



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO₂ ABSORVIDA EM
CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO**

EMANUELY LIZANDRA CORREIA

SÃO CARLOS - SP

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO₂ ABSORVIDA EM
CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO**

EMANUELY LIZANDRA CORREIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos - SP

2024

A Deus, pela força e sabedoria que me
guiaram ao longo desta jornada;
aos meus pais, pelo amor e apoio
incondicional;
aos meus avós, pelo carinho,
ensinamentos e exemplo de vida;
à minha irmã, por ser minha companheira
de vida, minha amiga e confidente;
à minha família e amigos, pelo apoio e
por estarem ao meu lado durante essa
caminhada;
e a todos que me inspiraram a sonhar e
nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

*Confie ao Senhor as suas obras, e seus planos serão bem-sucedidos
(Provérbios 16:3)*

Agradeço a Deus pela força e sabedoria que me guiaram ao longo desta jornada. Sem Sua constante presença e amparo, nada disso seria possível. Aos meus pais, Maildes e Elizandro, expresso minha profunda gratidão pelo amor, apoio contínuo e por sempre acreditarem nos meus sonhos, mesmo nos momentos em que eu mesma duvidei. Vocês são minha maior motivação e meu porto seguro.

Aos meus avós, Magali, João e Geraldo, e à minha querida avó Nilza, que partiu deixando saudades, agradeço pelo carinho, pelos ensinamentos e pelo exemplo de vida que sempre me inspiraram a seguir em frente com determinação.

À minha irmã, Maísa, agradeço por ser minha companheira de vida, amiga e confidente. Ao meu namorado, agradeço por estar ao meu lado, trazendo calma e apoio nas horas mais difíceis. À minha família e amigos, sou grata pelo apoio e por estarem ao meu lado em cada etapa desta caminhada. Cada um de vocês, de alguma forma, contribuiu para a realização deste sonho.

Agradeço à professora e orientadora, Fernanda Giannotti, pelo suporte constante, pela orientação e paciência ao longo de todo o processo. Também agradeço ao técnico do laboratório, José Roberto, pela assistência durante os ensaios e pelas conversas e amizade. À Profa. Dra. Edna Possan, sou grata pela valiosa ajuda nos cálculos, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian e ao Ricardo Luiz, agradeço por disponibilizarem o Laboratório de Sistemas Estruturais para a realização dos ensaios mecânicos, proporcionando um suporte técnico imprescindível. Minha sincera gratidão também ao Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos, que realizou o ensaio de termogravimetria, contribuindo significativamente para este trabalho.

Aos meus professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, meu sincero agradecimento por todo o conhecimento transmitido, pela dedicação e por terem me preparado para os desafios da profissão.

Finalmente, agradeço a todos os meus colegas do curso de graduação, que compartilharam comigo os inúmeros desafios que enfrentamos ao longo dessa jornada.

RESUMO

CORREIA, E.C. **Determinação da quantidade de CO₂ absorvida em concretos com incorporação de pó de vidro.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental na economia brasileira, mas também é responsável pelo elevado consumo de recursos naturais, energia e pela significativa emissão de CO₂. Além disso, gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, contribuindo para impactos ambientais negativos. Diante disso, torna-se essencial adotar estratégias que minimizem esses efeitos, como a reutilização de resíduos, cada vez mais valorizados como fontes alternativas de matéria-prima passíveis de aprimoramento. Ressalta-se que o cimento, indispensável em obras, libera CO₂ durante sua fabricação. No entanto, materiais cimentícios possuem a capacidade de capturar esse gás ao longo do tempo, por meio do processo de carbonatação. Dessa forma, o presente trabalho visa quantificar a absorção de CO₂ em concretos com 20% de substituição de cimento por pó de vidro, devido à carbonatação, por análise termogravimétrica. Ademais, foram verificados a profundidade de carbonatação, por meio de aspensão de indicador de pH em amostras submetidas à carbonatação natural, e a resistência à compressão dos concretos. O concreto com 20% de pó de vidro atingiu a maior profundidade de carbonatação em menor tempo, com 9,37 mm em 28 dias. Em relação à resistência à compressão, tanto o concreto referência quanto o com pó de vidro apresentaram resultados semelhantes, com o traço com incorporação de pó de vidro atingindo um desempenho de 153,20% do requisito mínimo da NBR 6136 na idade de 28 dias. A análise termogravimétrica revelou que o concreto referência capturou 48,39 Kg.CO₂/m³, absorvendo em torno de 60,88% das emissões de CO₂, enquanto o traço com pó de vidro absorveu até 61,77%. Esses resultados indicam que a incorporação de pó de vidro é uma alternativa eficaz para reduzir as emissões de CO₂, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais da construção civil.

Palavras-chave: Concreto. Carbonatação. Captura de CO₂. Sustentabilidade. Pó de Vidro. Termogravimetria.

ABSTRACT

CORREIA, E.C. **Determination of the amount of CO₂ absorbed in concrete with the incorporation of glass powder.** 2024. Undergraduate Thesis (Bachelor's in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2024.

The construction industry plays a fundamental role in the Brazilian economy, but it is also responsible for the high consumption of natural resources, energy, and significant CO₂ emissions. Additionally, it generates a large amount of solid waste, contributing to negative environmental impacts. In light of this, it becomes essential to adopt strategies that minimize these effects, such as the reuse of waste, increasingly valued as alternative sources of raw materials that can be improved. It is worth noting that cement, indispensable in construction projects, releases CO₂ during its production. However, cementitious materials have the ability to capture this gas over time through the carbonation process. Thus, the present work aims to quantify the CO₂ absorption in concretes with 20% cement replacement by glass powder, due to carbonation, through thermogravimetric analysis. Furthermore, carbonation depth was measured by spraying a pH indicator on samples subjected to natural carbonation, and the compressive strength of the concretes was tested. The concrete with 20% glass powder reached the greatest carbonation depth in the shortest time, with 9.37 mm in 28 days. Regarding compressive strength, both the reference concrete and the one with glass powder showed similar results, with the mix incorporating glass powder achieving 153.20% of the minimum requirement of NBR 6136 at 28 days. Thermogravimetric analysis revealed that the reference concrete captured 48.39 Kg.CO₂/m³, absorbing around 60.88% of the CO₂ emissions, while the mix with glass powder absorbed up to 61.77%. These results indicate that the incorporation of glass powder is an effective alternative for reducing CO₂ emissions, contributing to the mitigation of the environmental impacts of the construction industry.

Keywords: Concrete. Carbonation. CO₂ Capture. Sustainability. Glass Powder. Thermogravimetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de fabricação do cimento Portland comum.....	16
Figura 2 - Fatores que afetam a captura de CO ₂	25
Figura 3 - Ciclo de carbono do cimento/concreto.....	27
Figura 4 - Fluxograma das etapas gerais do programa experimental.	29
Figura 5 - Materiais utilizados para moldagem dos CPs.	30
Figura 6 - a) Lavagem e retirada dos rótulos das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço. .	30
Figura 7 - Moinho descarregando o pó de vidro.....	31
Figura 8 - 300 gramas de vidro moído para realizar o peneiramento.....	32
Figura 9 - Peneirador mecânico.	32
Figura 10 - Argamassadeira utilizada para misturar os materiais com capacidade total de 10 litros.....	34
Figura 11 - Equipamento utilizado para medir umidade e temperatura.	35
Figura 12 - Equipamento Proctor utilizado para as moldagens dos CPs.	35
Figura 13 - Objeto cilíndrico colocado no interior do molde.	36
Figura 14 - a) Prolongador; b) Funil.	36
Figura 15 - Recipiente utilizado para armazenamento dos corpos de prova.....	37
Figura 16 - a) Esquadro com nível, piso cerâmico, espátula e desmoldante; b) Recipiente com água; c) Água e cimento.....	38
Figura 17 - a) Argamassadeira planetária da Solotest; b) Balança de precisão.....	39
Figura 18 - CPs capeados e identificados.....	40
Figura 19 - a) Primeira leitura do diâmetro no CP; b) Segunda leitura do diâmetro no CP; c) CP após o ensaio de resistência à compressão.....	41
Figura 20 - CPs expostos a condições ambiente de laboratório.	42
Figura 21 - a) CP sendo quebrado; b) Leitura da frente de carbonatação após aspersão de fenolftaleína.	42
Figura 22 - a) Remoção do giz utilizado para identificar o CP e extração do pó com auxílio de uma lima; b) Passagem do pó extraído na peneira de malha #200; c) Cadinho com o pó extraído sendo pesado.....	44
Figura 23 - a) CP sendo lixado com auxílio de uma esmerilhadeira; b) Verificação da área não carbonatada a ser extraído o pó; c) Quebra da amostra não carbonatada;	

d) Trituração da amostra com auxílio de um almofariz; e) Passagem do material na peneira de malha #200; f) Armazenamento do pó em um cadinho.	44
Figura 24 - a) Sílica gel no dessecador; b) Dessecador utilizado para armazenamento das amostras; c) Amostras carbonatadas e não carbonatadas no dessecador.....	45
Figura 25 - a) Equipamento TGA Q500 com a panelinha; b) Visão ampla do equipamento TGA Q500.	45
Figura 26 - a) Intervalos de perda de massa para as amostras do traço REF; b) Intervalos de perda de massa para as amostras com incorporação de 20% de pó de vidro.	48
Figura 27 - Curva de distribuição granulométrica do pó de vidro.	52
Figura 28 - Comparação dos resultados de resistência à compressão dos concretos entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.	54
Figura 29 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em dias.	55
Figura 30 - Média das profundidades de carbonatação dos concretos analisados medidas ao longo do tempo.	55
Figura 31 - a) Curvas de TG e DTG para as amostras do traço REF; b) Curvas de TG e DTG para as amostras com incorporação de 20% de pó de vidro.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de resíduos de vidro e outras pozolanas.	20
Tabela 2 - Pesquisas recentes que abordaram a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios.	21
Tabela 3 - Pesquisas recentes que investigaram o potencial de captura de CO ₂	28
Tabela 4 - Traços, composição e quantidade em gramas dos materiais confeccionados.	33
Tabela 5 - Consumo de cimento para produzir 1 m ³ de concreto.	34
Tabela 6 - Ensaio realizados na pesquisa.	40
Tabela 7 - Dados obtidos para aplicar na Equação 2.	46
Tabela 8 - Dados obtidos para aplicar nas Equações 8 e 10.	49
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do pó de vidro.	51
Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.	52
Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 14 dias.	52
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.	53
Tabela 13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias.	53
Tabela 14 - Resultados da análise termogravimétrica e obtenção do potencial de captura de CO ₂	58
Tabela 15 - Resultado do balanço das emissões.	59
Tabela A.1 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo.	71
Tabela A.2 - Anotações sobre as moldagens e leituras dos concretos estudados. .	72
Tabela B.1 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.	73
Tabela B.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.	73
Tabela B.3 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.	74
Tabela B.4 - Resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.	74
Tabela B.5 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.	74
Tabela B.6 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.	75
Tabela B.7 - Teste de Tukey da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.	75

Tabela B.8 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.....	75
Tabela B.9 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.....	76
Tabela B.10 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.	76
Tabela B.11 - Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.....	76
Tabela B.12 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.....	77
Tabela B.13 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.	77
Tabela B.14 - Resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.....	77
Tabela B.15 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.....	78
Tabela B.16 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.	78
Tabela B.17 - Resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.....	79
Tabela B.18 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.....	79
Tabela B.19 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.	79
Tabela B.20 - Anotações sobre as moldagens e ruptura dos concretos estudados.	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CO₂ – Dióxido de carbono (gás carbônico)

CP / CPs – Corpo de prova / Corpos de prova

DTG – Derivada da termogravimetria

LMC – Laboratório de Materiais e Componentes

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

RAS – Reação Álcali-Sílica

TGA / TG – Análise Termogravimétrica / Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	18
2.2 INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	19
2.3 CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	23
2.4 CAPTURA DE CO ₂ POR CARBONATAÇÃO	26
3 METODOLOGIA	28
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	29
3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	33
3.3 ENSAIOS REALIZADOS	40
3.3.1 Resistência à compressão.....	40
3.3.2 Determinação da profundidade de carbonatação.....	41
3.3.3 Termogravimetria (TG)	43
3.4 DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂	46
3.4.1 Emissões da indústria do cimento.....	46
3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO ₂ ABSORVIDA DEVIDO À CARBONATAÇÃO POR ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	47
3.6 BALANÇO DAS EMISSÕES.....	49
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 GRANULOMETRIA DO PÓ DE VIDRO	50
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS.....	52

4.3 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	54
4.4 TERMOGRAVIMETRIA	56
4.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO ₂ ABSORVIDA DEVIDO À CARBONATAÇÃO POR ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	58
4.6 BALANÇO DAS EMISSÕES.....	59
5 CONCLUSÕES.....	60
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A	71
APÊNDICE B	73

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é, sem dúvidas, de grande importância para a sociedade. Por meio dela, busca-se as melhores formas de oferecer conforto, segurança e bem-estar, em ambientes domésticos ou de trabalho. Contudo, esse setor ainda provoca diversos impactos nocivos ao meio ambiente, uma vez que produz um elevado número de resíduos sólidos. Somado a isso, as obras em geral utilizam concreto, sendo o principal constituinte, o cimento, o qual é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (Global Cement and Concrete Association, 2021).

Se por um lado o setor da construção civil possui como desvantagem produzir resíduos em quase todos os seus processos, por outro, possui como vantagem a capacidade de absorver parte dos resíduos que produz.

Nesse sentido, uma alternativa que vem sendo adotada é de reduzir a quantidade de cimento e incorporar materiais cimentícios suplementares na produção do concreto. Para isso, devem ser realizados estudos quanto às propriedades mecânicas desses materiais, considerando as condições reais de uso a que eles serão destinados. Essa estratégia pode contribuir para construções mais sustentáveis, além de viabilizar economicamente sua utilização. Isso porque, possivelmente, proporcionará a redução de gastos na compra de novos insumos.

Assim, os resíduos estando bem protegidos e geridos, contribuirão para a preservação do meio ambiente, evitando assim, os impactos socioambientais e à saúde pública. Com o reuso do material, que seria descartado, os benefícios obtidos são a redução da extração de matéria prima, do uso dos recursos naturais e da poluição causada quando esses resíduos são despejados em lugares impróprios, como em aterros sanitários, lixões a céu aberto e terrenos baldios.

Segundo Ferreira *et al.* (2018), o vidro, é um material reciclável e apresenta propriedades mecânicas que o tornam altamente propício para sua integração no concreto, já que possui alta resistência à compressão e ao desgaste. Diante disso, os materiais alternativos, como o pó de vidro, ganham, cada vez mais, espaço na indústria da construção civil, por questões ambientais, sociais e econômicas. Em 2022, foram produzidos, em média, 55,8 bilhões de vidros processados em m² no Brasil, cujo faturamento foi em torno de 6,7 milhões (Abravidro, 2023).

Todavia, conforme Panzera *et al.* (2007), o peso do vidro afeta o custo do transporte da sucata, sendo considerado um impasse para a reciclagem desse material. Além disso, a reutilização do vidro também é limitada devido a contaminação por outras classes de materiais e heterogeneidade da sucata de vidro. Dessa forma, é indispensável uma coleta seletiva eficiente, em que o material é higienizado e selecionado de acordo com suas características e separado de possíveis contaminantes, para então retornar à indústria vidreira e ser reciclado (Abividro, sd). Em locais que não contemplam fábricas de vidro, existe a possibilidade de incorporar esse resíduo ao concreto. Segundo a Abravidro (2024), foi criada em 2024 a entidade Circula Vidro, comprometida com a reciclagem de vidro no Brasil e com o desenvolvimento de políticas públicas que promovam a economia circular e a sustentabilidade no país. A entidade pretende aumentar a taxa de reciclagem de vidros de 11% para 40% até 2032. A criação da Circula Vidro foi impulsionada pelo Decreto Federal nº 11.300, de 21 de dezembro de 2022, que regulamenta a logística reversa de embalagens de vidro (Brasil, 2022b).

De acordo com Abividro (2023), as embalagens de vidro podem ser totalmente reaproveitadas no ciclo produtivo da reciclagem do vidro, sem perda de material. Ademais, utilizar cacos de vidro (vidro pós-consumo) para produzir novas embalagens reduz o consumo de energia, além de diminuir a emissão de dióxido de carbono (Abividro, 2023). Isso porque a cada 6 toneladas de vidro reciclado utilizadas, deixa-se de emitir, em média, 1 tonelada de CO₂ na atmosfera, correspondendo a um crédito de carbono acumulado pelo conceito de Crédito de Carbono, originado no Protocolo de Quioto (Abividro, sd). A produção de embalagens de vidro no Brasil é de mais de 8,6 bilhões de unidades por ano, equivalente a 1,3 milhão de toneladas de material. No entanto, apenas 47% desse material é reaproveitado (Abividro, 2019).

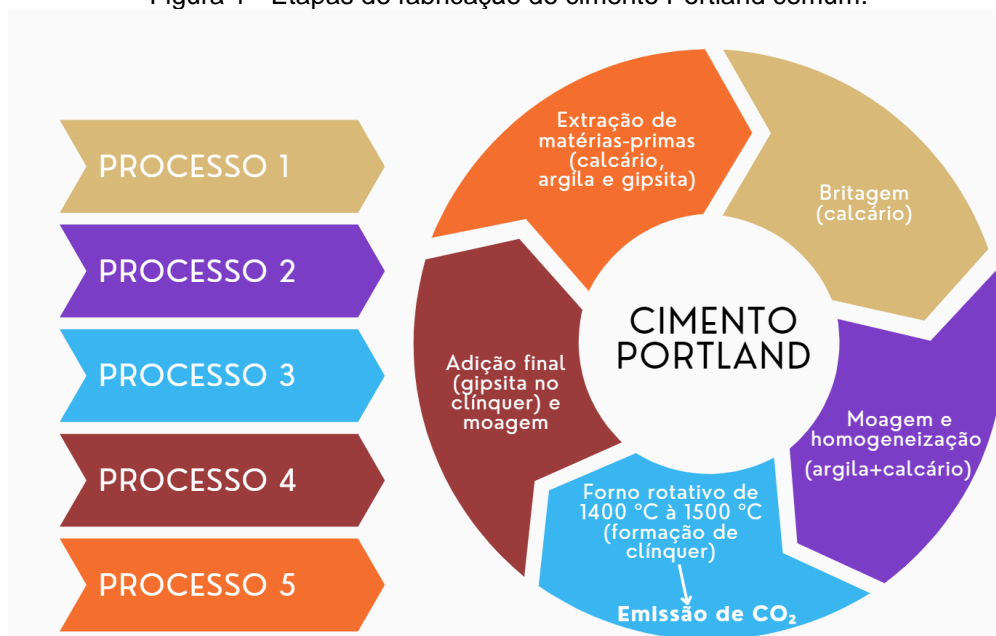
Portanto, a indústria vidreira não consegue reciclar todo o resíduo que ela produz. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Brasil, 2022a) mostram que apenas 32,2% dos 5060 municípios brasileiros analisados possuem coleta seletiva. Logo, é de extrema importância a conscientização e implementação de alternativas para a reciclagem do vidro pós-consumo, especialmente como material complementar ao cimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto, de forma ampla, é o resultado de um produto ou massa obtido a partir de um meio cimentante (Neville, 2013). Atualmente, conforme Helene e Andrade (2010), o concreto de cimento Portland é considerado o material mais importante no âmbito estrutural e de construção civil.

De acordo com Caracitas (2022), a média mundial de cimento produzido por cada ser humano por dia é, em torno, uma tonelada. Em relação ao processo de produção do cimento, o clínquer é o principal componente produzido. Durante esse processo algumas matérias-primas são consumidas, calcário e argila por exemplo, além da utilização de energia e descarbonatação do calcário. Desse modo, à medida que ocorre a saída do cimento do forno rotativo, após a queima do combustível e descarbonatação, o dióxido de carbono é emitido. A Figura 1 mostra as etapas de fabricação do cimento Portland comum.

Figura 1 - Etapas de fabricação do cimento Portland comum.



Fonte: Autora (2023)

Na literatura, a reação de carbonatação é um tema discutido há mais de 70 anos, uma vez que ela compromete a durabilidade das estruturas de concreto armado, ao reduzir o pH do concreto, possibilitando a corrosão do aço (Possan, 2019). Entretanto, ainda segundo a autora, nos últimos anos uma nova abordagem

vem sendo estudada, sendo direcionada para a capacidade de materiais a base de cimento e cal em capturar CO₂ ao longo do tempo.

Somado a isso, com o intuito de atenuar a utilização de cimento e promover a reciclagem de vidro pós-consumo, diversas pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas globalmente, visando à inclusão de pó de vidro em composições cimentícias (Barros, 2016; Borges, 2021; Carvalho, 2019; Chen *et al.*, 2006; Guignone *et al.*, 2020; Higuchi, 2018; Martioli, 2022; Moreira, 2022; Pontes, 2023; Salvador Filho *et al.*, 2017; Shayan e Xu, 2006; Soares *et al.*, 2019).

No entanto, o número de estudos dedicados à incorporação de pó de vidro em concreto seco ainda é limitado, e essa quantidade diminui ainda mais quando se considera a captura de CO₂ em materiais cimentícios suplementares, como é o caso do resíduo de vidro. Poucos dados estão disponíveis sobre a capacidade desses materiais de absorver gás carbônico em concretos.

Nessa perspectiva, é de suma importância a busca por novas alternativas que possam minimizar as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, uma vez que esse gás contribui para o aquecimento global. Portanto, justifica-se determinar a quantidade de CO₂ absorvida em concretos com incorporação de vidro em substituição ao cimento, visando a redução de emissões de gases poluentes, além de avaliar o potencial de carbonatação de concretos confeccionados com resíduos.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados o objetivo geral e específico deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo consiste em avaliar a quantidade de CO₂ absorvida em concretos com incorporação de pó de vidro, devido à carbonatação natural. A análise foca exclusivamente nas emissões de CO₂ relacionadas ao cimento.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo, englobam:

- a) Avaliar a resistência mecânica dos concretos com e sem a incorporação de pó de vidro, a partir de ensaios de resistência à compressão;
- b) Determinar a profundidade de carbonatação dos corpos de prova, após diferentes períodos de exposição em ambiente de laboratório;
- c) Avaliar e comparar, por meio do ensaio de termogravimetria (TG), a quantidade absorvida de CO₂ dos concretos carbonatados;
- d) Calcular e avaliar o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação natural pela análise termogravimétrica, juntamente com o balanço das emissões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos tópicos a seguir serão explicitados os trabalhos que contribuíram para o embasamento teórico do estudo em questão.

2.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

O setor da construção civil gera grande quantidade de resíduos, os quais acabam poluindo o meio ambiente devido à ausência de locais e métodos adequados para sua destinação correta (Andrade *et al.*, 2018). Entretanto, esses impasses estimulam o desenvolvimento de alternativas de reciclagem. Segundo Ludwig e Zhang (2015), a alternativa mais viável para diminuir a emissão de CO₂ é a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) misturados com cimento durante sua produção.

Os materiais alternativos utilizados para substituir parte do cimento Portland no concreto são conhecidos como materiais cimentícios suplementares (MCS), que podem se enquadrar como autocimentante ou pozolânico (Paris *et al.*, 2016). Os materiais autocimentantes se comportam de forma similar ao cimento comum quando esse endurece ao entrar em contato com a água. Já as pozolanas são materiais rico em silício, que não possuem por si mesmo propriedades cimentícias na presença de água. Para Costa (2021), os MCS são inevitavelmente finos, em

que a pozolanicidade é a principal propriedade a ser explorada. Isso porque esses materiais colaboram para o desempenho do concreto através da atividade hidráulica ou pozolânica (Duchesne, 2021). Na atualidade, muitos estudos têm sido direcionados nas aplicações de resíduos de vidro como substitutos do cimento ou como agregados para concreto (Shi; Zheng, 2007).

De acordo com Duchesne (2021), os MCS promovem a redução do consumo de cimento, melhoram a trabalhabilidade do concreto fresco, além de aumentar a resistência e aprimorar a durabilidade do concreto endurecido.

Conforme estudos de Pillai, Gettu e Santhanam (2020), o MCS pode reduzir a pegada de carbono do concreto, assim como aumentar a resistência à entrada de cloretos, promovendo a redução da taxa de corrosão da armadura. Para isso, é necessário que ao realizar a substituição de cimento por MCS, também sejam feitas modificações no traço e/ou nos processos de mistura e lançamento do concreto, a fim de garantir as propriedades mecânicas necessárias (Pillai; Gettu; Santhanam, 2020).

Portanto, para a aplicação adequada do MCS, é imprescindível compreender as proporções a serem utilizadas, bem como entender as possíveis mudanças que podem vir acontecer na estrutura do concreto (Costa, 2021).

2.2 INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Pesquisas sobre a possibilidade de utilizar resíduos de vidro em concreto não são recentes. De acordo com Sharifi *et al.* (2016), os primeiros estudos foram realizados na década de 1960, em que o objetivo era de empregar resíduos de vidro triturados em substituição ao agregado. Contudo, os autores comentam que não foram obtidos resultados satisfatórios, devido a reação entre o álcali do cimento e a sílica reativa do vidro (reação álcali-sílica: RAS). Conforme Aly *et al.* (2012), dependendo do tamanho das partículas de vidro, o concreto pode apresentar dois comportamentos distintos: a reação álcali-sílica (RAS), que provoca impactos negativos, e a reação pozolânica, a qual aumenta a resistência mecânica e melhora as propriedades físicas do concreto.

Sendo amorfo e possuindo consideravelmente grande quantidade de silício e cálcio, o vidro finamente moído possui características pozolânicas que o tornam um material cimentício suplementar, despertando interesse para sua reciclagem (Shi;

Zheng, 2007; Carsana *et al.*, 2014). Logo, quanto mais fina for a partícula de vidro, maior será a reatividade pozolânica (Shi *et al.*, 2005). Outra análise interessante feita por Aly *et al.* (2012), é que o pó de vidro extremamente fino reduz a expansão do RAS.

As propriedades que influenciam nas características pozolânicas dos resíduos de vidro e de outras pozolanas são a finura, a composição e a solução de poros presente para reação (Federico; Chidiac, 2009). Assim, a Tabela 1 compara a composição química de resíduos de vidro com a composição de algumas pozolanas.

Tabela 1 - Composição química de resíduos de vidro e outras pozolanas.

Composto	Resíduos de vidro	Cinza vulcânica	Pedrapomes vulcânica	Escória	Sílica ativa	Cinzas volantes com alto teor de Ca	OPC (Cimento Portland)
SiO ₂	63,79	73,68	65,74	35	90,9	39,21	20,33
Al ₂ O ₃	3,02	12,25	16,72	12	1,12	16,22	4,65
Fe ₂ O ₃	1,57	2,2	3,58	1	1,46	6,58	3,04
CaO	13,01	1,13	3,33	40	0,69	22,78	61,78
MgO	0,89	0,23	0,95	–	0,77	2,35	3,29
K ₂ O	0,54	3,95	3,05	–	–	–	0,59
Na ₂ O	11,72	3,6	4,48	0,3	–	–	0,24
SO ₃	0,165	0,32	0,65	9	0,38	4,3	3,63
PF (perda ao fogo)	4,55	3,05	2,4	1	3	2,1	–

Fonte: Traduzido e Adaptado de Federico e Chidiac (2009)

Shayan e Xu (2006) estudaram o desempenho do pó de vidro como material pozolânico no concreto. Os autores observaram resultados satisfatórios quanto à retração por secagem e à reatividade alcalina. A mistura contendo resíduos de vidro também indicaram redução de penetração de íons cloreto do concreto, o que possibilita diminuir a ocorrência de corrosão induzida por cloreto do aço no concreto. Como resultado, os estudos mostraram que pode existir incorporação de pó de vidro em concreto de 40 MPa em dosagens de 20 a 30% para substituir o cimento, sem efeitos negativos.

Chen *et al.* (2006) demonstraram que ao utilizar uma quantidade adequada de resíduos de vidro, a resistência à compressão, bem como a resistência ao ataque de sulfato e à penetração de íons cloreto foram, de forma significativa,

melhoradas. Os autores também concluíram que resíduos de vidro podem ser incorporados no concreto tanto como material cimentício, quanto como enchimento inerte, desde que o tamanho da partícula seja inferior à 75 µm.

Em relação às propriedades no estado fresco, Soliman e Tagnit-Hamou (2016) e Omran e Tagnit-Hamou (2016) verificaram que o uso de resíduos de vidro como substituto parcial do cimento no concreto apresenta boas características mecânicas e de durabilidade. Além disso, o aumento do teor de vidro na mistura melhorou a fluidez, devido à sua baixa absorção de água e superfície lisa.

A Tabela 2 apresenta uma síntese de estudos recentes que abordaram a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios. Na mesma tabela constam o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro e os principais resultados obtidos nessas pesquisas.

Tabela 2 - Pesquisas recentes que abordaram a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios.

Referência	Teores de substituição (%)	Resultados obtidos	País
Barros (2016)	0, 10, 15 e 20	O nível mais adequado de substituição foi de 10%, em que houve aumento da resistência à compressão axial de 69 Mpa (concreto convencional) para 71 Mpa (concreto de alta resistência) aos 90 dias.	Brasil
Omran e Tagnit-Hamou (2016)	10, 20 e 30	Além dos benefícios ambientais, o concreto feito com substituição de 20% de pó de vidro mostrou aumentos na resistência à compressão em 91 dias (7%), resistência à tração em 28 dias (35%) e resistência à flexão em 28 dias (4%) em comparação com misturas de referência sem pó de vidro.	Canadá
Salvador Filho <i>et al.</i> (2017)	10 e 20	Os resultados demonstraram que o uso do pó de vidro em substituição ao cimento Portland não afeta significativamente as propriedades mecânicas aos 28 dias.	Brasil
Du e Tan (2017)	15, 30, 45 e 60	Misturas cotendo 15% e 30% de pó de vidro demonstraram maior resistência e, simultaneamente, menor porosidade. Para dosagens de 28 dias ou mais, a taxa ideal de substituição do pó de vidro parece situar-se entre 15% e 45%.	Singapura

Fonte: Autora (2024)

Tabela 2 - Pesquisas recentes que abordaram a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios (continuação).

Pan et al. (2017)	5, 10 e 20	A substituição parcial do cimento por pó de vidro influencia a resistência das argamassas através de dois efeitos distintos: o efeito de diluição, que é negativo, e o efeito pozolânico, que é positivo. A contribuição desses efeitos varia de acordo com a taxa de substituição. Aos 28 dias, uma substituição de 5% de cimento por pó de vidro é ideal para alcançar resistência à compressão otimizada. Além disso, os autores comentam que a atividade pozolânica aumenta com a idade. Aos 28 dias, devido ao consumo de portlandita pela reação pozolânica, o teor de portlandita das pastas contendo GP foi inferior ao das amostras controle.	Austrália
Higuchi (2018)	5, 10, 15, 20 e 25	No estado endurecido, concretos e argamassas contendo 15% de resíduo de vidro moído apresentaram desempenho mecânico superior aos demais a partir dos 28 dias de cura submersa, tanto na compressão quanto na tração.	Brasil
Carvalho (2019)	0, 5, 7,5, 10 e 12,5	A substituição de 12,5% de cimento por resíduo de vidro moído, dentre as estudadas, apresentou maior eficiência, pois promoveu maior ganho de resistência em idades de 56 dias, e também consumiu menos cimento.	Brasil
Soares et al. (2019)	10, 20, 30 e 50	Os teores 20% e 50% apresentaram valores equivalentes, sendo este último recomendado pelos autores, visto que não foram observadas diferenças significativas nos resultados das propriedades físicas e mecânicas.	Brasil
Guignone et al. (2020)	10 e 20	No teor de 20% de substituição, houve reduções na penetração de cloretos, superior a 80%, na reação álcali-silica e conservação da resistência à compressão.	Brasil
Borges (2021)	0, 10, 20, 30 e 50	Os resultados mecânicos obtidos foram favoráveis ao teor de substituição de cimento por pó de vidro em 20% e foi possível constatar que em todas as propriedades analisadas houve a presença dos dois efeitos (fíler e pozolânico) do vidro finamente moído nas argamassas. Além disso, o estudo apresentou 24% em ganho de resistência à compressão por efeito pozolânico em relação ao valor de referência na idade mais avançada do estudo (91 dias).	Brasil

Fonte: Autora (2024)

Tabela 2 - Pesquisas recentes que abordaram a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios (continuação).

Referência	Teores de substituição (%)	Resultados obtidos	País
Moreira (2022)	5, 15, 25 e 35	Os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos para o cenário em que se inclui uma incorporação de 25% de pó de vidro da cor âmbar.	Portugal
Martioli (2022)	15, 25, 35 e 50	As proporções mais adequadas, identificadas no estudo, foram nas substituições parciais de 15 e 25% do CP V-ARI por vidro moído, em que foram obtidos resultados próximos do referencial quanto à resistência à tração e à compressão.	Brasil
Pontes (2023)	0, 5, 15, 25, 35, 50, 70 e 95	A resistência à compressão diminui conforme o aumento da substituição parcial do cimento por pó de vidro. Porém, a amostra com o cimento substituído em 70% pelo pó de vidro verde atingiu um aumento de aproximadamente 72% na resistência à compressão, de 28 para 90 dias.	Portugal

Fonte: Autora (2024)

Mediante os resultados expostos na Tabela 2, pode-se afirmar que a substituição do cimento por pó de vidro em diferentes porcentagens resulta em melhorias nas propriedades mecânicas de concretos e argamassas. As pesquisas demonstram que teores de substituição entre 10% e 20% geralmente apresentam os melhores desempenhos, com aumentos significativos na resistência à compressão e à tração.

2.3 CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Segundo Possan (2019), o processo de carbonatação ocorre devido a reação do dióxido de carbono (CO_2) com os elementos carbonatáveis contidos na matriz cimentícia, como o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ - portlandita), que resulta o carbonato de cálcio (CaCO_3) e a água (H_2O), como pode ser visto na Equação 1.



A partir dessa reação acontece a redução de pH da estrutura do concreto, possibilitando a corrosão do aço, sendo assim, prejudicial no âmbito das estruturas

de concreto armado. Todavia, em produtos e argamassas de concreto não armado, a carbonatação é vista como benéfica, já que pode atuar no equilíbrio das emissões gasosas e aumentar a capacidade de absorção de CO_2 atmosférico, com aumento, inclusive, da resistência mecânica dos materiais (Pade; Guimarães, 2007).

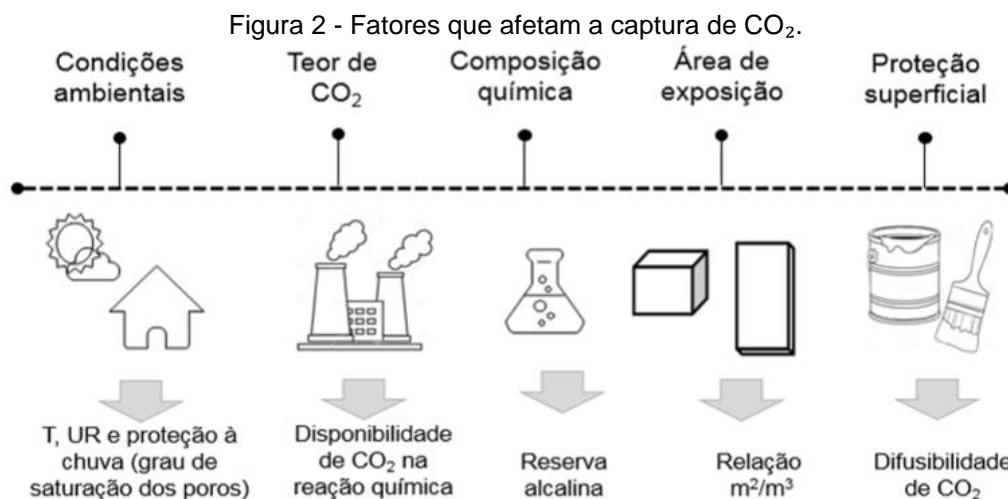
Nesse sentido, a captura de CO_2 por meio da reação de carbonatação é inversamente proporcional ao da produção de cimento no processo de calcinação (POSSAN, 2019). Então, na reação química, uma fração do gás emitido durante a descarbonatação pode ser absorvido.

Vale mencionar que o potencial de captura de CO_2 devido à carbonatação está subordinado a fatores que afetam essa reação, que de acordo com Possan (2019), são:

- a) Condições ambientais, referente a temperatura (T), umidade relativa (UR) e proteção à chuva, que influenciam no grau de saturação dos poros;
- b) Condições de exposição da estrutura ou elemento, dado pelo teor de CO_2 que a amostra será exposta, interferindo na disponibilidade de dióxido de carbono na reação química;
- c) Composição química do material, principalmente a reserva alcalina e;
- d) Proteção superficial, que afeta a difusibilidade de gás carbônico.

Ademais, a área superficial exposta à ação do dióxido de carbono também influencia na captura de CO_2 , uma vez que o gás se insere na estrutura da superfície para seu interior. Logo, quanto maior a área superficial exposta ao CO_2 , maior será a captura (Possan, 2019).

A Figura 2 evidencia um esquema dos fatores que afetam a captura de CO_2 .



Fonte: Sella (2022)

É importante mencionar também que os estudos sobre carbonatação podem ser realizados de duas formas distintas, que englobam: carbonatação natural e carbonatação acelerada. Os ensaios naturais ficam expostos com concentrações naturais de CO₂, requerendo, muitas vezes, um tempo maior para obtenção dos resultados (Pauletti, 2009). Já os ensaios acelerados visam simular a melhor condição para que exista reação de carbonatação, em que os fatores que a influencia são controlados, de maneira a acelerar o alcance de resultados (Pauletti, 2009).

Somado a isso, também é realizada a medição da profundidade carbonatada, que pode ser determinada por diferentes métodos. O mais utilizado é o indicador químico de pH, por ser considerado prático e de baixo custo (Pauletti, 2004). Além disso, normalmente o indicador mais empregado é a fenolftaleína (Pauletti, 2004), a qual provoca mudança de cor na superfície, indicando a área carbonatada e não carbonatada. Para o pH acima de 9, a fenolftaleína apresenta uma cor que varia do rosa ao vermelho carmim (Rilem, 1998), que representa a área não carbonatada. Já para a porção carbonatada, pH abaixo de 9, a coloração é incolor (Rilem, 1998). Após a aplicação da fenolftaleína, as medidas da profundidade de carbonatação pode ser obtida por meio de leituras com paquímetro e/ou análise de imagens (Kulakowski, 2002).

2.4 CAPTURA DE CO₂ POR CARBONATAÇÃO

A fixação do carbono, também conhecida como estocagem, sequestro ou captura de CO₂ vem sendo estudada como uma alternativa de reduzir a liberação de gases indesejáveis na atmosfera durante a produção do cimento (Possan, 2019).

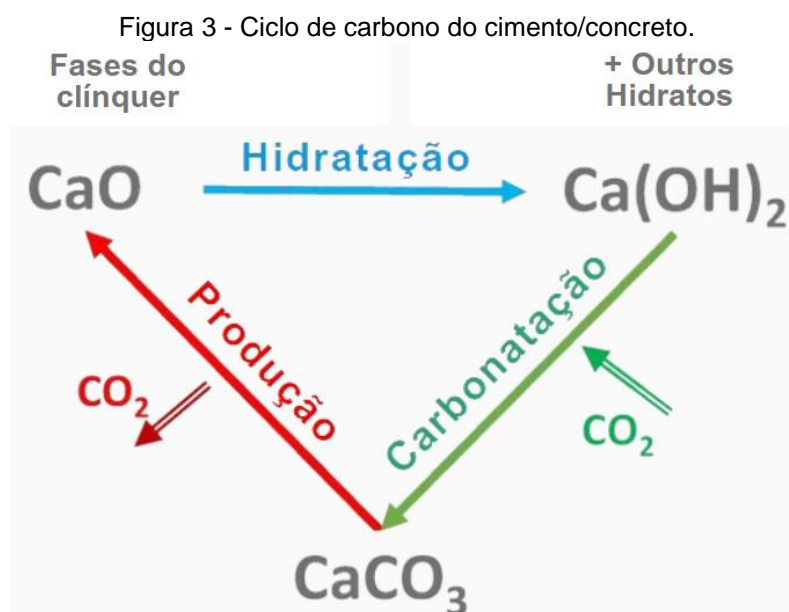
Desse modo, existem dois tipos de sequestro de carbono, o direto e o indireto. Em relação ao sequestro de carbono direto, a captura de dióxido de carbono possui origem em processos industriais e de processos ligados a queima de combustíveis fósseis, antes que o CO₂ atinja a atmosfera (Possan, 2019). Para esse tipo de captura, o gás carbônico pode ser retirado de indústrias cimenteiras, siderúrgicas, unidades de produção de gás natural, entre outros, em que seu armazenamento deve ser feito de forma segura (Possan, 2019). O CO₂ armazenado pode ser utilizado em processos industriais ou em formações geológicas. Já a captura de carbono indireta, existem dois processos comuns mais conhecidos: a fotossíntese e a carbonatação de materiais cimentícios. Ambos os processos são naturais e a remoção do dióxido de carbono atmosférico é realizada após sua emissão. De acordo com Possan (2019), no processo de fotossíntese, ao longo do crescimento do vegetal, o CO₂ é absorvido junto à biomassa. Na carbonatação de materiais fabricados à base de cimento e cal, a captura de CO₂ ocorre ao longo da vida útil das edificações e após a sua demolição (Possan, 2019).

Ainda existem divergências nos resultados apresentados dos estudos quanto ao potencial de captura de CO₂, especialmente no período pós-demolição. Até o momento, os estudos indicam que o concreto possui capacidade de capturar entre 10% e 57% do CO₂ emitido na produção do cimento (Possan, 2019).

A partir do estudo de Xi *et al.* (2016), a quantidade cumulativa de CO₂ sequestrado por materiais cimentícios carbonatados entre os anos 1930 e 2013 foi de 4,5 giga toneladas. Esse valor representa uma compensação de 43% das emissões de CO₂ na fabricação do cimento do mesmo período.

De acordo com Yang, Seo e Tae (2014), o sequestro de CO₂ da produção de cimento considerando um ciclo de vida de 100 anos (vida útil de 40 anos e tempo de reciclagem de 60 anos) corresponde em torno de 18% a 21% do CO₂ liberado. Conforme Lee *et al.* (2013), a absorção de CO₂ pelas estruturas de concreto através da carbonatação durante sua utilização não ultrapassa 5% do gás emitido na produção do concreto.

Por outro lado, Pade e Guimarães (2007), estimaram que mais de 50% do CO_2 emitido pela calcinação do calcário pode ser absorvido durante o ciclo de vida de materiais à base de cimento, por meio da carbonatação. Isso se for considerada a reciclagem do concreto após a demolição da estrutura de concreto em conjunto com a sua vida útil. A Figura 3 mostra o ciclo de carbono do cimento/concreto, evidenciando que o CO_2 emitido pela decomposição do calcário é proporcional ao potencial de reabsorção do gás durante a carbonatação.



Fonte: Traduzido de Scrivener; John; Gartner (2018)

Atualmente, existe pouco conhecimento e propagação sobre a captura de CO_2 por meio da carbonatação dos materiais cimentícios, havendo ainda, divergências quanto à sua eficácia.

Uma forma precisa de determinar a quantidade de CO_2 capturada pela carbonatação é por meio de análises termogravimétricas (Possan, 2019), realizada a partir da comparação entre amostra carbonatada e não carbonatada. Esse método considera a perda de massa dos elementos em função da temperatura de ensaio, mediante relações estequiométricas. A diferença entre as perdas de massas dos materiais das amostras carbonatada e não carbonatada, confirma o total de CO_2 sequestrado na reação de carbonatação. Vale ressaltar que ao associar o método da medição da profundidade carbonatada, explicitado anteriormente, com o de análise termogravimétrica (TGA) é possível obter a melhor condição para estudos que visam quantificar a captura de CO_2 de materiais cimentícios (Possan, 2019).

A Tabela 3 apresenta pesquisas recentes que investigaram o potencial de captura de CO₂, considerando diferentes variáveis e materiais utilizados.

Tabela 3 - Pesquisas recentes que investigaram o potencial de captura de CO₂.

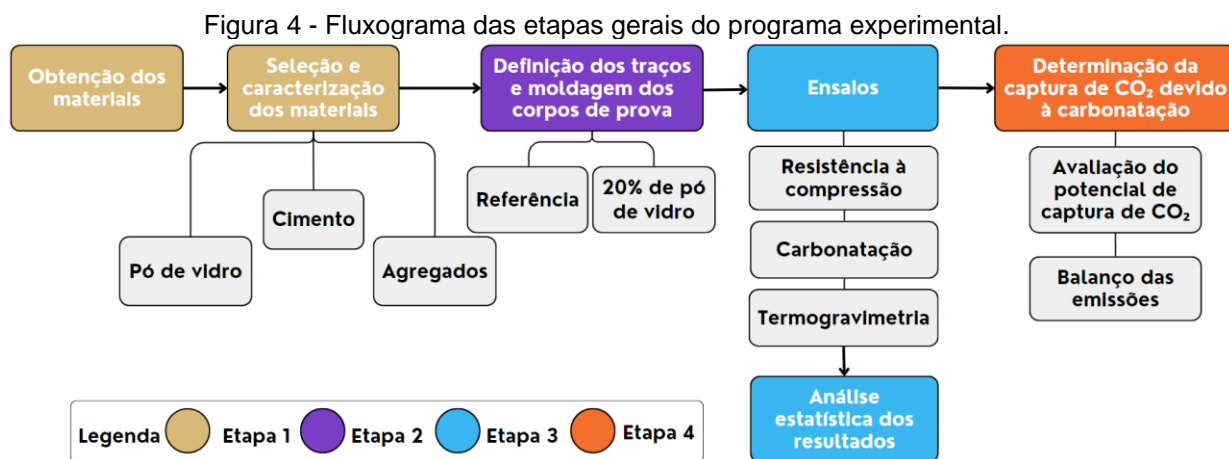
Referência	Material utilizado	Variáveis de estudo	Ensaio realizados	Captura de CO ₂
Rigo (2019)	Concretos produzidos com ou sem RCD	Relação água/cimento e teor de substituição do RCD	Carbonatação acelerada	Varição de 92,90 a 152,88 kg.CO ₂ /m ³
			Análise termogravimétrica	Varição de 12,08 a 130,24 kg.CO ₂ /m ³
Pessutto (2020)	Argamassas cimentícias	Teores de cimento, fíler e porosidade capilar	Carbonatação acelerada e Análise termogravimétrica	Varição de 0,82 a 1 g/g
Sella (2022)	Pastas e argamassas	Diferentes cimentos LC3	Carbonatação acelerada e Análise termogravimétrica	Varição de 100,26 a 141,09 kg.CO ₂ /t
Gomes (2024)	Argamassas mistas	Diferentes tipos de cimento com e sem aditivo	Carbonatação natural e Análise termogravimétrica	Varição de 1,71 a 107,31 kg.CO ₂ /m ³
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	Argamassas de revestimentos	Tempos de aplicação do revestimento variando entre 1 e 3 meses	Carbonatação natural e Análise termogravimétrica	Varição de 96,62 a 100,02 kg.CO ₂ /m ³

Fonte: Autora (2024)

A Tabela 3 revela a necessidade de desenvolvimento de pesquisas, dado a ampla variação da captura do CO₂ observada entre os diferentes materiais analisados.

3 METODOLOGIA

Para cumprir com os objetivos propostos, o programa experimental foi dividido em 4 partes: 1) obtenção dos materiais; seleção e caracterização dos materiais; 2) definição dos traços e moldagem dos corpos de prova; 3) ensaios; 4) determinação da captura de CO₂ devido à carbonatação. Dessa forma, um fluxograma geral das etapas pode ser visto na Figura 4.



Fonte: Autora (2024)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Como mencionado no tópico anterior, a obtenção, seleção e caracterização dos materiais corresponderam à primeira etapa da pesquisa. Assim, os materiais utilizados para produção dos concretos estão listados a seguir:

- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), fabricado pela Holcim do Brasil S/A;
- Pó de vidro resultante de garrafas de cor âmbar, com tamanho de partículas retidas na peneira de malha #200;
- Areia de origem quartzosa;
- Pedrisco de origem basáltica;
- Pó de pedra originado da areia industrial, a partir do processo de britagem da rocha basáltica;
- Água do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos/Sp.

Na Figura 5 é possível visualizar todos os materiais citados acima.

Figura 5 - Materiais utilizados para moldagem dos CPs.



Fonte: Autora (2024)

Vale mencionar que os materiais cimento, areia, pedrisco e pó de pedra foram caracterizados em outras pesquisas e armazenados para que pudessem ser utilizados em trabalhos futuros.

O vidro moído utilizado no estudo, classificado como sodo-cálcico, é proveniente de garrafas de bebidas de pós consumo. As garrafas foram lavadas, após a remoção dos rótulos e cola. Depois, foram expostas ao ar para secagem e então, foram quebradas em cacos em uma betoneira com esferas de aço. A Figura 6 mostra esses procedimentos.

Figura 6 - a) Lavagem e retirada dos rótulos das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço.



Fonte: Freitas (2019)

Em seguida, o vidro foi processado em um moinho de bolas (Figura 7), com revestimento de sílex, rocha sedimentar silicatada, sendo as bolas utilizadas para o processo de moagem do mesmo material (Freitas, 2019).

Figura 7 - Moinho descarregando o pó de vidro.

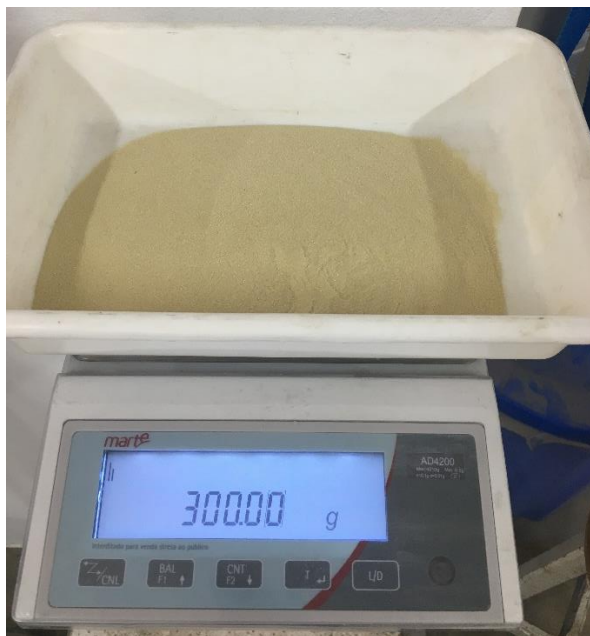


Fonte: Freitas (2019)

Ademais, o pó de vidro utilizado foi obtido pelo Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (GESEC/UFSCar), o qual peneirou, obtendo o vidro finamente moído passante na peneira #200, e armazenou em uma sacola de papel *kraft* protegida por um saco plástico.

Para a obtenção do vidro moído com tamanho de partículas superior a 75 μm , realizou-se um novo peneiramento no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), da Universidade Federal de São Carlos. Como o material estava armazenado e seco, não foi necessário colocá-lo na estufa. A quantidade de vidro moído colocada nas peneiras foi de 300 gramas (Figura 8).

Figura 8 - 300 gramas de vidro moído para realizar o peneiramento.



Fonte: Autora (2023)

A granulometria foi realizada desde as peneiras de malha #40 até as de malha #325. Então, realizou-se o peneiramento mecânico com a ajuda de um agitador de peneiras *Ro-Tap* (Figura 9), o qual foi ligado e o material peneirado por 10 minutos.

Figura 9 - Peneirador mecânico.



Fonte: Autora (2023)

Como ele suportava apenas 7 peneiras por vez, o ensaio de granulometria foi realizado em duas partes, primeiro com as peneiras de malha #40 à #100, depois as de malha #120 à #325. Vale ressaltar que somente o material retido na peneira de malha #200 foi utilizado nos concretos desta pesquisa.

3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O traço referência (REF) foi obtido com base no traço já utilizado pela fábrica Concretize para fabricação de blocos, localizada na cidade de Nova Granada – SP, em que foram fornecidos dados em massa. Já o traço com incorporação de 20% de pó de vidro foi adotado a partir do trabalho realizado por Soares (2021), a qual utilizou a mesma porcentagem do resíduo, mas em concreto de ultra alto desempenho. A composição e a quantidade em gramas de material, considerando a moldagem de 12 CPs para cada traço, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Traços, composição e quantidade em gramas dos materiais confeccionados.

Composição	Traço	
	REF	20% VD
Cimento (g)	280,00	224,00
Pedrisco (g)	1879,98	1879,98
Pó de pedra (g)	2159,36	2159,36
Areia (g)	1753,86	1753,86
Pó de vidro (g)	0,00	56,00
Água (g)	420,00	336,00

Fonte: Autora (2023)

O consumo de cimento para produzir 1 m³ de concreto foi determinado com base na massa específica dos materiais e no traço unitário de cada composição, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo de cimento para produzir 1 m³ de concreto.

Massa específica (g/cm ³)		Fonte	Consumo cimento para 1 m ³ de concreto (kg/m ³)	
Areia	2,60	Pignotti (2024)	REF	20% VD
Pedrisco	2,90		104,94	86,54
Pó de pedra	2,58			
Pó de vidro	2,55	Soares (2021)		
Cimento	3,16			

Fonte: Autora (2024)

Os corpos de provas foram moldados nas dimensões 5 cm x 10 cm e desmoldados logo após a moldagem de todos. Somado a isso, utilizou-se a argamassadeira Metvisa, com cuba em inox e capacidade de 10 litros (Figura 10), para misturar os materiais dos 12 CPs. O material foi misturado por 5 minutos.

Figura 10 - Argamassadeira utilizada para misturar os materiais com capacidade total de 10 litros.



Fonte: Autora (2023)

Além do mais, anotou-se a data e o início da mistura, assim como as características do laboratório no dia da moldagem, como: umidade e temperatura. A Figura 11 mostra o aparelho utilizado para isso.

Figura 11 - Equipamento utilizado para medir umidade e temperatura.



Fonte: Autora (2023)

Para as moldagens do corpo de prova, adaptou-se o equipamento Proctor do Laboratório de Estradas da UFSCar, conforme Figura 12. As adaptações foram feitas devido à altura do CP em questão, ser inferior à altura dos moldes utilizados para compactação do solo.

Figura 12 - Equipamento Proctor utilizado para as moldagens dos CPs.



Fonte: Autora (2023)

Primeiro, foi colocado um objeto cilíndrico (Figura 13) no interior do molde, com intuito de preenchê-lo apenas até a metade.

Figura 13 - Objeto cilíndrico colocado no interior do molde.



Fonte: Autora (2023)

Posteriormente, foi acrescentado um prolongador e um funil (Figura 14), para assegurar que o restante do material não transbordasse do molde. Após a colocação do material, empregou-se 12 golpes na primeira metade, depois escariou o material compactado com uma faca, virou o molde, retirando o objeto cilíndrico, e completou-se a outra metade. Em seguida, aplicou-se mais 12 golpes. Foram necessários 220 gramas para cada metade do molde utilizado.

Figura 14 - a) Prolongador; b) Funil.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2023)

Após o desmolde, os CPs foram colocados em uma caixa com água localizada na câmara seca do LMC, para que ocorresse a cura do concreto, até a idade de ensaio, conforme Figura 15.

Figura 15 - Recipiente utilizado para armazenamento dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2023)

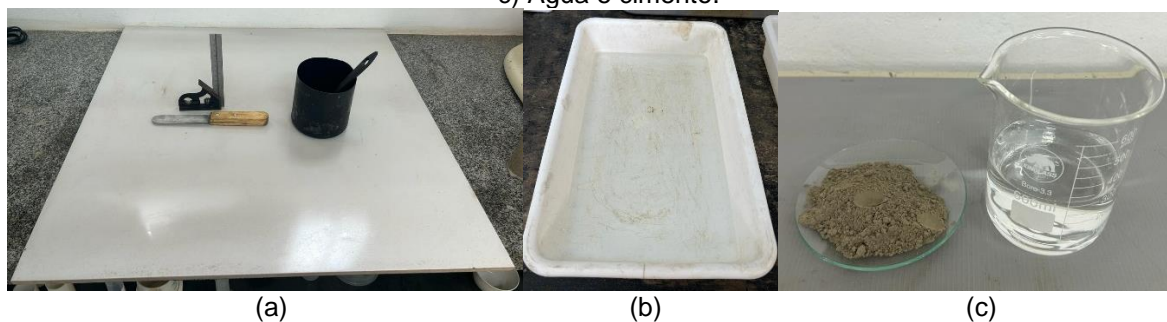
Além disso, foi feito capeamento em todos os corpos de prova, com uma relação água/cimento de 0,45 (500 g de cimento e 225 g de água), a fim de diminuir as irregularidades do topo e da base e garantir que os dois lados estivessem planos para a realização do ensaio de resistência à compressão. Também foi respeitado uma espessura máxima de, aproximadamente, 2 mm nas extremidades dos CPs. Esse processo se baseou na NBR 7215 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019). Os materiais e equipamento utilizados para essa etapa estão citados a seguir:

- Esquadro com nível: utilizado tanto para verificar a ortogonalidade dos corpos de provas após a aplicação da pasta, quanto para verificar se a superfície do corpo de prova que foi realizado o capeamento estava nivelada;
- Piso cerâmico: utilizado como uma superfície plana para a colocação, nivelamento e alinhamento dos CPs com a pasta;

- Espátula: utilizada para misturar a pasta de cimento na cuba e para colocação da pasta no CP;
- Desmoldante: colocado no piso antes da inserção do CP com a pasta para facilitar a remoção dela do piso cerâmico;
- Recipiente com água: utilizado para colocar os CPs antes de iniciar o capeamento, com intuito do CP não absorver água da pasta, eliminando o aparecimento de possíveis fissuras durante sua secagem;
- Água do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos/Sp;
- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), fabricado pela Holcim do Brasil S/A;
- Balança de precisão de até 2 casas decimais com capacidade de 5000 gramas: utilizada para pesar as quantidades necessárias de cada material;
- Argamassadeira planetária da Solotest, com cuba em inox e capacidade de 5 litros: utilizada para realizar o procedimento de mistura dos materiais.

A partir da Figura 16 é possível ver todos os materiais utilizados.

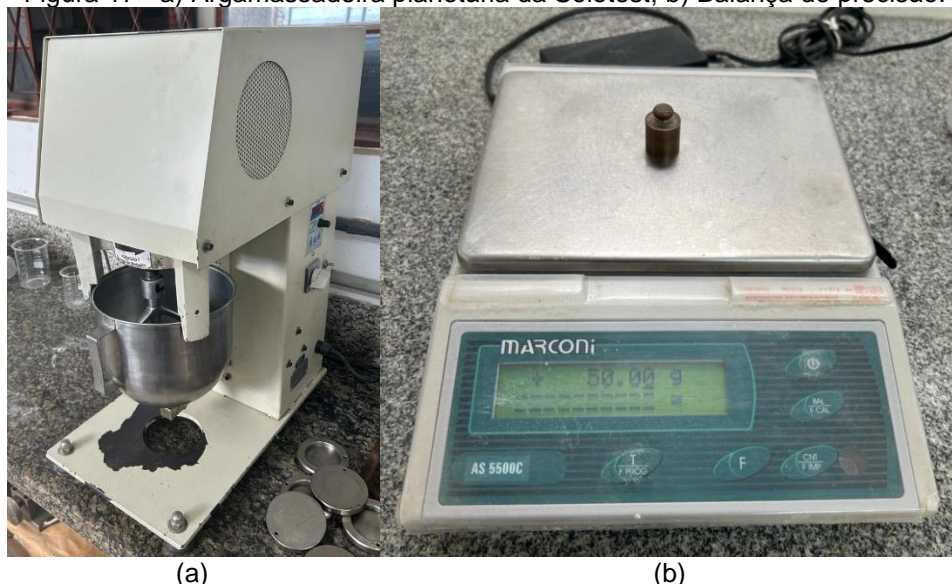
Figura 16 - a) Esquadro com nível, piso cerâmico, espátula e desmoldante; b) Recipiente com água; c) Água e cimento.



Fonte: Autora (2023)

Já a Figura 17 mostra a argamassadeira e a balança de precisão, com um peso padrão de 50 gramas para confirmar sua leitura.

Figura 17 - a) Argamassadeira planetária da Solotest; b) Balança de precisão.



Fonte: Autora (2023)

Para o procedimento da mistura, as seguintes etapas foram realizadas:

- Colocou-se a água na cuba, depois adicionou-se o cimento e em seguida a cuba foi colocada no misturador. Esse procedimento foi realizado em até 30 segundos.
- Posteriormente, o misturador foi ligado e o material permaneceu nele por 30 segundos na velocidade baixa.
- Na sequência, desligou-se o equipamento. Nos primeiros 30 segundos, retirou-se toda a pasta que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba, com o auxílio de uma espátula. Durante o tempo restante (60 segundos), a pasta ficou em repouso na cuba.
- Após esse intervalo, ligou-se novamente a argamassadeira, na velocidade alta, e o material ficou misturando por mais 60 segundos.

Os CPs capeados e identificados podem ser visualizados na Figura 18. Menciona-se que em laranja é o traço 20% VD e em amarelo o REF.

Figura 18 - CPs capeados e identificados.



Fonte: Autora (2023)

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

Na Tabela 6 estão contidos os ensaios realizados nesta pesquisa com seu respectivo traço, assim como as normativas e a quantidade de corpos de prova referente as idades a serem ensaiadas.

Tabela 6 - Ensaio realizados na pesquisa.

Traço	Ensaio	Metodologia	Corpos de prova		Idades (dias)
			Quantidade	Total	
REF	Resistencia à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	3 por idade	12	7, 14, 28 e 91
	Carbonatação	RILEM (1998)	2 por idade	8	
	Termogravimetria	ASTM E2550 (ASTM, 2021)	1 por idade	4	
20% VD	Resistencia à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	3 por idade	12	7, 14, 28 e 91
	Carbonatação	RILEM (1998)	2 por idade	8	
	Termogravimetria	ASTM E2550 (ASTM, 2021)	1 por idade	4	

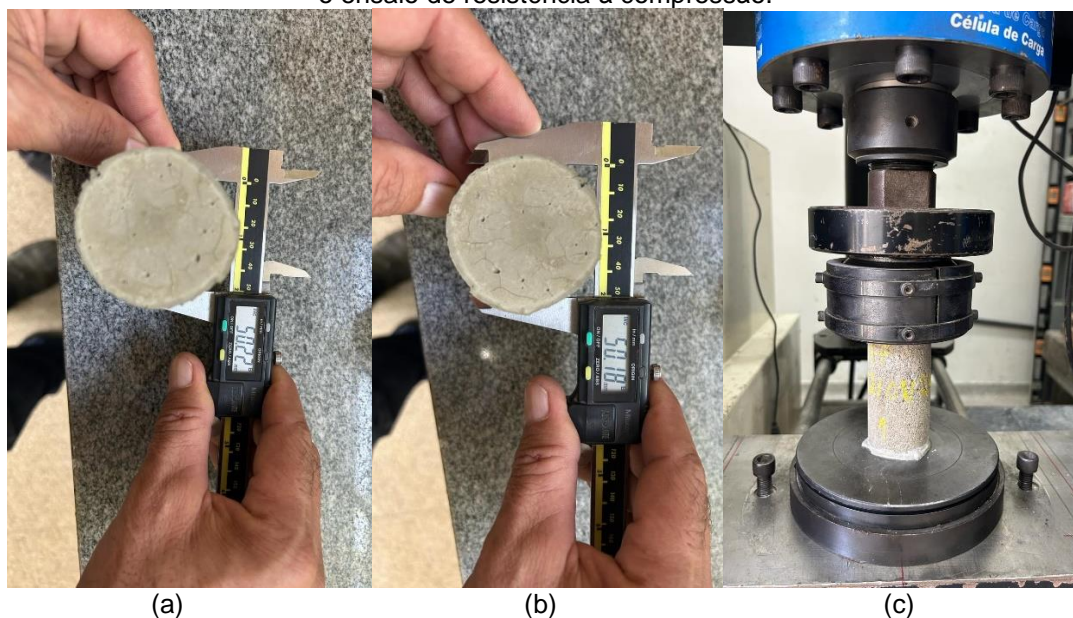
Fonte: Autora (2023)

3.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão baseou-se na NBR 7215 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) e foi realizado nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias. Antes das rupturas, os corpos de prova foram capeados, como descrito anteriormente, com intuito de garantir uma distribuição uniforme do esforço durante a aplicação da carga. Além disso, também foi anotado o diâmetro, em que se realizou 2 leituras, sendo a primeira próxima a face inferior do CP e a segunda próxima a face superior dele, após o emprego de um giro de 90°. Assim, obteve-se a média dos diâmetros. Para realização do ensaio, a máquina solicita esse parâmetro

como dado de entrada. As amostras foram rompidas na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN, no Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar. A Figura 19 ilustra o procedimento.

Figura 19 - a) Primeira leitura do diâmetro no CP; b) Segunda leitura do diâmetro no CP; c) CP após o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2023)

3.3.2 Determinação da profundidade de carbonatação

A carbonatação dos concretos foi estudada no modo natural, uma vez que a porosidade dos corpos de prova deste estudo é alta, facilitando o processo de carbonatação do material cimentício. Então, para ser possível analisar a frente de carbonatação, sem que os CPs carbonatassem totalmente, armazenou-se as amostras na câmara seca, no LMC, durante 7 dias. Após esse período, os corpos de prova foram retirados da câmara e levados para uma bancada, em condições normais de laboratório, até a idade de ensaio (Figura 20).

Figura 20 - CPs expostos a condições ambiente de laboratório.



Fonte: Autora (2023)

A medição da profundidade de carbonatação foi realizada com o auxílio de um paquímetro. Para isso, quebrou-se inicialmente um CP, com ajuda de um martelo e uma ponteira, a fim de verificar a frente de carbonatação da amostra, após a aspersão de solução de fenolftaleína a 1% na superfície fraturada. O segundo CP foi quebrado apenas se o primeiro tivesse uma frente de carbonatação maior que 1 cm, suficiente para a extração do pó com finalidade de, posteriormente, realizar o ensaio de termogravimetria, o qual será descrito no tópico a seguir.

Vale mencionar que foram realizadas 12 leituras em toda a circunferência do CP, sendo o resultado final a média desses valores.

A Figura 21 evidencia as etapas do ensaio de carbonatação.

Figura 21 - a) CP sendo quebrado; b) Leitura da frente de carbonatação após aspersão de fenolftaleína.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2023)

3.3.3 Termogravimetria (TG)

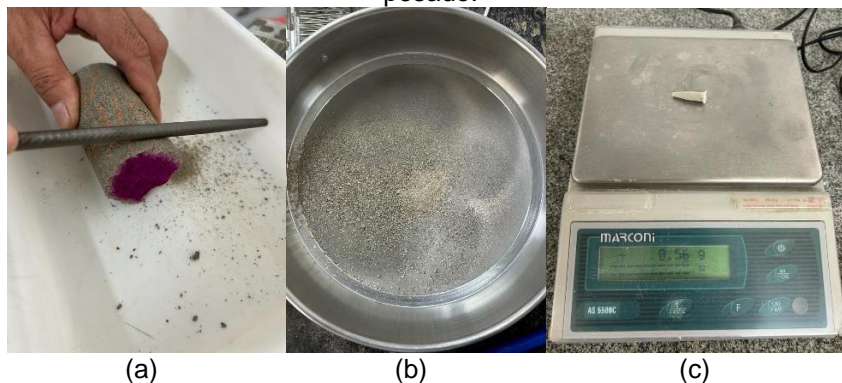
O ensaio de termogravimetria (TG) foi realizado com o intuito de quantificar o carbonato de cálcio (calcita) das amostras expostas às condições ambientes do LMC, por meio do percentual de perda de massa *versus* temperatura. Conforme Soares (2021), a variação de massa acontece devido às reações químicas ou alterações físicas do material (sublimação, evaporação ou sorção). Assim, os resultados de variação de massa e temperatura são expressos por uma curva (TG). A derivada dessa curva TG em relação à temperatura gera a curva DTG. A partir dela é possível quantificar a decomposição térmica de compostos voláteis como a água e o dióxido de carbono. Também são obtidas informações sobre estabilidade térmica, composições iniciais e qualquer formação de produto intermediário (Silva, 2006).

As medidas de análise termogravimétrica foram realizadas no equipamento TGA Q500 da TA Instruments, com temperatura de 30°C a 950°C em atmosfera de nitrogênio, usando uma taxa de aquecimento de 10°C/min e um fluxo de 100ml/min. As análises foram realizadas no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. Ressalta-se que a escolha da atmosfera é de extrema importância, visto que pode ocorrer interação entre a amostra e os gases presentes nela ou com os gases liberados na decomposição térmica de fases da própria amostra.

Para tal, extraiu-se aproximadamente 0,56 gramas de pó do corpo de prova, com auxílio de uma lima, de zonas carbonatadas e não carbonatadas, a fim de comparar os resultados dos gráficos TG/DTG para cada amostra analisada. O pó obtido foi passado na peneira de malha #200.

A partir da Figura 22 é possível visualizar as etapas para extração do pó das amostras carbonatadas.

Figura 22 - a) Remoção do giz utilizado para identificar o CP e extração do pó com auxílio de uma lima; b) Passagem do pó extraído na peneira de malha #200; c) Cadinho com o pó extraído sendo pesado.



Fonte: Autora (2024)

Já na Figura 23 nota-se a o procedimento realizado para extração do pó das amostras não carbonatadas.

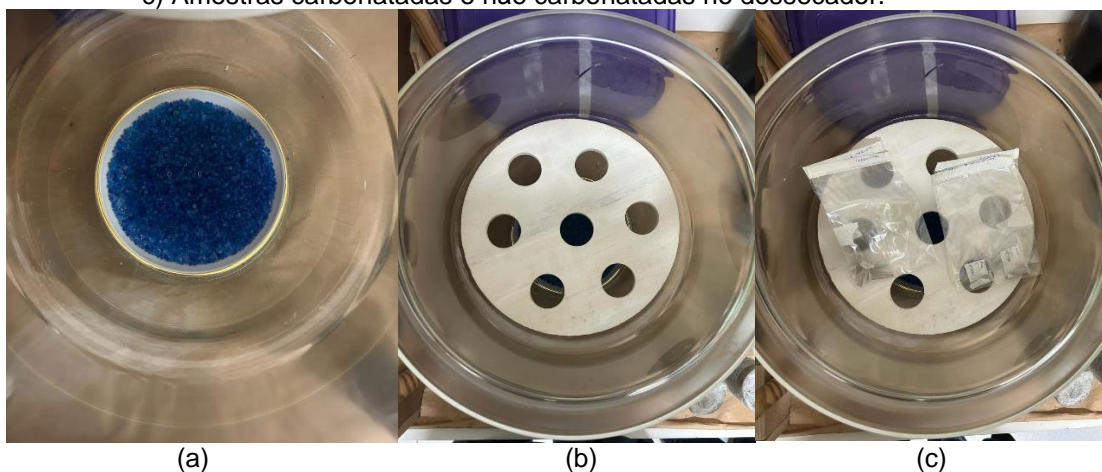
Figura 23 - a) CP sendo lixado com auxílio de uma esmerilhadeira; b) Verificação da área não carbonatada a ser extraído o pó; c) Quebra da amostra não carbonatada; d) Trituração da amostra com auxílio de um almofariz; e) Passagem do material na peneira de malha #200; f) Armazenamento do pó em um cadinho.



Fonte: Autora (2024)

Na sequência, as amostras foram armazenadas em um dessecador contendo sílica gel para que as características delas, como a umidade, fossem mantidas até serem devidamente ensaiadas. Os cadinhos com as amostras carbonatadas e não carbonatadas no dessecador estão representados na Figura 24.

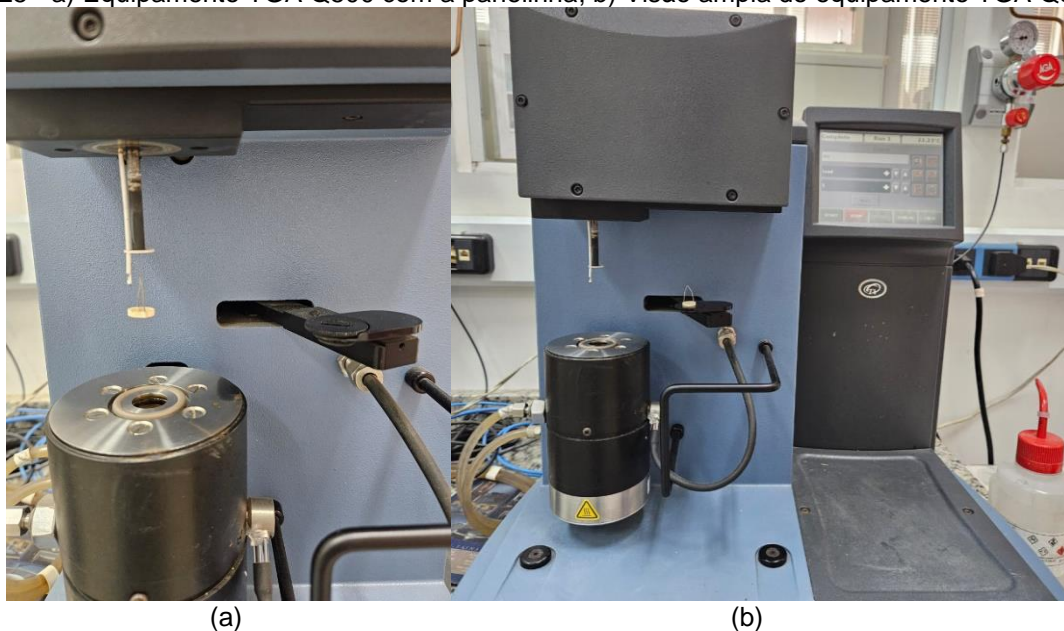
Figura 24 - a) Sílica gel no dessecador; b) Dessecador utilizado para armazenamento das amostras; c) Amostras carbonatadas e não carbonatadas no dessecador.



Fonte: Autora (2024)

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada com base nas diretrizes gerais da ASTM E2550 (American Society for Testing and Materials, 2021). Ademais, os ensaios foram realizados para os traços REF e 20% VD aos 14 dias de idade. O equipamento TGA Q500 da TA Instruments utilizado pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 - a) Equipamento TGA Q500 com a panelinha; b) Visão ampla do equipamento TGA Q500.



Fonte: Autora (2024)

3.4 DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

Para determinar as emissões de CO₂ na atmosfera, é necessário calcular as emissões provenientes de cada material presente nos concretos. Neste estudo, foram consideradas somente as emissões do cimento.

3.4.1 Emissões da indústria do cimento

O processo de produção do cimento libera CO₂ principalmente durante o processo 3, como ilustrado na Figura 1. Nesse estágio, ocorre o aquecimento dos fornos e o consumo de matérias-primas para a produção do clínquer, além do gasto de energia elétrica na produção. Nesse sentido, a partir da Equação 2, pode-se determinar as emissões totais oriundas da produção do cimento, desconsiderando emissões referentes à água.

$$E_{cim} = (E_{clínquer} * \%clínquer_{cim}) + (E_{energia} * FE_{energia}) \text{ Equação 2}$$

Onde,

E_{cim} (kg. $\frac{CO_2}{ton}$) = Emissão total da indústria do cimento;

$E_{clínquer}$ (kg. $\frac{CO_2}{ton}$) = Emissão oriunda da produção de clínquer;

$\%clínquer_{cim}$ = Porcentagem de clínquer do cimento analisado;

$E_{energia}$ ($\frac{kWh}{ton}$) = Emissão oriunda da energia elétrica gasta no processo;

$FE_{energia}$ (kg. $\frac{CO_2}{kWh}$) = Fator de emissão da energia elétrica.

Os dados que serão utilizados para compor a Equação 2, bem como suas respectivas fontes, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados obtidos para aplicar na Equação 2.

Variáveis	Valores	Unidade	Fonte
$E_{clínquer}$	832	kg.CO ₂ /ton	GNR 2.0 (GCCA, 2019)
$\%clínquer_{cim}$	85-95 ¹	%	NBR 16697 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018)
$E_{energia}$	108	kWh/ton	GNR 2.0 (GCCA, 2019)
$FE_{energia}$	0,08	kg.CO ₂ /kwh	MCTI (Brasil, 2021)

¹Desconsiderando o teor de sulfatos, estimado em 5% para o cimento CP V ARI e os percentuais máximos de filler carbonático que pode ser adicionado a este tipo de cimento no Brasil. Além disso, será considerado o valor médio (90%) da NBR 16697 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).

Portanto, a emissão total de CO₂ do concreto, considerando somente a contribuição da indústria do cimento, pode ser obtida pela Equação 3.

$$E_{con} \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{ton}} \right) = (E_{cim} * Q_{cim}) \text{ Equação 3}$$

Onde,

$E_{con} \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{ton}} \right)$ = Emissão total do concreto;

$E_{cim} \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{ton}} \right)$ = Emissão oriunda da indústria do cimento (757,44);

$Q_{cim} (ton)$ = Consumo de cimento para produzir 1 m³ de concreto (REF 104,94 kg/m³ e 20% VD 86,54 kg/m³).

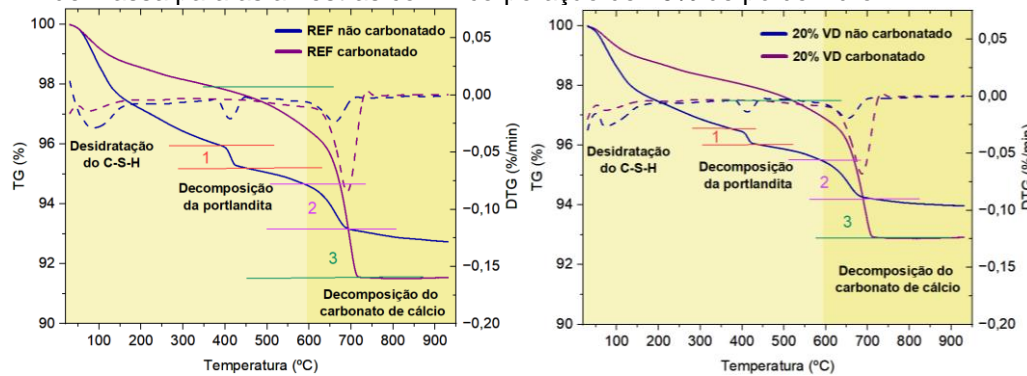
3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO₂ ABSORVIDA DEVIDO À CARBONATAÇÃO POR ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A captura de CO₂ será determinada por meio de análise termogravimétrica. Esta metodologia visa determinar a captura de CO₂ decorrente da decomposição de fases carbonáticas, ou seja, da descarbonatação do carbonato de cálcio (calcita). Para isso, será quantificada a perda de massa resultante da decomposição da calcita para, posteriormente, determinar por meio de estequiometria, a quantidade de CO₂ absorvido.

Desse modo, a análise termogravimétrica será realizada da seguinte forma:

- a) Identificação da temperatura e da perda de massa associadas à decomposição do carbonato de cálcio (a descarbonatação ocorre tipicamente entre 600°C e 800°C);
- b) Obtenção dos picos da perda de massa na curva TG do ensaio de termogravimetria (Figura 26), para as amostras carbonatadas e não carbonatadas dos traços REF e 20% VD. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 14.

Figura 26 - a) Intervalos de perda de massa para as amostras do traço REF; b) Intervalos de perda de massa para as amostras com incorporação de 20% de pó de vidro.



Nota:

¹Intervalo da perda de massa da portlandita (%);

²Intervalo da perda de massa do carbonato de cálcio da amostra não carbonatada (%);

³ Intervalo da perda de massa do carbonato de cálcio da amostra carbonatada (%).

Fonte: Autora (2024)

c) A partir dos percentuais de massa obtidos na análise termogravimétrica (TG), foram calculadas a captura de CO₂ na amostra (captura real) e a captura potencial, conforme as Equações 4 a 8.

$$Cap_{CO_2} \text{ da amostra (\%)} = [(TG_{1AC} - TG_{2AC}) - (TG_{1NC} - TG_{2NC})] * 0,44 \text{ Equação 4}$$

$$CaO_{eq.CaCO_3} (\%) = Cap_{CO_2} \text{ da amostra (\%)} * \left(\frac{MM_{CaO}}{MM_{CO_2}}\right) \text{ Equação 5}$$

$$CaO_{livre} (\%) = CaO_{eq.CaCO_3} (\%) - CaO_{FRX} \text{ Equação 6}$$

$$Pot. cap_{CO_2} (\%) = CaO_{livre} (\%) * \left(\frac{MM_{CO_2}}{MM_{CaO}}\right) \text{ Equação 7}$$

$$Pot. cap_{CO_2} \left(kg. \frac{CO_2}{m^3}\right) = \frac{Pot. cap_{CO_2} (\%)}{100} * Massa \text{ carbonatável}_{concreto} \left(\frac{kg}{m^3}\right) \text{ Equação 8}$$

Onde,

$Cap_{CO_2} \text{ da amostra (\%)}$ = Porcentagem de massa retida oriunda da análise de TG da amostra;

MM_{CaO} = Massa molar do CaO (56 g/mol);

MM_{CO_2} = Massa molar do CO₂ (44 g/mol);

CaO_{FRX} = Quantidade de óxido de cálcio presente no cimento Portland CP V ARI;

$Massa\ carbonatável_{concreto} \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \text{Teor de massa carbonatável no concreto.}$

A Tabela 8 evidencia os valores que serão utilizados para calcular as Equações 6 e 8.

Tabela 8 - Dados obtidos para aplicar nas Equações 8 e 10.

Variáveis	Valores	Unidade	Fonte
CaO_{ERX}	61,4	%	Soares (2021)
$Massa\ carbonatável_{concreto}$ REF	104,94	kg/m ³	Autora (2024)
$Massa\ carbonatável_{concreto}$ 20% VD	86,54	kg/m ³	Autora (2024)

Fonte: Autora (2024)

3.6 BALANÇO DAS EMISSÕES

A determinação do balanço das emissões envolve a quantidade de CO₂ emitida e a quantidade de CO₂ absorvida pelo concreto ao longo do tempo, desconsiderando a água. Conforme já mencionado, para esse cálculo, será considerada exclusivamente a emissão de CO₂ proveniente da produção do cimento CP V ARI utilizado no concreto. Esse balanço, pode ser obtido por meio da Equação 9, que expressa o percentual de CO₂ capturado em relação ao CO₂ emitido durante o processo de produção.

$$Cap_{CO_2}(\%) = \left(\frac{Pot.cap_{CO_2}}{E_{con}}\right) * 100 \text{ Equação 9}$$

Onde,

$Cap_{CO_2}(\%) = \text{Valor de captura de CO}_2 \text{ relativo;}$

$Pot. cap_{CO_2} \left(kg \cdot \frac{CO_2}{m^3}\right) = \text{Potencial de captura de CO}_2;$

$E_{con} \left(kg \cdot \frac{CO_2}{m^3}\right) = \text{Emissões provenientes dos concretos.}$

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para analisar os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA), metodologia que visa comparar três ou mais tratamentos. Os dados que apresentaram diferença significativa foram submetidos ao teste de *Tukey*, em que é feita a comparação das médias.

Nesse contexto, por meio do método da ANOVA é possível realizar um teste estatístico para verificar se há diferença na distribuição de um valor entre três ou mais grupos. Ele é feito mediante decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo. Assim, por meio do teste F de *Fisher-Snedecor*, testa-se a hipótese de que não há fonte de variação entre as amostras.

As hipóteses são as seguintes:

H_0 – não existe diferença estatisticamente significativa;

H_1 – há, pelo menos, um valor estaticamente diferente.

Compara-se também o valor-p com o α . Para este estudo, o α adotado foi de 5%.

- Se $\text{valor-p} \geq \alpha$, aceita-se H_0 (não existem diferenças estatísticas significativas);
- Se $\text{valor-p} < \alpha$, rejeita-se H_0 (há diferenças estatísticas significativas).

Para os casos em que H_0 foi rejeitado, realizou-se o teste de *Tukey* utilizando o *software* gratuito de análises estatísticas Past®. Os resultados completos das análises estatísticas estão dispostos no Apêndice B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados nos tópicos seguintes os resultados obtidos deste estudo, acompanhados de uma breve discussão.

4.1 GRANULOMETRIA DO PÓ DE VIDRO

O ensaio de granulometria foi realizado como descrito no item 3.1. Na Tabela 9 está exposta a distribuição granulométrica do pó de vidro, em que foi utilizada uma massa inicial de 300 gramas.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do pó de vidro.

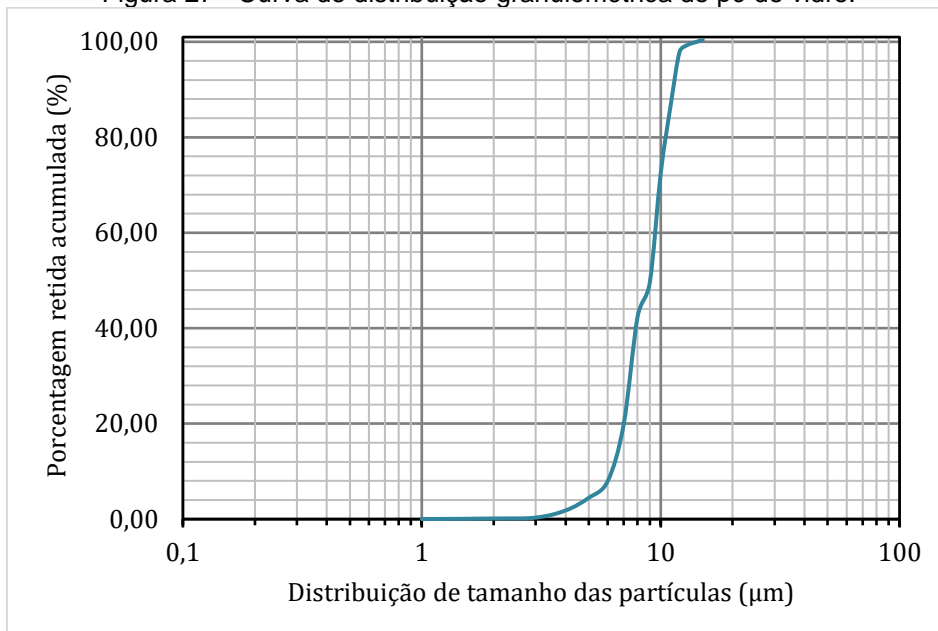
Abertura das peneiras (μm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
425	0,00	0,00	0,00
355	0,39	0,13	0,13
300	0,56	0,19	0,32
250	4,47	1,49	1,81
212	7,93	2,64	4,45
180	10,45	3,48	7,93
150	35,74	11,91	19,85
125	67,56	22,52	42,37
106	21,44	7,15	49,51
90	68,69	22,90	72,41
75	42,43	14,14	86,55
63	34,07	11,36	97,91
53	4,36	1,45	99,36
45	1,70	0,57	99,93
Fundo	1,49	0,50	100,43
Total	301,28	100,43	682,96

Fonte: Autora (2024)

Segundo a NBR 17054 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), para agregados, o somatório de todas as massas não deve exceder 0,3%. Conforme observado na Tabela 9, houve um acúmulo de material nas peneiras, ultrapassando o limite estabelecido pela norma. No entanto, considerando que este estudo foca em um material aglomerante, avaliou-se que essa divergência não interferirá nos objetivos deste trabalho.

A curva granulométrica do pó de vidro pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 - Curva de distribuição granulométrica do pó de vidro.



Fonte: Autora (2024)

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

Nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 podem ser visualizadas as resistências à compressão dos concretos com 7, 14, 28 e 91 dias, respectivamente. A análise estatística para a resistência à compressão das quatro idades ensaiadas está apresentada no Apêndice B.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.

Traços	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Diferença significativa em relação ao REF
	MPa	MPa	%	
REF	4,92	0,65	13,26	
20% VD	4,70	0,53	11,37	NÃO

Fonte: Autora (2024)

Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 14 dias.

Traços	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Diferença significativa em relação ao REF
	MPa	MPa	%	
REF	6,06	0,25	4,18	
20% VD	5,04	0,39	7,84	SIM

Fonte: Autora (2024)

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Traços	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Diferença significativa em relação ao REF
	MPa	MPa	%	
REF	5,07	0,69	13,59	
20% VD	4,60	0,19	4,10	NÃO

Fonte: Autora (2024)

Tabela 13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias.

Traços	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Diferença significativa em relação ao REF
	MPa	MPa	%	
REF	4,96	0,41	8,23	
20% VD	4,81	0,34	7,08	NÃO

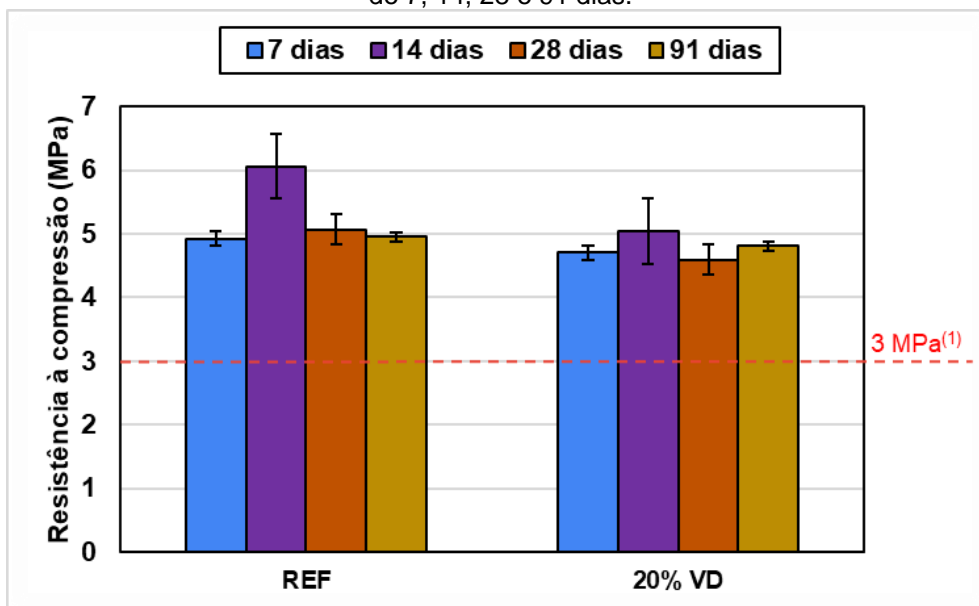
Fonte: Autora (2024)

Observa-se que aos 14 dias foi obtida a maior resistência à compressão em relação às demais idades. Entretanto, o traço 20% VD apresentou diferença estatística significativa em relação ao REF. Ainda assim, quando realizada a análise estatística entre as idades para os dois traços (REF e 20% VD), não houve diferença significativa para nenhuma situação, conforme as Tabelas B.16 e B.19 do Apêndice B. Nesse sentido, comparando os concretos REF e 20% VD entre todas as idades analisadas, sugere-se que a utilização de ambos os concretos não apresenta divergência em relação às suas características.

Para as idades 7, 28 e 91 dias, todas as amostras demonstraram ser estatisticamente equivalentes, indicando que não há diferença na escolha entre os traços do ponto de vista estatístico.

Conforme a NBR 6136 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016), a resistência característica à compressão na idade de 28 dias para blocos da classe C (com ou sem função estrutural), deve ser maior ou igual que 3 MPa. Tal requisito foi atendido para todas as idades e traços estudados, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Comparação dos resultados de resistência à compressão dos concretos entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.



Nota:

(¹) Requisito mínimo para resistência à compressão obtida aos 28 dias da NBR 6136 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

Fonte: Autora (2024)

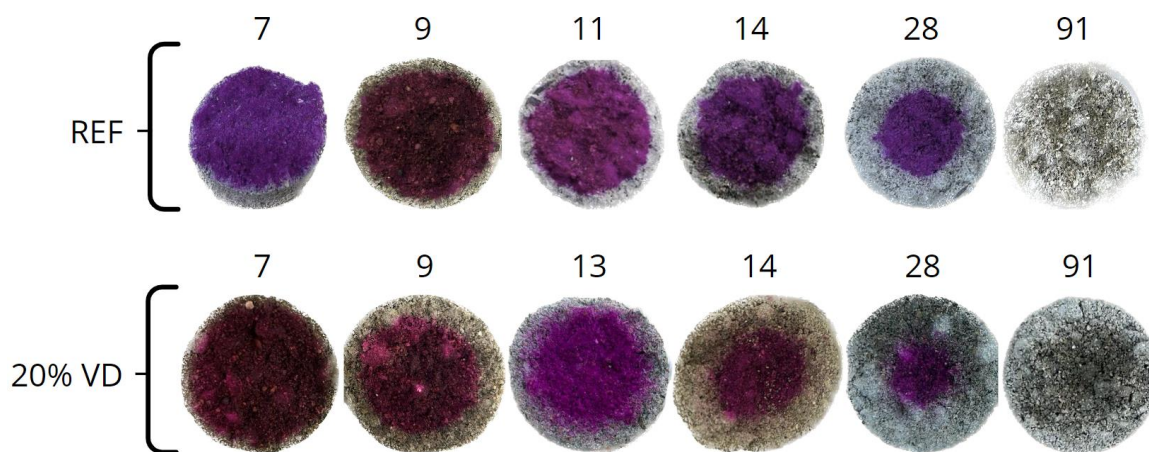
Para as idades 7, 14, 28 e 91 dias, nota-se que a resistência para o traço com incorporação de vidro (20% VD) apresentou reduções de 4,47%, 16,79%, 9,31% e 2,91%, respectivamente, em relação ao REF, obtendo os valores de 4,70 MPa, 5,04 MPa, 4,60 MPa e 4,81 MPa, na mesma sequência.

Ressalta-se que o traço 20% VD apresentou um desempenho equivalente a 156,77%, 168,00%, 153,20% e 160,43% em relação ao requisito mínimo 3 MPa da NBR 6136 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016), para as idades de 7, 14, 28 e 91 dias, respectivamente.

4.3 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A profundidade de carbonatação foi determinada conforme descrito no item 3.3.2. A partir da Figura 29, é possível notar a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo, após aspersão de fenolftaleína nas faces dos CPs.

Figura 29 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em dias.

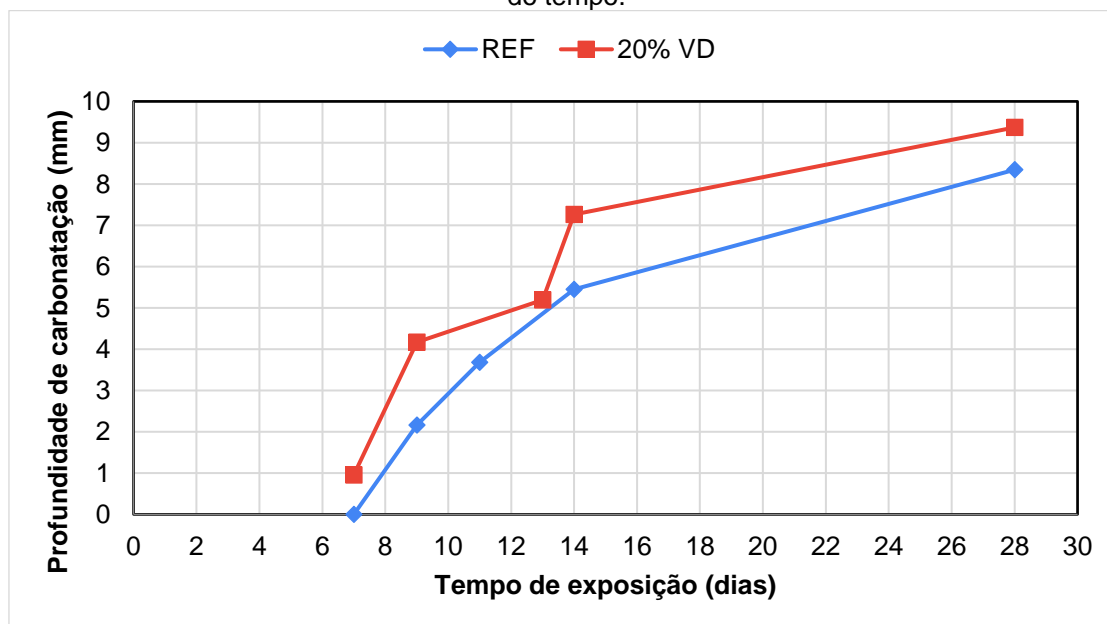


Fonte: Autora (2024)

Vale mencionar que a leitura no traço 20% VD foi realizada aos 13 dias, e não aos 11 dias como no traço REF, visando analisar as frentes de carbonatação em dias úteis.

A partir da Figura 30 é possível visualizar a média das profundidades de carbonatação dos concretos estudados ao longo do tempo. Na Tabela A.1 do Apêndice A, constam as leituras obtidas com seu respectivo traço.

Figura 30 - Média das profundidades de carbonatação dos concretos analisados medidas ao longo do tempo.



Fonte: Autora (2024)

Observa-se que os concretos com substituição de 20% de cimento por pó de vidro apresentaram maiores profundidades de carbonatação que o traço referência

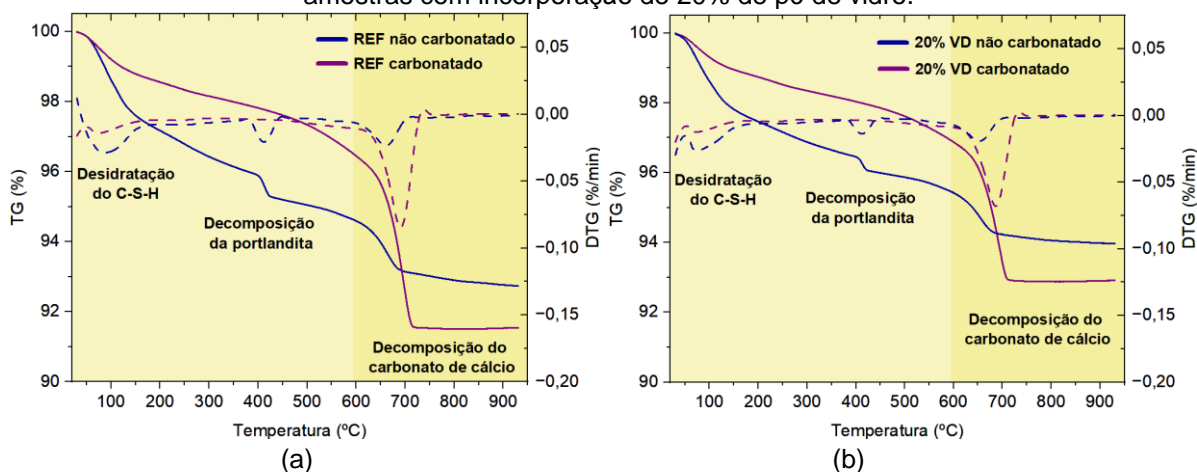
após 11 dias (REF) e 13 dias (20% VD) de exposição. Portanto, a maior profundidade de carbonatação atingida foi de 9,37 mm aos 28 dias de exposição, para o traço com pó de vidro. Somado a isso, a velocidade de carbonatação também foi maior, já que a partir dos 7 dias de exposição já foi possível medir a profundidade carbonatada para o CP com pó de vidro. Isso pode ser atribuído ao fato de que o pó de vidro possui propriedades pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio (portlandita) produzido durante a hidratação do cimento para formar produtos de hidratação adicionais, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação consome portlandita, um dos compostos que contribui para a resistência à carbonatação, e reduz a quantidade de Ca(OH)_2 livre na matriz do concreto. Essa redução pode levar a uma diminuição do pH, tornando o concreto mais suscetível à carbonatação. Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento do teor de pó de vidro, que é consistente com a tendência observada no concreto para vários materiais pozolânicos e, provavelmente, devido à redução de portlandita.

Aos 91 dias de exposição, nota-se que ambos os traços ficaram totalmente carbonatados.

4.4 TERMOGRAVIMETRIA

Os ensaios de termogravimetria foram realizados conforme procedimento descrito no item 3.3.3. As análises termogravimétricas foram efetuadas em quatro amostras no total, na condição carbonatada e não carbonatada, para o traço referência e com incorporação de 20% de pó de vidro. Ademais, todos os concretos foram analisados com o auxílio do programa OriginPro 2024b. Os resultados podem ser visualizados na Figura 31 em forma de TG (termogravimetria) e DTG (derivada da TG), em que é possível visualizar os eventos ocorridos em várias faixas de temperatura. A curva da DTG permite uma visualização mais clara dos degraus correspondentes às variações de massa da curva TG, substituindo-os por picos. Esses picos representam áreas proporcionais às variações de massa, destacando logo, as inflexões da curva TG.

Figura 31 - a) Curvas de TG e DTG para as amostras do traço REF; b) Curvas de TG e DTG para as amostras com incorporação de 20% de pó de vidro.



Fonte: Autora (2024)

A partir da Figura 31, nas curvas DTG das amostras não carbonatadas dos dois traços analisados, observam-se três eventos principais de perda de massa. O primeiro ocorre entre 30°C e 100°C e corresponde à liberação de água livre e parte da água adsorvida pelos compostos hidratados, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Segundo Nobre *et al.* (2023), as reações relacionadas à desidratação do C-S-H são observadas até temperaturas próximas de 600°C, indicando uma perda contínua de massa, sem um pico definido, característico da presença de fases não cristalinas. Nesse contexto, a maior perda de massa na região inicial dos gráficos acontece na amostra sem pó de vidro. Em compósitos cimentícios com adições reativas, como o pó de vidro, é esperado que haja uma maior quantidade de C-S-H em comparação à amostra de referência. Vale mencionar que as reações do pó de vidro ocorrem mais tardiamente em relação às reações do cimento.

O segundo evento ocorre na faixa de temperatura entre 400°C e 500°C, evidenciando um processo térmico característico da desidratação da portlandita (hidróxido de cálcio). Somado a isso, percebe-se uma redução da quantidade de hidróxido de cálcio no traço com pó de vidro em relação ao de referência, o que pode ser atribuído ao consumo pela carbonatação.

Por fim, o terceiro evento pode ser verificado no intervalo entre 600°C e 800°C, correspondente à decomposição de fases carbonáticas, isto é, da descarbonatação do carbonato de cálcio (calcita). Dessa forma, quantificou-se a perda de massa da decomposição da calcita para determinar, posteriormente, a quantidade de CO₂ absorvido. A perda de massa da calcita foi de 1,53% e 6,37%

para as amostras REF não carbonatado e REF carbonatado, respectivamente. Já para as amostras 20% VD não carbonatado e 20% VD carbonatado, a perda de massa foi de 1,31% e 4,62%, respectivamente.

Diferente das amostras não carbonatadas, nas amostras carbonatadas de ambos os traços não ocorre a desidratação da portlandita, uma vez que ela reage com o CO₂ para formar a calcita, que é o produto da carbonatação. Desse modo, a perda de massa da portlandita foi de 0,75% e 0,57% para as amostras REF não carbonatado e 20% VD não carbonatado, respectivamente.

Nota-se ainda uma diferença na perda de massa referente a decomposição do carbonato de cálcio, sendo menor para o traço com substituição de 20% de cimento por pó de vidro. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de cimento Portland no traço referência.

4.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CO₂ ABSORVIDA DEVIDO À CARBONATAÇÃO POR ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os resultados obtidos para a captura de CO₂ devido à carbonatação foi obtido por análise termogravimétrica, conforme item 3.5. Os valores obtidos da perda de massa do hidróxido de cálcio (item 4.4) foram aplicados na Equação 4, resultando na determinação dos valores de potencial de captura de CO₂ a partir da Equação 8. Portanto, o potencial de CO₂ absorvido para os traços REF e 20% VD foi de 48,39 kg.CO₂/m³ e 40,49 kg.CO₂/m³, respectivamente. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos da análise termogravimétrica e a obtenção do potencial de captura de CO₂ aplicando as Equações 4 a 8.

Tabela 14 - Resultados da análise termogravimétrica e obtenção do potencial de captura de CO₂.

Dados da Análise Termogravimétrica						
Traço	Amostra Carbonatada			Amostra Não Carbonatada		
	TG 1 AC (%)	TG 2 AC (%)	CaCO ₃ (%)	TG 1 NC (%)	TG 2 NC (%)	CaCO ₃ (%)
REF	97,89	91,52	6,37	94,69	93,16	1,53
20% VD	97,52	92,90	4,62	95,49	94,18	1,31
Captura potencial de CO₂						
Traço	Intervalo analisado da Figura 26	CO ₂ capturado (%)	CaO eq. CaCO ₃ (%)	CaO livre (%)	Captura potencial em relação ao CaO livre (%)	Captura potencial (kg.CO ₂ /m ³)
REF	2 e 3	2,13	2,71	58,69	46,11	48,39
20% VD	2 e 3	1,46	1,85	59,55	46,79	40,49

Fonte: Autora (2024)

Conforme observado na tabela, o traço REF apresentou o maior potencial de captura de CO₂. No entanto, embora o potencial do traço 20% VD seja inferior, o ensaio de carbonatação indica que a frente de carbonatação avança mais rapidamente nesse traço com incorporação de vidro. Isso sugere que, apesar do potencial inicial ser menor, o traço 20% VD pode alcançar um aumento mais rápido no potencial de captura em comparação ao traço REF. Outra explicação possível é o maior consumo de cimento na mistura de referência, que pode ter influenciado o resultado final.

De acordo com a literatura, o potencial de captura de CO₂ varia de 1,71 kg.CO₂/m³ a 141,09 kg.CO₂/m³ (Rigo, 2019; Sella, 2022; Gomes, 2024; Oliveira *et al.*, 2024). Os resultados obtidos na Tabela 14 estão em conformidade com esses dados, evidenciando mais um estudo relevante para a literatura sobre o tema.

4.6 BALANÇO DAS EMISSÕES

Para realizar o balanço das emissões, é necessário contabilizar as emissões totais para cada tipo de concreto confeccionado. Neste caso, considerou-se somente a emissão do cimento. Os valores obtidos para as emissões do cimento, assim como para o balanço das emissões, de acordo com os passos descritos no item 3.6, estão presentes na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do balanço das emissões.

Traço	Emissão do concreto (kg.CO ₂ /m ³) ¹	Captura de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)	Balanço das emissões (%)
		TG/DTG	TG/DTG
REF	79,49	48,39	60,88
20% VD	65,55	40,49	61,77

Nota:

¹Considerou-se somente a emissão do cimento.

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados mais recentes da literatura, o balanço das emissões de CO₂ em concretos e argamassas varia entre 1% e 61% (Pade, Guimarães, 2007; Lee *et al.*, 2013; Xi *et al.*, 2016; Rigo, 2019; Gomes, 2024). Os resultados obtidos na Tabela 15 estão dentro desse intervalo. Isso representa uma contribuição para os

estudos sobre a captura de CO₂, dado que o tema é recente e ainda há uma escassez de bases bibliográficas.

Além disso, o maior balanço das emissões observado no traço 20% VD pode ser atribuído ao maior consumo de cimento na mistura de referência, que influenciou o resultado final.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, procurou-se quantificar a captura de CO₂ de concretos com incorporação de 20% de pó de vidro em substituição parcial ao cimento.

Mediante análises realizadas e resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho, destaca-se:

- Aos 14 dias, a resistência à compressão atingiu seu valor máximo em comparação com as demais idades estudadas. Embora o traço com 20% VD tenha mostrado uma diferença estatisticamente significativa em relação ao traço de referência (REF), a análise estatística entre as idades para ambos os traços (REF e 20% VD) não revelou diferenças significativas em nenhuma situação, conforme demonstrado nas Tabelas B.16 e B.19 do Apêndice B. Dessa forma, ao comparar os concretos REF e 20% VD em todas as idades avaliadas, pode-se verificar que a utilização de ambos os concretos apresenta características semelhantes, sem diferenças significativas.
- Nas idades de 7, 28 e 91 dias, todas as amostras se mostraram estatisticamente equivalentes em relação à resistência à compressão, indicando que, do ponto de vista estatístico, não há diferença significativa na escolha entre os traços.
- Os traços, com e sem incorporação de pó de vidro, alcançaram resistência à compressão superior a 3 MPa em todas as idades e traços analisados, atendendo ao requisito estabelecido pela NBR 6136 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016). A Figura 28 apresenta esses resultados.
- Em relação aos valores obtidos para a profundidade de carbonatação, concretos com substituição de 20% de cimento por pó de vidro

apresentaram maiores profundidades de carbonatação em comparação ao traço referência (REF) após 11 dias (REF) e 13 dias (20% VD) de exposição.

- A maior profundidade de carbonatação atingida foi de 9,37 mm aos 28 dias de exposição no traço com pó de vidro. Além disso, a velocidade de carbonatação foi maior nesses concretos, com a profundidade carbonatada sendo medida já a partir dos 7 dias de exposição. Isso confirma a tendência de aumento da profundidade de carbonatação com o incremento de pó de vidro, um comportamento comum em concretos com materiais pozolânicos.
- Aos 91 dias de exposição, ambos os traços (REF e 20% VD) apresentaram-se totalmente carbonatados.
- O traço REF apresentou o maior potencial de captura de CO_2 , com 48,39 $\text{kg.CO}_2/\text{m}^3$. Em contrapartida, o traço 20% VD, com potencial de 40,49 $\text{kg.CO}_2/\text{m}^3$, avança mais rapidamente na frente de carbonatação. Isso sugere que, apesar do potencial inicial inferior, o traço 20% VD pode aumentar mais rapidamente sua capacidade de captura. Essa diferença também pode ser atribuída ao maior consumo de cimento na mistura de referência.
- O balanço das emissões variou de 60,88% para o traço REF e 61,77% para o traço 20% VD, com valores compatíveis com os encontrados em outros estudos na literatura. Ademais, o maior balanço de emissões observado no traço 20% VD pode ser atribuído ao maior consumo de cimento na mistura de referência, o que impactou o resultado final.

Com base nas considerações mencionadas, os resultados obtidos indicam que a carbonatação em concretos com 20% de pó de vidro em substituição parcial ao cimento é uma alternativa eficaz para mitigar a emissão de gases que contribuem para o aquecimento global. Somado a isso, os concretos analisados demonstraram porcentagens significativas de captura de CO_2 , absorvendo até 61,77% de suas emissões.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Realizar ensaios em corpos de prova selecionados aleatoriamente e a partir de misturas diferentes, considerando que o tempo de moldagem é variável e pode influenciar os resultados obtidos;
- Calcular e avaliar as emissões totais de concretos, levando em conta a emissão de todos os materiais presentes na mistura, especialmente o pó de vidro, assim como seu potencial de captura de CO₂ e o balanço de emissões, visto que a disponibilidade de estudos sobre esse material ainda é limitada na literatura;
- Determinar a quantidade de CO₂ absorvida em concretos devido à carbonatação acelerada.

REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO. **Vidro: O resíduo infinitamente reciclável**. 2019. Disponível em: <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/> Acesso em 10 abr. 2024.
- ABIVIDRO. **Benefícios da reciclagem do vidro**. 2023. Disponível em: <https://abividro.org.br/beneficios-da-reciclagem-do-vidro/> Acesso em 30 nov. 2023.
- ABIVIDRO. **Porque o vidro é a melhor opção para reciclar!**. Sd. Disponível em: https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2021/08/E-book_Porque-o-vidro-e-a-melhor-opcao-para-reciclar-1.pdf Acesso em 30 nov. 2023.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ABRAVIDRO. **Panorama Abravidros Edição 2023 – O mercado vidreiro em números**. 2023. Disponível em: <https://abravidro.org.br/mercado/panorama-abravidro/> Acesso em 30 nov. 2023.
- ABRAVIDRO. **Circula Vidro é criada para impulsionar a reciclagem de embalagens**. 2024. Disponível em: <https://abravidro.org.br/punoticias/circula-vidro-e-criada-para-impulsionar-reciclagem-de-embalagens/> Acesso em 27 ago. 2024.
- ALY, M. *et al.* Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. **Materials & Design**, v. 33, p. 127-135. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.008> Acesso em 27 nov. 2023.
- ANDRADE, J. J. O. *et al.* Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817322985> Acesso em 28 nov. 2023.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken, PA, 2021.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Área de concentração Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-31012017-163751/publico/LaerteMeloBarrosDOcorrigida.pdf> Acesso em 03 jan. 2024.

BORGES, A. L. **Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14441/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Alexandre.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em 03 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **4ª Comunicação Nacional do Brasil a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília, 2021. 620 p. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes-mcti/quarta-comunicacao-55-nacional-do-brasil-a-unfccc/sumario_executivo_4cn_brasil_web.pdf. Acesso em 22 ago. 2024.

BRASIL. Ministérios das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs> Acesso em 12 fev. 2023.

BRASIL. Decreto-lei nº 11300, de 21 de dezembro de. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 dez. 2022b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11300.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.300%2C%20DE%202021,reversa%20de%20embalagens%20de%20vidro. Acesso em 27 ago. 2024.

CARACITAS, R. L. **Otimização da composição do cimento rumo à neutralidade carbônica**. 2022. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2022. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/104665/1/Otimiza%C3%A7%C3%A3o%20da%20composi%C3%A7%C3%A3o%20do%20cimento%20rumo%20%C3%A0%20neutralidade%20carb%C3%B3nica_Raquel_V2.pdf Acesso em 27 nov. 2023.

CARSANA, M. et al. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 45. p. 39-45. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005> Acesso em 30 nov. 2024.

CARVALHO, E. L. B. de. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento no concreto verde**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia

do Piauí, Teresina, 2019. Disponível em:
http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/bitstream/123456789/1302/2/2019_TCC_elbcarvalho.pdf Acesso em 03 jan. 2024.

CHEN, C. H. et al. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, 3. ed., p. 449-456. 2006. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.010> Acesso em 30 nov. 2023.

COSTA, J. M. **Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em:
<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/57306/3/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20-%20VERS%c3%83O%204.1%20-%20revisada%20reposit%c3%b3rio%20ufmg.pdf> Acesso em 29 nov. 2023.

DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22-29, 2017. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010> Acesso em 28 jun. 2024.

DUCHESNE, J. Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures: a review on characterization and properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 1219-1236. 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01068-4> Acesso em 28 nov. 2023.

FEDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, 8. ed., p. 606-610. 2009. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001> Acesso em 30 nov. 2023.

FERREIRA, A. P. *et al.* Estudo Experimental da Resistência de Blocos de Concreto com Vidro Moído como Agregado Miúdo. *In*: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 10., 2018, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: ABPE, 2018. p. 1-10. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/209.pdf> Acesso em 27 nov. 2023.

FREITAS, T. O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12137> Acesso em 03 jan. 2024.

GCCA - GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Global Cement and Concrete Industry Announces Roadmap to Achieve Groundbreaking ‘Net zero’ CO₂ Emissions by 2050**. Londres, 2021. Disponível em:
<https://gccassociation.org/news/global-cement-and-concrete-industry-announces-roadmap-to-achieve-groundbreaking-net-zero-co2-emissions-by-2050/> Acesso em 27 nov. 2023.

GCCA - GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **GNR 2.0: GCCA in Numbers**. 2019. Disponível em: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/> Acesso em 22 ago. 2024.

GOMES, L. J. **Sequestro de CO₂ devido à carbonatação de argamassas com diferentes tipos de cimento por meio de análise termogravimétrica**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024.

GUIGNONE, G. C. et al. Desempenho do concreto com incorporação de resíduos do processo de lapidação e polimento de vidro em substituição parcial ao cimento. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 613-627. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952020000300011> Acesso em 03 jan. 2024.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2010. cap. 29, p. 905 – 944. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf> Acesso em 27 nov. 2023.

HIGUCHI, A. M. D. **Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/15M3twPU7s9NDRaizfiP9A2z-hjININ4V/view> Acesso em 03 jan. 2024.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adições de sílica ativa**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) - Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LEE, S. et al. Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 93-102. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.034> Acesso em 30 nov. 2023.

LUDWIG, H. M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 24-37. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884615001556> Acesso em 27 nov. 2023.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205-215, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027> Acesso em 27 jun. 2024.

MARTIOLI, L. C. **Estudo Comparativo do Efeito da Substituição Parcial do Cimento Portland por Vidro Moído**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharel em Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33079/1/substituicaoocimentovidromoi.do.pdf> Acesso em 03 jan. 2024.

MOREIRA, B. A. S. **Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, 2022. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/85022/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o_BrunaMoreira_83078.pdf Acesso em 03 jan. 2024.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

NOBRE, T. R. S. *et al.* Reativação térmica de finos de resíduos cimentícios. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 64., 2023, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRACON, 2023. p. 1-11. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Nobre/publication/373040159_Reativacao_termica_de_finos_de_residuos_cimenticios/links/65fa96a6a8baf573a1c5fae5/Reativacao-termica-de-finos-de-residuos-cimenticios.pdf Acesso em 27 jun. 2024.

OLIVEIRA, D. R. B. *et al.* Avaliação da captura de carbono em argamassas de revestimento durante a fase construtiva: Um estudo de caso. *In*: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5., 2024, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: CLBMCS, 2024. p. 1-12.

OMRAN, A.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of glass-powder concrete in field applications. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 84-95, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006> Acesso em 28 abr. 2024.

PADE, C.; GUIMARÃES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, 9. ed., p.1348-1356. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009> Acesso em 30 nov. 2023.

PAN, Z. *et al.* High temperature performance of mortars containing fine glass powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 16-26, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.003> Acesso em 28 jun. 2024.

PANZERA, T. H. *et al.* Investigação do Efeito da Adição de Resíduos Vítreos nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios. **Cerâmica Industrial**, v. 12, 5. ed., p. 44-47. 2007. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657327f8c9d6e028b4729/pdf/ci-12-5-587657327f8c9d6e028b4729.pdf> Acesso em 30 nov. 2023.

PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, Gainesville, v. 121, p. 1-18. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013> Acesso em 30 nov. 2023.

- PAULETTI, C. **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5157> Acesso em 30 nov. 2023.
- PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Dissertação (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/30120> Acesso em 27 nov. 2023.
- PESSUTTO, D. L. P. **Captura de CO₂ em Produtos cimentícios – O efeito do teor de fíler**. 2020. Dissertação (Mestrado em ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- PIGNOTTI, G. B. **Dosagem de concretos para blocos com incorporação de RCD**. 2024. Relatório final de Iniciação Científica – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.
- PILLAI, R. G.; GETTU, R.; SANTHANAM, M. Uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) en sistemas de concreto armado - Beneficios y limitaciones. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 2, p. 147-164. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477> Acesso em 30 nov. 2023.
- PONTES, K. H. M. **Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes?**. 2023. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Universidade do Minho, Braga, 2023. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/85024/1/Disserta%
a7%c3%a3o_KlaussPontes_PG42612.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/85024/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o_KlaussPontes_PG42612.pdf) Acesso em 03 jan. 2024.
- POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. **Concreto e Construções**, São Paulo, 95. ed., p. 60-66, jul. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Edna-Possan/publication/343178071_Captura_de_CO2_em_materiais_cimenticios_CO2_uptake_in_cementitious_materials/links/6000af3592851c13fe0f2040/Captura-de-CO2-em-materiais-cimenticios-CO2-uptake-in-cementitious-materials.pdf Acesso em 27 nov. 2023.
- RIGO, E. **Avaliação do Potencial de Captura de CO₂ de Concretos com Resíduos de Construção e Demolição devido á Carbonatação**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu/PR, 2019.
- RILEM. CPC 18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth. **TC56 - MHM Hydrocarbon Materials**, 1998. ISSN 0025-5432/88.
- SALVADOR FILHO, J. A. A. *et al.* Influência da utilização do pó de vidro em substituição ao cimento Portland na resistência à compressão de matrizes cimentícias de ultra alta resistência. *In: Congresso Brasileiro de Concreto*, 59., 2017,

Bento Gonçalves. **Anais** [...] Bento Gonçalves: Ibracon, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Americo-Salvador-Filho-2/publication/320908894_Influencia_da_utilizacao_do_po_de_vidro_em_substituicao_ao_cimento_Portland_na_resistencia_a_compressao_de_matrizes_cimenticias_de_ultra_alta_resistencia/links/63a46169097c7832ca590286/Influencia-da-utilizacao-do-po-de-vidro-em-substituicao-ao-cimento-Portland-na-resistencia-a-compressao-de-matrizes-cimenticias-de-ultra-alta-resistencia.pdf Acesso em 03 jan. 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015> Acesso em 30 nov. 2023.

SELLA, D. C. N. **Capacidade de captura de CO₂ em matrizes à base de cimentos LC3 por meio da carbonatação acelerada**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/6624/Capacidade%20de%20Captura%20de%20CO2%20em%20Matrizes%20%C3%A0%20Base%20de%20Cimentos%20LC%C2%B3%20por%20meio%20da%20Carbonata%C3%A7%C3%A3o%20Acelerada?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 30 nov. 2023.

SHARIFI, Y. et al. Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 337-353. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0141-z> Acesso em 30 nov. 2023.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, Vermont South, v. 36, 3. ed., 457-468. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012> Acesso em 30 nov. 2023.

SHI, C. et al. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, 5. ed., p. 987-993. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015> Acesso em 30 nov. 2023.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, 2. ed., p. 234-247. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013> Acesso em 30 nov. 2023.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Área de Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia,

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14126> Acesso em 04 jan. 2024.

SOARES, S. M. et al. Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com a incorporação de diversos teores de pó de vidro. *In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES*, 4., 2019, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba: Editora Cubo, 2019. p. 136-146. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2526-7248.036> Acesso em 03 jan. 2024.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder - Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600-612, 2016.

XI, F. et al. Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 880-883. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo2840> Acesso em 30 nov. 2023.

YANG, K.; SEO, E.; TAE, S. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43-52. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.004> Acesso em 30 nov. 2023.

APÊNDICE A

No Apêndice A são apresentados dados referentes às leituras da profundidade de carbonatação, assim como informações adicionais das moldagens dos concretos analisados.

A.1 LEITURAS DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A partir da Tabela A.1 é possível visualizar os valores obtidos das leituras da profundidade de carbonatação, ao longo do tempo, dos concretos estudados.

Tabela A.1 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo.

Traço	Tempo (dias)	Profundidade (mm)
REF	7	0
	9	2,16
	11	3,68
	14	5,45
	28	8,35
	91	Carbonatou totalmente
20% VD	7	0,96
	9	4,17
	13	5,19
	14	7,27
	28	9,37
	91	Carbonatou totalmente

Fonte: Autora (2024)

A.2 MOLDAGENS E LEITURAS

Na Tabela A.2 constam as anotações sobre as moldagens dos corpos de prova, sendo: data, horário do início da mistura, umidade e temperatura. Nela também é possível observar a idade, data e o período em que as leituras foram realizadas nos CPs.

Tabela A.2 - Anotações sobre as moldagens e leituras dos concretos estudados.

Traço	CP	Idade dias	Moldagem			Leitura		
			Data	Início da mistura horas	Umidade %	Temperatura °C	Data	Período
REF	1	7	22/01/2024	12:23	48	28	29/01/2024	Manhã
	2							
	3							
	4	14	22/01/2024	12:23	48	28	05/02/2024	
	5							
	6							
	7	28	22/01/2024	12:23	48	28	19/02/2024	
	8							
	9							
	10	91	22/01/2024	12:23	48	28	22/04/2024	
	11							
	12							
20% VD	1	7	23/01/2024	17:46	52	25	30/01/2024	Tarde
	2							
	3							
	4	14	23/01/2024	17:46	52	25	06/02/2024	
	5							
	6							
	7	28	23/01/2024	17:46	52	25	20/02/2024	
	8							
	9							
	10	91	23/01/2024	17:46	52	25	23/04/2024	
	11							
	12							

Fonte: Autora (2024)

APÊNDICE B

No Apêndice B são apresentados dados adicionais dos ensaios, incluindo valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade e informações sobre as moldagens. Além disso, são fornecidos dados estatísticos descritivos das análises, assim como a descrição dos resultados da ANOVA e do teste de *Tukey* para a resistência à compressão dos concretos nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

B.1 ANÁLISE AOS 7 DIAS

Na Tabela B.1 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 dias de idade.

Tabela B.1 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.

Nº CP	REF (Mpa)	20% VD (Mpa)
CP 1	4,27	4,10
CP 2	4,93	5,13
CP 3	5,57	4,88

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.2 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 dias de idade.

Tabela B.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (Mpa)	Média (Mpa)	Variância (MPa ²)
REF	3	14,77	4,92	0,42
20% VD	3	14,11	4,70	0,29

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos com idade de 7 dias, como mostra a Tabela B.3.

Tabela B.3 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,07	1	0,07	0,20	0,67	7,71
Dentro dos grupos	1,42	4	0,36			
Total	1,49	5				

Conclusão: Aceita-se H_0 Nota: Não foi necessário realizar o teste de *Tukey*, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA dos dados de 7 dias da resistência à compressão levaram à seguinte conclusão: que se deve aceitar H_0 , ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação às médias das populações.

B.2 ANÁLISE AOS 14 DIAS

Na Tabela B.4 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 14 dias de idade.

Tabela B.4 - Resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.

Nº CP	REF (Mpa)	20% VD (Mpa)
CP 4	5,83	5,37
CP 5	6,33	4,60
CP 6	6,01	5,15

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.5 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 14 dias de idade.

Tabela B.5 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (Mpa)	Média (Mpa)	Variância (MPa ²)
REF	3	18,17	6,06	0,06
20% VD	3	15,12	5,04	0,16

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos com idade de 14 dias, como mostra a Tabela B.6.

Tabela B.6 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,55	1	1,55	14,00	0,02	7,71
Dentro dos grupos	0,44	4	0,11			
Total	1,99	5				

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA levaram à seguinte conclusão: que se deve rejeitar H_0 , ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para isso, foi realizado o teste de *Tukey*, a fim de avaliar os valores estatisticamente divergentes, conforme a Tabela B.7.

Tabela B.7 - Teste de *Tukey* da resistência à compressão dos concretos aos 14 dias de idade.

Amostras	REF	20% VD
REF		SIM

Fonte: Autora (2024)

B.3 ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela B.8 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 28 dias de idade.

Tabela B.8 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.

Nº CP	REF (Mpa)	20% VD (Mpa)
CP 7	4,79	4,75
CP 8	4,56	4,65
CP 9	5,85	4,39

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.9 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 28 dias de idade.

Tabela B.9 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (Mpa)	Média (Mpa)	Variância (MPa ²)
REF	3	15,20	5,07	0,47
20% VD	3	13,79	4,60	0,03

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos com idade de 28 dias, como mostra a Tabela B.10.

Tabela B.10 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,33	1	0,33	1,30	0,32	7,71
Dentro dos grupos	1,02	4	0,25			
Total	1,35	5				

Nota: Não foi necessário realizar o teste de *Tukey*, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA dos dados de 28 dias da resistência à compressão levaram à seguinte conclusão: que se deve aceitar H_0 , ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação às médias das populações.

B.4 ANÁLISE AOS 91 DIAS

Na Tabela B.11 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 91 dias de idade.

Tabela B.11 - Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.

Nº CP	REF (Mpa)	20% VD (Mpa)
CP 10	4,63	4,86
CP 11	5,41	5,13
CP 12	4,82	4,45

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.12 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos estudados aos 91 dias de idade.

Tabela B.12 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (Mpa)	Média (Mpa)	Variância (MPa ²)
REF	3	14,86	4,95	0,17
20% VD	3	14,44	4,81	0,12

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos com idade de 91 dias, como mostra a Tabela B.13.

Tabela B.13 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,03	1	0,03	0,21	0,67	7,71
Dentro dos grupos	0,57	4	0,14			
Total	0,59	5		Conclusão: Aceita-se H ₀		

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA dos dados de 91 dias da resistência à compressão levaram à seguinte conclusão: que se deve aceitar H₀, ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação às médias das populações.

B.5 ANÁLISE DO CONCRETO REF ENTRE AS IDADES

Na Tabela B.14 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos REF entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade.

Tabela B.14 - Resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Nº CP	7 dias (MPa)	14 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)	91 dias (Mpa)
CP 1	4,27	5,83	4,79	4,63
CP 2	4,93	6,33	4,56	5,41
CP 3	5,57	6,01	5,85	4,82

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.15 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos REF estudados entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade.

Tabela B.15 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
7 dias	3	14,77	4,92	0,42
14 dias	3	18,17	6,06	0,06
28 dias	3	15,2	5,07	0,47
91 dias	3	14,86	4,95	0,17

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos REF entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade, como mostra a Tabela B.16.

Tabela B.16 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,64	3	0,88	3,12	0,09	4,07
Dentro dos grupos	2,25	8	0,28			
Total	4,89	11		Conclusão: Aceita-se H ₀		

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA dos dados REF entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias da resistência à compressão levaram à seguinte conclusão: que se deve aceitar H₀, ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação às médias das populações.

B.6 ANÁLISE DO CONCRETO 20% VD ENTRE AS IDADES

Na Tabela B.17 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão dos concretos com incorporação de 20% de pó de vidro (20% VD) entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade.

Tabela B.17 - Resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Nº CP	7 dias (MPa)	14 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)	91 dias (Mpa)
CP 1	4,27	5,83	4,79	4,63
CP 2	4,93	6,33	4,56	5,41
CP 3	5,57	6,01	5,85	4,82

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela B.18 podem ser visualizados os valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos 20% VD estudados entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade.

Tabela B.18 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
7 dias	3	14,11	4,70	0,29
14 dias	3	15,12	5,04	0,16
28 dias	3	13,79	4,60	0,03
91 dias	3	14,44	4,81	0,12

Fonte: Autora (2024)

Com base nos dados estatísticos descritivos, realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão dos concretos 20% VD entre 7, 14, 28 e 91 dias de idade, como mostra a Tabela B.19.

Tabela B.19 - ANOVA da resistência à compressão dos concretos 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,64	3	0,88	3,12	0,09	4,07
Dentro dos grupos	2,25	8	0,28			
Total	4,89	11				

Fonte: Autora (2024)

Desse modo, os resultados da ANOVA dos dados 20% VD entre as idades de 7, 14, 28 e 91 dias da resistência à compressão levaram à seguinte conclusão: que se deve aceitar H_0 , ao nível de significância (p) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação às médias das populações.

B.7 MOLDAGENS E RUPTURA

Na Tabela B.20 constam as anotações sobre as moldagens dos corpos de prova, sendo: data, horário do início da mistura, umidade e temperatura. Nela também é possível observar a idade, data e o período em que o ensaio de resistência à compressão foi realizado.

Tabela B.20 - Anotações sobre as moldagens e ruptura dos concretos estudados.

Traço	CP	Idade dias	Moldagem			Ruptura		
			Data	Início da mistura horas	Umidade %	Temperatura °C	Data	Período
REF	1	7	22/01/2024	11:04	48	28	29/01/2024	Manhã
	2							
	3							
	4	14	22/01/2024	11:04	48	28	05/02/2024	
	5							
	6							
	7	28	22/01/2024	11:04	48	28	19/02/2024	
	8							
	9							
	10	91	22/01/2024	11:04	48	28	22/04/2024	
	11							
	12							
20% VD	1	7	23/01/2024	16:23	48	27	30/01/2024	Tarde
	2							
	3							
	4	14	23/01/2024	16:23	48	27	06/02/2024	
	5							
	6							
	7	28	23/01/2024	16:23	48	27	20/02/2024	
	8							
	9							
	10	91	23/01/2024	16:23	48	27	23/04/2024	
	11							
	12							

Fonte: Autora (2024)