolhidos

Para estudar a CCA, em provetes de argamassas com incorporação de CV e PV, como substituto parcial do cimento foi necessário proceder à escolha dos materiais para o fabrico destes mesmo provetes.

Para a produção das argamassas, além do cimento, da areia e da água, foram utilizados os seguintes materiais com características pozolânicas: CV e PV. Todos os materiais foram cedidos pelo LMC, sendo que o PV utilizado foi material excedente de outras investigações ligadas à GlassCON., especificamente, “Betão de elevado desempenho com grandes incorporações de pó de vidro”, Moreira, O. (2023). Nessa dissertação, os materiais foram caracterizados de forma rigoroso devido a temática em foco, dessa forma irei apresentar de seguida os materiais usados e seguidamente a caracterização dos mesmos.

#### 3.1.1. Apresentação dos materiais

##### *Cimento*

O cimento Portland mais comum na construção resulta da mistura do clínquer moído com gesso e com outras adições. Estas adições foram implementadas, inicialmente, para reduzir o consumo de cimento e consequentemente reduzir o custo. Atualmente, o uso destas adições é claramente mais amplo e visa promover a sustentabilidade ambiental e económica (Aguar, 2007).

No entanto, a escolha do cimento para este projeto recaiu no CEM I 42,5R, sem adições. Isto para garantir que os resultados obtidos não fossem adulterados por qualquer influência potencial de materiais adicionados na sua composição.

O cimento usado para a constituição das argamassas foi o cimento Portland CEM I 42.5, composto por 95% a 100% Clínquer Portland. Segundo a ficha técnica, é um produto com elevado calor de hidratação, de elevada qualidade e desempenho, muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. Espera-se que apresente uma resistência à compressão, aos 2 dias de aproximadamente de 20 MPa e aos 28 dias de 42,5 MPa.

##### *Cinzas volantes*

A norma NP EN 450-1 (2012) define as CV como um pó fino que apresenta constituição essencialmente baseada em partículas vítreas e esféricas, com propriedades pozolânicas e quimicamente ricas em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . As CV, considerado uma das adições mais usadas no nosso país, para substituição parcial do

cimento no fabrico de betões e argamassas, foram inicialmente utilizadas para diminuir o custo do betão. Atualmente, devido ao encerramento das centrais termoelétricas em Portugal, as CV são um material escasso e outras opções precisam ser estudadas de forma a substituir o seu uso.

As CV que foram implementadas na preparação das argamassas, para futuramente proceder à análise de resultados, foram produzidas na Central Termoelétrica do Pego, e resultaram da queima de carvão proveniente da África do Sul e da Colômbia e apresentam 90% de partículas com dimensão inferior a 20  $\mu\text{m}$ , como se irá verificar na caracterização dos materiais, realizada por trabalhos anteriores.

#### *Pó de vidro*

O PV é um dos diversos resíduos ou materiais reciclados que podem ser utilizados como substituto parcial do cimento e que se encontram, atualmente, em grande foco na comunidade científica.

Após uma pesquisa bibliográfica sobre os experimentos que têm sido feitos com PV, é plausível assegurar que consoante a finura do PV aumenta, há também um aumento da resistência de compressão (Malheiro *et al.*, 2022). A incorporação de vidro nas argamassas pode levar à ocorrência de reações álcalis-silica (RAS), que consistem em reações químicas que causam expansão do agregado através da formação de um gel solúvel e viscoso de silicato de sódio, no qual este gel higroscópico incha e aumenta de volume ao absorver água, comprometendo o potencial do betão ou argamassa. Pesquisas anteriores indicam que a RAS não ocorre quando o tamanho das partículas é inferior a 75  $\mu\text{m}$  (Matos e Sousa-Coutinho, 2012).

Como já referido, este projeto encontra-se integrado num grupo de investigação associado ao projeto GlassCon, e como tal, utilizou-se PV ainda existente no LMC, remanescente de outros trabalhos. O PV utilizado neste trabalho proveio do trabalho de mestrado desenvolvido por Moreira, O. (2023), onde foram utilizados resíduos de vidro sodo-cálcico para produção do pó. De seguida, apresenta-se sinteticamente o processo de moagem executado (Figura 8).



Figura 8 - Procedimentos para moagem de vidro (Moreira, O. 2023)

As garrafas foram sujeitas a um processo de limpeza e descontaminação (A), seguido de secagem (B) por 1 hora a uma temperatura controlada de  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ . As garrafas foram quebradas, manualmente, para produzir cacos (C) para, posteriormente, serem submetidas a uma moagem primária (D) (num triturador de mandíbulas, passou por 2 ciclos, levando cerca de 5 minutos). Nesta fase, temos como subproduto (a) cacos de vidro graúdos (E). De seguida, foram submetidos a uma moagem intermédia (F) (num moinho de martelo, por 2 ciclos, cerca de 5 minutos). O subproduto (b) gerado desta moagem eram cacos de vidro miúdos (G). Para obtenção da finura necessária procedeu-se a uma moagem final (H), recorrendo ao moinho de Los Angeles, inseriu-se porções de 5kg, sujeitos a 40 ciclos, de 15 minutos cada. Por fim obtemos o produto final (I) – PV verde.

É importante referir que este procedimento permitiu alcançar uma granulometria do PV semelhante à do cimento e das CV.

## Areia

A areia utilizada para a produção dos provetes de argamassa é um agregado fino, com dimensão nominal de 0/4 obtido por crivagem de material dragado do leito do Rio Tejo, fornecida pela LMC. Trata-se de uma areia quartzosa, constituída por partículas subprismáticas, subangulosas e rugosas/ligeiramente rugosa, à base de quartzo, quartzito, feldspato, xisto, moscovite e biotite. Pode ser utilizada para betão e argamassas para edifícios, estradas ou outros trabalhos de engenharia civil.

### 3.1.2. Caracterização dos materiais

Devido ao reduzido tamanho das partículas, a distribuição granulométrica do cimento, CV e PV foi determinada a laser com o recurso ao equipamento MasterSizer 3000. Este equipamento mede o tamanho das partículas e a sua distribuição por tamanhos através de difração a laser, após a colocação de uma pequena quantidade de amostra, entre 5 e 10 g, na água destilada presente no equipamento. A distribuição granulométrica da areia foi determinada pelo método da peneiração, seguindo a NP EN 933-1 (2000).

A distribuição granulométrica dos materiais, presente na Figura 9, mostra a semelhança entre as curvas de CV e PV, sendo que a curva representativa do cimento também não é muito diferente das duas primeiras. Destaca-se a curva da areia, que sendo agregado miúdo, apresenta dimensões superiores a  $100\mu\text{m}$ , ao contrário das CV e PV.

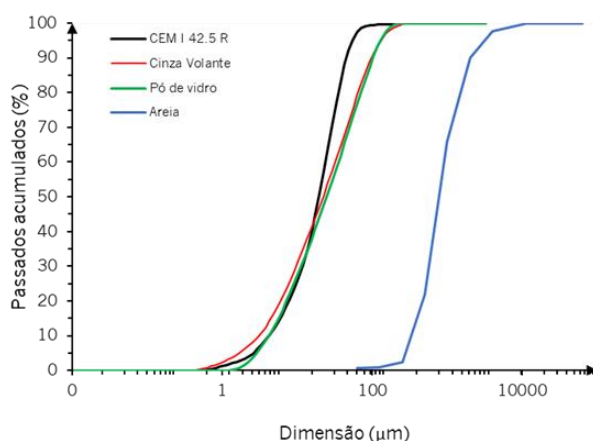


Figura 9 - Distribuição granulométrica dos materiais utilizados (Moreira, O. 2023)

Uma das principais características resultantes da adição de pozolana ao cimento é a hidratação lenta com baixa libertação de calor e aumento da resistência aos sulfatos ou outros agentes agressivos ácidos. A

pozolana consiste num material silicoso que, finamente moído e na presença de água, reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formando compostos com propriedades cimentícias (Almeida, 2015).

A introdução de materiais com características pozolânicas tem por objetivos melhorar a microestrutura do betão. As pequenas partículas de pozolanas, por serem menos reativas do que o cimento promovem inúmeros locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação assim como permitem o aumento na compactação da mistura. No entanto é necessário apontar algumas desvantagens no uso de pozolanas, nomeadamente das CV, dentro das quais: ocorre redução dos níveis de hidróxido de cálcio responsável pelo meio alcalino protetor da corrosão das armaduras, a redução da exsudação pode levar a fissuração, provocada pela evaporação de água e a falta de uniformidade das características das cinzas (Malheiro, R.,2018)

Referente aos materiais com características pozolânicas que foram utilizados para as campanhas laboratoriais, é possível observar algumas das suas propriedades físicas na Tabela 1, assim como a respetiva composição química na Tabela 2.

*Tabela 1 - Caracterização física dos materiais com características pozolânicas (Moreira, O. 2023)*

| Material | Blaine (NP EN 196-6)             | Densidade (LNEC E 64)             | Diâmetros característicos ( $\mu\text{m}$ ) |          |          |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|----------|----------|
|          | $S_e$ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) | $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | $D_{10}$                                    | $D_{50}$ | $D_{90}$ |
| CEM      | 599                              | 3,14                              | 4,68                                        | 21,90    | 54,60    |
| CV       | 740                              | 2,36                              | 3,53                                        | 24,00    | 109,00   |
| PV       | 493                              | 2,60                              | 4,57                                        | 26,00    | 106,00   |

*Tabela 2 - Composição química dos materiais com características pozolânicas (Moreira, O. 2023)*

|     | CaO  | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | MnO | MgO  | $\text{SO}_3$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | RI   | LOI  |
|-----|------|-------------------------|----------------|-------------------------|-----|------|---------------|----------------|----------------------|-----------------------|------|------|
| CEM | 62,7 | 3,06                    | 20,25          | 4,43                    | -   | 2,01 | 3,11          | -              | 0,76                 | 0,25                  | 1,23 | 2,74 |
| CV  | 1,25 | 12,70                   | 53,70          | 22,70                   | -   | 1,55 | 0,79          | 1,60           | 3,46                 | 1,52                  | -    | 6,20 |
| PV  | 11,8 | 1,3                     | 69,2           | 2,3                     | 0,1 | 1,0  | -             | -              | 0,9                  | 13,4                  | -    | -    |

### 3.2. Produção das argamassas

Após a exposição e caracterização dos materiais adotados, foram produzidos diferentes tipos de argamassa, moldadas em provetes prismáticos de 40x40x160 mm.

A escolha entre o fabrico de argamassa ou de betão decaiu sobre fatores logísticos e técnicos: produzir argamassa exige menos PV (material de obtenção demorada); a carbonatação, que foi explorada no Capítulo 2, costuma ocorrer de forma mais rápida em provetes de argamassas uma vez que possuem maior porosidade. Já a dimensão dos provetes foi escolhida com base no tipo de ensaios que se iriam realizar, tendo em conta as suas normativas.

Considerando a utilização de diferentes tipos de materiais com características pozolânicas, e analisando resultados obtidos em projetos anteriores (Moreira, B., 2022), optou-se por utilizar uma razão água/ligante (A/L) igual a 0,50, para todas as argamassas, a fim de promover uma comparação coerente entre os resultados analisados.

Primeiramente, foi necessário definir a composição das argamassas, para obter os mapas de quantidades necessárias e confirmar a disponibilidade das mesmas no LMC. Este planeamento permitiu garantir uma eficaz execução do estudo laboratorial.

Quanto à composição das argamassas foram produzidas um total de 7 argamassas, divididas por duas campanhas: na primeira campanha produziu-se 3 argamassas diferentes (de referência com 100% de cimento, REF; com 25% de substituição parcial do cimento por cinzas volantes, CV; com 25% de substituição parcial do cimento por pó de vidro, PV), que foram expostas a 4 condições de cura distintas e ensaiadas apenas após 28 dias de idade. Para a segunda campanha, selecionou-se a condição de exposição ao CO<sub>2</sub>, que adquiriu melhores resultados e aprofundou-se o mesmo estudo, para idades de 28 e 90 dias, acrescentando uma quarta argamassa com 50% de substituição parcial do cimento por PV.

É importante referir que estas substituições foram realizadas tendo em conta o volume. Primeiramente calculou-se o volume correspondente à percentagem de massa de cimento que se iria substituir, para depois se calcular a massa da adição, CV ou PV, necessária para ocupar esse mesmo volume de cimento. Através do uso de folhas de cálculo disponibilizadas pelo LMC, esta quantificação de materiais tornou-se bastante mais eficiente.

As composições das argamassas de cada campanha, assim como as condições de pré-cura e cura, tradicional ou CCA, selecionadas encontram-se descritas nos subcapítulos seguintes.

Durante a preparação das argamassas, o processo foi muito semelhante entre as duas campanhas, diferenciando, nesta fase do trabalho experimental, a capacidade da misturadora utilizada e o método de vibração aplicado.

Na fase inicial da preparação das argamassas foi importante ter em atenção alguns pontos que poderiam influenciar os resultados obtidos, entre os quais:

- Garantir uma lavagem, limpeza e secagem a 100% (de forma a este processo ser mais eficiente, foi usado um compressor de ar para ajudar a retirar todas as partículas de água) de todos os equipamentos, para garantir que não haja presença de impurezas ou de água que possa influenciar a mistura;
- Garantir uma secagem e arrefecimento a temperatura ambiente da areia utilizada, para evitar que a água, presente anteriormente na mesma, não influencie na relação A/L desejada;
- Garantir uma disponibilidade, limpeza e prontidão dos moldes (assegurar que se encontram oleados) necessários para a produção de argamassa no dia da moldagem.

Após garantir os pontos anteriores, começou-se por fazer pesagens dos materiais necessários para cada amassadura, consoante a capacidade da misturadora. Foi necessário garantir que estas pesagens fossem o mais rigorosas possível, comparativamente às quantidades calculadas para a composição da argamassa.

Na primeira campanha optou-se por usar uma misturadora de capacidade igual a 3 litros, que possibilita a produção de um molde composto por 3 provetes prismáticos com cada mistura. Na segunda campanha, foi utilizado uma misturadora, AMASADORA M-15-A, com capacidade superior (15 litros), que pode produzir 5 moldes, até um total de 15 provetes. Na Figura 10 encontram-se as misturadoras utilizadas no LMC, para a primeira e segunda campanha, respetivamente.



*Figura 10 - Misturadoras no LMC - 1ª campanha e 2ª campanha, respetivamente*

A preparação das argamassas seguiram os parâmetros impostos na norma NP EN 196-1 (2017). Na primeira campanha, a areia, cimento e possíveis adições foram colocadas na misturadora e envolvidos durante 30 segundos por um movimento lento ( $145 \pm 5$  rpm). De seguida, foi se acrescentado gradualmente a água. Após a mistura sofrer um processo mais rápido ( $285 \pm 5$  rpm), ocorre uma pausa onde se raspou as paredes do recipiente. Este procedimento foi finalizado através da imposição de mais uma fase com movimento rápido.

Na segunda campanha, devido à quantidade superior de material, este processo foi distinto. Começou-se por envolver, durante 1 minuto, a areia e 20% da água total. Depois, introduziu-se o cimento e as adições previstas (CV ou PV) e mais 20% da água, para auxiliar a envolver, durante 3 minutos. Dado por terminado essa fase, adiciona-se a restante água e deixa-se durante mais 3 minutos, na velocidade lenta ( $145 \pm 5$  rpm) do misturador. Ocorre então uma interrupção do ciclo para se proceder à raspagem das paredes do recipiente e, para finalizar, com movimento rápido ( $285 \pm 5$  rpm), deixa-se envolver toda a mistura durante mais 1 minuto.

Após finalizar o processo de amassadura, foi necessário proceder a um ensaio de trabalhabilidade no estado fresco, para avaliar, através do cálculo da média, o desvio médio entre as diferentes amassaduras do mesmo tipo argamassa. A trabalhabilidade foi determinada com base na NE EN 1015-3 (2004) e será descrito em pormenor no subcapítulo 3.3.

Após realizar o ensaio de trabalhabilidade, voltou-se a inserir a amostra testada dentro do recipiente da misturadora, e voltou-se a envolver a argamassa manualmente, com movimentos circulares, garantindo a

raspagem da base e das paredes do recipiente, como forma de evitar assentamento e assegurar a homogeneidade dos provetes.

Uma vez preparada a argamassa, foi necessário proceder à compactação recorrendo aos equipamentos de vibração disponíveis no LMC. Uma vez que na primeira campanha, resultavam volumes de argamassa para produzir 1 molde (3 provetes) e na segunda campanha, a quantidade fabricada em cada amassadura era capaz de encher 5 moldes (15 provetes), foi essencial alterar o método de vibração entre as campanhas.

Na primeira campanha a vibração do molde foi realizada individualmente através do equipamento exposto na Figura 11(a), compactador de acordo com o descrito na NP EN 196-1 (2017). Na segunda campanha a vibração foi efetuada na mesa vibratória presente na Figura 11(b).



Figura 11 – Equipamentos utilizados na etapa de compactação

A quantidade de provetes fabricados na totalidade encontra-se descrita no subcapítulo seguinte, 3.2.1, alusivo à composição e as condições de exposição ao CO<sub>2</sub> das argamassas estão descritas no subcapítulo 3.2.2, pois estes foram os fatores decisivos para determinar quantos provetes iríamos avaliar.

Finalizando o processo de preparação das argamassas, todos os provetes foram transportados para a câmara húmida existente no LMC ( $\pm 23^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 60\%$  HR), durante 24h, de acordo com a norma NP EN 196-1 (2017). Decorrido esse tempo, os provetes foram desmoldados e identificados consoante o tipo de mistura, as condições a que irá estar exposto e, no caso da segunda campanha, a idade que irá ser ensaiado em estado endurecido.

Uma vez moldados os provetes, em moldes metálicos padronizados, prosseguiu-se à identificação dos moldes, para posterior desmoldagem, garantindo assim que não iria haver permutas entre os provetes nesta fase.

Este processo encontra-se na Figura 12, onde é possível observar a coerência que foi usada para evitar trocas entre os provetes, conforme as horas de moldagem e o consequente processo de pré-cura e de cura a que estes estariam sujeitos.



*Figura 12 - Processo de desmoldagem e Identificação*

Na Figura 13 apresentam-se alguns dos provetes produzidos e identificados na primeira campanha.



*Figura 13 - Alguns provetes na 1ª campanha*

Na Figura 14 apresentam-se todos os provetes fabricadas e identificados da segunda campanha, antes de se iniciar os devidos processos de pré-cura e cura.



Figura 14 - Provetes fabricados na 2ª campanha

Na Figura 15 encontram-se todos os provetes no processo de cura tradicional, até atingirem 28 dias.

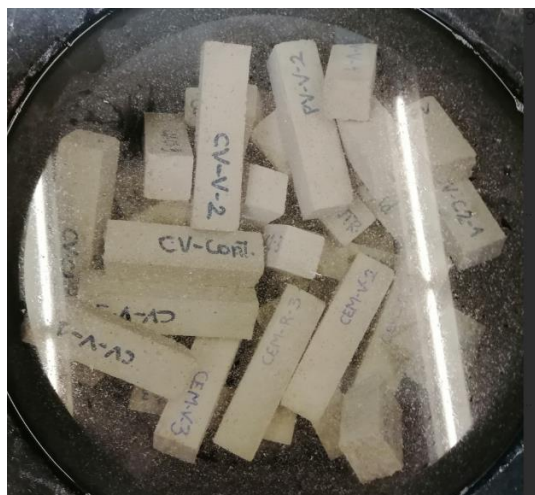


Figura 15 - Cura tradicional de todos os Provates

É importante referir que, dado as variantes existentes para este projeto, o número de provetes tornou-se consideravelmente elevado, o que fez com que a preparação das argamassas fosse diferida no tempo. Na primeira campanha, preparou-se 3 tipos de argamassas, sujeitas a 4 condições de exposição ao CO<sub>2</sub> e decidiu-se preparar cada tipo de argamassa, no início de cada semana, e proceder aos restantes trabalhos durante a semana (desmoldagem, pesagem e desenvolvimento do processo de pré-cura e cura). Na segunda campanha, o processo foi semelhante, no entanto, como a capacidade da misturadora usada era cinco vezes superior, foi possível produzir 2 tipos de argamassas por dia, repartindo, na primeira semana, os moldes de CEM e CV e para a segunda semana, os moldes PV25 e PV50 (estas nomenclaturas encontram-se demonstradas na Figura 14).

### 3.2.1. Composição das argamassas

#### *Primeira campanha laboratorial*

Para uma primeira campanha laboratorial optou-se por produzir e analisar 3 tipos de argamassas distintas, sujeitas a 4 padrões de condições de exposição de CO<sub>2</sub>, assim como de pré e pós-cura. Uma vez que será analisado a integração do uso de CCA combinado com a incorporação de PV, como alternativa às CV, na substituição parcial do cimento, foi necessário obter PV obtido através do processo de moagem de vidro verde reciclado, como já exposto anteriormente.

Numa fase inicial e após uma reflexão focada na investigação já desenvolvida sobre temática da redução de emissões de CO<sub>2</sub> (Hanifa *et al.*, 2023), optou-se por produzir três tipos de argamassa com composições distintas.

Para a argamassa de referência (nomeou-se os provetes produzidos como CEM, para facilitar os ensaios previstos), optou-se por usar 100% de cimento (cimento Portland, CEM I 42,5 R), com uma razão A/L=0,5. Para a segunda argamassa (PV) optou-se por proceder à substituição parcial de 25% do cimento por PV verde, mantendo-se as restantes características semelhantes à primeira argamassa. Como forma de comparação com os materiais produzidos até os dias de hoje, usou-se uma terceira argamassa (CV) com adição de CV, substituindo-se 25% do cimento por CV.

Após analisar as condições que iriam ser estudadas, chegou-se à conclusão de que seriam precisos 13 provetes para cada situação (cada situação será delineada no subcapítulo 3.2.2). Recorrendo às folhas de cálculo fornecidas para determinar as quantidades de materiais necessárias para proceder à investigação laboratorial.

Na Tabela 3 é possível encontrar as quantidades necessárias de cada material, expressas em quilograma por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), para cada tipo de argamassa, CEM (100% de cimento), CV (25% de substituição parcial do cimento por cinzas volantes) e PV (25% de substituição parcial do cimento por pó de vidro verde).

*Tabela 3 - Quantidade de materiais - 1ª campanha*

|     | Areia ( $\text{kg/m}^3$ ) | Cimento ( $\text{kg/m}^3$ ) | CV ( $\text{kg/m}^3$ ) | PV Verde ( $\text{kg/m}^3$ ) | Água ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-----|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| CEM | 1535                      | 512                         | —                      | —                            | 256                      |
| CV  | 1535                      | 384                         | 96                     | —                            | 256                      |
| PV  | 1535                      | 384                         | —                      | 106                          | 256                      |

#### *Segunda campanha laboratorial*

Após o término da primeira campanha, analisaram-se os resultados obtidos através dos ensaios em estado fresco e endurecidos, passados 28 dias após a moldagem. Analisou-se qual a condição de CCA que produziu melhores resultados, comparativamente com os provetes de referência e os de CV e decidiu-se acrescentar uma quarta argamassa composta por 50% substituição parcial do cimento por PV (PV50), como forma de comparar os resultados com os provetes com 25% de substituição parcial de cimento por PV (PV25) e conhecer melhor o comportamento do PV face à CCA.

Para esta campanha criou-se um total de 14 provetes para cada argamassa (cada situação será delineada no subcapítulo 3.2.2).

Na Tabela 4 apresenta-se as quantidades necessárias de cada material, expressas em quilograma por metro cúbico, ( $\text{kg/m}^3$ ), para cada tipo de argamassa estudada na segunda campanha.

*Tabela 4 - Quantidade de materiais - 2ª campanha*

|      | Areia ( $\text{kg/m}^3$ ) | Cimento ( $\text{kg/m}^3$ ) | CV ( $\text{kg/m}^3$ ) | PV Verde ( $\text{kg/m}^3$ ) | Água ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| CEM  | 1535                      | 512                         | —                      | —                            | 256                      |
| CV   | 1535                      | 384                         | 96                     | —                            | 256                      |
| PV25 | 1535                      | 384                         | —                      | 106                          | 256                      |
| PV50 | 1535                      | 256                         | —                      | 212                          | 256                      |

### 3.2.2. Condições de exposição de CO<sub>2</sub> dos provetes

A definição das condições de exposição foi feita após uma criteriosa revisão bibliográfica sobre o tema, associada às condições laboratoriais disponíveis no momento da execução do trabalho.

#### *Primeira campanha laboratorial*

Como referido no subcapítulo 3.2.1, a primeira condição fundamental foi a de referência, que se irá identificar como R. É caracterizada por uma pré-cura na câmara húmida de 24±2 horas, seguido de desmoldagem, identificação (R) e cura tradicional, durante 28 dias submersos em água. Desta situação irão surgir 3 provetes de cada composição de argamassa: CEM-R (1,2,3), PV-R (1,2,3) e CV-R (1,2,3). Este raciocínio para a identificação dos provetes vai se manter ao longo de todo o trabalho.

Na segunda e terceira condição, os provetes estarão expostos ao CO<sub>2</sub> através da introdução dos provetes na câmara de carbonatação disponível no LMC (Figura 16). A câmara, da empresa ARALAB, modelo FITOCLIMA S600PH. Como referido nas limitações, no Capítulo 1, possibilita esta investigação laboratorial, mas dentro de determinados limites. Assim, é possível recriar nesta câmara as seguintes condições: temperatura média de 23°C, HR aproximadamente 60% e uma taxa de concentração de CO<sub>2</sub> reduzida, 5%.



Figura 16 - Câmara de carbonatação

Assim, a segunda condição, consistiu numa pré-cura na câmara húmida de  $24 \pm 2$  horas, seguido de desmoldagem, identificação (C1), uma CCA durante 24 horas na câmara de carbonatação referida anteriormente, e após as 24 horas a serem expostos a  $\text{CO}_2$  os provetes foram encaminhados para o processo de cura tradicional, ou seja, submersos em água a  $21^\circ\text{C}$  até atingirem 28 dias de idade. A identificação será CEM-C1-(1,2,3,4), CV-C1-(1,2,3,4) e PV-C1-(1,2,3,4). Para esta situação será necessário produzir um quarto provete, para verificação da carbonatação ocorrida após as 24h na câmara de carbonatação, este quarto provete irá servir como provete de controlo da carbonatação, como forma de assegurar que, pelo menos, alguns resultados irão ser atingidos. Passadas 24 horas na câmara de carbonatação, o provete de controlo será partido numa ponta e através da solução de fenolftaleína analisou-se os resultados obtidos com aquela exposição. O resultado desta análise permitiu concluir que houve carbonatação no período de 24h e, por isso, os demais provetes seguiram para cura em água por mais 26 dias.

Na terceira condição, foi o tempo da pré-cura que optamos por variar; adotou-se  $48 \pm 2$  horas, em vez de 24h, sendo esta a diferença entre a segunda e terceira condição. Assim, passados dois dias da moldagem, foram retirados do molde, identificados (C2) e encaminhados para 24h dentro da câmara de carbonatação. Após decorridos 24h na câmara de carbonatação, os provetes foram colocados em cestos com água, para ocorrer o processo de cura tradicional, por mais 25 dias. A identificação será CEM-C2-(1,2,3,4), CV-C2-(1,2,3,4) e PV-C2-(1,2,3,4).

Para a quarta condição, tentou-se recriar um ambiente quase de 100% de concentração de  $\text{CO}_2$ . Sendo que a pré-cura consistiu em  $24 \pm 2$  horas na câmara húmida, seguido de desmoldagem, identificação (V) e condições de exposição ao  $\text{CO}_2$  durante 24h e deixados por mais 26 dias em água, como feito para as outras condições. . A identificação será CEM-V-(1,2,3,4), CV-V-(1,2,3,4) e PV-V-(1,2,3,4).

A fim de tentar atingir os 100% de  $\text{CO}_2$  no ambiente de exposição, foi usado um exsicador como ambiente fechado, e com recurso de uma bomba de ar procede-se à extração do ar armazenado no exsicador, vaselina para garantir que a tampa do exsicador se encontrava fechada hermeticamente (este processo foi possível verificar, uma vez que ao ritmo que o ar era retirado, era possível verificar as bolhas de ar presentes entre o exsicador e a tampa a desaparecer) e uma botija de  $\text{CO}_2$  existente no LMC como forma de preencher o espaço interior do exsicador com  $\text{CO}_2$ . Na Figura 18 encontra-se o mecanismo que foi criado para tentar recriar essas condições.

Na Figura 17 encontra-se o mecanismo que foi criado para tentar recriar essas condições.

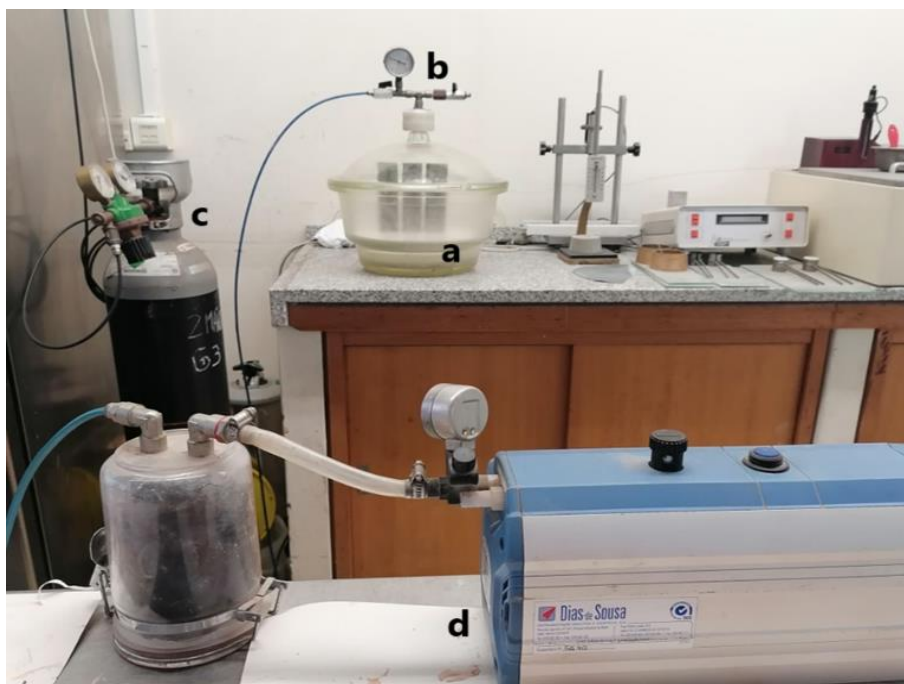


Figura 17 - Mecanismo para simulação de vácuo, 100% de concentração de  $\text{CO}_2$ : a) Exsicador; b) Monitor de pressão; c) Botija de  $\text{CO}_2$ ; d) Bomba de extração de ar

Durante este processo foi preciso manter o controlo da pressão dentro do exsicador. Este parâmetro era indicador de quando se atingia, teoricamente, os 100% de  $\text{CO}_2$  dentro do exsicador. Quando o mostrador apresentava uma pressão aproximada de 0 bar, o exsicador encontrar-se-ia preenchido com gás  $\text{CO}_2$  e, teoricamente, seria suficiente fechar as válvulas, retirar o cabo de alimentação de  $\text{CO}_2$  e os provetes no interior estariam sujeitos a uma esta concentração de  $\text{CO}_2$  durante o tempo que permanecem dentro do exsicador, no caso, 24 horas. Ao final das 24 horas foram observadas perdas na pressão (Tabela 5) e, consequentemente, fugas de  $\text{CO}_2$ .

Tabela 5 - Perdas de pressão em vácuo

|               | 0 minutos                                                                           | 10 minutos                                                                          | 60 minutos                                                                          | 180 minutos                                                                          | 24 horas                                                                              |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Pressão (bar) | -0,05 (aprox. 0)                                                                    | -0,2                                                                                | -0,35                                                                               | -0,6                                                                                 | -0,8                                                                                  |
|               |  |  |  |  |  |

Deste modo, é importante ter em mente, para efeito de análise dos resultados, que os provetes não estiveram expostos à 100% de CO<sub>2</sub> durante as 24 horas que estiveram dentro do exsicador e que se observou uma condensação excessiva dentro do exsicador (Figura 18).



*Figura 18 - Efeito da condensação no exsicador*

Esta condensação pode estar relacionada com a própria reação de carbonatação que resulta em carbonato de cálcio mais água. Este procedimento revelou-se interessante para o estudo da CCA, contudo precisa de ajustes para que se consiga atingir o fim desejado.

Finalizando a exibição das condições da primeira campanha apresenta-se uma tabela-resumo, Tabela 6, com identificação, tempo de duração de pré-cura e de cura, seja tradicional ou CCA.

*Tabela 6 - Condições de exposição de pré-cura e cura - 1ª campanha*

|    | Pré-cura<br>(câmara húmida) | CCA        |                                             | Cura tradicional<br>(em água) |
|----|-----------------------------|------------|---------------------------------------------|-------------------------------|
|    |                             | Tempo      | Condições                                   |                               |
| R  | 24±2 horas                  | -          | -                                           | 27 dias                       |
| C1 | 24±2 horas                  | 24±2 horas | 23°C<br>HR: ±60%<br>% CO <sub>2</sub> = ±5% | 26 dias                       |
| C2 | 48±2 horas                  | 24±2 horas |                                             | 25 dias                       |
| V  | 24±2 horas                  | 24±2 horas | Vácuo (±99% CO <sub>2</sub> )               | 26 dias                       |

### *Segunda campanha laboratorial*

Considerando os resultados obtidos na primeira campanha laboratorial, além das condições laboratoriais para execução dos ensaios, optou-se por selecionar a condição de CCA com melhores resultados, C1, para reprodução na segunda campanha.

Assim, para a segunda campanha, foram produzidas quatro argamassas diferentes (CEM, CV, PV25 e PV50) a duas condições de cura: cura tradicional (R) e CCA (C1).

Como forma de avaliar melhor o efeito das composições pozolânicas, em que o comportamento é mais evidente aos 90 dias, nesta campanha foram criados provetes para proceder aos ensaios em estado endurecido, para idades de 28 e 90 dias. Esta identificação nos provetes será diferenciada pelo acréscimo de “28” para provetes para ensaiar aos 28 dias de idade e de “90” para os de 90 dias.

Uma vez descrita a metodologia contínua para o fabrico dos provetes de argamassas, apresentam-se seguidamente os procedimentos, assim como especificações em que foram baseados para proceder à posterior análise e avaliação dos resultados.

### **3.3. Procedimentos de ensaio**

Em ambas as campanhas efetuaram-se ensaios no estado fresco e no estado endurecido, aos 28 dias, para a primeira campanha, e aos 28 e 90 dias de idade, para a segunda, com o objetivo de avaliar o impacto dos diferentes materiais utilizados para a produção das argamassas, assim como das diferentes condições a que foram submetidos, cura tradicional e CCA.

#### *Ensaio de trabalhabilidade em estado fresco*

A trabalhabilidade foi determinada com base na NE EN 1015-3 (2004) através do uso da mesa de espalhamento (Figura 19).



*Figura 19 - Mesa de espalhamento - ensaio de trabalhabilidade*

O processo de execução deste ensaio consistiu no preenchimento do molde com argamassa, em duas camadas compactado com 10 pancadas cada (uma por segundo, aproximadamente). O molde foi removido e para avaliar o comportamento da amostra, foram dadas 15 pancadas (1 por segundo) e posteriormente mediu-se o diâmetro da superfície.

### *Resistividade elétrica*

A resistividade elétrica permite efetuar a medição da resistividade da superfície da argamassa. Para determinação deste parâmetro utilizou-se o método das quatro pontas, com recurso ao equipamento RESIPOD, da marca Proceq (Figura 20).



*Figura 20 - Equipamento RESIPOD, da marca Proceq*

Durante este teste, uma baixa frequência em corrente alternada (CA) é aplicada entre os dois elétrodos exteriores, enquanto a tensão é medida nos dois elétrodos interiores. Para evitar erros de leitura garantiu-se que: a leitura se realizasse imediatamente após a retirada do provete da água (para assegurar

que todos os provetes estivessem saturados), manteve-se o aparelho com os sensores mergulhados, num recipiente com água, ao longo do ensaio e verificou-se a calibração do aparelho num intervalo de 3 provetes.

Na segunda campanha foi possível medir a resistividade elétrica dos provetes previstos ensaiar aos 90 dias durante o processo de cura tradicional, esses dados estarão expostos no capítulo 4, Análise e Discussão dos Resultados.

### *Densidade Aparente*

Após a determinação da resistividade elétrica, as dimensões dos provetes foram medidas recorrendo a um paquímetro para determinar o volume (V) real do provete, em cm<sup>3</sup>. Também se procedeu à pesagem dos mesmos, determinando a massa (M), expressa em gramas (g). Com o volume e a massa é possível calcular a densidade aparente ( $\rho$ ), em g/cm<sup>3</sup>, através da Equação 2.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

### *Resistência à flexão*

Após determinação da densidade aparente, os provetes foram ensaiados no que diz respeito à resistência à flexão. Este procedimento seguiu a EN 1015-11 e, de acordo com esta norma, a resistência à flexão da argamassa é determinada pelo carregamento de três pontos sob o provete de argamassa endurecida até à sua rotura. Para o ensaio utilizou-se uma prensa universal LLOYD, modelo LR50K Plus (Figura 21). Este equipamento regista a curva de resistência à flexão de cada provetes



Figura 21 - Prensa universal Lloyd utilizada para realização do ensaio de resistência à flexão

Como é possível observar na Figura 21, à direita, o provete é ensaiado até ocorrer rotura total do provete, resultando duas metades. A primeira metade será utilizada para determinação da profundidade de carbonatação e, em seguida, da resistência à compressão. Enquanto a segunda metade será utilizada para determinação da absorção de água por capilaridade e por imersão.

#### *Determinação da profundidade de carbonatação*

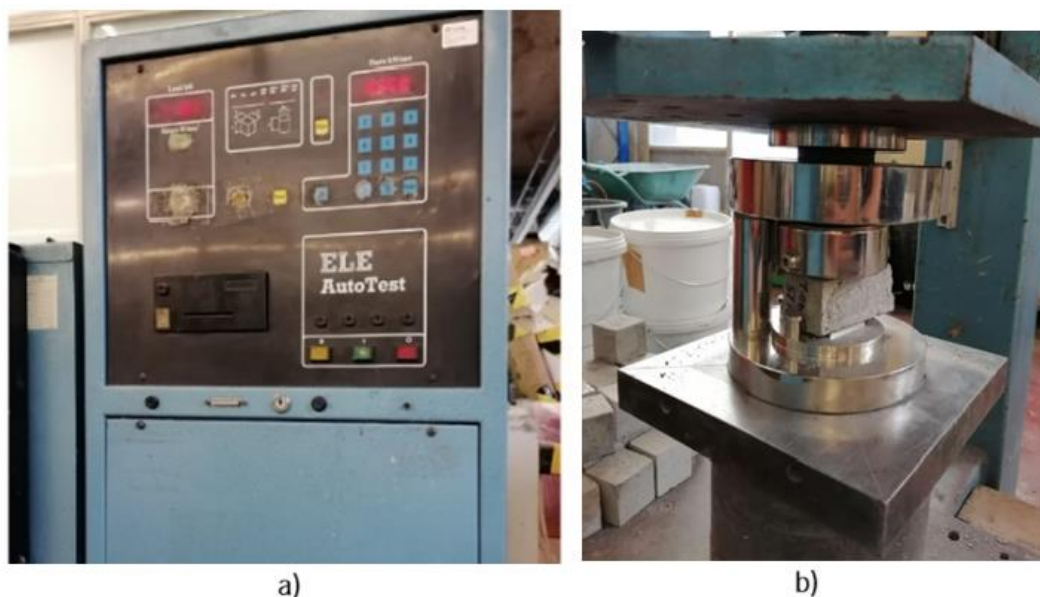
A verificação da carbonatação foi efetuada nas faces fraturadas dos provetes e utilizou-se o método colorimétrico por aspersão de fenolftaleína.

A superfície fraturada foi pulverizada com uma solução alcoólica com fenolftaleína a 0,1%. Nas zonas não carbonatadas, com pH superior a 9, a seção apresenta uma cor vermelho-púrpura. Enquanto nas zonas carbonatadas, com pH mais baixo, a seção mantém-se incolor. Por norma, a carbonatação ocorre a partir dos limites exteriores pois é a partir das extremidades que existe contato com o meio exterior. Posteriormente, através do registo fotográfico efetuado, é possível analisar a profundidade de carbonatação com base na RILEM CPC-18 (1988).

#### *Resistência à compressão*

De modo a avaliar o desempenho mecânico, no que diz respeito à compressão, realizaram-se ensaios com base no estabelecido na EN1015-11 (2000).

Este ensaio foi realizado na prensa universal (Figura 22(a)) da marca ELE Autotest. No resultado deste ensaio é apresentado apenas o valor da carga a que o provete está a ser sujeito, em condições de compressão. Quando ocorre rotura do provete, o equipamento cessa a solicitação imposta e obtemos a resistência à compressão máxima do provete.



*Figura 22 - Prensa Universal ELE utilizada para realização do ensaio de resistência à compressão*

Uma vez que estamos perante um provete prismático de 40x40x80 (aproximadamente metade de 160 mm) foi necessário recorrer ao acessório desta prensa disponível para provetes cúbicos. Este adereço encontra-se pormenorizado na Figura 22(b).

#### *Absorção de água por capilaridade*

A capilaridade consiste na penetração de um fluido pela rede porosa da argamassa. Este fenómeno acontece devido ao aparecimento de forças capilares que têm origem na diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior e a superfície da água no interior dos poros. Relativamente ao fenómeno da capilaridade pode afirma-se que quanto menor os poros, maior será a força capilar.

Os ensaios de absorção por capilaridade foram realizados com base na norma europeia EN 1015-18 (2002). As partes a ensaiar (provenientes dos ensaios de flexão) permaneceram em estufa (60°C) até atingirem massa constante. Quando tal sucedeu, foi possível proceder ao início do ensaio. Para isto foi necessário efetuar o isolamento lateral dos provetes (Figura 23), com recurso a silicone geral, para desta forma controlar a área de absorção de água (garantir que a absorção de água se efetuasse apenas pela face fraturada).



Figura 23 - Isolamento para absorção de água por capilaridade

Após 24h expostos a temperatura ambiente para secagem completa do silicone aplicado, iniciou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade. Relativamente a este ensaio, a quantificação da água absorvida foi verificada através da realização de pesagens consecutivas ao longo de 4 horas (mede-se a absorção da água aos 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 210, 240 e 270 minutos). O coeficiente de absorção capilar foi calculado de seguida, considerando as pesagens feitas aos 10 (M1) e 90 (M2) minutos, utilizando a Equação 3.

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) \quad (3)$$

Para este procedimento foi necessário manter os provetes, com a face fraturada mergulhada em, aproximadamente 0,5 cm de profundidade de água, como demonstrado na Figura 24.

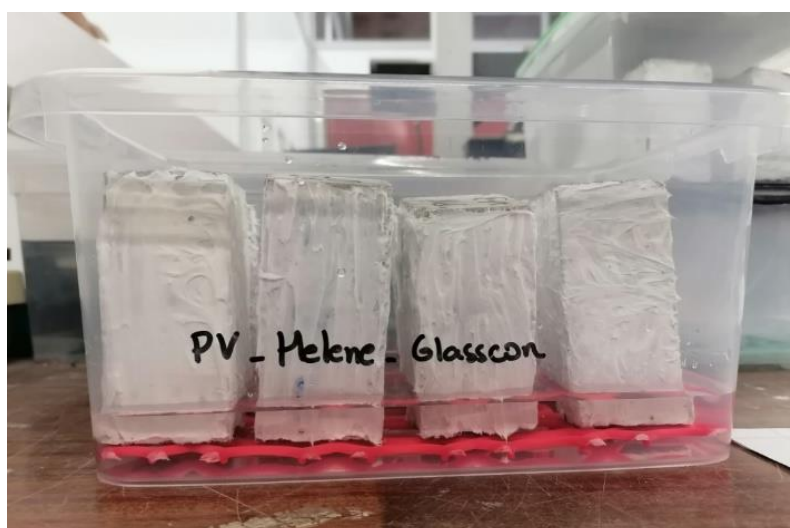


Figura 24 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Após terminar este ensaio, encheu-se os recipientes com água até os provetes se encontrarem completamente submersos. Isto para deixar os provetes saturados para efetuar o ensaio de absorção de água por imersão.

### *Absorção de água por imersão*

Este ensaio tem como finalidade avaliar a porosidade aberta da argamassa, e quanto maior a porosidade menor será a sua qualidade e, conseqüentemente, a sua durabilidade.

Neste ensaio os provetes tinham de se encontrar saturados, para tal, mantiveram-se os provetes em ambiente saturado de água até atingirem massa constante, ou seja, uma variação de massa inferior a 0,1% em medições intervaladas de 48h

Os ensaios de absorção de água por imersão foram realizados com base na especificação LNEC E 394 (1993) e determinou-se a massa hidrostática através da equação (4), onde  $m_1$  é a massa saturada,  $m_2$  é igual a massa hidrostática e  $m_3$  representa a massa seca. As pesagens foram realizadas com recurso a uma balança de precisão (Figura 25).

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (4)$$



*Figura 25 - Ensaio para absorção de água por imersão*

#### 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Uma vez expostos os materiais e os procedimentos de ensaio adotados, segue-se a exposição dos resultados obtidos nas duas campanhas desenvolvidas. Tendo em conta as variáveis presentes, irá inicialmente realizar-se uma análise comparativa entre as profundidades de carbonatação, resultantes dos diferentes tipos de cura (tradicional ou CCA). Sendo a temática desta dissertação a “*Contribuição do betão para a neutralidade carbónica 2050 através da captura de CO<sub>2</sub>*” é fundamental examinar mais aprofundadamente o efeito que a CCA pode eventualmente produzir e como pode afetar o desempenho e a durabilidade dos materiais.

Seguidamente, irá analisar-se os resultados obtidos para os restantes parâmetros ensaiados, nomeadamente a resistência mecânica, a resistividade elétrica e a absorção de água, visando uma comparação entre as argamassas de controlo (CEM) e as argamassas com incorporação de PV e CV como substituto parcial do cimento.

Uma vez que as diferentes argamassas foram sujeitas a diferentes condições de exposição a CO<sub>2</sub>, encontra-se, também, a discussão dos resultados obtidos, no panorama geral das duas campanhas efetuadas. De um modo geral, irá avaliar-se o efeito conjunto do uso de CCA e da incorporação de substitutos parciais para o cimento, neste caso de PV, como alternativa às CV.

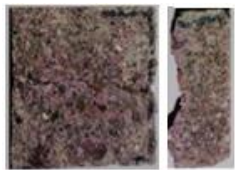
## 4.1. Apresentação dos resultados da 1ª campanha

### 4.1.1. Análise da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi testada em dois momentos distintos, ao final da CCA (aos 2 ou 3 dias de idade, em função da condição de cura), utilizando os provetes de controlo, e ao final dos 28 dias, utilizando os provetes moldados para este fim.

Na Tabela 7 encontram-se os registos fotográficos captados após o processo de CCA, para as 3 argamassas de controlo em estudo, para as condições de exposição de C1, C2 e V. Este controlo foi previsto para confirmação da existência de carbonatação sob as condições estudadas, uma vez que, se tal não tivesse ocorrido, não seria pertinente iniciar a etapa seguinte de cura tradicional, ou seja, provetes submersos em água.

*Tabela 7 - 1ª campanha: Registo fotográfico da carbonatação nos provetes de controlo.*

|     | C1                                                                                  | C2                                                                                  | V                                                                                     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| CEM |  |  |  |
| CV  |  |  |  |
| PV  |  |  |  |

A Tabela 8 sintetiza os valores médios de profundidade de carbonatação atingidos nesta etapa, juntamente com os valores médios alcançados após 28 dias de cura, sendo na Figura 26 apresentado os registos fotográficos após cura.

*Tabela 8 - 1ª campanha: Médias de profundidade de carbonatação em mm*

| Médias de profundidade de carbonatação em mm |          |         |          |         |
|----------------------------------------------|----------|---------|----------|---------|
| Condições                                    | C1       |         | C2       |         |
| Ident.                                       | Controlo | 28 dias | Controlo | 28 dias |
| <b>CEM</b>                                   | 2,23     | --      | 1,61     | --      |
| <b>CV</b>                                    | 3,24     | 1,94    | 2,24     | --      |
| <b>PV</b>                                    | 4,87     | 3,10    | 3,46     | 4,35    |

Conforme é possível verificar na Tabela 7, ocorreu carbonatação na maior parte dos provetes de controlo sujeitos a CCA. Este ensaio foi realizado aos 2 dias de idade, para C1 e V, e aos 3 dias para C2, após os respetivos processos de pré-cura e CCA, exposto no capítulo 3.2.2.

Analisando os resultados obtidos para os provetes da condição de exposição ao CO<sub>2</sub> de vácuo, V, pode-se afirmar que a experiência laboratorial não alcançou os resultados pretendidos, uma vez que a profundidade de carbonatação obtida foi muito superficial, sendo pouco representativa. Este facto pode ser explicado pela inexistência de controlo de parâmetros fundamentais para a carbonatação, como temperatura e humidade, dentro do exsicador. Uma vez que os provetes não foram sujeitos ao processo de secagem antes de serem colocados no exsicador, a humidade dos mesmos seria elevada, dificultando a penetração de CO<sub>2</sub>. Além disso, não foi possível perceber no decorrer das 24 horas em vácuo, qual seria a concentração real de CO<sub>2</sub>.

Na Tabela 7 e na Tabela 8, podemos também observar que a CCA, nas condições de C1 e C2, resultou em profundidades de carbonatação reduzidas, sendo que se obteve médias de profundidade de carbonatação superiores para C1. Fazendo uma comparação direta, entre C1 e C2, para todas as misturas, é importante relembrar que a única diferença entre estas condições é o tempo de pré-cura em câmara húmida (24 horas para C1 e 48 horas para C2). Considerando a importância da humidade para o processo de carbonatação, estas duas condições foram previstas para permitir a apreciação relativa ao efeito da presença de água nos provetes, ou seja, os provetes C2, estiveram durante 2 dias a “perder” água, enquanto os provetes C1, sofreram este processo apenas durante 1 dia. Em todas as misturas observou-se um melhor desempenho dos provetes de controlo para a condição C1, o que leva a concluir que, para as condições estudadas, 1 dia de cura é a opção mais favorável para o desenvolvimento da carbonatação. Observaram-se para a condição C1 médias de profundidade de carbonatação de 2,2 mm / 4,87 mm / 3,24 mm, enquanto para a condição de exposição de C2, estas médias baixaram 1,61 mm /

3,46 mm / 2,24 mm, para CEM, PV e CV, respetivamente. Além disso, observa-se, como esperado, que os provetes sem incorporação de resíduos apresentam uma maior resistência à carbonatação. Entre os provetes com resíduos, os com CV apresentam maior resistência (50% maior) do que aqueles com PV.

Quando os provetes atingiram 28 dias de idade voltou-se a testar a carbonatação, a meio do provete, após rotura causada no ensaio à resistência à flexão. Na Figura 26, é possível verificar os resultados obtidos, captados por fotografia, e na Tabela 8 verificam-se os valores médios de profundidade de carbonatação para estas situações. No que se refere aos provetes sem incorporação de resíduos, CEM, contrariamente ao verificado nos provetes de controlo (aos 2 ou 3 dias), não foi possível identificar a presença de carbonatação, independentemente da condição de cura. No caso dos provetes com incorporação de resíduos, PV e CV, verificou-se a ocorrência de carbonatação para as condições de cura C1 e C2, no caso do PV, e C1, no caso dos CV.

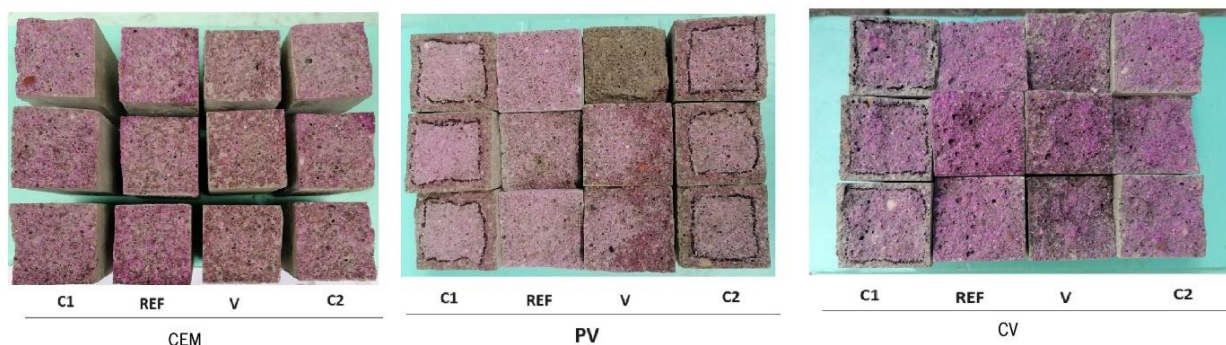


Figura 26 - 1ª campanha: Carbonatação 28 Dias

Considerando as condições de cura, no caso dos provetes submetidos à cura tradicional (R) não foi verificada carbonatação. O comportamento apresentado vai ao encontro do esperado, uma vez que estes provetes não foram submetidos ao contato com o CO<sub>2</sub> durante o período de cura. No caso da condição de cura V, de facto, não houve carbonatação relevante na fase de controlo, nem após a cura completa (28 dias), apesar do contato com o CO<sub>2</sub> durante o período de cura. Este resultado contribui para a exclusão desta variável no que se refere ao desenvolvimento da 2ª campanha, uma vez que é necessário que ocorra carbonatação durante o processo de CCA. Como discutido anteriormente, este resultado pode estar associado ao funcionamento inadequado do sistema de exposição ao CO<sub>2</sub>.

No caso das condições de cura C1 e C2, ambas apresentaram carbonatação durante a etapa de controlo. Porém, após a cura completa, a carbonatação verificou-se apenas em algumas situações, variando com a composição da argamassa. Algumas hipóteses são levantadas. A primeira está relacionada com a forma como o ensaio foi realizado. A aspersão excessiva de fenolftaleína na amostra, faz com que haja um

espalhamento da solução por toda a superfície, espalhando a tonalidade rosa para além da parte não carbonatada, ou seja, “camuflando” a parte carbonatada. Outra hipótese é a reação que ocorre entre a solução de fenolftaleína e o teor de água presente no interior do provete. Para confirmar esta hipótese, o provete de controlo PV-C1, foi retirado da água (cura tradicional) e após 7 dias exposto ao meio ambiente, o provete encontrava-se seco e foi novamente partido e testado (Figura 27). Nesta figura podemos observar que a profundidade de carbonatação se encontra bem definida, ao contrário do que se observou quando testados aos 28 dias de idade.



*Figura 27 - PV-C1(controlo): Teste de fenolftaleína após 28 cura tradicional + 7 dias ambiente natural*

Se não considerarmos o possível efeito positivo da CCA na resistência à compressão dos provetes e considerarmos o possível efeito negativo da carbonatação nos materiais cimentícios, uma vez que a composição PV apresenta maiores profundidades de penetração de  $\text{CO}_2$ , seria pertinente estudar algumas estratégias que ajudassem a reduzir a velocidade de carbonatação. Reis (2022) optou por utilizar uma percentagem de cal na mistura, de forma a aumentar a disponibilidade de hidróxido de cálcio disponível para a reação de carbonatação e, consequentemente, reduzir a velocidade de carbonatação.

#### 4.1.2. Análise de resultados de ensaios aos 28 dias

##### *Resistividade elétrica*

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para a resistividade elétrica, aos 28 dias de idade, para todos os provetes da 1ª campanha laboratorial. Estes resultados representam a média das leituras dos 4 lados dos provetes, dos 3 provetes de cada composição e condição de exposição.

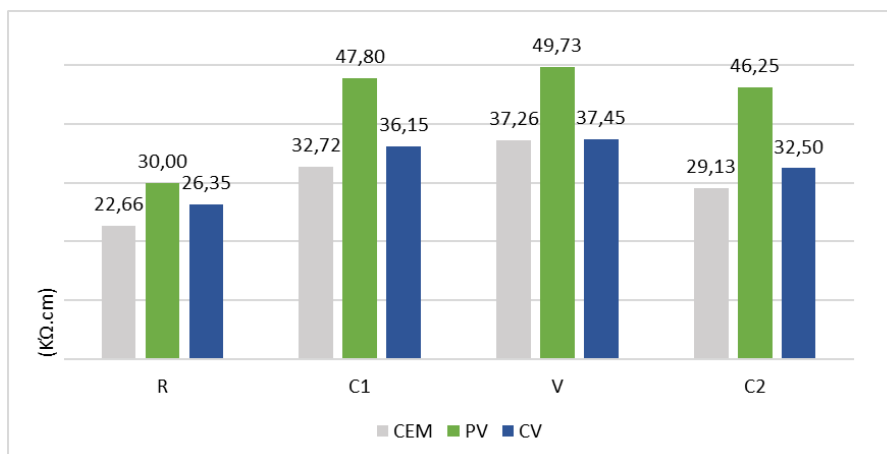


Figura 28 - 1ª campanha: Resistividade elétrica, 28 Dias

A análise da Figura 28 mostra que a introdução de MCS aumenta a resistividade elétrica, sendo este aumento superior quando introduzido PV, comparativamente a CV. No capítulo 4.2.2, relativo aos resultados conseguidos na segunda campanha, irá aprofundar-se esta análise, pois será avaliada a evolução ao longo do tempo da resistividade elétrica, uma vez que se espera que o desenvolvimento lento das reações pozolânicas origine um aumento substancial dos valores.

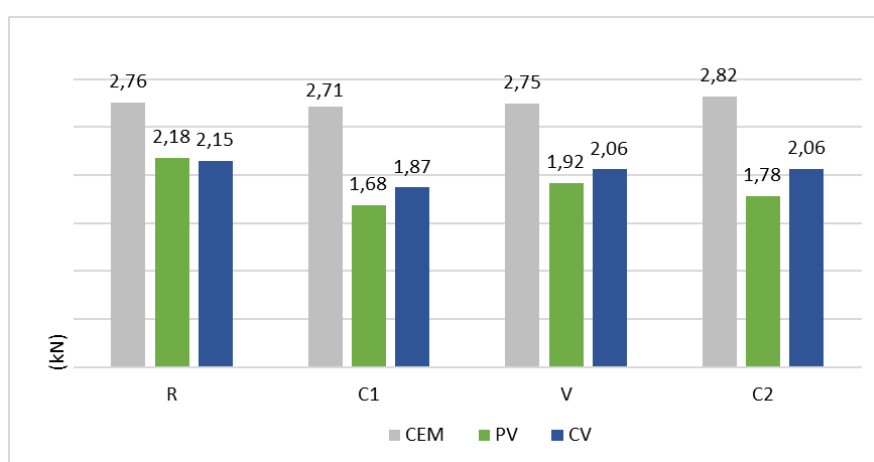
Estes resultados vão ao encontro aos resultados obtidos por Kamal *et al.* (2015), onde os autores obtiveram uma melhoria da resistividade elétrica em betões com incorporação de CV, quando comparados com betões de referência. Assim, espera-se que tenha havido uma melhoria da compacidade do material e uma redução na permeabilidade, o que conduziu ao aumento significativo da resistividade elétrica. Este resultado é, também, coerente com outros resultados obtidos onde materiais cimentícios, formados como resultado de reações pozolânicas preenchem melhor os poros, aumentando a resistividade elétrica das misturas (Moreira, O., 2023).

Quanto ao uso de CCA, analisando a Figura 28, é possível observar que as condições C1, C2 e V, em comparação à condição sem exposição ao CO<sub>2</sub>, resulta num desempenho consideravelmente superior. Sendo que, entre C1, C2 e V, é possível observar uma certa semelhança entre os valores obtidos. Por exemplo, na composição PV, que gerou os melhores resultados em todas as condições, obteve para a condição R uma média de 30 KΩ.cm, enquanto as condições de CCA alcançaram valores médios de 46,25; 47,80 e 49,73 KΩ.cm, para C2, C1 e V, respetivamente. Este resultado vai ao encontro de estudos anteriores sobre resistividade em provetes carbonatados (Reis *et al.* 2014). Durante a carbonatação, o CO<sub>2</sub> reage com hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), presente na matriz do cimento, formando carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e água. O CaCO<sub>3</sub> é mais denso e menos poroso que o Ca(OH)<sub>2</sub>, resultando numa estrutura mais

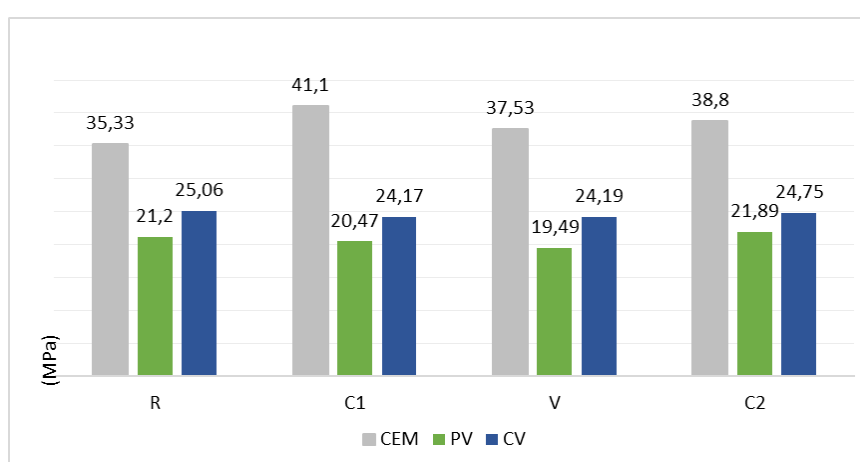
compacta, que leva a uma diminuição da quantidade de caminhos disponíveis para ocorrer condução elétrica através dos poros preenchidos por água, melhorando então a resistividade.

### *Resistência mecânica*

Quanto à resistência mecânica dos provetes, avaliou-se a resistência à flexão e à compressão, como já exposto no capítulo 3.3, relativo aos procedimentos de ensaios. Nesta análise do desempenho mecânico dos provetes, o objetivo é a comparação através das médias obtidas, entre cada composição e cada condição de exposição ao CO<sub>2</sub>, como forma de viabilizar a substituição de CV por PV e o uso de CCA em argamassas com substituição parcial de cimento por 25% de CV e 25% de PV (Figura 29 e 30).



*Figura 29 - 1ª campanha - Resistência à flexão, 28 Dias*



*Figura 30 - 1ª campanha - Resistência à compressão, 28 Dias*

Nas Figuras 29 e 30 podemos verificar que a argamassa composta por 100% de cimento (CEM) apresenta o melhor desempenho mecânico, tanto para flexão como para compressão, e sendo ela composta apenas por cimento, representa os provetes de referência.

Quanto à resistência a flexão, Figura 29, verificou uma redução nos valores dos provetes com substituição parcial do cimento por materiais com características pozolânicas (CV e PV) quando comparados aos provetes CEM, independentemente do tipo de cura. Sobre o impacto do tipo de cura na resistência à flexão dos provetes não são observadas diferenças significativas nos provetes CEM, estando os valores compreendidos entre 2,71 e 2,82 MPa. Nos provetes com substituição do cimento é possível observar uma ligeira tendência de redução dos valores para os provetes submetidos à CCA quando comparados à cura de referência. Torna-se relevante atentar à proximidade obtida entre provetes CV e provetes PV, pois reforça a hipótese da utilização de PV como alternativa às CV. Estes valores estão de acordo com o estudo de Moreira *et al.* (2023) que aponta para a possibilidade da utilização de PV em substituição às CV.

No que diz respeito a resistência à compressão, Figura 30, as composições com substituição de CEM, por 25% de CV ou PV, estes valores tendem a diminuir. Este comportamento é esperado e está relacionado com a menor quantidade de produtos de hidratação formados inicialmente (28 dias), resultado da substituição parcial do cimento. Além disso, também se deve à natureza mais lenta das reações pozolânicas das CV e do PV. A longo prazo, espera-se que as CV e o PV contribuam para uma maior resistência e durabilidade, devido ao contínuo desenvolvimento da microestrutura da argamassa. Desta forma, na segunda campanha laboratorial, irá testar-se novamente para os 28 dias e, posteriormente, para os 90 dias, para analisar este princípio.

Quanto ao impacto do tipo de cura na resistência à compressão, os provetes CEM apresentam um aumento nos valores quando submetidos à CCA, independentemente da condição. A condição C1 apresenta mesmo o maior valor de resistência à compressão, 41,1 MPa. No que se refere aos provetes com substituição parcial do cimento, existe uma tendência para uma alteração pouco significativa na resistência dos provetes curados através de CCA, quando comparados com R. Analisando a Figura 30 é possível afirmar que ocorre pouca variação entre os valores de resistência à compressão dentro das mesmas composições. Por exemplo, para PV, entre R e C1, ocorre uma redução de 5% na resistência à compressão, enquanto entre R e C2 ocorre um aumento de 3%.

Considerando a existência de carbonatação nos provetes, verificada através dos provetes de controle conforme apresentado no subcapítulo 4.1.1., esperava-se que a alteração na microestrutura provocada

pela carbonatação favorecesse a resistência à compressão, como verificado em outros estudos (Sharma e Goyal 2018). Vários fatores podem ter influenciado o resultado obtido, avançando-se 3 hipóteses.

A primeira é referente às limitações já exposta relativas aos parâmetros da câmara de carbonatação (câmara climática), pois é usual a utilização de teores de CO<sub>2</sub> próximos de 100%, durante períodos mais longos (até vários dias por exemplo) e nesta investigação preconizou-se apenas  $5 \pm 0,1\%$  CO<sub>2</sub> durante 24 horas. A segunda hipótese, deve-se à elevada taxa de substituição do cimento das misturas pozolânicas (25%). A terceira hipótese, devido à alteração precoce das condições de humidade interna nos provetes. Esta última hipótese já foi avaliada por Lee *et al.* (2016), no estudo de argamassas de cimento, sem substituição por material pozolânico, submetidas à cura por carbonatação acelerada. Os autores também observaram uma redução na resistência à compressão aos 28 dias quando comparada a situação de referência, possivelmente devido à redução da humidade interna pela reação precoce de carbonatação.

Possivelmente, todos estes fatores concorrem para a efetiva redução da capacidade mecânica, após cura por carbonatação. Mas, admitindo que aos 28 dias a matriz cimentícia dos provetes produzidos apenas com cimento encontra-se bem consolidada (CEM), provavelmente, o reduzido teor de CO<sub>2</sub> será a causa mais relevante.

No entanto é importante conhecer melhor a estrutura porosa da zona carbonatada, sendo para isso necessário a realização de ensaios ao nível da micro e da macroestrutura. Os ensaios de microestrutura não puderam ser realizados no âmbito desta dissertação. Contudo, os resultados dos ensaios de absorção de água, que auxiliam a análise ao nível da macroestrutura, serão apresentados de seguida.

#### *Absorção de água por capilaridade*

A cinética de absorção capilar é apresentada através de curvas que indicam a variação na quantidade de água absorvida por unidade de área da amostra em contato com a água, em função da raiz quadrada do tempo. Conforme indicado por Coutinho (1988), o cálculo do coeficiente de absorção capilar é relativo às primeiras 4 horas do ensaio. Essas curvas, para provetes curados em água durante 28 dias para a primeira campanha, são observáveis na Figura 31 e representam o valor médio de absorção de água por capilaridade obtido para duas amostras.

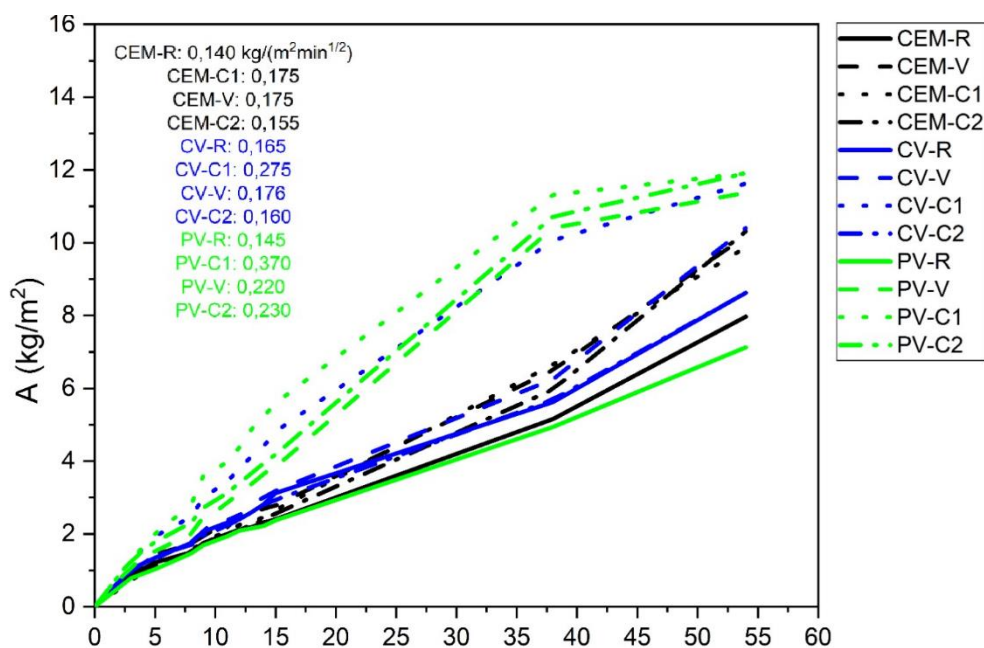


Figura 31 - 1ª campanha - Absorção por capilaridade, 28 Dias

Comparando as composições, R, CV e PV, é possível verificar que aos 28 dias de idade, PV obteve absorção mais baixa que CV, no provete não carbonatado, sendo que CV-R foi superior a CEM-R. Estes resultados são coerentes com os expostos por Deepa Paul *et al.* (2022) que obtiveram uma redução de 18% no percentual de absorção capilar, para betão com 40% de substituição do cimento por PV, sendo que neste estudo as amostras não foram sujeitas a CCA.

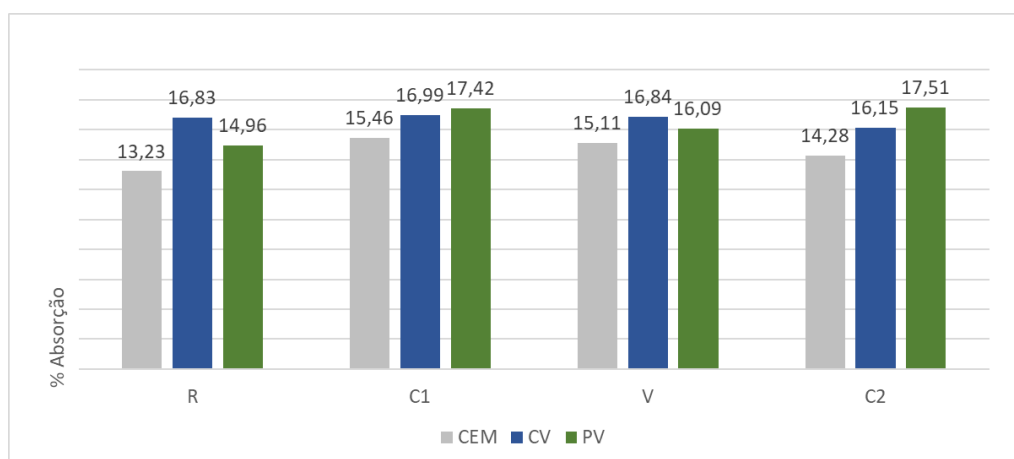
Quando sujeitos a CCA, seja por C1, C2 ou por V, ao contrário do esperado, os coeficientes de absorção dos provetes, independentemente do material, foram superiores quando comparados à cura de referência. Estes resultados indicam que há uma maior interconectividade entre os poros. No caso do PV estes aumentos são mais significativos, chegando a 255% quando se compara o PV-R (0,145) com o PV-C1 (0,370). A realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) seria importante para conhecer a distribuição dos poros e tentar compreender melhor esta situação. A realização de um ensaio termogravimétrico para determinação da quantidade de  $\text{CaCO}_3$  formado durante o processo de carbonatação também seria importante, uma vez que é o  $\text{CaCO}_3$  o principal responsável pela densificação da matriz durante o processo de CCA. Espera-se que o resultado da segunda campanha, realizada aos 90 dias, para a absorção capilar seja mais esclarecedor, e mostre uma melhoria na absorção capilar de CV, uma vez que a maioria das reações pozolânicas estarão mais desenvolvidas.

### *Absorção de imersão*

É pertinente referir que a absorção de água por imersão representa um indicador de porosidade aberta e que esta pode influenciar os resultados obtidos no desempenho mecânico, especificamente, na resistência à compressão.

Quanto ao valor do coeficiente de absorção de água por imersão, este foi obtido através da média das duas amostras resultantes da primeira campanha, para cada condição, após os 28 dias de idade.

Aplicando a equação 4, presente no subcapítulo 3.3, foi possível calcular os valores médios relativos à absorção de água por imersão e representá-los de forma gráfica, para simplificação da sua análise (Figura 42).



*Figura 32 – 1ª campanha - Absorção por imersão, 28 Dias*

Sabemos que quanto mais elevada a absorção por imersão, a entrada de água é mais facilitada, logo pior será o desempenho em termos mecânicos e de durabilidade. Observando a Figura 32, é possível notar que a porosidade mais baixa, é apresentada para CEM-R, com 13,23%, e a situação mais gravosa, porosidade mais alta, corresponde a PV-C2, com 17,51%. Com isto pode-se afirmar que tanto a implementação de PV como o uso de CCA, como forma de capturar CO<sub>2</sub>, não causaram efeitos negativos que descredibilizem estas soluções. A condição C1, gerou piores resultados para a porosidade aberta, no entanto, sendo uma diferença relativamente baixa, continua a compensar quando atentamos a todas os ensaios realizados.

Analisando a Figura 32, podemos afirmar que os provetes CEM possuem menos porosidade que as argamassas com CV ou PV. Isto pode explicar os resultados obtidos para a compressão, quando se esperava que atingissem valores superiores aos de referência pois, como exposto por Moreira, O. (2023),

as resistências mais altas derivam de argamassas com menor porosidade. Moreira, O. (2023) demonstrou que a relação entre a porosidade aberta e a resistência à compressão não é linear e conclui que a porosidade por si só pode não ser um fator determinante para alcançar alta resistência. Ambas afirmações vão ao encontro dos resultados obtidos nesta campanha laboratorial, quando comparamos os resultados de resistência mecânica com os de absorção de água, Figura 33.

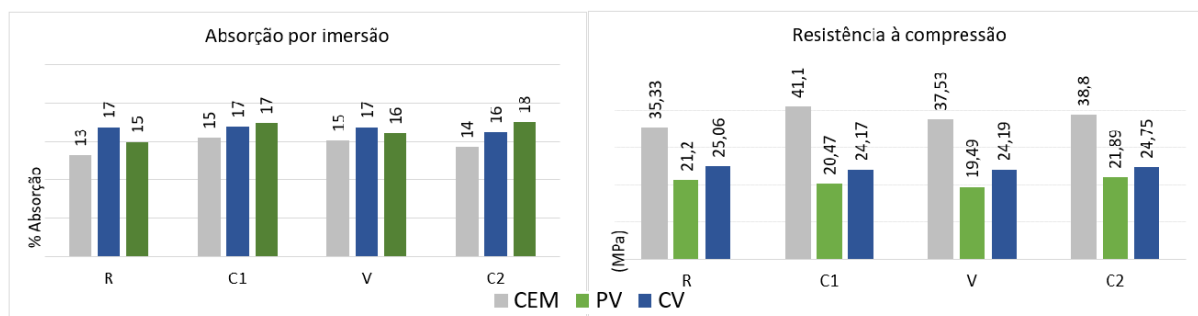


Figura 33 - 1ª campanha: Comparação entre porosidade aberta e resistência à compressão.

Quanto à comparação entre CV e PV, pode observar-se que provetes sujeitos à CCA com substituição de PV acabam por causar um aumento no coeficiente de absorção por imersão. Mesmo assim, não apresenta variações muito significativas.

## 4.2. Apresentação dos resultados da 2ª campanha

Apresenta-se aqui uma análise dos resultados obtidos para a segunda campanha. Aqui irá analisar-se de forma mais abrangente as duas condições em selecionadas na primeira campanha, uma de referência, R, e outra de CCA, C1. A escolha recaiu na condição C1 após análise dos resultados obtidos na 1ª campanha, onde tanto para a resistência mecânica como em ensaios de absorção de água, não houve muita discrepância entre C1 e C2, sendo a temática desta dissertação, a carbonatação, priorizou-se as maiores profundidades de carbonatação alcançadas em C1. O presente subcapítulo irá focar-se numa análise mais detalhada entre as composições das argamassas, nomeadamente a acrescência de uma nova argamassa, com 50% de substituição de cimento por PV. Esta variante foi introduzida como forma de aprofundar o estudo da introdução do pó de vidro em materiais cimentícios.

### 4.2.1. Análise da profundidade de carbonatação

Nas Tabela 9 e 10 é possível verificar, através de registos fotográficos, a profundidade de carbonatação resultante da segunda campanha, para 28 e 90 dias de idade, respetivamente.

Tabela 9 - 2ª campanha: Profundidade de carbonatação, 28 Dias

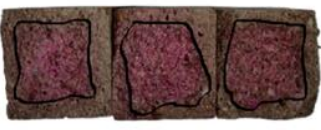
|      | R (Sem CCA)                                                                       | C1 (Com CCA)                                                                       |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| CEM  |  |  |
| CV   |  |  |
| PV25 |  |  |
| PV50 |  |  |

Tabela 10 - 2ª campanha: Profundidade de carbonatação, 90 Dias

|      | R (Sem CCA)                                                                         | C1 (Com CCA)                                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| CEM  |  |  |
| CV   |  |  |
| PV25 |  |  |
| PV50 |  |  |

Analisando a Tabela 9 é possível verificar que, apesar da diferença na tonalidade do cor-de-rosa, os provetes de referência (esquerda), não sofreram carbonatação, ao contrário dos provetes submetidos à CCA, excetuando os CEM (direita) Estes resultados corroboram os resultados obtidos na primeira campanha. Além disso, observa-se que os provetes submetidos à CCA foram carbonatados, independentemente da existência de CV ou PV, sendo que em CEM observa-se uma diferença de tonalidades do exterior para o interior, mas essa profundidade de carbonatação não foi possível demarcar com certeza. Estes valores vão ao encontro dos valores de resistividade elétrica apresentados (tanto para a primeira campanha como para a segunda, que irá ser apresentado de seguida) ou seja, os maiores valores de resistividade estão relacionados aos provetes carbonatados.

Na Tabela 10 podemos observar através da análise de carbonatação dos provetes PV50 que, assim como apurado por Moreira, O., (2023) o aumento na utilização de PV, provoca aumentos na carbonatação, sendo essa situação que cria maiores profundidades de carbonatação.

A tendência para profundidade da frente de carbonatação é similar para as quatro situações estudadas, com ligeira propensão decrescente no sentido: PV50, PV25 e CV e CEM (Tabela 11). Este é um comportamento esperado uma vez que as misturas com materiais pozolânicos possuem pouca resistência à carbonatação. A cinza volante, ao reagir na mistura, através de reações pozolânicas, consome  $\text{Ca(OH)}_2$  para formar outros produtos cimentícios, como o C-S-H. Isso reduz a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível e, portanto, diminui a capacidade da argamassa de neutralizar o  $\text{CO}_2$  que entra efetivamente no provete.

*Tabela 11 - 2ª campanha: Médias de profundidade de carbonatação em mm*

| Médias de profundidade de carbonatação em mm |         |         |
|----------------------------------------------|---------|---------|
| Condição                                     | C1      |         |
| Idade                                        | 28 dias | 90 dias |
| <b>CEM</b>                                   |         | 3,51    |
| <b>CV</b>                                    | 2,51    | 4,82    |
| <b>PV25</b>                                  | 3,49    | 4,67    |
| <b>PV50</b>                                  | 5,24    | 8,56    |

Importa perceber agora a estrutura porosa da zona carbonatada assim como o impacto que esta carbonatação possui nas propriedades da argamassa e a sua influência na resistência mecânica, quando submetidos à CCA. Estes parâmetros serão avaliados de seguida.

#### 4.2.2. Análise de resultados de ensaios aos 28 dias e aos 90 dias

##### *Resistividade elétrica*

Quanto aos valores de resistividade elétrica obtidos para a segunda campanha podemos observar que os provetes carbonatados resultam em resistências mais elevadas, assim como decorrido na primeira campanha. Na Figura 34 e 35 apresentam-se os valores médios, para os 28 e 90 dias respetivamente. Estes valores foram medidos nos mesmo parâmetros que na primeira campanha.

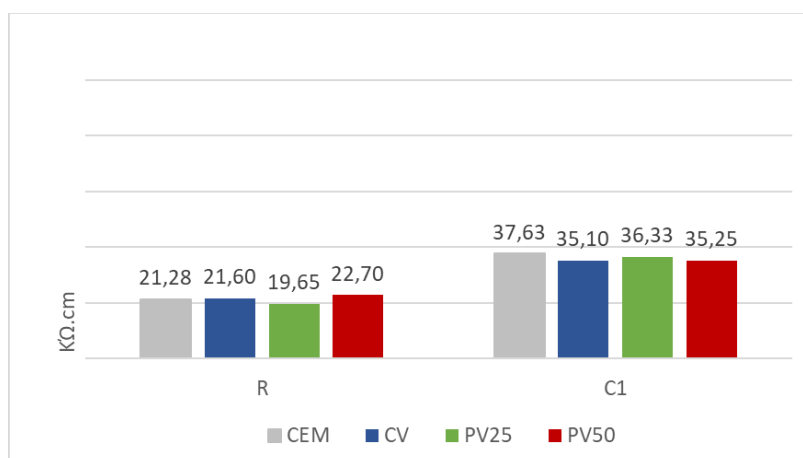


Figura 34 - 2ª campanha: Resistividade elétrica, 28 dias

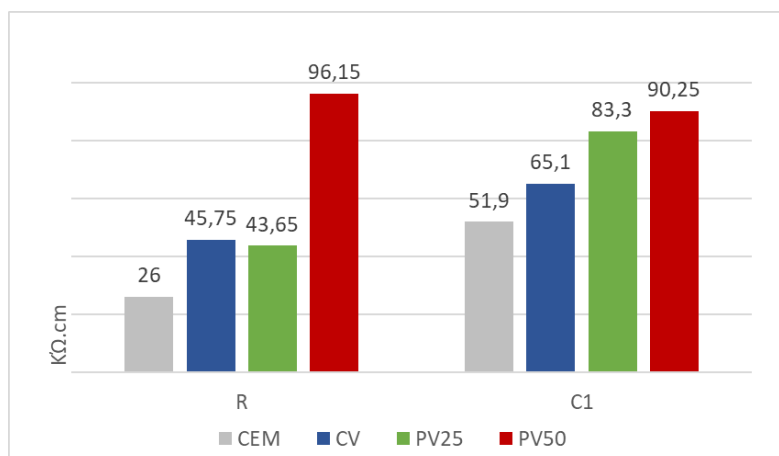


Figura 35 - 2ª campanha: Resistividade elétrica, 90 dias

Observando a Figura 34, podemos verificar que aos 28 dias o uso de CCA eleva razoavelmente os valores obtidos, mas nunca com diferença considerada razoável, quando sujeitas às mesmas condições. Quando comparamos a evolução de CV e PV25, ambas com 25% de substituição do cimento, o PV25 apenas ultrapassa CV quando sujeito a CCA, ou seja, quando expostas ao CO<sub>2</sub>, sendo essa diferença mais notória aos 90 dias (Figura 35).

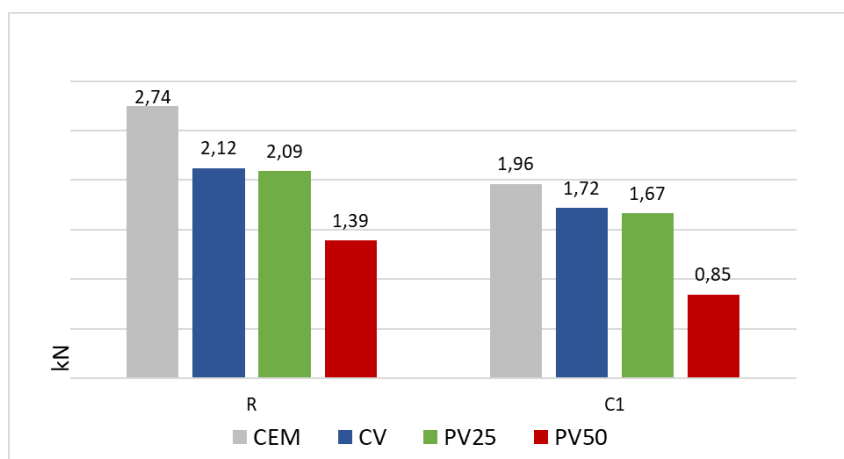
O CEM-R sofreu pouca alteração entre 28 e 90 dias, tendo sofrido maior aumento com CCA (de 21,28 para 26 K $\Omega$ .cm em R e de 37,63 para 51,9 K $\Omega$ .cm para CCA). Analisando as composições PV50, entre os 28 e 90 dias de idade, podemos reparar um aumento considerável de 423%, para provetes de referência e de 256 %, para carbonatados.

Os resultados confirmam que o desenvolvimento lento das reações pozolânicas do PV resulta num crescimento exponencial dos valores, particularmente entre as idades de 28 e 90 dias. Pode-se perceber também que o aumento no teor de PV das composições provoca uma elevação da resistividade, em qualquer idade.

Estes resultados estão em concordância com o obtido por Moreira, O., (2023) e Kamali *et al.* (2015), que também obtiveram uma melhoria significativa da resistividade elétrica quando incorporado PV em betões. Mais uma vez, os resultados obtidos alinham com a conceção que materiais formados como resultado de uma reação pozolânica, resultam num preenchimento mais eficaz dos poros, melhorando a compacidade do material.

### *Resistência mecânica*

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão e à compressão, para os 28 e os 90 dias de idade, estão apresentados na Figura 36 e 37, respetivamente.



*Figura 36 - 2ª campanha: Resistência à flexão, 28 dias*

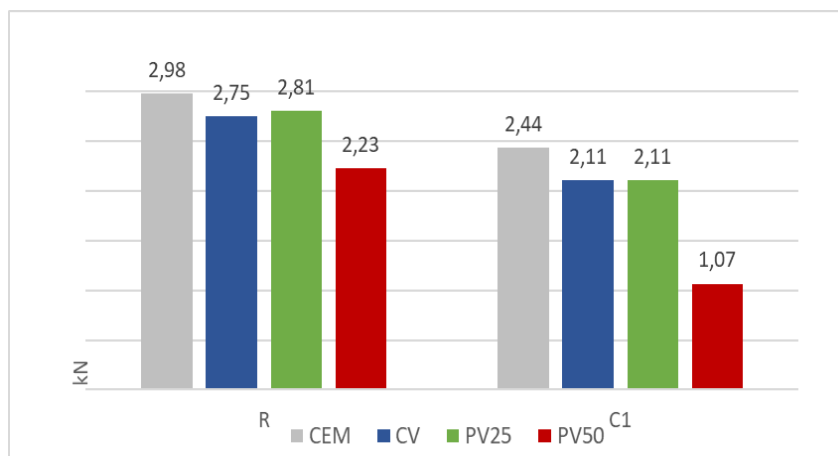


Figura 37 - 2ª campanha: Resistência à flexão, 90 dias

Na Figura 36 e 37, relativo à flexão aos 28 e 90 dias respectivamente, podemos observar que, assim como na primeira campanha, o CEM obteve os melhores resultados. Além disso, comparando CV e PV25, observa-se uma proximidade entre as resistências obtidas. Os resultados mais baixos foram obtidos para PV50, em ambas as idades, sendo que os provetes carbonatados (PV50-C1) acabaram por se tornar menos resistentes quando comparados aos de referência (PV50-R). Também se pode observar que, respeitante à flexão, todos os provetes carbonatados obtiveram valores inferiores aos provetes não carbonatados. No entanto, percebe-se claramente um aumento nos valores de resistência à flexão com a progressão do período de cura, quando incorporado CV e PV, consequência das reações pozolânicas se desenvolverem mais lentamente.

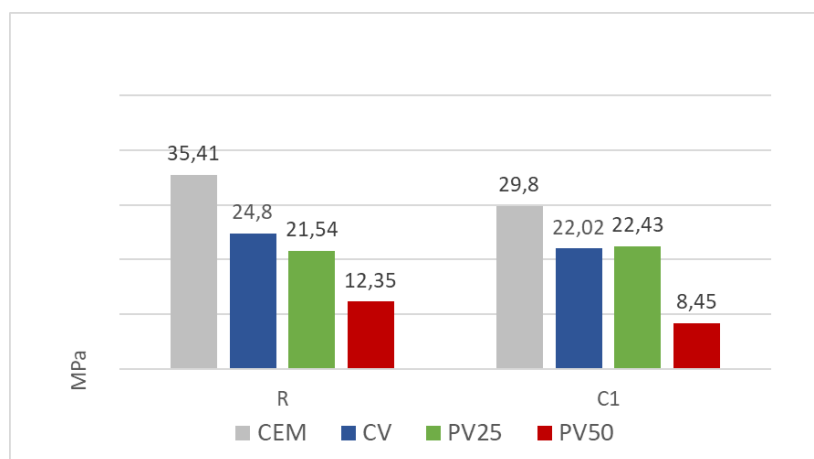


Figura 38 - 2ª campanha: Resistência à compressão, 28 dias

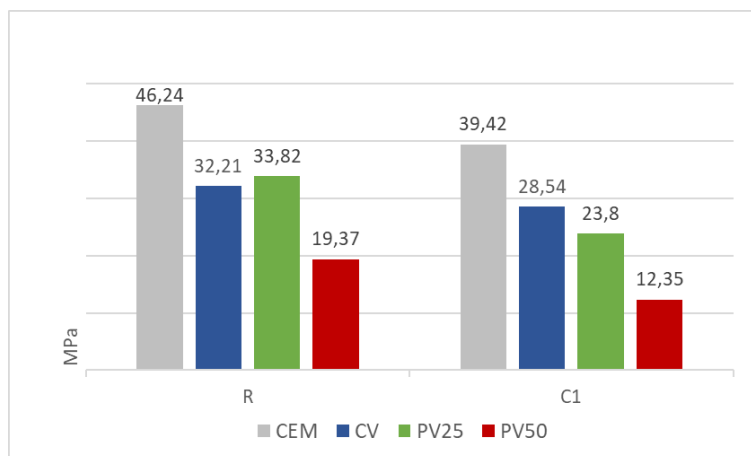


Figura 39 - 2ª campanha: Resistência à compressão, 90 dias

A Figura 38 e 39, relativo à compressão aos 28 e 90 dias, respetivamente, obtida na segunda campanha. Podemos expor, que assim como na flexão, o aumento na incorporação de PV na argamassa PV50, traduziu-se numa redução bastante significativa na resistência à compressão, para qualquer condição.

Para as composições CEM, CV e PV25, os valores obtidos vão ao encontro dos resultados de Moreira B. (2022). A autora ensaiou argamassas diferentes, em provetes cúbicos de  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ , compostos totalmente por cimento ou com substituição parcial de CV ou PV, com 25% em ambos os casos. No seu estudo, as resistências à compressão, para 28 e 90 dias assemelham-se ao obtido no decorrer do presente trabalho. No entanto, as baixas resistências obtidas, com PV50, levam a crer que substituir 50% de cimento por PV, em argamassas, pode resultar em efeitos negativos na resistência mecânica e na durabilidade do material. É relevante mencionar que Moreira, O., (2023), ao ensaiar betões com incorporações de 50% de PV (mistura com  $300 \text{ kg/m}^3$  de ligante e 50% de vidro) atingiu 46,42 MPa, enquanto a referência apresentou 40 MPa. Sendo o uso de PV um tema ainda em crescimento, os motivos para as resistências à compressão da argamassa PV50 serem tão baixas (19,37 e 12,35 MPa, para R e C1, respetivamente aos 90 dias de idade) podem ser explicados pela relação A/C, uma vez que na presente dissertação padronizou-se uma relação A/L igual a 0,5, Moreira, O. utilizou relações A/C diferentes para as diferentes composições, sendo a relação mais baixa utilizada pelo autor igual a 0,3 e adicionalmente recorreu a um superplastificante.

Considerando os restantes resultados, o uso de CCA conjugado com a incorporação de PV, em alternativa as CV, verifica-se possível, pois não ocorre grandes alterações entre as resistências mecânicas obtidas, do ponto das resistências mecânicas.

### Absorção de água por capilaridade

Na Figura 40 apresenta-se as curvas que indicam a variação na quantidade de água absorvida pelos provetes, assim como realizado no decorrer da primeira campanha.

Estas representam o valor médio de absorção de água por capilaridade obtido para três amostras, para todos as composições, após 90 dias de cura tradicional. Nesta campanha, optou-se por realizar este ensaio apenas aos 90 para que se pudesse avaliar o impacto das reações pozolânicas neste contexto.

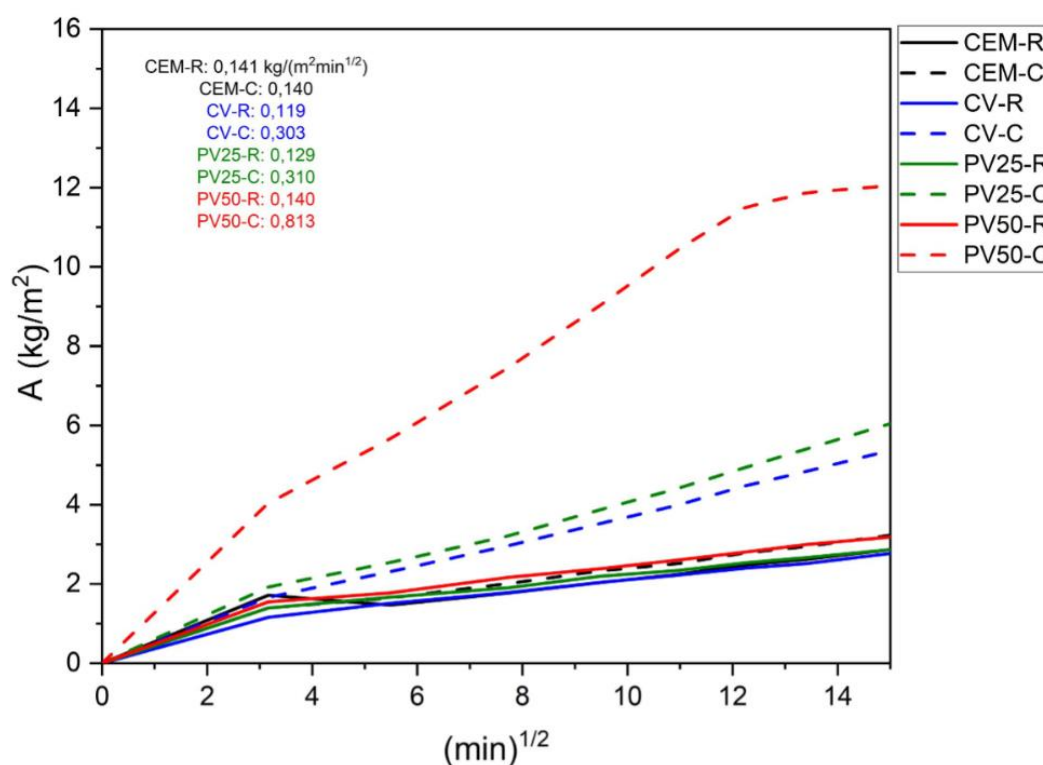


Figura 40 - 2ª campanha: Absorção de água por capilaridade, 90 dias

Analisando a Figura 40 repara-se, primeiramente, com o PV50-C1, que atinge um coeficiente de absorção capilar bastante elevado ( $0,813 \text{ Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ). Contudo, o PV50-R apresenta um coeficiente idêntico ao CEM-R. Deepa Paul *et al.* (2022) estudaram betões com incorporações de PV de 40%, sem carbonatação acelerada, alcançando uma redução de 18% na absorção capilar. No trabalho em causa, é verificada uma redução de 10% na absorção capilar utilizando 25% de PV, PV25-R.

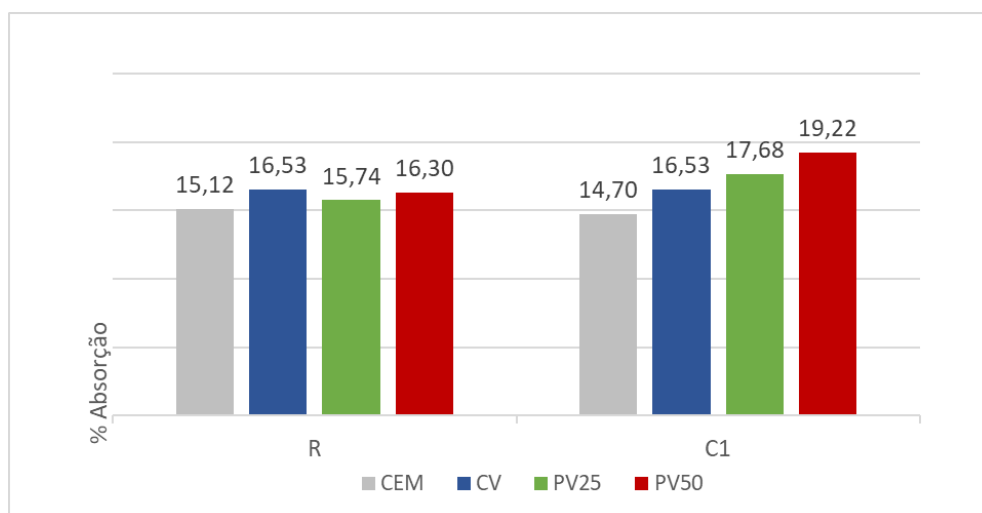
Quanto ao comportamento das PV25 e das CV, comparativamente a CEM, obtemos bons resultados, pois confirma-se, novamente, as PV como em alternativa as CV, e que ambas mantêm um desempenho superior à referência. Estes resultados estão de acordo com o demonstrado por Moreira, O. (2023), que

comprovou que o uso de PV em betões, com 50% e 70% de PV, resulta em coeficientes de absorção capilar inferiores ou similares aos obtidos para os provetes de referência e com CV, respetivamente.

É possível verificar também que os provetes carbonatados, independentemente da composição, atingem valores superiores aos seus pares não carbonatados, isto demonstra que o uso da CCA como forma de captura de CO<sub>2</sub>, pode acabar por aumentar a absorção capilar da água. Também é importante reparar que apenas a composição CEM manteve uma certa igualdade entre os valores das condições de cura submetidos. Isto leva a afirmar que tanto o uso de CV ou de PV, quando expostos a CO<sub>2</sub>, resulta num desempenho pior. A maioria dos estudos analisados relativamente a CCA conseguiram obter resultados positivos neste prisma. Uma das hipóteses para explicar esta desconcordância de resultados poderá ser as condições de CCA aplicadas. Como já apontado, esta temática oferece uma imensidão de variantes e possibilidades de usar CCA como estratégia de captura de CO<sub>2</sub>, sendo que maioria consegue aplicar elevadas concentrações de carbono, assim como prolongar o tempo de exposição, como referido no subcapítulo 2.4, Cura por Carbonatação Acelerada.

#### *Absorção de água por imersão*

Na Figura 41 apresentam-se os valores médios do coeficiente de absorção por imersão, relativo à porosidade dos provetes, obtido para três amostras, aos 90 dias de idade.



*Figura 41 - 2ª campanha: Absorção de água por imersão, 90 dias*

Na Figura 41 é possível observar que para os provetes de referência não houve um impacto significativo nos valores de absorção para as diferentes composições estudadas. Os valores obtidos estão muito próximos entre si, variando desde 15,12 até 16,53%. Já nos provetes que sofreram carbonatação

acelerada, observa-se uma tendência de crescimento da absorção do CEM-C1 (14,70%) para o PV50-C1 (19,22%). Comparando os resultados obtidos para as diferentes formas de cura, é possível observar que a CCA pouco influencia a porosidade total das argamassas, sendo apenas notável um ligeiro aumento nas percentagens relativas a PV (PV50 sofreu o maior aumento, quando sujeito a CCA). Estes resultados, assim como os de absorção capilar, não vão de encontro da literatura. Moreira (2022) estudou betões com grandes incorporações de PV, sendo que estes obtiveram melhores desempenho a nível da porosidade aberta comparativamente a provetes 100% de cimento ou com a mesma percentagem de substituição em CV.

You K. *et al.* (2013) avaliou as propriedades físicas de provetes de argamassa (40x40x160 mm) sujeitos a CCA (temperatura:25°C; HR:40%; CO<sub>2</sub> concentração: 15% durante 14 dias). Nesse estudo obtiveram-se melhores resultados de porosidade para os provetes carbonatados. Mais uma vez questiona-se a aptidão da concentração de CO<sub>2</sub> disponível para reproduzir resultados vantajosos na captura do CO<sub>2</sub>.

#### 4.3. Discussão dos resultados

De seguida encontra-se uma síntese geral do desempenho das composições contendo PV em relação a composições de referência (CEM) e de CV, considerando o efeito de CCA, em detrimento de apenas cura tradicional. Também se irá discutir como a adição de PV50 ajudou a perceber como o CO<sub>2</sub> reage quando ocorre um aumento na substituição parcial de cimento.

De uma forma geral, pode-se dizer que os resultados obtidos para a temática da “Contribuição do betão para a neutralidade carbónica 2050 através da captura de CO<sub>2</sub>” não foram totalmente os esperados. Após a leitura de Zhang *et al.* (2017), sobre uma revisão incidindo em estudos relativos a CCA, esperava-se que os resultados demonstrassem melhores desempenhos, tanto na resistência mecânica como para a absorção de água. Isso não se observou nesta dissertação, estando a explicação mais plausível relacionada com as condições de concentração de CO<sub>2</sub>.

Quanto à profundidade de carbonatação registada nos provetes carbonatados, os resultados foram promissores pois ocorreu, efetivamente, penetração de CO<sub>2</sub> durante a CCA, confirmando então a captura de CO<sub>2</sub> como uma estratégia viável. É também pertinente referir que, quando adicionados materiais com características pozolânicas, CV e PV, essa profundidade é notoriamente superior, principalmente com PV50, aos 90 dias, mesmo após as reações pozolânicas envolvidas na hidratação do material se terem desenvolvido ao longo de um espaço de tempo superior.

Na resistividade elétrica é possível verificar uma melhoria significativa relativa aos provetes carbonatados. Quanto ao uso de CAA, analisando a Figura 38, é possível observar que as condições C1, C2 e V, em comparação à condição R, resultou num desempenho consideravelmente superior. O CEM-R manteve-se pouco inalterado entre 28 e 90 dias, tendo sofrido maior aumento com CCA (de 21,28 para 26 em R e de 37,63 para 51,9 para CCA), enquanto as propriedades pozolânicas desenvolvem-se para idades maiores, após 90 dias, CV e PV obtiveram melhores desempenhos na segunda campanha, para 90 dias de idade. Analisando as composições PV50, entre os 28 e 90 dias de idade, podemos reparar um aumento significativo de 423,56%, para provetes de referência, de 256,03%, para carbonatados, o que comprova que o aumento no teor de PV das composições, provoca uma elevação da resistividade, em qualquer idade.

Quanto à relação entre a carbonatação e o seu efeito na resistência à compressão, You K. *et al.* (2013) concluíram que a resistência à compressão aumenta devido à maior densidade que a carbonatação produz. No entanto, afirma não haver uma correlação proporcional entre essas duas características, ou seja, que a profundidade de carbonatação não aumenta ao mesmo ritmo que a resistência à compressão. You K. *et al.* (2013) afirmam, também, que a diminuição na resistência à compressão pode ser consequente da decomposição de hidratos, incluindo C-S-H, conjugado com um aumento na resistência devido à diminuição do volume dos poros.

Na Figura 42 encontra-se uma síntese da resistência à compressão, sem as especificações das misturas representadas, de alguns estudos onde a concentração de CO<sub>2</sub> era superior a 70%, abordados em Zhang *et al.* (2017). É evidente o aumento resultante na resistência à compressão, quando se aumenta a CCA de 3 dias para 28 dias. Isto vai de acordo com o exposto durante a análise de resultados, quando se atribui as limitadas condições de exposição deste projeto, aos desempenhos negativos de resistência mecânica resultante nos provetes carbonatados em comparação aos de referência.

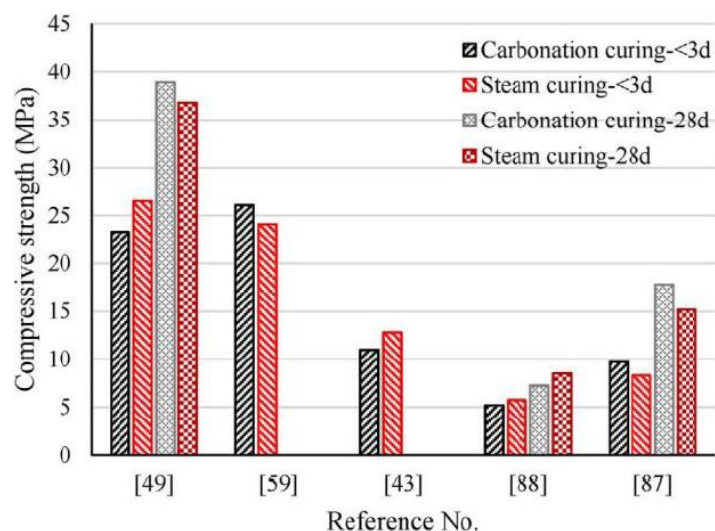


Figura 42 - Resistência à compressão de misturas à base de PC submetidas à cura por carbonatação e cura a vapor (Zhang et al. 2017)

Na Figura 42 é facilmente visível que o uso de cura por carbonatação por 28 dias resulta em valores de resistência a compressão de quase 40 MPa, enquanto com 3 dias, essa resistência é inferior a 25 MPa. Esses 25 MPa vão ao encontro dos resultados obtidos para as duas campanhas (expostos em 4.1.2 e 4.2.2).

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, capilar e por imersão, os resultados não foram totalmente os esperados, uma vez que, pela literatura, esperava-se que o uso de PV e CV, como substituto parcial de cimento, em provetes carbonatados resultasse em coeficientes de absorção capilar inferiores aos de referência. Quanto à absorção de água por imersão, tanto aos 28 dias como aos 90 dias, os resultados consideram-se positivos pois não há grande variação entre qualquer composição ou condição, que ponha em causa a durabilidade e qualidade da argamassa.

Rodier e Savastano (2018) indicam que o efeito do PV no volume de vazios permeáveis e na absorção de água após imersão, de argamassas aos 28 dias, com a substituição parcial de cimento por 10% em peso de PV resulta em uma redução de 15% no volume de vazios permeáveis e na absorção de água em comparação com o controle (argamassa sem adição mineral). A reação entre a sílica amorfa presente no PV e a cal produz C-S-H adicional, que preenche os poros capilares. A densificação dos poros capilares pelo C-S-H, leva ao decremento do volume total de vazios permeáveis

Quanto à composição de PV25 e PV50 os resultados obtidos não vão ao encontro das conclusões obtidas anteriormente por Deepa Paul *et al.* (2022), quando investigados diferentes teores de PV em betões. Nos seus estudos, a percentagem de absorção de água diminuiu com o aumento do teor de PV. Os autores

justificam este facto declarando que "a diminuição da porosidade com o aumento do teor de PV deve se à microestrutura porosa densa dos betões com PV, proporcionada pela reação pozolânica do PV".

Em uma análise da relação entre resistência à compressão e porosidade aberta, assim como visível na Figura 33, relacionando a porosidade aberta com a resistência à compressão. pode-se notar uma estreita relação entre elas, em que resultados de resistência à compressão mais altos alinham-se com argamassas menos porosas, mas também demonstra que a relação entre porosidade aberta e resistência à compressão não é linear. Além disso, fica evidente que a porosidade por si só pode não ser um fator determinante para alcançar alta resistência.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo principal desta dissertação consistiu em avaliar o comportamento de argamassas sustentáveis submetidas à cura por carbonatação acelerada (CCA), contribuindo, assim, para alcançar a Neutralidade Carbônica 2050.

Foram desenvolvidas duas campanhas laboratoriais, que estudaram duas composições sustentáveis principais, uma contendo CV e outra contendo PV como substitutos parciais do cimento. Estas composições foram estudadas sob diferentes condições de cura que incluíram diferentes formas de utilizar a CCA.

A primeira campanha focou na definição da forma mais apropriada de utilizar a CCA, considerando o tempo disponível para o desenvolvimento do trabalho e as condições laboratoriais existentes. Provetes de controlo foram utilizados para verificação da existência de carbonatação durante o período de pré-cura, onde pode-se concluir que a submissão dos provetes após 24h e 48h de moldagem à câmara de carbonatação (5% CO<sub>2</sub>), durante 24h, provocou carbonatação nos provetes. Já os provetes que foram submetidos ao vácuo, na tentativa de simular um ambiente com 100% de CO<sub>2</sub>, não apresentaram profundidade de carbonatação relevante. Neste caso, conclui-se que seria necessário um melhor ajuste e controlo dos parâmetros envolvidos (CO<sub>2</sub>, humidade relativa, temperatura e pressão) para que fosse possível a exposição efetiva aos 100% de CO<sub>2</sub>, como acontece na maioria dos casos encontrados na literatura. Atendendo à disponibilidade temporal do trabalho, não foi possível avançar com o aperfeiçoamento do sistema de vácuo e optou-se por utilizar a condição de cura C1 na segunda campanha, ou seja, 24h em câmara de carbonatação com 5% de CO<sub>2</sub> após 24h da moldagem do provete.

Os resultados da primeira e da segunda campanha, em conjunto, permitiram concluir sobre as vantagens e inconvenientes da utilização da CCA em argamassas sustentáveis. Para a maioria dos casos estudados, o período de permanência na câmara de carbonatação durante a fase de pré-cura, após 24h ou 48h de moldagem das argamassas, resultou em carbonatação, ou seja, em captura de CO<sub>2</sub>. A medição da profundidade de carbonatação após 28 e, principalmente, após 90 dias, revela valores expressivos. Neste sentido os resultados foram promissores pois ocorreu penetração de CO<sub>2</sub> durante a CCA, confirmando a captura de CO<sub>2</sub> como uma estratégia viável.

Na análise de carbonatação dos provetes PV50 verifica-se um aumento na profundidade de carbonatação, sendo essa situação que cria maiores profundidades de carbonatação. A tendência para profundidade da

frente de carbonatação é similar para as quatro situações estudadas, com ligeira propensão decrescente no sentido: PV50, PV25 e CV e CEM. Estes resultados concluem, indo também ao encontro da literatura, que a utilização de MCS' s leva à diminuição de hidróxido de cálcio, que provoca um aumento na profundidade de carbonatação, o que se verifica nas composições de PV e CV.

Estes resultados diferem de grande parte dos trabalhos que utilizam CCA. Contudo, há autores que alcançaram resultados semelhantes. No trabalho em causa, é possível que estes resultados estejam relacionados com os parâmetros utilizados durante a CCA, sendo a reduzida quantidade de  $\text{CO}_2$  o responsável mais direto. São necessárias análises ao nível da microestrutura para suportar esta hipótese, nomeadamente, a realização de um ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e análises termogravimétricas (TG) para determinar a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  formada durante o período de pré-cura.

Apesar da redução das resistências mecânicas, este resultado não inviabiliza a utilização dos materiais estudados, sendo necessária a definição de ambientes específicos para sua utilização.

No que se refere à utilização do PV como material substituto das CV, os resultados são favoráveis. As composições PV25 e CV25 apresentaram comportamentos muito semelhantes em todos os ensaios realizados, independentemente da condição de cura. Estes resultados confirmam a possibilidade da utilização de PV como alternativa às CV. Concluindo, e pela revisão contínua sobre alguns estudos relativos a CCA, esperava-se que os resultados demonstrassem melhores desempenhos, tanto na resistência mecânica como para a absorção de água. Isso não se observou nesta dissertação, estando a explicação mais plausível relacionada com as condições de concentração de  $\text{CO}_2$ . As limitadas condições de exposição deste projeto, apenas de 5% de  $\text{CO}_2$ , após 24h de pré cura húmida, não se conseguiram traduzir em melhorias quanto ao desempenho na resistência mecânica resultante nos provetes carbonatados em comparação aos de referência. Mesmo assim, fazendo uma comparação direta entre CV e PV, conclui-se que estamos perante uma alternativa às CV, uma vez que estas são limitadas.

## 5.1. Trabalhos Futuros

Este projeto evidencia que o procedimento de CCA pode promover a captura de  $\text{CO}_2$  em argamassas com incorporação de CV e PV e afirmam o elevado potencial deste procedimento para benefício ambiental.

É importante perceber que os resultados obtidos ao longo desta dissertação não corroboraram o que se tem feito mundialmente relativo a esta temática. As condições possíveis no LMC, permitiram sujeitar os provetes a uma concentração de 5% de  $\text{CO}_2$ , sendo que a maioria dos estudos levados a cabo utilizam 99,9% de  $\text{CO}_2$  e, algumas vezes, através de outros métodos, como a carbonatação com  $\text{CO}_2$  seco sob pressão, carbonatação a vácuo, carbonatação a alta pressão e a carbonatação supercrítica.

Exposta a dificuldade de criar situações de CCA em laboratório, apresentam-se algumas linhas de pensamento, que poderiam ser levadas a cabo no futuro:

- Sujeitar as amostras a concentrações superiores de  $\text{CO}_2$
- Aumentar o tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ ;
- Compreender melhor a microestrutura dos provetes através da realização de ensaios com MIP, TG e SEM;

## 6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, J. B. (2007). *Materiais de Construção I*. Apontamentos da Unidade Curricular, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Almeida, A. A. (2015). Caracterização Química e Física de Pozolanas comumente utilizadas na RMR, Dissertação de Conclusão do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Alonso, A.M.J. (2016). Resíduos de Vidro e Resíduos de Construção e Demolição no Cimento. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Alonso, J. L. & Wesche, K. (1991). Fly ash in concrete: properties and performance. Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, (pp. 3-23).
- ASTM C1866 (2022). Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM C618 (2022). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- Battagin, A.F.; Curti, R.; Silva, C. O.; Munhoz, F.A.C. (2010) Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. In: Instituto brasileiro de Concreto – Congresso Brasileiro, 44, São Paulo, 13p.
- Benitez, L.R.F. (2019). Captura de CO<sub>2</sub> em peças de concreto para pavimentação através da cura por carbonatação acelerada. Dissertação de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Bertos, M.F.; Simons, S.J.R; Hills, C.D.; Carey, P.J. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>
- Bezerra, I. M. T.; Souza, J.; Carvalho, J. B. Q.; Neves, G. A. (2011). Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental., Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 639-645.
- Bukowski, J.M.; R.L. Berger. (1979). Reactivity and strength development of CO<sub>2</sub> activated non-hydraulic calcium silicates. Cem. Concr. Res. 9.
- Camões de Azevedo, A. F. F. L. (2002). Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes. Dissertação de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Camões, A. (2019). Durabilidade de Materiais. Apontamentos da Unidade Curricular, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Costa, A. & Appleton, J. (2002) Estruturas de Betão I, Parte II- Materiais. Apontamentos da Unidade Curricular, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Coutinho, A. (1988). “Fabrico e Propriedades do Betão”, Volume 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988, ISBN:978-972-49-0326-2.
- Deepa Paul, K.R. Bindhu, Ana Mafalda Matos, João Delgado, Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution, Construction and Building Materials 355 (2022) 129217, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217>

- eCycle, (2024) Clínquer: impactos ambientais e alternativas. Consultado em março 10 2024, em <https://www.ecycle.com.br/cliquer/>
- Glanville, J., & Neville, A. (Eds.). (1997). Prediction of Concrete Durability: Proceedings of STATS 21st anniversary conference (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482294910>
- Haselbach, L.M. ; Thomle, J. N. (2014). An alternative mechanism for accelerated carbon sequestration in concrete. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.01.001>
- Helene, P.; Levy, S.M. (2013). Qual é a Cura Recomendada para a Estrutura de Concreto? Boletín Técnico nº 8. Mérida, México: ALCONPAT –Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología eRecuperación de la Construcción.
- International Energy Agency: IEA (2024). Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach, <https://www.iea.org/reports/cement-3>, acesso 30 de maio 2024.
- Isaia, G.C.et al.(2011). A água no Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo,Ed. Ibracon.
- Jang, J.G., Kim, H.J., Park, S.M., Lee, H.K., (2015) The influence of sodium hydrogen carbonate on the hydration of cement. Constr. Build. Mater. 94.
- Jones, R.H. (1996). Cement treated with high-pressure CO<sub>2</sub>. Materials Technology Ltd., Nevada, USA
- Kamal, M. M., Etman, Z. A., Afify, M. R., & Salem, M. M. (2015). Bond strength of concrete containing different recycled coarse aggregates. *Concrete Research Letters*, 6(2).
- Kamal, M.L.N.; Itam, Z.; Sivaganese, Y.; Beddu, S. (2020) Carbon dioxide sequestration in concrete and its effects on concrete compressive strength. Materials Today: Proceedings, 31: A18–A21.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art . Swedish Cement and Concrete Research Institute. ISBN 91-976070-0-2
- Lee, J.-C & Song, H. & Kim, B.-Y & Song, T.-H & Seo, C.-H. (2016). The application of CO<sub>2</sub> in the curing process of cement brick products. 17. 17-25.
- LNEC E391 – Determinação da resistência a carbonatação em betões, LNEC, 1993.
- LNEC E393 – Determinação da absorção de água por capilaridade, LNEC, 1993.
- LNEC E394 – Determinação da absorção de água por imersão, LNEC, 1993.
- Malheiro, R.; Camões, A.; Meira, G. (2022). Durabilidade do Betões com Cinzas Volantes face à Carbonatação em Ambiente Marítimo. CLBMCS, Salvador. <https://hdl.handle.net/1822/81942>
- Malheiro, R.; Moreira, B.; Pontes, K.; Jesus, C.; Camões A.(2022) – Utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento: uma abordagem experimental acerca da resistência mecânica, CLBMCS, Salvador. <https://hdl.handle.net/1822/81939>
- Malheiro, R.L.M.C. (2018). Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho. Portugal. <https://hdl.handle.net/1822/58335>

- Maries, A. (1985). The activation of portland cement by carbon dioxide, In Proceedings of Conference in Cement and Concrete Science, Oxford, UK
- Matos, A. M. (2010). Estudos de Argamassas com Substituição Parcial de Cimento por Resíduos de Vidro Moído. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal.
- Matos, A.M.; Sousa-Coutinho, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36: 205-215.
- Medeiros, R. (2018). Estudo da influência das características das cinzas volantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: proposta de método simplificado. Dissertação pós-graduação em Engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2008). Evolução em tecnologia do concreto. *Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (1992). *Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1ª Ed. São Paulo: Editora Pini.
- Morandea, A.; Thiéry, M.; Dangla, P. (2014). Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.* 56
- Moreira, B. A. (2022). Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial de cimento. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
- Moreira, B.; Jesus, C.; Malheiro, R.; Camões, A. (2023). Using Glass Waste for producing Low CO<sub>2</sub> Cementitious Material as a Contribution to Circular Economy. *Romanian Journal of Materials*, 53(4): 297-305. <https://solacolu.chim.upb.ro/pg297-305.pdf>
- Moreira, O. M. J. (2023). Betão de elevado desempenho com grandes incorporações de pó de vidro. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
- Moreira, O.; Camões, A.; Malheiro, R.; Jesus, C. (2024) High Glass Waste Incorporation towards Sustainable High-Performance Concrete. *CivilEng*, 5: 41-64. <https://doi.org/10.3390/civileng5010003>
- Nassar, R. U. D.; Soroushian, P.; Sufyan-Ud-Din, M. (2021). Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00745>
- Neto, M. K. (2017). *Elaboração do Vidro, Introdução ao Vidro e sua Produção*. Consultado em junho 18, 2024, em [https://wikividros.eesc.usp.br/introducao\\_ao\\_vidro\\_e\\_sua\\_producao/elaboracao](https://wikividros.eesc.usp.br/introducao_ao_vidro_e_sua_producao/elaboracao)
- Neves, J. A. (2014). Captura de CO<sub>2</sub> em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.
- Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*, 5th Edition, Pearson Education Limited, Harlow, England, ISBN 978-0-273-75580-7
- NP EN 1015-11, 2019. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

- NP EN 1015-18 (2002). Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar
- NP EN 1015-3, 2004. Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- NP EN 196-1, 2017. Métodos de ensaio de cimentos : parte 1 : determinação das resistências mecânicas / Instituto Português da Qualidade
- NP EN 196-6, 2019, Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: determinação da finura, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 197-1:2012 - Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Portugal: IPQ, 2012.
- NP EN 206-1:2007 - Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade
- NP EN 450 –1. 2012, Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.
- Olofinnade, O. M.; Ndambuki, J. M.; Ede, A. N.; Booth, C. (2017). Application of Waste Glass Powder as a Partial Cement Substitute towards more Sustainable Concrete Production. International Journal of Engineering Research in Africa, 31:2017-2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.31.77>
- Pontes, K. (2023), Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes? Tese Mestrado, Universidade do Minho, <https://hdl.handle.net/1822/85024>
- Redação SustentArqui. (2019). Impactos Ambientais da Construção Civil. SustentArqui. Consultado em maio 7, 2024 em ) <https://sustentarqui.com.br/impactos-ambientais-da-construcao-civil/>
- Reis, R.; Malheiro, R.; Camões, A.; Ribeiro, M. (2014) Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (ISSN 2183-1866), Guimarães, Portugal, p.49-59 - v.3.
- Reis, Rui Jorge Alves da Cunha, Influência da adição de cal hidratada na carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2022 - <https://hdl.handle.net/1822/81153>
- Rilem, T.C. (1988) CPC-18 RILEM RECOMMENDATION: CPC-18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth. Materials and Structures, 21: 453–455.
- Risson, K.; Proença M.; Oliveira D.; Cassel, V.; Molin, D.; Zara, K.; Possan, E.(2023). Pós de Resíduos da Construção e Demolição Tratados com CO<sub>2</sub>: Potencial de Uso Como Material Cimentício Suplementar
- Rodier L., Holmer Savastano Jr, Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials, Journal of Cleaner Production 184 (2018) 333e341, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.269>
- Santos, S.; Moreira, L.; Gomes, C.; Oliveira, R.; Salles, P.; Junior, L. (2019). Caracterização da cinza de casca de arroz como adição mineral ao concreto. Research, Society and Development, vol. 8, núm. 3, pp. 01-12, 2019

- Sharma, D.; Goyal, S. (2018). Accelerated carbonation curing of cement mortars containing cement kiln dust: An effective way of CO<sub>2</sub> sequestration and carbon footprint reduction. *Journal of Cleaner Production*, 192: 844-854.
- Stark, D.; Helmuth, R.; Diamond, S.; Moranville-Regourd, M. (1993). *Alkali-silica reactivity: an overview of research*. Washington
- Tipos de ensaios, ensaios e monitorização. Consultado em julho 30, 2024 em <https://www.spybuilding.com/index.php?id1=3&id2=1>
- Venhuis, M.A.; Reardon, E.J. (2001). Vacuum method for carbonation of cementitious waste forms. *Environ. Sci. Technol.* 35
- Vidro: história, composição, tipos, produção e reciclagem. Consultado em julho 14, 2024, em <https://www.recicloteca.org.br/material-reciclaivel/vidro/>
- Warda A. (2016). Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities, *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080~>
- You K.; Jeong H.; Hyung W. (2013). Effects of Accelerated Carbonation on Physical Properties of Mortar. DOI:[10.3130/jaabe.13.217](https://doi.org/10.3130/jaabe.13.217)
- Zhang, D.; Ghouleh, Z.; Shao, Y. (2017). Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 21: 119–131.
- Zhang, D.; Shao, Y. (2016) Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. *Construction and Building Materials*, 123: 516–526.