CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE COMBA GOMES

SEQUESTRO DE CO_2 POR AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E SUA APLICAÇÃO EM ARGAMASSAS

BELO HORIZONTE

2024

HENRIQUE COMBA GOMES

SEQUESTRO DE CO_2 POR AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E SUA APLICAÇÃO EM ARGAMASSAS

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.ª. Drª Flávia Spitale Jacques Poggiali

Coorientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte

Fevereiro de 2024

Gomes, Henrique Comba

G633s Sequestro de CO_2 por agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e sua aplicação em argamassas / Henrique Comba Gomes. – 2024.
96 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Orientadora: Flávia Spitale Jacques Poggiali.
Coorientador: Conrado de Souza Rodrigues.
Bibliografia: f. 71-86.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

Detritos de construção e demolição – Teses. 2. Sequestro de carbono – Teses. 3. Compensação de carbono – Teses. 4. Comércio de emissões – Teses. % Sustentabilidade – Teses. I. Poggiali, Flávia Spitale Jacques. II. Rodrigues, Conrado de Souza. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624.1891

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE COMBA GOMES

SEQUESTRO DE CO_2 POR AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E SUA APLICAÇÃO EM ARGAMASSAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

gov.br

Prof.ª. Drª. Flávia Spitale Jacques Poggiali – Orientadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues – Coorientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Assinado por: João Paulo de Castro Gomes
Num. de Identificação: 07695244
Data:2024.02.16 18:01:18 +0000

Prof. Dr. João Paulo Castro Gomes – Membro externo
Universidade Beira Interior (UBI)

gov.br
Documento assinado digitalmente
AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA
Data: 20/02/2024 07:01:18-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra – Membro interno
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

DEDICATÓRIA

A meus pais, Fábio e Alessandra, irmãos Filipe e Daniel, pelo amor, cuidado e apoio.

A Jesus Cristo, pela salvação, cuidado e pelo dom da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Flávia Spitale Jacques Poggiali e Conrado de Souza Rodrigues pela orientação, amizade e oportunidade de desenvolver um trabalho científico do nível de mestrado.

Ao professor Augusto César da Silva Bezerra pela amizade e por toda a ajuda no decorrer da pesquisa. Sem sua ajuda seria impossível a realização desse trabalho.

As professoras Mag Geisielly Alves Guimarães, Denise de Carvalho Urashima e Carlos Alberto de Carvalho Castro pela influência durante a graduação que me fizeram ingressar na pós-graduação.

Aos discentes membros do PPGEC do CEFET-MG pelas disciplinas ministradas e ajuda no desenvolvimento do trabalho. Aos técnicos dos laboratórios pela amizade e ajuda na realização dos ensaios.

Aos amigos da pós-graduação do CEFET-MG e do grupo de pesquisa MIS pela amizade, parceria e toda a ajuda na realização dos ensaios, sem a qual seria impossível realizar esse trabalho.

Ao CEFET-MG pela disponibilização das instalações para os ensaios e pela oportunidade da graduação. A CAPES e FAPEMIG pelo apoio econômico.

Ao grupo ECOVIA/LIMPAVIA pela britagem dos blocos intertravados e disponibilização materiais reciclados utilizados nessa pesquisa.

Aos amigos pelas parcerias, alegrias, orações e apoio.

Aos meus irmãos na fé pelas orações, carinho, apoio e alegrias.

Aos meus queridos tios André, Alexandre, Érica e Monica, e meu bisavô Antonio pelo apoio, carinho e amizade.

A minha querida avó, Terezinha, pelo apoio, carinho, amizade e pela leitura e revisão do manuscrito.

A minha namorada Catarina por todo apoio e carinho durante o mestrado.

Aos meus queridos irmãos, Filipe e Daniel, pela amizade, parceria, alegrias e apoio durante toda a vida e durante à pós-graduação.

A meus amados pais, Fábio e Alessandra, pela amizade, apoio, ensinos e conselhos dados durante toda a vida e durante à pós-graduação. Serei grato por toda a vida.

A Jesus Cristo, meu Deus, amigo e mestre, por tudo o que fez por mim.

EPÍGRAFE

“Tudo quando fizerdes, fazei-o de todo o coração, como para o Senhor e não para homens.”

Colossenses 3. 23.

RESUMO

A indústria da construção civil exerce papel fundamental no desenvolvimento social e econômico de um país. Entretanto, o setor gera impactos ambientais significativos no que tange à geração dos resíduos de construção e demolição (RCD). A gestão dos RCD é um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável, sendo uma solução a reciclagem de materiais na forma de agregados. Com a consolidação dos mercados de crédito de carbono, materiais passíveis de capturarem dióxido de carbono (CO_2) têm ganhado destaque por sua possibilidade de comercializar os direitos de emissão de carbono nesses mercados, gerando ganho econômico. Nesse sentido, pesquisadores têm estudado a viabilidade da captura de CO_2 por meio dos agregados reciclados através do processo de carbonatação. A carbonatação ocorre através do contato entre o CO_2 e os íons de cálcio (Ca^{2+}) presentes no cimento, reagindo e gerando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) que fica alocado estrutura do material. Diante disso, esse trabalho avaliou a capacidade de captura de CO_2 por meio de agregados reciclados produzidos a partir de blocos intertravados de concreto britado. Para isto, foi avaliado o pH no interior do concreto para confirmar o potencial de captação de CO_2 pelos agregados reciclados produzidos por ele a partir da alcalinidade proveniente dos íons de cálcio. Em seguida, os agregados RCD foram carbonatados em câmara climática e medições sucessivas pelos métodos de massa e termogravimetria (TGA) foram realizadas para calcular o teor de carbonatação dos agregados e o CO_2 capturado. Posteriormente, os agregados carbonatados miúdos foram caracterizados novamente para avaliar a influência da carbonatação em suas propriedades e foram aplicados para estudo da influência dos agregados reciclados carbonatados em argamassas. As propriedades das argamassas foram avaliadas por meio de ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade. Como resultado, foi possível confirmar a possibilidade de captura de CO_2 pelos agregados reciclados de concreto e sua aplicação dentro dos mercados de crédito de carbono para ganho econômico. Além disso, a aplicação do agregado reciclado miúdo em argamassas sugere melhorias nas propriedades físicas de densidade e absorção de água, resistência à compressão e durabilidade contra ataques ácidos e absorção de água por capilaridade, indicando o efeito positivo da carbonatação nos RCD.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Captura de CO_2. Carbonatação. Mercado de crédito de carbono. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry plays a fundamental role a country's social and economic development. However, the sector generates significant environmental impacts regarding the generation of construction and demolition waste (CDW). The management of CDW is one of the main challenges for sustainable development, and one solution is the recycling of materials in the form of aggregates. With the consolidation of carbon credit markets, materials capable of capturing carbon dioxide (CO_2) have gained prominence for their possibility of trading carbon emission rights in these markets, generating economic gain. In this sense, researchers have been studying the feasibility of capturing CO_2 through recycled aggregates through the carbonation process. Carbonation occurs through the contact between CO_2 and calcium ions (Ca^{2+}) in the cement, reacting and generating calcium carbonate ($CaCO_3$) compounds that adhere to the material. Therefore, this work sought to evaluate the capacity of CO_2 capture through recycled aggregates produced from interlocking blocks of crushed concrete. For this, the pH inside the concrete was investigated to confirm the potential of CO2 uptake by the recycled aggregates produced by it from the alkalinity of calcium ions. The CDW aggregates were carbonated in a climatic chamber and successive measurements by mass and thermogravimetry (TGA) methods were performed to calculate the carbonation content of the aggregates and the CO_2 captured. Subsequently, the fine carbonate aggregates were again characterized to evaluate carbonation's influence on their properties. They were applied to mortars to study the effect of carbonated recycled aggregates on mortars. They were investigated using physical, mechanical and durability tests. As a result, it was possible to confirm the possibility of CO_2 capture by recycled concrete aggregates and its application within carbon credit markets for economic gain. In addition, the application of fine recycled aggregate in mortars suggests improvements in the physical properties of density and water absorption, compressive strength and durability against acid attacks and water absorption by capillarity, indicating the positive effect of carbonation on CDW.

Keywords: Construction and demolition waste. CO_2 capturing. Carbonation. Carbon market. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de utilização e armazenamento de CO_2 em materiais à base de cimento. 7

Figura 2 - Impacto do tempo de exposição nas porcentagens de carbonatação. 11

Figura 3 - Curva ganho de massa cumulativa de um produto de concreto durante 2h de cura de CO_2.....17

Figura 4 - Exemplos de curvas TGA e DTG. 18

Figura 5 - Histórico de cotação das units de carbono. 21

Figura 6 - Distribuição de mercados de crédito de carbono pelo mundo. 22

Figura 7 - Setores contemplados nos mercados de crédito de carbono existentes. 23

Figura 8 - Fluxograma dos materiais utilizados. 25

Figura 9 - Pavers utilizados para produção dos agregados reciclados. 26

Figura 10 - Areia RCD (a), brita RCD (b) e britador da usina (c).....26

Figura 11 - Agregados reciclados britados dos pavers (a) areia e (b) brita. 27

Figura 12 - Fluxograma da metodologia. 28

Figura 13 - Preparo das amostras para ensaio de Arquimedes (a) imersão dos pavers em água e (b) secagem dos pavers em estufa. 29

Figura 14 - Preparo amostras pré-inserção na câmara climática (a) amostra de areia RCD seca, (b) adição de água relativo ao teor de água absorvido da areia RCD, e (c) amostra de areia RCD após homogeneização da água adicionada. 31

Figura 15 - Dimensões dos pavers (cm). 35

Figura 16 - Alcalinidade no interior do pavers. 36

Figura 17 - Poros no interior dos pavers investigados com magnitude de 40x. 37

Figura 18 - Análise do poro 1 do interior dos pavers com magnitude de 500x, 1000x, 2500x e 5000x. 37

Figura 19 - Análise do poro 2 do interior dos pavers com magnitude de 500x, 1000x, 2500x e 5000x. 38

Figura 20 - Curva granulométrica das britas natural e reciclada. 40

Figura 21 - Curva granulométrica das areias natural, areia reciclada e corrigida da areia reciclada. 40

Figura 22 - Aplicação de fenolftaleína nas britas RCD. 41

Figura 23 - Aparência da brita RCD devido a remoção da argamassa aderida à superfície (a) antes e (b) depois do ataque de ácido sulfúrico. 41

Figura 24 - Difratrograma das fases identificadas dos agregados RCD. 43

Figura 25 - Ganho de massa da areia RCD ao longo do tempo, considerando diferentes condições de carbonatação (0% e 5% CO2) e diferentes teores de umidade adicionada (0%, 30% e 50%). 45

Figura 26 - Ganho de massa da brita RCD ao longo do tempo, considerando diferentes condições de carbonatação (0% e 5% CO2) e diferentes teores de umidade adicionada (0%, 30% e 50%). 45

Figura 27 - Curvas TGA/DTG da areia reciclada. 48

Figura 28 - Curvas TGA/DTG do agregado graúdo reciclado 48

Figura 29 - Espectro FTIR das areias RCD. 52

Figura 30 - Espectro FTIR dos RCD graúdos. 53

Figura 31 - Resultado do pré-teste do ensaio de trabalhabilidade da argamassa 100nRCD. 55

Figura 32 - Resistência à compressão de argamassas aos 7 dias 58

Figura 33 - Aspectos dos corpos de prova das argamassas após rompimento aos 7 dias (a) argamassa REF, (b) argamassa 50nRCD, (c) argamassa 100nRCD, (d) argamassa 50cRCD e (e) argamassa 100cRCD. 59

Figura 34 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias. 60

Figura 35 - Aspectos dos corpos de prova das argamassas após rompimento aos 28 dias (a) argamassa REF, (b) argamassa 50nRCD, (c) argamassa 100nRCD, (d) argamassa 50cRCD e (e) argamassa 100cRCD. 61

Figura 36 - Curvas de resistência à compressão das argamassas. 62

Figura 37 - Absorção de água por capilaridade das argamassas testadas. 63

Figura 38 - Corpos de prova após ataque de ácido sulfúrico.....64

Figura 39 - Perda de massa após ataque de ácido sulfúrico. 65

Figura A1 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa de referência (REF). 87

Figura A2 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50nRCD. 88

Figura A3 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100nRCD. 89

Figura A4 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50cRCD. 90

Figura A5 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100cRCD. 91

Figura B1 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa de referência (REF). 92

Figura B2 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50nRCD. 93

Figura B3 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100nRCD. 94

Figura B4 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50cRCD. 95

Figura B5 - Rompimento doss corpos de prova de argamassa 100cRCD. 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de Resíduos da Construção Civil coletados pelos municípios no Brasil, 2010 a 2018. 4

Tabela 2 - Normas dos ensaios utilizados para caracterização física dos agregados. 30

Tabela 3 - Argamassas dosadas para avaliar o efeito da carbonatação nos agregados reciclados. 32

Tabela 4 - Normas dos ensaios das propriedades das argamassas. 33

Tabela 5 - ETS que comercializam CO_2 capturado considerando o setor da construção civil. 34

Tabela 6 - Densidade dos pavers de concreto. 35

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados. 39

Tabela 8 - Composição química dos agregados RCD antes da carbonatação acelerada. ... 42

Tabela 9 - Cristalinidade identificada dos agregados de RCD. 43

Tabela 10 - Ganho de massa dos agregados RCD aos 7 dias pelo método de ganho de massa. 46

Tabela 11 - Potencial de captura de CO_2 dos agregados reciclados pelo método de massa considerando a condição 5% CO_2 + 30% umidade. 47

Tabela 12 - Potencial de captura de CO_2 dos agregados reciclados pela termogravimetria. 49

Tabela 13 - Caracterização dos agregados reciclados antes e após carbonatação. 54

Tabela 14 - Teores de materiais para a produção de 1m³ de argamassa. 54

Tabela 15 - Propriedades físicas índice de consistência, densidade e absorção de água das argamassas. 56

Tabela 16 - Preço da *unit* de carbono para cada um dos ETS considerados em 2022. 66

Tabela 17 - Valor total de comercialização do CO_2 capturado pelos RCD. 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública de Resíduos Especiais ACI - Instituto Americano de Concreto Al_2O_3 - Alumina

ANOVA - Análise de variância

ARCI - Agregados reciclados cimentícios

ARCO - Agregados reciclados de concreto

ARM - Agregados reciclados mistos

BRICS - Bloco econômico composto por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

BRL - Real brasileiro

BS EN - Norma britânica

B- C_2S, C_2S e C_3S - Silicatos de cálcio

C_4AF - Ferrita

C_3A - Aluminato tricálcico

$Ca(OH)_2$ - Hidróxido de cálcio

Ca^{2+} - Cálcio

$CaCO_3$ - Carbonato de cálcio

CCS - Captura e armazenamento de carbono

CCUS - Captura, uso e armazenamento de carbono

CH - Hidróxido de cálcio

CNY - Yuan chinês

CO_2 - Dióxido de carbono

CP - Cimento Portland

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

DIN - Instituto Alemão de Normas Técnicas

DRX - Difração de raios X

ETS - Mercado de crédito de carbono

ETS UE - Mercado de crédito de carbono europeu

FRX - Espectrometria de fluorescência de raios X em energia dispersiva

FTIR - Espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier

GEE - Gases do efeito estufa

GB/T - Norma chinesa

H_2SO_4 - Ácido sulfúrico

ICAP - Parceria internacional de ação em matéria de carbono

ICC - Indústria da construção civil

IEA - Agencia internacional de energia

JIS - Comitê de normas japonesas industriais

JPY - Iene japonês

KETS - Mercado de crédito de carbono sul-coreano

MBRE - Mercado brasileiro de redução de emissões

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

Mg^{2+} - Magnésio

N_2 - Nitrogênio

NBR - Norma brasileira

NZETS - Mercado de crédito de carbono neozelandês

NZD - Dólar neozelandês

O_2 - Oxigênio

OH - Hidroxila

PA - Para Amostra

pH - Potencial hidrogeniônico

PIB - Produto Interno Bruto RCD - Resíduos de

Construção e Demolição RCLE - Regime de

comércio de licenças de emissão RPC - Resíduos de

pó de concreto RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SiO_2 - Quartzo

TGA/DTG - Termogravimetria Diferencial

UR - Umidade relativa

USD - Dólar estadunidense

ZTI - Zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

º/min - Passo

% - Porcentagem

°C - Graus célsius

a/c - Relação água/cimento

bar - Unidade de pressão Bt

- Bilhões de toneladas cm^{-1}

- Comprimento de onda g -

Gramas

g CO_2/g - Grama CO_2 por grama agregado

g/cm^3 - Grama por centímetro cúbico

Gt - Gigatoneladas

Kg - Quilogramas

Kg CO_2/ton - Quilograma de CO_2 por tonelada agregado

kg/m^3 - Quilograma por metro cúbico

kW - Quilowatts mA -

Corrente elétrica mg -

Microgramas mL/min

- Fluxo

mm - Milímetros

mm/ano - Milímetros por ano

MPa - Megapascal

Mt - Megatoneladas

nm - Nanômetros

ppm - Partes por milhão

ρs - Densidade seca

ρ/s - Relação água/sólidos

μm - Micrômetros

Unit - 1 tonelada de CO_2

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. PERGUNTA DE PESQUISA 3

1.2. OBJETIVOS 3

1.2.1. Objetivo geral 3

1.2.2. Objetivos específicos 3

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 3

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1. SEQUESTRO DE CARBONO 5

2.2. SEQUESTRO DE CO_2 ATRAVÉS DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) 7

2.2.1.Variáveis que interferem no sequestro de CO_2 10

2.2.2.Capacidade de sequestro de CO_2 pelos RCD 12

2.2.3.Influência da carbonatação nos agregados RCD 14

2.3. MÉTODOS PARA QUANTIFICAR A ABSORÇÃO DE CO_2 15

2.4. CAPTURA DE CARBONO ATRAVÉS DOS RCD E RELAÇÃO COM MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO 20

3. MATERIAIS E MÉTODOS 25

3.1. MATERIAIS 25

3.2. MÉTODOS 27

3.2.1.Caracterização da matéria prima 28

3.2.2.Caracterização dos agregados 29

3.2.3.Capacidade de sequestro de CO_2 dos agregados RCD. 31

3.2.4.Influência da carbonatação nas propriedades de argamassas recicladas. 32

3.2.5.Potencial financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados RCD em mercados de crédito de carbono. 33

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 35

4.1. Caracterização da matéria prima 35

4.2. Caracterização dos agregados 38

4.3. Capacidade de sequestro de CO_2 pelos agregados reciclados 44

4.3.1. Sequestro de CO_2 pelo método de ganho de massa 44

4.3.2. Sequestro de CO_2 pelo método de termogravimetria 47

4.4. Influência da carbonatação nas propriedades de argamassas recicladas. 51

4.4.1. Caracterização dos agregados após a carbonatação 51

4.4.2. Dosagem das argamassas 54

4.4.3. Influência da carbonatação dos agregados miúdos reciclados nas propriedades das argamassas 55

4.5. Potencial financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados RCD em mercados de crédito de carbono. 65

5. CONCLUSÕES 68

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 70

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA 71

ANEXO A - CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS ROMPIMENTO AOS 7 DIAS 87

ANEXO B - CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS ROMPIMENTO AOS 28 DIAS 92

1. INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) é um setor importante para o Brasil. No primeiro trimestre de 2022, a ICC apresentou crescimento de 9% em relação a 2021 (Cbic, 2022a), promovendo mais de 100 mil postos de trabalho formais e, desde o 3º trimestre de 2020, ela tem alavancado o PIB nacional (Cbic, 2022b). Além disso, devido às demandas por infraestrutura dos países, principalmente de países em desenvolvimento e não desenvolvidos, existe o aumento da perspectiva das atividades do setor (Ghosh *et al.*, 2009).

Entretanto, a ICC é responsável por alterar o espaço urbano como um todo, adequando a realidade do ambiente às demandas requisitadas pela sociedade (Nagalli, 2014). Esse mesmo setor tem sido um dos principais geradores de impactos ambientais, principalmente no que tange à geração de resíduos sólidos, poluição do ar, de rios e mudanças climáticas (Haider *et al.*, 2022).

Estima-se que a geração global de resíduos sólidos tem aumentado, chegando a 2 bilhões de toneladas (ton) (Silpa *et al.*, 2018) em 2016, e projeta-se a geração de mais de 2,5 bilhões de toneladas até 2030 e 3,4 bilhões até 2050 (Silpa *et al.*, 2018). Nesse sentido, a construção civil é um dos setores que mais contribuem com a produção dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (Brasil, 2020), principalmente resíduos da construção e demolição (RCD), produzidos de restos de concreto, argamassas, cerâmicas, entre outros (Brasil, 2002). Os RCD configuram um desafio global no que tange à gestão de resíduos sólidos devido ao seu volume de geração ser superior à sua taxa de reciclagem (Haider *et al.*, 2022) e sua principal disposição ser em aterros sanitários (Blengini; Garbarino, 2010; Tam *et al.*, 2020). Ademais, a ICC é uma das principais responsáveis pela exploração do meio ambiente. Calcula-se que, em 2019, a extração de minerais não metálicos para produção de insumos para a construção civil (cimento, areia e brita) tenha sido superior a 42 bilhões de toneladas (USGS, 2021; Wu Vienna, 2022), sendo os principais exploradores os países membros dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China, e África do Sul), responsáveis por mais de 26 bilhões de toneladas (Ghosh *et al.*, 2009; Wu Vienna, 2022) devido às demandas de infraestrutura pelo processo de industrialização.

Outro problema associado à indústria da construção civil ocorre pela emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera. A International Energy Agency (IEA) estima que, em 2021, foram gerados 36,3 Gigatoneladas (Gt) de CO_2, sendo quase 500 megatoneladas (Mt) o percentual de dióxido de carbono emitido pela ICC (IEA, 2021). Estima-se que a indústria do

cimento Portland, material utilizado para produção de concretos e argamassas, emite quantias consideráveis de dióxido de carbono durante seu processo de produção, sendo responsável pela emissão de 8% do CO_2 total global (Andrew, 2021), tornando-se um dos principais produtos que contribuem consideravelmente para o excesso de CO_2 na atmosfera (Wasim *et al*., 2022).

Para diminuir o impacto das emissões de CO_2 da atmosfera, pesquisadores têm estudado a capacidade de sequestro de dióxido de carbono em materiais cimentícios (Aparicio *et al*., 2022; Galan *et al*., 2010; Nedunuri; Mohammed; Muhammad, 2021). Esse processo ocorre pela carbonatação dos compostos de cálcio (Ca^{2+}) presentes nos materiais à base de cimento, que fixam CO_2 da atmosfera, formando compostos de carbonato de cálcio, $CaCO_3$ (Li; Mo; Unluer, 2022; Liu *et al*., 2022) e armazenando permanentemente o carbono capturado na forma de $CaCO_3$ (Chang *et al*., 2017a). Nos agregados RCD, essa prática é possível devido aos íons Ca^{2+} presentes nos resíduos cimentícios acoplados às argamassas e concretos (Li *et al*., 2019; Torrenti *et al*., 2022). Como forma de mitigar os impactos ambientais, a captura de carbono pode ser classificada na categoria de "carbon capture, use and storage" (CCUS) (IEA, 2022). CCUS engloba tecnologias que capturam o carbono atmosférico e utilizam de forma eficiente no produto capturador, agregando valor (Nawaz; Suleman; Maulud, 2022).

Outra consideração importante é a capacidade de quantificar o sequestro de carbono para ganho econômico. Desde a publicação do protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998), políticas públicas têm sido propostas para diminuir a emissão de carbono para a atmosfera. Uma dessas propostas é a comercialização dos direitos de emissão de CO_2 nos chamados mercados de crédito de carbono (UNFCCC, 2022), ferramenta cuja função é regular a emissão de CO_2 através do comércio dos esquemas de troca de emissão, permitindo que o mercado limite a quantidade de carbono e quantifique o preço dessa troca, aferindo valor econômico ao CO_2 emitido e capturado (Hua; Dong, 2019).

Considerando esse panorama e visando o desenvolvimento sustentável, pesquisadores têm buscado formas de reutilizar os resíduos gerados, na forma de agregados RCD, em materiais comumente utilizados dentro da ICC, como concretos e argamassas (Li *et al*., 2020; Reis *et al*., 2022; Sereng *et al*., 2021). Entretanto, devido à heterogeneidade dos resíduos, os agregados RCD apresentam alterações em suas propriedades (Li *et al*., 2019), fazendo com que os concretos produzidos com esses resíduos tenham perda de desempenho (Giergiczny *et al*., 2020; Hosseini Zadeh *et al*., 2021; Russo; Lollini, 2022; Xuan; Zhan; Poon, 2016).

Visando potencializar a capacidade de captura do CO_2 atmosférico pelos RCD, pesquisadores e indústria têm pesquisado a viabilidade de fortalecer os agregados reciclados a partir do processo de cura carbonatada (Infante Gomes *et al*., 2021a; Tam; Butera; Le, 2020; Zhu *et al*., 2022).

Diante do exposto, foi estudada a capacidade de absorção de carbono dos agregados de RCD através da carbonatação visando avaliar o potencial de sequestro de CO_2 por esses materiais, buscando a aplicação em mercados de crédito de carbono para diminuir os passivos ambientais referentes à emissão de gases do efeito estufa gerados pela ICC.

1.1. PERGUNTA DE PESQUISA

Qual a capacidade de sequestro de CO_2 dos agregados reciclados e quais os efeitos do seu uso carbonatado nas propriedades de argamassas?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar o potencial de captura de dióxido de carbono pelos agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição e identificar os efeitos do uso dos agregados carbonatados nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade de argamassas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o potencial de captura de carbono dos agregados RCD obtidos a partir de concreto britado através do processo de carbonatação;
- Avaliar e quantificar o sequestro de carbono por agregados RCD por meio do método de pesagem de massa e por análise termogravimétrica;
- Associar o potencial de captura de carbono dos agregados RCD em termos financeiros, com base nos mercados de crédito de carbono; e
- Avaliar efeitos do uso do agregado reciclado carbonatados miúdos em argamassas.

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Visando o desenvolvimento sustentável, a gestão dos RCD é um desafio presente na engenharia civil por conta dos altos volumes de resíduos gerados. Segundo o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (Brasil, 2020), estima-se que sejam gerados no Brasil 84 milhões de m^3 de RCD por ano, tendo sido coletados em 2021 48 milhões de toneladas de RCD pelos

municípios (Abrelpe, 2022). Desde 2010, o volume de RCD coletado tem aumentado nos municípios (Tabela 1), sendo sua maioria localizado na região Sudeste do Brasil, região com maior concentração de pessoas no País (Abrelpe, 2022).

Tabela 1 - Quantidade de Resíduos da Construção Civil coletados pelos municípios no Brasil, 2010 a 2018.

Ano	Coletado (ton/dia)	Índice de coleta (ton/hab/dia)
2018	122.012	0,585
2017	123.421	0,594
2016	123.621	0,600
2015	123.721	0,605
2014	122.262	0,603
2013	117.435	0,584
2012	112.248	0,579
2011	106.549	0,554
2010	99.354	0,521

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

O reaproveitamento de resíduos de construção e demolição tem sido buscado em todo o mundo. Diversos países dispõem de aparatos técnicos que viabilizam a aplicação de RCD dentro da construção civil, tais como a norma americana ACI CRC 18.517 (ACI, 2019), a norma japonesa JIS A 5021 (JSA, 2011), a norma britânica BS EN 12.620 (CEN, 2008) e a norma alemã DIN 4226:100:2002-02 (DIN, 2002). Entretanto, prioriza-se a aplicação de agregados graúdos originados de concretos. Em 2021, o Brasil atualizou a norma NBR 15.116, classificando os agregados a partir da matéria prima utilizada para sua produção e permitindo a aplicação de agregados de concreto para fins estruturais (ABNT, 2021a). Os agregados foram classificados em agregados reciclados de concreto (ARCO), produzido pelo uso exclusivo de concretos; cimentícios (ARCI), produzido por pastas e argamassas; e mistos (ARM), produzido pela mistura de materiais cimentícios e cerâmicos. A partir da atualização da norma, projeta-se o aumento da utilização dos RCD dentro da ICC, colaborando para a criação de um novo nicho de mercado baseado na reciclagem desses resíduos.

Além disso, a consolidação dos mercados de crédito de carbono como instrumento para ganho financeiro tem aumentado o interesse de setores industriais (Bello, 2022; khalilpour, 2014; Nogrady, 2021), possibilitando investimentos em iniciativas sustentáveis que mitiguem a emissão de gás carbônico (OCDE, 2022). Nessa perspectiva, a viabilidade dos RCD como mecanismo para captura de CO_2 pode ser impulsionada pela perspectiva de financiamento através de mercados de crédito, agregando valor a esse produto e contribuindo para sua reciclagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SEQUESTRO DE CARBONO

O Sequestro de dióxido de carbono é um método usado para remover gases do efeito estufa (GEE) da atmosfera e armazená-los (Yan; Zhang, 2019). Seu principal objetivo é diminuir a concentração de dióxido de carbono e reduzir as consequências do efeito estufa sobre o mundo (Mastali; Abdollahnejad; Pacheco-Torgal, 2020; Nawaz; Suleman; Maulud, 2022; Shaw; Mukherjee, 2022). Como o CO_2 é o maior contribuinte para o efeito estufa (Lindsey; Dlugokencky, 2022; Nawaz; Suleman; Maulud, 2022), representando 76% de todas as concentrações de GEE na atmosfera (Kaliyavaradhan; Ling, 2017), associa-se a captura de GEE à captura de carbono.

As emissões excessivas de carbono para a atmosfera começaram na revolução industrial do século XVIII (Lindsey; Dahlman; Blunden, 2022). O grande número de fábricas e a atividade industrial baseada na combustão fóssil, principalmente o carvão, aumentaram os níveis de GEE na atmosfera (Lindsey; Dahlman; Blunden, 2022). Nos últimos 100 anos, os níveis de CO_2 aumentaram drasticamente: passaram de 280 ppm para acima de 400 ppm, muito acima do limite aceito de 350 ppm necessário para manter o efeito estufa estável, com uma taxa de emissão estimada perto de 51 bilhões de toneladas de GEE por ano (Shaw; Mukherjee, 2022).

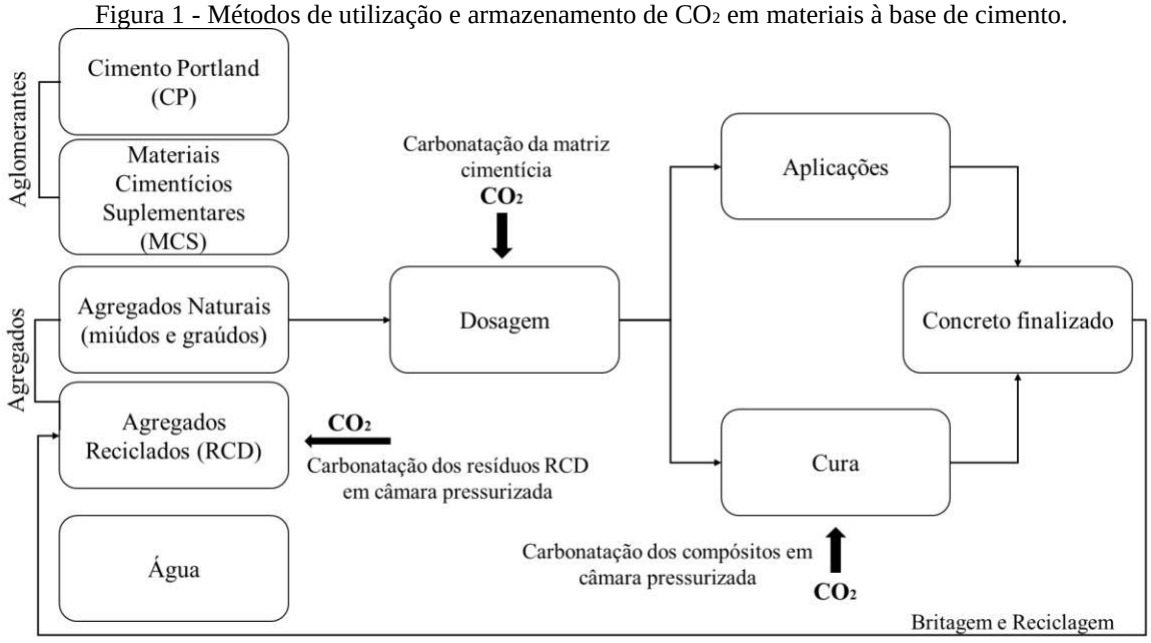
O Acordo de Paris estabeleceu a meta de limitar o aumento da temperatura global em até 2ºC até 2030 (Delbeke *et al.*, 2019). Para cumprir esse objetivo é necessário mitigar as emissões de carbono e diminuir os níveis de GEE na atmosfera (Delbeke *et al.*, 2019; Nawaz; Suleman; Maulud, 2022). Nesse sentido, estão sendo desenvolvidas tecnologias para mitigar o carbono CO_2 na atmosfera estão sendo desenvolvidas, como captura e armazenamento de carbono (carbon capture and storage - CCS em inglês) e captura, uso e armazenamento de carbono (carbon capture, use and storage - CCUS em inglês).

CCS é uma tecnologia que consiste na captura de emissões de dióxido de carbono de processos industriais e da atmosfera, transportado de onde foi produzido e armazenado em formações geológicas (Amsen, 2021). CCUS utiliza eficazmente o CO_2 como energia em instalações industriais ou converte-o em produtos químicos valiosos, produtos de valor acrescentado e/ou a sua utilização como mercadoria (IEA, 2022; Nawaz; Suleman; Maulud, 2022), por isso se difere da CCS.

No que diz respeito à CCUS, o dióxido de carbono é capturado da atmosfera ou de instalações industriais que utilizam combustíveis fósseis ou biomassa como combustível para produção de energia (IEA, 2022). O CO_2 capturado é usado para processos industriais, transformação de combustível e geração de energia é comprimido e transportado por tubulação ou por outros meios, para ser usado em uma variedade de aplicações, ou injetado em formações geológicas profundas para utilizar o CO_2 para armazenamento permanente (IEA, 2022). De acordo com a IEA, estima-se que o uso do CCUS capturou 44 milhões de toneladas de CO_2 em 2021, sendo uma das tecnologias mais promissoras que podem desempenhar um papel importante no cumprimento das metas globais de energia e clima (IEA, 2022).

Li *et al*. (2022) investigaram e concluíram que as iniciativas de CCS e CCUS mais aplicadas em engenharia civil estão concentradas em quatro categorias principais: (1) produção de produtos carbonatados à base de materiais cimentícios, (2) fabricação de produtos usando adições minerais e resíduos industriais carbonatados, (3) produção de agregados carbonatados e (4) produção de concreto com minerais carbonatados. Além disso, Liu e Meng (2021) indicam que existem três métodos de CCUS considerando apenas materiais à base de cimento: (i) carbonatação de matérias-primas para compósitos à base de cimento, (ii) injeção de CO_2 em compósitos à base de cimento de estado fresco e (iii) cura por carbonatação de compósitos à base de cimento, que podem ser resumidos na Figura 1. Além disso, Hasan *et al*. (2022) concluíram que o processo de carbonatação é um método eficiente que pode ser utilizado para sequestrar o CO_2 produzido em instalações industriais e aplicá-lo a produtos de construção, como concreto e blocos de concreto. O CO_2 capturado reage com o Ca^{+2} presentes na pasta de cimento, produzindo cristais de $CaCO_3$ que são mantidos permanentemente presos na matriz cimentícia, o que significa que a absorção de carbono através do processo de carbonatação poderia ser aplicada como estratégia para promover o CCUS (Carboclave, 2021).

Figura 1 - Métodos de utilização e armazenamento de CO_2 em materiais à base de cimento.



Fonte: Adaptado de Lim; Ellis; Skerlos (2019).

2.2. SEQUESTRO DE CO_2 ATRAVÉS DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A captura de carbono na construção civil ocorre por meio do processo de carbonatação (Lu *et al*., 2018). A carbonatação é um processo natural que ocorre devido às reações entre sólidos alcalinos, como materiais ricos em Ca^{+2} e Mg^{2+}, e CO_2 (Li; Mo; Unluer, 2022). Essas reações ocorrem pela precipitação da solução supersaturada formada entre o CO_2 e os materiais alcalinos em ambientes úmidos. Em sistemas ricos em Ca^{2+}, elas produzem diferentes tipos de cristais de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), sendo a mais frequente a calcita (De Leeuw; Parker, 1998), mas podendo ser formadas outras fases como aragonita, vaterita e $CaCO_3$ de fase amorfa, dependendo da reação e de temperatura e pressão (Chang *et al*., 2017b, 2017a). Na presença de Mg^{2+}, a carbonatação leva à formação de fases hidratadas de carbonato de magnésio, embora seja frequentemente menos favorável quanto à formação de cristais nos sistemas ricos em Ca^{2+} (Li; Mo; Unluer, 2022). Este processo ocorre naturalmente em materiais cimentícios (Chen *et al*., 2022; Kashef-Haghighi; Ghoshal, 2013), mas progride lentamente sob condições ambientais (Hyvert *et al*., 2010). No entanto, apesar da taxa lenta em condições ambientais, se for dado tempo suficiente, a superfície exposta de sistemas ricos em Ca^{2+} pode reagir consideravelmente com o CO_2 (Galan *et al*., 2010; Possan *et al*., 2017).

Em materiais cimentícios, devido à presença do Cimento Portland, a formação de cristais é uma abordagem fundamental utilizada no processo de carbonatação. Concentração, mobilidade e acessibilidade de sólidos alcalinos presentes no clínquer e no CO_2 são fatores cruciais para

determinar a adequação de um determinado substrato para o tratamento de carbonatação e o grau final de carbonatação (Wei *et al*., 2018). Os silicatos de cálcio anidros (C_3S e β-C_2S) presentes no clínquer reagem com água, produzindo cristais de portlandita ($Ca(OH)_2$) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que, em contato com CO_2 atmosférico, geram cristais de $CaCO_3$ (Chang; Fang; Shang, 2016; Zhang; Shao, 2016). A reação de carbonatação em uma matriz cimentícia é um processo complexo (Zajac *et al*., 2018), ocorrendo devido ao transporte de CO_2 para a matriz e a reação com as fases de cálcio existentes (Zhang; Ghouleh; Shao, 2017). O CO_2 se difunde na matriz cimentícia e reage com o Ca^{2+} (Silva *et al*., 2015), produzindo cristais de $CaCO_3$ (Mu *et al*., 2018; Zajac *et al*., 2020), como mostram as Equações 1 – 4. (Aparicio *et al*., 2022; Mazurana *et al*., 2022; Xuan; Poon, 2019).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O, \quad (1)$$

$$C\text{–}S\text{–}H + CO_2 \rightarrow 3\ CaCO_3 + 2\ SiO_2 \bullet 3\ H_2O, \quad (2)$$

$$CaSiO_3 + CO_2 + nH_2O \rightarrow CaCO_3 + SiO_2 \bullet nH_2O \quad (3)$$

$$Ca_x\ Si_y\ H\ z\ O(x+_{2y+z}/2) + xCO_2 \rightarrow xCaCO_3 + y(SiO_2 \bullet tH_2O) + (z/2 - yt)H_2O \quad (4)$$

Agregados feitos com RCD, especialmente ARCO, possuem potencial de captura de carbono devido ao cimento presente na argamassa que envolve os agregados (Ahmad, 2018; Lu *et al*., 2018). O processo de carbonatação funciona como um método para melhorar as propriedades do ARCO (Zhang *et al*., 2022). Este processo é chamado de carbonatação acelerada ou cura carbonatada (Torrenti *et al*., 2022). O CO_2 atmosférico infiltra através dos poros e fissuras presentes na argamassa anexa e dissolve-se na água dos poros, produzindo íons cálcio e ácido carbônico através da decomposição de C-S-H, $Ca(OH)_2$ e silicatos de cálcio (Li; Mo; Unluer, 2022). Em seguida, as reações entre Ca^{2+} e íons de carbonato produzem gel de sílica e $CaCO_3$ (Li; Mo; Unluer, 2022; Phung , 2015) que precipitam nos poros e rachaduras de ARCO na forma de calcita (Peter *et al*., 2008), mitigando as microfissuras existentes na zona de transição interfacial (ZTI) (Al-Waked *et al*., 2022; Li *et al*., 2020; Liu; Meng, 2021) e elevando a qualidade dos ARCOs (Fang; Chang, 2015; Zhang; Ghouleh; Shao, 2017).

Visando melhorar as propriedades dos ARCO, técnicas foram desenvolvidas para aumentar a taxa de carbonatação (Xuan; Zhan; Poon, 2016). Os métodos utilizados para realizar as investigações são o Método Padrão de Carbonatação, recomendado pela norma chinesa GB50082 (GB/T 50082-2009, 2009), o Método de Carbonatação Pressurizada (Kou; Zhan;

Poon, 2014), o Método de Cura por Fluxo de CO_2 (Kashef-Haghighi; Ghoshal, 2010) e o Método de Cura Cooperativa de Água-CO_2 (Pasquier et al., 2014).

O Método Padrão de Carbonatação, amplamente utilizado e o mais frequente na bibliografia selecionada, é realizado em câmara de carbonatação com o ajuste dos parâmetros temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 para realização do fenômeno. As variáveis temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 são ajustadas nos valores 20 ± 2 °C, 70 ± 5% e 20 ± 3%, respectivamente. Também é comum analisar o conteúdo de material carbonatado após diferentes períodos de exposição dentro da câmara (Liang *et al*., 2020a, 2020b).

O Método de Carbonatação Pressurizada faz uso de câmara de carbonatação, porém diferencia-se do método padrão pelo fato de controlar o teor de CO_2 pelo ajuste da pressão de CO_2 no interior da câmara (Suescum-Morales *et al*., 2021; Suescum-Morales; Fernández-Rodríguez; Jiménez, 2022). Em um primeiro momento, a pressão no interior da câmara é ajustada até o valor de -0,5 bar para, em seguida, o CO_2 com 99% de pureza ser bombeado para o interior da câmara (Kou; Zhan; Poon, 2014; Monkman; Shao, 2010). Os parâmetros temperatura e umidade relativa são ajustados entre 25 ± 2°C e 50 ± 5%, e a pressão de CO_2 controlada pode variar entre 0.1, 1.48 e 4 bar de CO_2, respectivamente (Kou; Zhan; Poon, 2014; Shi; Wu, 2008).

O Método de Cura por Fluxo de CO_2 utiliza câmara de carbonatação, porém diferencia-se dos métodos anteriores por controlar o teor de CO_2 no interior da câmara pela injeção do gás de um dos lados na câmara e consequente descarregamento do gás pelo outro lado (Suescum-Morales *et al*., 2021; Suescum-Morales; Fernández-Rodriguez; Jiménez, 2022). Análogo ao Método de Carbonatação Pressurizada, a pressão no interior da câmara é ajustada até -0,5 bar e, durante o bombeamento do CO_2 com 99% de pureza, a pressão da câmara é controlada em 0,1 bar, mantendo-se assim até o final do ensaio (Zhan; Poon; Shi, 2016). Os parâmetros temperatura e umidade relativa são ajustados em 23 ± 5°C e 50 ± 5%, respectivamente (Zhan; Poon; shi, 2016).

O Método de Cura Cooperativa de Água-CO_2 consiste em submergir as amostras em uma solução de água com a presença de CO_2, O_2 e N_2, que reagem com os componentes cimentícios das amostras e carbonatam o material (Suescum-Morales *et al*., 2021; Suescum-Morales; Fernández-Rodriguez; Jiménez, 2022). A solução aquosa é produzida com água destilada e a inserção de uma mistura gasosa simulando o gás de combustão de uma cimenteira, contendo 18,2% de CO_2 e 4% de O_2 equilibrados com N_2 (Ben Ghacham *et al*., 2017). Nesse método, a

pressão é ajustada entre 120-280 bar e não existe parâmetro definido de temperatura (Ben Ghacham *et al*., 2017).

2.2.1. Variáveis que interferem no sequestro de CO_2

A captura de carbono através das reações de carbonatação pelos agregados de RCD é influenciada por diversas variáveis (Xuan; Poon, 2019). Zhang *et al.* (2020). listaram alguns parâmetros críticos: tamanho de partícula, umidade relativa (UR), temperatura, pressão de CO_2, concentração de CO_2 e tempo de exposição. Li *et al*. (2022) complementam informando que a composição e a porosidade do material também afetam a cinética de carbonatação.

Nos primeiros estágios, as reações de carbonatação são influenciadas pelo tamanho das partículas dos reagentes (Li; Mo; Unluer, 2022). Isso ocorre porque agregados com dimensões menores apresentam maior área superficial, aumentando o contato, a taxa de reações e a capacidade de sequestro de CO_2 (Kikuchi; Kuroda, 2011; Zhang *et al*., 2015a) e porque os grãos menores tendem a ter uma maior concentração de cálcio exposto ao CO_2 atmosférico presente nas argamassas acopladas à sua superfície (Fang; Xuan; Poon, 2017; Verian; Ashraf; Cao, 2018; Xuan; Zhan; Poon, 2016).

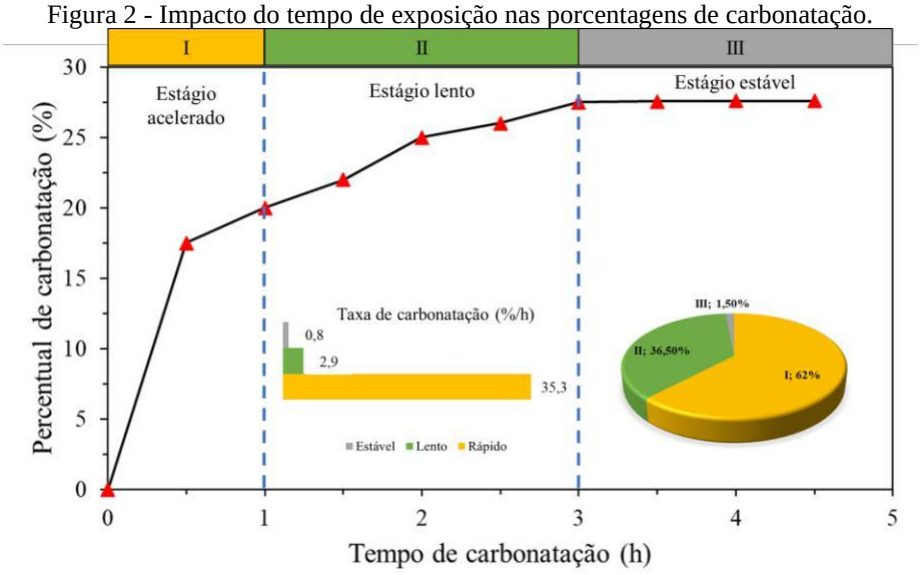
Outro fator a considerar é a solubilidade do CO_2 que depende da temperatura e umidade relativa (Li; Mo; Unluer, 2022). Temperaturas mais altas aumentam a difusividade do CO_2 e aceleram a lixiviação de íons Ca^{2+} das partículas sólidas, mas diminuem a solubilidade do CO_2 (Lekakh *et al*., 2008; Wang; Noguchi; Nozaki, 2019). Li e Wu (2022) indicam que a absorção de CO_2 atmosférico aumenta em temperaturas até 60 ºC (Li; Mo; Unluer, 2022), mostrando que para alcançar condições ideais de carbonatação, a temperatura deve ser controlada.

Ahmad (2018) relata a importância da umidade relativa na cinética de carbonatação. A água é necessária para dissolver os íons Ca^{2+} presentes no cimento e formar os cristais de $Ca(OH)_2$ que, após entrarem em contato com o CO_2, reagem e formam os cristais de $CaCO_3$. Valores de UR abaixo de 40% inibem a cinética de carbonatação por não realizar a dissolução íons cálcio (Li; Wu, 2022; Zhang; Cai; Jaworska, 2020), enquanto valores de UR acima de 80% retardam a difusão de CO_2 pelo condensamento dos poros, impedindo que o carbono penetre na parte interna dos materiais e comprometendo a carbonatação (Kaliyavaradhan; Ling; Hung, 2020; Sereng *et al*., 2021; Zhang; Cai; Jaworska, 2020). Para que essas reações ocorram de maneira efetiva, Jang *et al*. (2016) e Junior *et al*. (2013) sugerem que umidade relativa entre 50 - 70% estão em condições ideais para o processo de carbonatação das misturas cimentícias.

Ademais, concentração e pressão de CO_2 afetam a cinética de carbonatação (Kaliyavaradhan; Ling, 2017c). Pesquisadores destacam que o aumento da concentração de CO_2 do nível atmosférico (0,04%) até valores entre 20-40% aceleram a cinética das reações, contribuindo para o aumento da taxa de carbonatação (Pu *et al*., 2021a, 2021b). O mesmo ocorre com a pressão de CO_2 no interior da câmara (Li; Wu, 2022). Hyvert *et al*. (2010) concluíram que o aumento da pressão de CO_2 até 0,01 MPa melhora a taxa de carbonatação, enquanto valores mais elevados não mostraram influência. Portanto, sugere-se o valor de 0,01 MPa para a pressão de CO_2 para carbonatação de ARCO (Fang; Xuan; Poon, 2017).

A literatura indica que o tempo de exposição influencia significativamente a taxa de carbonatação (Aparicio *et al*., 2022). Suescum-Morales *et al*. (2021) concluíram que a taxa de absorção de CO_2 por agregados reciclados é maior nos períodos iniciais de exposição devido à maior concentração de C-S-H e $Ca(OH)_2$ não carbonatados, capazes de reagir com o CO_2. Decorrido o tempo, a taxa de carbonatação diminui gradualmente (Liu *et al*., 2022). Pu *et al*. (2021b) dividem a carbonatação em três estágios: estágio de crescimento rápido ou acelerado, onde a porcentagem de carbonatação aumenta rapidamente e contribui com até 62% da extensão total de carbonatação; estágio de crescimento lento, onde a taxa de carbonatação diminui e dura por um tempo relativamente longo, contribuindo com 36,5% da extensão total de carbonatação; e o estágio estável, onde a taxa de carbonatação permanece estável e contribui com até 1,5%, como ilustra a Figura 2. Um exemplo é o estudo de Kou e Poon (2012), que testaram a carbonatação em agregados reciclados de concreto por aproximadamente 10 anos e verificaram que, após 1 ano exposto, a carbonatação progrediu a uma taxa linear de 0,80/0,85 mm/ano.

Figura 2 - Impacto do tempo de exposição nas porcentagens de carbonatação.



Fonte: Adaptado de Pu *et al.* (2021).

Em relação à composição, a variabilidade dos tipos de resíduos altera a capacidade de reagir com CO_2, o que pode afetar a taxa de carbonatação (Dong *et al*., 2019). Fernández Bertos *et al*. (2004) sugeriram que altas concentrações de íons Ca^{2+} e Mg^{2+} aumentam a taxa de carbonatação, o que foi confirmado por Gomes *et al.* (2021) quando concluíram que materiais com maior teor de portlandita apresentaram potencial de carbonatação superior e por Dong. (2019), que verificaram melhoria da taxa de carbonatação pelo aumento do pH de 8 para 10. Essa é a razão pela qual os resíduos de concreto são preferíveis aos resíduos cerâmicos quanto à carbonatação (Galan *et al*., 2010; Liang *et al*., 2020b). Considerando que o RCD é um material heterogêneo (Gálvez-Martos *et al*., 2018; Infante Gomes *et al*., 2021a), é importante segregar os resíduos cimentícios do restante para aumentar a taxa de carbonatação. Além disso, Li *et al*. (2022) concluíram que a presença de ferrita (C_4AF) e silicatos de cálcio (C_3S, C_2S) são importantes para a formação de etringita e C-S-H, que reagem com CO_2 e formam $CaCO_3$. Sobre porosidade, Zajac *et al*. (2018) observaram que a baixa porosidade limita a difusão de CO_2 entre as partículas, diminuindo a carbonatação.

Pesquisadores concluíram que as condições ideais para alcançar uma carbonatação rápida são a concentração de CO_2 de 40-60% (Fang; Xuan; Poon, 2017), umidade de 40-70% (Fang; Xuan; Poon, 2017; Kou; Zhan; Poon, 2014; Zhan *et al*., 2014) e temperatura de 20-30 °C (Li *et al*., 2017; Lu *et al*., 2019; Wang *et al*., 2020), respectivamente. Ademais, recomenda-se borrifar uma solução com água e 1% de fenolftaleína para avaliar e manter a umidade dos agregados para manter carbonatação durante o ensaio (Zhang *et al*., 2015a, 2015b).

2.2.2. Capacidade de sequestro de CO_2 pelos RCD

Conforme descrito no tópico 2.3, a carbonatação é altamente afetada por diferentes aspectos (Xuan; Poon, 2019). A composição dos materiais é uma das propriedades que influencia na carbonatação, principal mecanismo utilizado para a captação de CO_2 através do RCD (Dong *et al*., 2019; Liu *et al*., 2021; Zhang *et al*., 2022). Andrade (2020) concluiu que a absorção de CO_2 é altamente dependente do teor de material cimentício. Considerando que agregados reciclados podem ser produzidos a partir de resíduos cimentícios e cerâmicos, existem diferenças quanto à capacidade de captura de CO_2 (Braymand *et al*., 2017; Dong *et al*., 2019; Fernández Bertos *et al*., 2004). Agregados tipo ARCO e ARCI detêm maior capacidade de sequestro em relação aos ARM devido à maior disponibilidade de íons Ca^{2+} presentes em sua composição (Li; Wu, 2022; Li; Mo; Unluer, 2022).

Avaliando agregados reciclados, Suescum-Morales *et al*. (2021) estudaram o potencial de captura de ARM miúdos, obtendo 5,55 kg de CO_2 por tonelada desse agregado. Para ARCI, o potencial de captura de CO_2 varia entre 21 e 270 Kg CO_2/ton para agregados miúdos (Kaliyavaradhan; Ling, 2017; Pfleger; Vill, 2022). Para ARCO, o potencial de absorção de agregados miúdos varia entre 20 a 120 Kg CO_2/ton (Fang; Xuan; Poon, 2017; Nedunuri; Mohammed; Muhammad, 2021; Xuan; Zhan; Poon, 2016; Zhang *et al*., 2022). Vale ressaltar que a variabilidade dos valores tem relação com a imprecisão quanto ao que pode ser considerado ARCI e ARCO pela classificação das normas e pelos agentes que lidam na prática com RCD. Pesquisadores também estudaram a capacidade de sequestro do CO_2 pelos agregados reciclados aplicados a materiais de construção. Suescum-Morales *et al*. (2021) verificaram que ARM aplicados a argamassas, nos teores de 0, 50 e 100% capturaram 24, 26 e 27 kg CO_2/ton de argamassa produzida, respectivamente. Em outro estudo, Suescum-Morales, Rodríguez e Jiménez (2022) obtiveram 16,5 kg CO_2/ton de argamassa produzida com substituição total de ARM. Em relação aos ARCI, Mazurana *et al*. (2022) obtiveram aproximadamente 36, 41 e 43 Kg CO_2/ton de argamassa produzida com os agregados reciclados nos teores de substituição de 0, 50 e 100%, respectivamente, indicando que em fatos específicos os resultados não apresentam grande variabilidade.

Diversos trabalhos avaliaram a influência da granulometria no sequestro de CO_2. Kikuchi e Kuroda (2011) pesquisaram sobre a capacidade de absorção de CO_2 por agregados reciclados em 8 usinas de reciclagem no Japão e concluíram que cada tonelada de ARCO, com dimensões entre 0 e 40 mm, poderia absorver até 11 kg de dióxido de carbono. Xuan *et al*. (2016) compararam o efeito da carbonatação em duas faixas de agregados (5 a 10 mm e 10 a 20 mm) e concluíram que britas de menor granulometria capturaram maiores teores de CO_2 (0,81%) quando comparadas as de maior granulometria (0,66%). Ghacham *et al*. (2017) estudou o potencial de absorção de carbono para diferentes granulometrias moídas de agregados em pó de concreto fino (<500 μm), obtendo 0,057 g CO_2/g, 0,043g CO_2 /g e 0,034g CO_2/g para 32,60 μm, 33,31 μm e 253,25 μm por grama de agregado fino, respectivamente.

Além disso, propriedades diversas como umidade, tempo de ensaio e teor de cimento dos RCD foram consideradas e, a partir de suas análises, Fang *et al*. (2017) concluíram que a eficiência média de sequestro de carbono pela carbonatação é de aproximadamente 18%, evidenciando como a carbonatação é um método eficiente para captura de carbono. Para estudar a influência das propriedades na captura de carbono, Kaliyavaradhan *et al*. (2022) propuseram

pó (RPC), utilizando análise de variância (ANOVA) e considerando a influência da umidade (representada na relação água-sólido (p/s)) e o tempo de carbonatação (t). A RPC foi curada em câmara de cura a 20 °C, 65% UR e 20% de concentração de CO_2. A maior captação de CO_2 foi de 2,817% (28,17g de CO_2/kg de cimento) para relação água/cimento (a/c) de 0,4 e tempo de exposição de 90 horas. Foi obtido na análise ANOVA o resultado de 0,971, comprovando que as variáveis umidade e tempo de exposição a carbonatação são variáveis importantes no processo de captura de carbono.

Em teoria, a capacidade de captura de carbono através de materiais cimentícios pode ser calculada por composições químicas de seus constituintes, mostrada na Equação 5 (Huntzinger *et al*., 2009; Xuan; Zhan; Poon, 2018a).

$$\text{Absorção teórica (Th) de } CO_2\% = 0{,}785CaO - 0{,}440CaCO_3 - 0{,}550SO_3 + 1{,}091MgO + 1{,}420Na_2O + 0{,}935K_2 \quad (5)$$

A Equação 5 assume que todos os íons cálcio presentes na mistura cimentícia podem precipitar, formando íons carbonato (Xuan; Zhan; Poon, 2018b). No entanto, Wang *et al*. (2022) concluíram que a taxa de sequestro CO_2 teórica é inviável devido ao fato de o cálcio hidratado nas moléculas de C-S-H não participar totalmente das reações de carbonatação. Portanto, assume-se que 75% do cálcio está disponível para carbonatação (Pade; Guimaraes, 2007; Wang; Xiao; Duan, 2022).

Considerando a aplicação do RCD para captura de CO_2, Zhang *et al*. (2020) estimaram o potencial de sequestro de carbono nos próximos anos considerando duas situações, a manutenção do cenário real e a implementação de projetos CCS/CCUS planejados em todo o mundo pela IEA até 2035 (IEA, 2016). Os resultados obtidos comprovaram o grande potencial de captura de carbono pois o CO_2 sequestrado aumentaria de 1558 megatoneladas (considerando o cenário atual) para 4526 megatoneladas até 2035. Em outro estudo, Davis, Caldeira e Matthews (2010) estimaram que as emissões anuais de CO_2 associadas à infraestrutura em todo o mundo seriam de 115 bilhões de toneladas (Bt) de 2010 a 2060, sendo o maior projeto CCS/CCUS avaliado até o momento.

2.2.3. Influência da carbonatação nos agregados RCD

A literatura relata maiores teores de porosidade nos agregados RCD em relação aos naturais devido ao processo de obtenção, em que ocorre britamento de estruturas de concreto, gerando micro trincas e rachaduras no material (Olorunsogo; Padayachee, 2002); e também pela maior

quantidade de microfissuras, trincas e a presença de duas ZTIs, a primeira entre o agregado original e a argamassa acoplada à sua superfície e a segunda entre a argamassa adesiva e a nova matriz cimentícia (Shi *et al*., 2016). Devido aos maiores teores de porosidade e materiais finos presentes nos agregados reciclados, a literatura relata diminuição da performance dos agregados reciclados, impactando propriedades físicas, mecânicas e durabilidade (Kou; Poon, 2012).

Nesse sentido, a literatura destaca que o processo de carbonatação melhora o desempenho de concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados (Xuan; Zhan; Poon, 2016; Zhan *et al*., 2014; Zhang *et al*., 2015a). Esse processo é produto do preenchimento dos poros dos agregados com cristais de $CaCO_3$ produzidos pela reação entre CO_2 atmosférico e $Ca(OH)_2$ (Tam; Butera; Le, 2021; Xuan; Zhan; Poon, 2016; Zhang *et al*., 2020). Como resultado, reduz-se o índice de vázios, diminuindo a porosidade, contribuindo para o fortalecimento do material (Li *et al*., 2020; Russo; Lollini, 2022; Tam *et al*., 2021) e melhorando propriedades mecânicas (Tam; Butera; Le, 2021; Xuan; Zhan; Poon 2016) e a durabilidade (Evangelista; De Brito, 2010; Kou; Zhan; Poon, 2014; Russo; Lollini, 2022).

No que se refere às propriedades mecânicas, Tam *et al*. (2021) compararam o efeito da carbonatação em agregados reciclados graúdos em 30, 50 e 100% de substituição. Para os referidos teores, os agregados RCD carbonatados apresentaram aumento na resistência à compressão (10, 15 e 20%), tração (9, 15 e 20%) e flexão (10, 17 e 22%) em relação aos agregados RCD não carbonatados, respectivamente. Além disso, Li *et al.* (2022) observaram melhorias nas mesmas propriedades comparando agregados ARCO, relatando aumento entre 13,1% a 32,9% para resistência a compressão, 9,2% a 37,1% a resistência à tração e 16,2% a 50,8% a resistência à flexão, respectivamente.

Considerando durabilidade, a literatura (Gomes *et al*., 2023; Kou; Poon, 2012; Li; Mo; Unluer, 2022) relata melhorias quando comparados agregados RCD carbonatados e não carbonatados. Li *et al*. (2022) destacam melhorias de 43,5% na permeabilidade; 20,7% na absorção de água; diminuição de 19,7% quanto à profundidade de carbonatação e aumento contra resistência à infiltração de infiltração de cloretos entre 33 e 64%

2.3. MÉTODOS PARA QUANTIFICAR A ABSORÇÃO DE CO_2

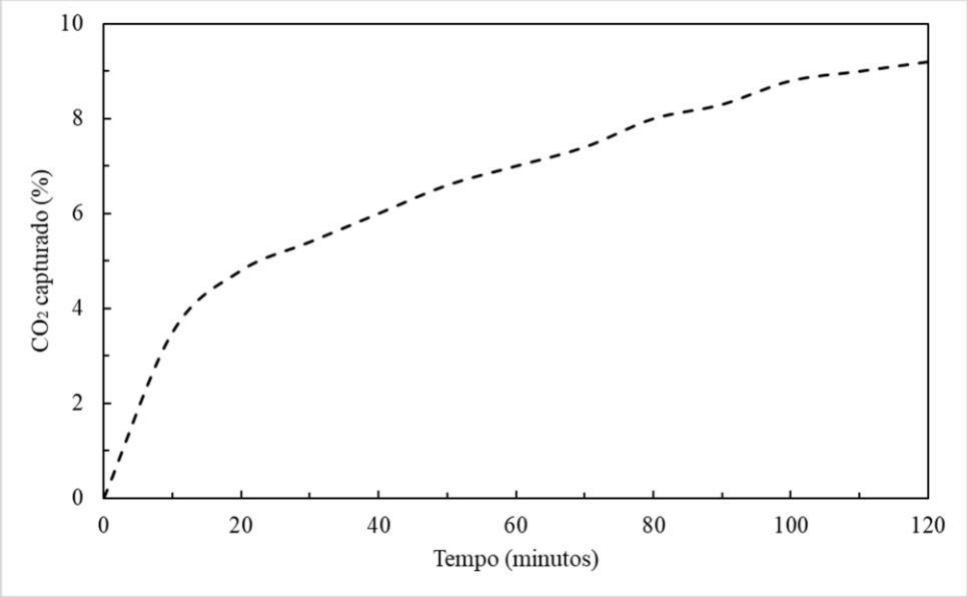
He *et al*. (2020) descreveram as principais técnicas de medição aplicadas para quantificar dióxido de carbono absorvido por materiais cimentícios. Os principais métodos são variação de massa e ensaio de termogravimetria (TGA). Além disso, autores utilizaram difração de raios X

(DRX), Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR) microscopia eletrônica de varredura (MEV) e testes de porosidade para identificar a microestrutura dos agregados as alterações ocorridas devido ao processo de carbonatação (Da Silva *et al*., 2022; Tam; Butera; Le, 2020).

A metodologia mais simples para quantificar e absorver o CO_2 identificada na bibliografia selecionada foi o método de variação de massa, um método não destrutivo que quantifica o teor de CO_2 pela pesagem dos agregados secos antes e após a cura do CO_2 (Li; Wu, 2022; Liu; Meng, 2021; Xuan; Zhan; Poon, 2016; Zhan *et al*., 2014). O método de ganho de massa mede diferença de massa antes e depois do processo de carbonatação. Esse método consiste em tomar medidas cumulativas do incremento através da cura de CO_2, representando a taxa de sequestro de CO_2 ao longo do tempo (Rostami; Shao; Boyd, 2011). No início do método, a amostra de RCD é pesada e anotada sua massa (M_2). Após isso, a amostra é levada à estufa durante 24 horas à temperatura de 100°C para perda de toda umidade e, após esse processo, pesada para determinação da massa de água perdida (Mw). Em seguida, a amostra é colocada em uma câmara de carbonatação e carbonatada. Após esse processo, é anotada a massa final da amostra (M_1). Para avaliar o percentual de CO_2 capturado, divide-se o valor pela massa de materiais reativos ao CO_2, como por exemplo o teor de argamassa presente nas superfícies dos agregados reciclados (M_3). A absorção de dióxido de carbono pode ser calculada pela Equação 6. Além disso, a curva de desenvolvimento de massa da amostra de RCD para a absorção de carbono pode ser construída através deste método, representando a taxa de sequestro de CO_2 ao longo do tempo (Figura 3) (He; Shi; Poon, 2018).

$$\text{Absorção de } CO_2 \ (\%) = \frac{(1 + \text{á}) - 2}{3} \ 100 \qquad (6)$$

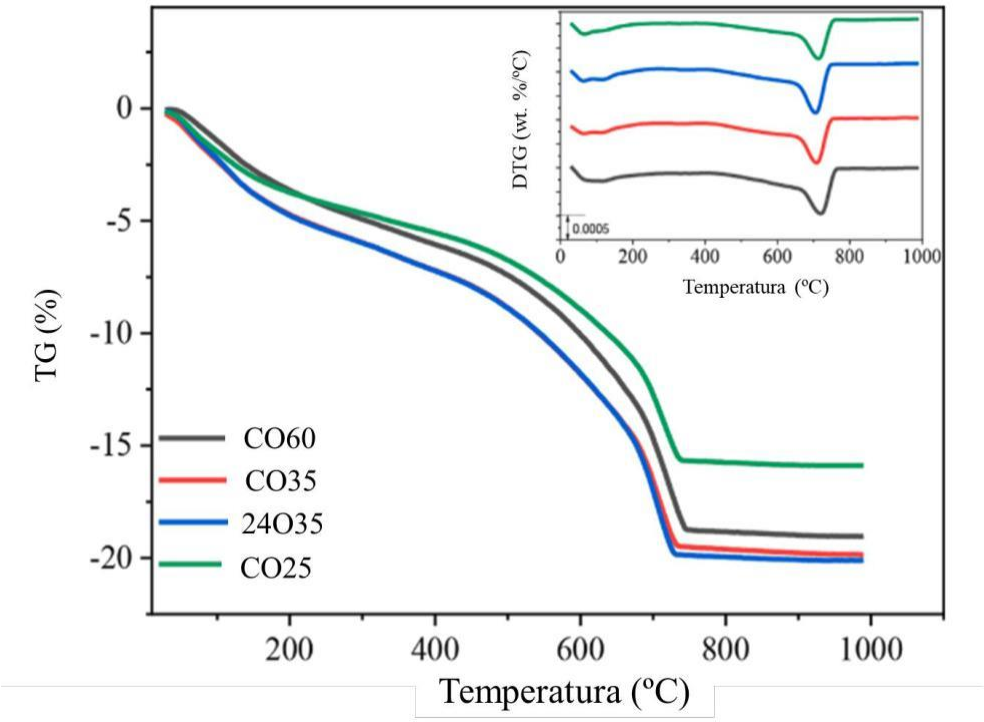
Figura 3 - Curva ganho de massa cumulativa de um produto de concreto durante 2h de cura de CO_2.



Fonte: Adaptado de He; Shi; Poon (2018).

O método de termogravimetria (TGA) ocorre pelo aquecimento de uma amostra de agregado reciclado submetida a uma taxa de aquecimento constante (He; Shi; Poon, 2018). O ensaio consiste em colher uma amostra com massa até 10 mg, triturá-la até a dimensão das partículas seja inferior a 100 μm e aquecê-la até 1000 °C a uma taxa de aquecimento projetada numa atmosfera de nitrogênio (N_2) dentro da câmara termogravimétrica (He; Shi; Poon, 2018). As amostras são aquecidas até altas temperaturas (1000°C) para averiguar a carbonatação através da decomposição dos cristais formados. As amostras são aquecidas até 520 °C para remoção da água e dos cristais de $Ca(OH)_2$ e, em seguida, aquecidas até 1000°C. A decomposição de cada fase cristalina pode ser identificada na plotagem das curvas de termogravimetria derivada (DTG). A diferença de peso entre 520 °C e 1000 °C representa a decomposição de cristais de $Ca(OH)_2$ (500 – 700 °C), de $CaCO_3$ pouco cristalino (520 – 720 °C) e de $CaCO_3$ bem cristalino (720 – 950 °C) expressos nas formas cristalinas de vaterita, aragonita, calcita e fases amorfas (Xuan; Zhan; Poon, 2016). Um exemplo de resultado do ensaio está expresso na Figura 4.

Figura 4 - Exemplos de curvas TGA e DTG.



Fonte: Adaptado de Nedunuri; Mohammed e Muhammad (2021).

O percentual de CO_2 capturado pode ser calculado através da Equação 7 (Jiang; Ling, 2020; Kaliyavaradhan; Ling; Hung, 2020).

$$CO_2 \text{ absorvido } (\%) = \frac{\Delta_{CO_2}}{m_{105°C}} \times 100 \qquad (7)$$

Onde $\Delta_m CO_2$ corresponde à perda de massa da amostra devido à decomposição do $CaCO_3$ (600 – 800ºC) e m105°C corresponde à massa da amostra seca dentro do TGA.

A partir do resultado obtido na equação 7, o potencial de absorção de CO_2 pelos agregados será calculado conforme a Equação 8.

$$CO_2 \text{ capturado } (\%) = \frac{CO_2(\%) - CO_2(\%)}{100 - CO_2(\%)} \times 100 \qquad (8)$$

Huntzinger *et al*. (2009) compararam o uso do método de mudança de massa e TGA e concluíram que os resultados de ambos os métodos apresentaram valores próximos, apesar de os resultados do método de mudança de massa serem ligeiramente maiores devido à variação de massa da amostra.

Embora o método TGA seja o mais utilizado para medir o sequestro de carbono, ele não consegue identificar as várias fases do carbonato de cálcio, sendo necessários métodos adicionais para fazer essa análise (He; Shi; Poon, 2018).

A espectroscopia no infravermelho é uma técnica que possibilita a identificação de componentes químicos e determinação das estruturas moleculares a partir do estudo da interação entre infravermelho com a matéria (Smith, 1999). A principal técnica denomina-se Espectroscopia Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) (Smith, 1999). A medição realizada denomina-se espectroscopia infravermelha, plotada em um gráfico que relaciona a intensidade das moléculas com radiação eletromagnética entre os comprimentos de onda de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} (Schubnell, 2017). Em materiais cimentícios, essa técnica é utilizada para identificar e caracterizar reações e a formação de novos produtos e materiais (Ramachandran; Beaudoin, 2002). No caso da captura de carbono, essa técnica é utilizada para investigar as diferenças entre as bandas dos materiais cimentícios antes e após o processo de carbonatação, avaliando as diferenças nas composições químicas do material influenciadas pela formação do $CaCO_3$.

A difração de raios X (DRX) é utilizada para indicar o teor cristalino $CaCO_3$ (He; Shi; Poon, 2018). O método é usado para distinguir diferentes fases de carbonato de cálcio (calcita, vaterita, aragonita) (Tu *et al*., 2016). Ele consiste na preparação de amostras como as utilizadas no método de ignição e na utilização de um difratômetro equipado com uma fonte de radiação de raios X, que emite esses raios e possibilita a quantificação das diferentes fases do carbonato de cálcio presente na matriz cimentícia através da identificação dos picos obtidos (Tu *et al*., 2016). Como o DRX pode distinguir as diferentes fases cristalinas de Ca^{2+}, normalmente é usado para complementar a análise TGA.

Para estudar a microestrutura dos materiais, utiliza-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). O MEV é um equipamento utilizado para identificar a microestrutura dos materiais (Tam; Butera; Le, 2020), permitindo que os pesquisadores visualizem detalhes e complexidades que são inacessíveis pela microscopia de luz (Abdullah; Mohammed, 2019). A resolução do MEV pode variar de 1 μm a 1 nm, fornecendo imagens e dados importantes da estrutura RCD (Vernon-Parry, 2000). Na literatura, a análise de MEV é utilizada em conjunto com outros métodos de forma complementar pois, aplicando o MEV antes e após a cura por carbono, é possível identificar alterações microestruturais ocorridas em materiais cimentícios devido ao processo de carbonatação, permitindo a identificação de diferentes fases do $CaCO_3$ (Ramachandran; Beaudoin, 2002; Shao *et al*., 2014) e a densificação das ZTI após a cura por carbono (Li *et al*., 2020; Lu *et al*., 2019; Wang *et al*., 2020).

2.4. CAPTURA DE CARBONO ATRAVÉS DOS RCD E RELAÇÃO COM MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO

Buscando o desenvolvimento sustentável, países têm tentado controlar as emissões de GEE e ajustar a economia existente visando o desenvolvimento sustentável baseado em baixas emissões de carbono (Zhou; Li, 2019). Para atingir este objetivo, duas opções propostas foram a imposição de impostos sobre as emissões e o desenvolvimento do regime de comércio de licenças de emissão, denominado mercado de crédito de carbono (ETS – Emission Trading System em inglês) Hua; Dong, 2019; Zakkour; Dixon; Cook, 2011).

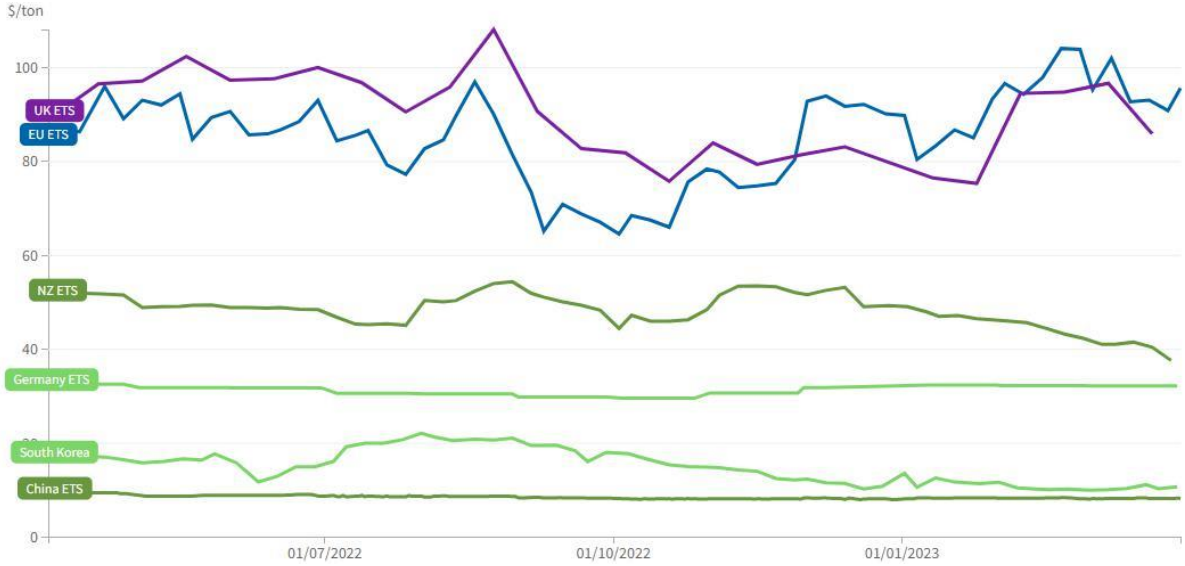
Segundo o Banco Mundial (2012), um ETS é um instrumento de precificação de carbono que limita a quantidade permitida de emissões de GEE e permite que as forças de mercado quantifiquem o preço do carbono através da comercialização dos direitos de emissão pelos emissores. A jurisdição do governo limita o nível total dos GEE (incluindo CO_2) através de licenças que são distribuídas a entidades (fontes de emissão) que devem resgatar licenças para cada tonelada emitida de CO_2, com a possibilidade de vender licenças não utilizadas ou comprar licenças adicionais (Worldbank, 2012).

O ETS tem sido apoiado por políticas internacionais como o "Protocolo de Quioto" (UNFCCC, 1998) e o Acordo de Paris (Delbeke *et al.*, 2019). O Acordo de Paris propôs maneiras de lidar com as mudanças climáticas após 2020, tendo mais de 170 países se comprometendo a manter o aumento da temperatura global dentro do limite de 2 °C. Para promover este objetivo, foram desenvolvidas medidas de financiamento do carbono com o objetivo de resolver de forma eficaz os problemas climáticos (Zhou; Li, 2019).

Financiamento de carbono é uma atividade de comércio e investimento baseada em unidades que representam "direitos de emissão de carbono" (UNFCCC, 2022). Mercados de crédito de carbono comercializam esses direitos na forma de "units", promovendo atividades comerciais e políticas financeiras de investimentos para reduzir as emissões de GEE e desenvolver projetos que limitem as emissões de CO_2 baseados nos comércios das units (Zhou; Li, 2019). Regulando o comércio das units, os mercados de comércio de emissões de CO_2 criam oportunidades para os países participantes alcançarem as metas de redução das emissões. O ETS pode ser dividido em duas categorias, o comércio de cotas, que visa metas de redução de emissões, e o comércio voluntário, que é a transação voluntária de redução de emissões de carbono para responsabilidade social (Zhou; Li, 2019). Acerca da efetividade do ETS, ressalta-se que o mercado de carbono tem sido importante para mitigar as mudanças climáticas e se

tornou uma importante ferramenta política para muitos países alcançarem reduções de emissões de baixo custo (Rodriguez Lopez; Engels; Knoll, 2017). A Figura 5 ilustra o histórico de cotação de alguns ETS existentes.

Figura 5 - Histórico de cotação das units de carbono.

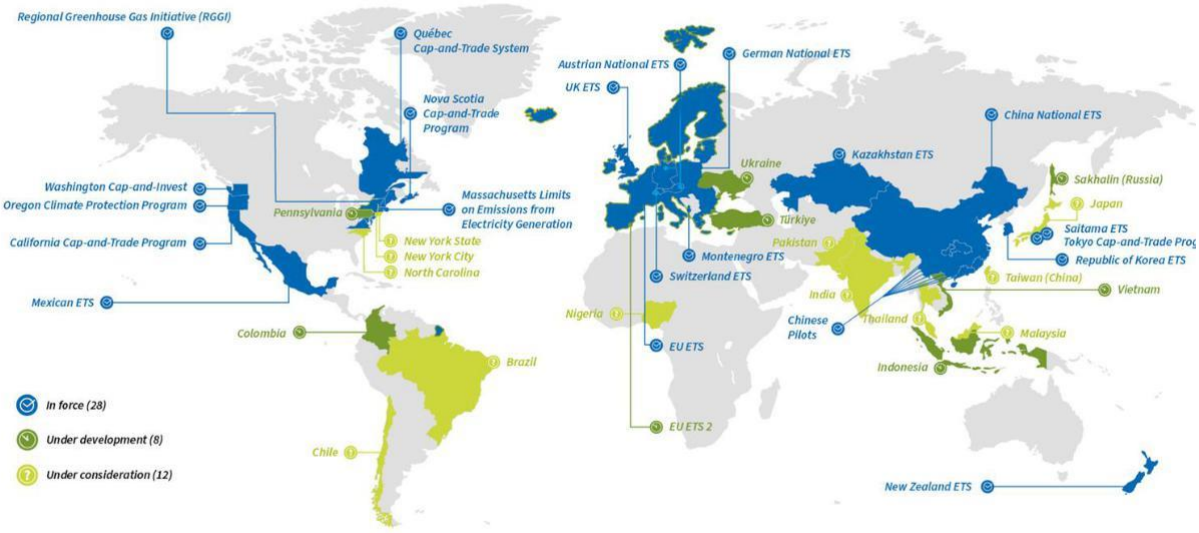


Fonte: ICAP (2022).

As entidades emissoras consideram o custo de suas emissões dentro de seus processos de produção e analisam a compra ou venda das licenças, criando um mercado de CO_2 que negocia a produção de carbono e incentiva sua redução (Asian Development Bank, 2018; OECD, 2013). As entidades consideradas geralmente são indústrias, construtoras, setor de energia, setor de transporte, aviação doméstica, resíduos e florestas, respectivamente (ICAP, 2022). Alguns dos ETS mais importantes são o Europeu (ETS da UE), o inglês (UK ETS), o neozelandês (NZ ETS), o Sul Coreano (K ETS), o Alemão (Germany ETS) e o ETS Nacional Chinês (China ETS) (ICAP, 2021; Worldbank, 2012).

Conforme exposto na Figura 6, a Parceria Internacional de Ação em matéria de Carbono (ICAP) (2023) informa que existam atualmente 26 mercados de carbono do regime de comércio de licenças de emissão (RCLE) em curso no mundo (cor azul), 9 em desenvolvimento (cor verde escuro) e 14 (cor verde claro) em consideração, totalizando 49 RCLE (ICAP, 2023a). O fato de já estarem em funcionamento 26 RCLE e mais 23 a estarem planejados para os próximos anos mostra que esse mercado do carbono é uma solução atrativa para limitar as emissões de gases com efeito de estufa.

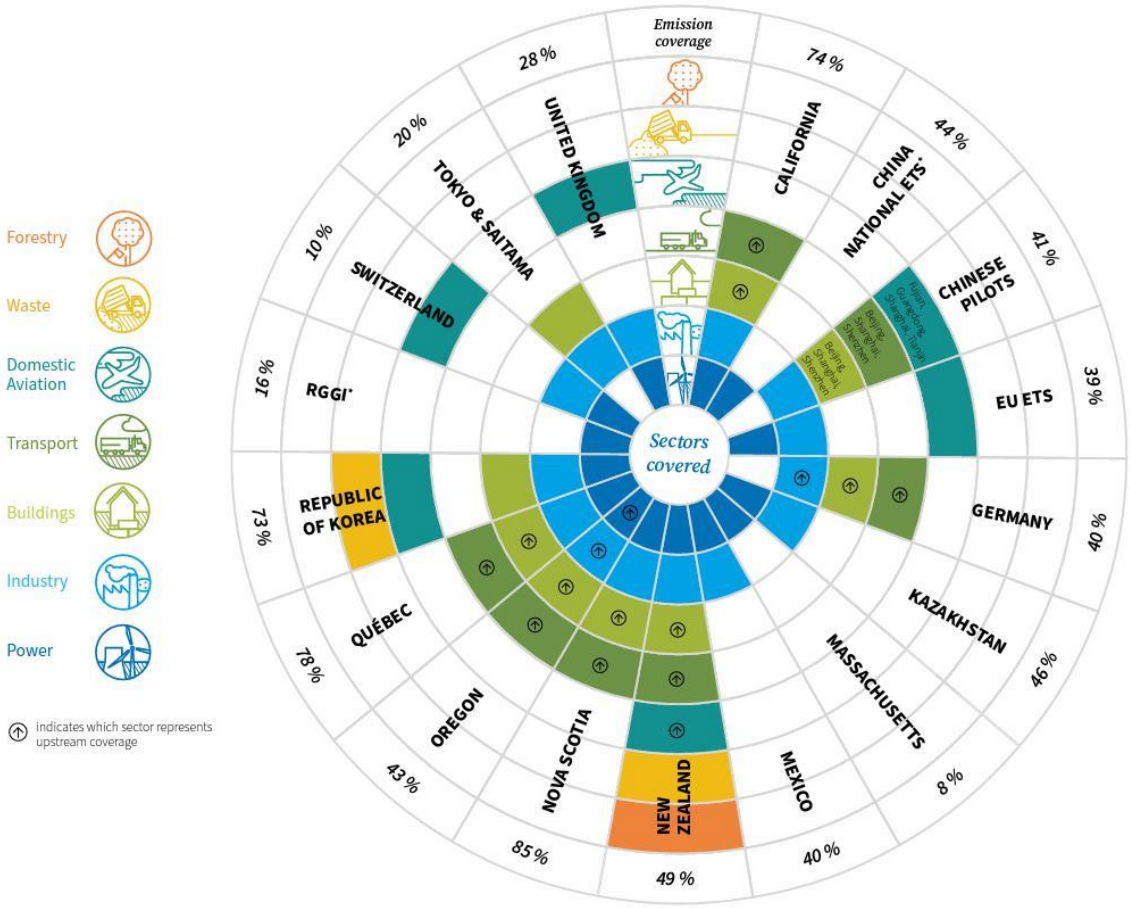
Figura 6 - Distribuição de mercados de crédito de carbono pelo mundo.



Fonte: ICAP (2022).

De acordo com o ICAP, apenas o ETS sul-coreano (KETS) e neozelandês (NZ ETS) cobrem as emissões dos setores de resíduos (Figura 7). No entanto, o KETS abrange apenas resíduos de madeira (Asian Development Bank, 2018) e o NZ ETS abrange os resíduos orgânicos produzidos em residências (NZ ETS, 2013), excluindo os resíduos de construção e demolição.

Figura 7 - Setores contemplados nos mercados de crédito de carbono existentes.



Fonte: ICAP (2022).

Embora a literatura evidencie o potencial de captura de CO_2 por RCD, não há artigos que considerem os materiais de RCD como uma estratégia a ser implementada no ETS. Os materiais RCD poderiam ser aplicados no ETS em duas situações: calculando o potencial de captura de CO_2 por sua aplicação em edifícios e aplicando um dos modelos propostos, como apresentado por Kaliyavaradhan *et al*. (2022) por exemplo, estimando o carbono capturado; ou utilizá-lo para estimar a absorção de carbono e aplicá-lo diretamente no ETS como uma unit para o setor da construção, passível de ser comercializada pelo setor da construção nos mercados de crédito de CO_2.

No Brasil, há planos para a criação de um mercado de carbono para redução de emissões de carbono (ICAP, 2022). Em 2021, dois projetos paralelos foram desenvolvidos para a implantação de um ETS, um focado no setor elétrico (Brasil, 2021a) e outro vinculado a legislações que visam reduzir as emissões de CO_2 e a criação do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) (Brasil, 2021b). No entanto, nenhum destes projetos contempla resíduos

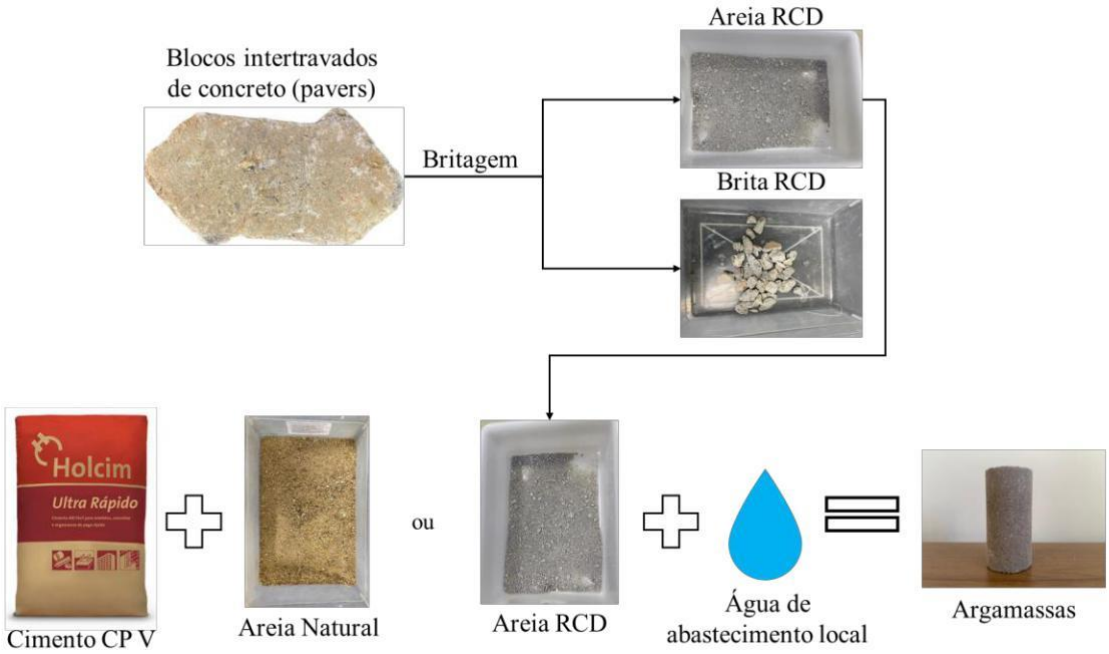
de construção e demolição como material para criação de units a serem comercializadas nos ETS. Essa poderia ser uma alternativa viável para gerenciar as 48 milhões de toneladas de RCD coletados pelo Brasil (Abrelpe, 2022), contribuindo para o cumprimento da agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável (Brasil, 2022).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Foram utilizados agregados reciclados produzidos a partir de blocos intertravados de concreto nas frações miúdas e graúdas para o sequestro de CO_2 atmosférico. Foram empregados agregados miúdos convencionais na produção das argamassas de referência. O resumo dos materiais utilizados na pesquisa está resumido na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma dos materiais utilizados.



Fonte: Do autor

Os agregados reciclados foram obtidos a partir da britagem de blocos intertravados de concreto, pavers, com resistência média à compressão de 46,32 MPa, classificados conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013) na classe de até 35 MPa. Os blocos intertravados foram retirados do CEFET-MG campus VIII, unidade Varginha (Figura 9). Estima-se que esses blocos tenham sido instalados em 2011, na inauguração do campus VIII, ficando expostos ao ambiente até 2022, ano de início das reformas no CEFET-MG unidade Varginha. Eles foram transportados até a usina de reciclagem de resíduos da construção civil ECOVIA, localizada no município de Varginha-MG.

Figura 9 - Pavers utilizados para produção dos agregados reciclados.



Fonte: Do autor

Em seguida, os pavers foram britados e segredados nas granulometrias miúda (0,15 - 4,75mm) (Figura 10a) e graúda (acima 4,75mm) (Fig. 10b) pelo britador da usina (Fig. 10c), os quais foram separados, coletados e devidamente ensacados para evitar contato com o CO_2 atmosférico e transportados para o CEFET-MG campus II.

Figura 10 - Areia RCD (a), brita RCD (b) e britador da usina (c).



Fonte: Do autor.

Para avaliar a capacidade de sequestro de carbono foram utilizados os agregados produzidos de RCD nas frações miúdas e graúdas. As Figuras 11a e 11b ilustram os agregados RCD ensaiados.

Figura 11 - Agregados reciclados britados dos pavers (a) areia e (b) brita.



Fonte: Do autor.

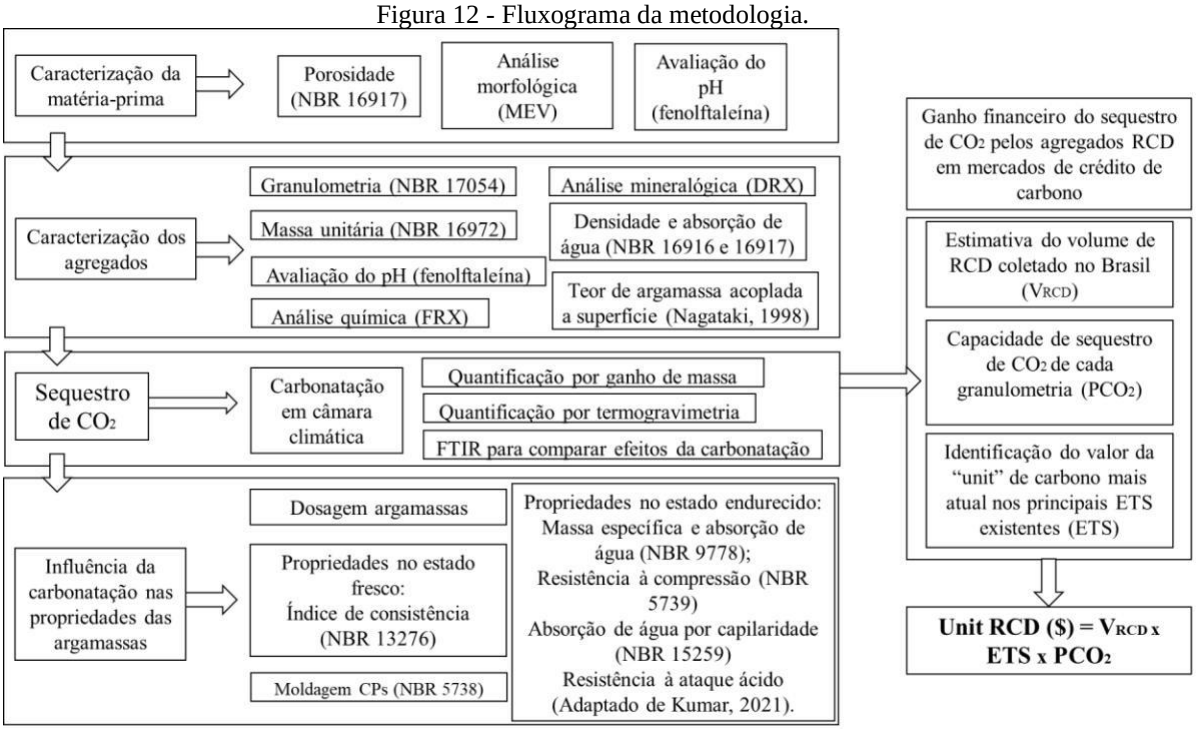
Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021a), os agregados produzidos se enquadram na classificação de agregado reciclado constituído por resíduos de concreto (ARCO). Conforme a referida norma, agregados tipo ARCO pode substituir agregados convencionais em até 20% da massa em artefatos e concretos para fins estruturais das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014), justificando sua relevância.

Para avaliar a influência da carbonatação nas propriedades das argamassas foi escolhida a utilização apenas da fração miúda dos agregados reciclados e o cimento CPV ARI PLUS do grupo CSN/LafargeHolcim por ser um cimento com maiores teores de clínquer. O uso do CPV ARI PLUS possibilitou análises mais controladas relativas à influência da carbonatação nos agregados. Foram utilizados para a produção das argamassas de referência areia média lavada produzida na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

3.2. MÉTODOS

A metodologia do trabalho foi dividida em cinco macro etapas para organização da pesquisa. As etapas foram: (i) caracterização da matéria prima, (ii) caracterização dos agregados, (iii) sequestro de CO_2, (iv) influência da carbonatação nas propriedades das argamassas e, (v) potencial de ganho financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados RCD em mercados de crédito de carbono. Um resumo das principais etapas da metodologia está expresso na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Do autor.

3.2.1. Caracterização da matéria prima

Foram realizados ensaios para determinar as propriedades dos pavers. Primeiramente, foi avaliada a porosidade para verificar se o interior dos blocos intertravados entrou em contato com o CO_2 atmosférico, consumindo os íons Ca^{2+} presente no material cimentício no interior do material e impossibilitando a carbonatação. Essa investigação foi realizada a partir dos ensaios de definição de densidade através do método de Arquimedes, aplicação de fenolftaleína para avaliar a alcalinidade do concreto e análise da microestrutura com microscopia eletrônica de varredura.

O ensaio de densidade pelo princípio de Arquimedes foi adaptado da NBR 16917 (ABNT, 2021b), norma que utiliza deste princípio para determinar a densidade de agregados graúdos. As amostras foram imersas em água durante 24 horas (Figura 13a). Em seguida, foram pesadas na balança nas condições saturada superfície seca e hidrostática. Após as pesagens, foram levadas à estufa durante 24 horas e pesadas na condição seca (Figura 13b). A partir do ensaio, foi calculada a densidade dos pavers nas condições saturadas e secas, possibilitando estimar a porosidade do material.

Figura 13 - Preparo das amostras para ensaio de Arquimedes (a) imersão dos pavers em água e (b) secagem dos pavers em estufa.



Fonte: Do autor.

A alcalinidade do interior dos pavers foi avaliada a partir da aplicação de fenolftaleína após seu rompimento. Os blocos foram rompidos na máquina de ensaios universal EMIC 2000kN e, imediatamente após, foi aplicada a fenolftaleína.

A análise morfológica do material foi realizada por meio da microscopia eletrônica de varredura utilizando o equipamento Hitachi TM3000 sob o baixo vácuo com detector de elétrons retroespalhados e tensão de aceleração de elétrons de 15k. Para o ensaio, amostras dos pavers foram preparadas, sendo cortadas até a dimensão necessária para inserção no MEV (4 cm), lixadas na politriz e polidas com alumina (Al_2O_3).

3.2.2. Caracterização dos agregados

Os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados química, física e mineralogicamente. A caracterização química investigou o potencial de carbonatação pela Espectrometria de fluorescência de Raios-X em energia dispersiva (FRX) a partir da presença de cálcio nos agregados, enquanto a caracterização mineralógica por difração de raios X foi utilizada para confirmar as correspondentes estruturas cristalinas, tais como silicato de cálcio hidratado, portlandita e calcita. O teor de argamassa acoplado foi utilizado para estimar o teor de pasta cimentícia presente nos agregados reciclados, os quais são os principais alvos da carbonatação devido a maior concentração do cálcio. Os ensaios para determinação das propriedades físicas

foram realizados conforme os padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), cujos ensaios das referidas normas estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 - Normas dos ensaios utilizados para caracterização física dos agregados.

Referência	Norma	Ensaio
(ABNT, 2021c, 2021b)	NBR ABNT 16916 e 16917	Agregado miúdo – densidade e absorção de água; Agregado graúdo – Determinação da densidade e absorção de água.
(ABNT, 2021d)	NBR ABNT 16972	Massa unitária e índice de vazios
(ABNT, 2022ª)	NBR ABNT 17054	Agregados – Determinação da composição granulométrica – método de ensaio

Fonte: Do autor.

O pH dos agregados foi avaliado a partir da aplicação de uma solução de fenolftaleína no material. A análise química dos agregados foi identificada através de espectrometria de Florescência de raios X em energia dispersiva da marca Shimadzu EDX-720. A análise mineralógica dos materiais foi realizada no difratômetro de raios X da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, com tubos de raios X de cobre com tensão de 40kV e corrente elétrica de 30,0 mA, ângulo de varredura de 2θ de 10 a 70º e passo de 0,02º com tempo de permanência de 3 segundos. O difratrograma foi plotado por meio do software Origin 2023 e a cristalinidade dos precursores foi calculada utilizando o refinamento Rietveld por meio do software Match!3 versão 3.15. Os picos foram identificados com a base de dados Crystallography Open Database (COD) revisão nº 211633. As modificações estruturais após a carbonatação foi realizada pelo espectroscópio de infravermelho com transformada de Fourier ThermoFischer Scientific modelo Nicolet Summit PRO. A análise FTIR foi realizada em uma faixa de número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} com resolução espectral de 0,4 cm^{-1}.

O teor de argamassa acoplado à superfície dos agregados reciclados foi determinado conforme estudos na literatura (Nagataki; Saeki; Lida, 1998; Seo; Choi, 2014): amostras secas de 0,5 kg dos agregados foram imersas em solução aquosa com 10% de ácido clorídrico (HCl). Os agregados foram expostos durante 24 horas, sendo a solução trocada 5 vezes. Após a perda de massa ter sido observada pela decomposição da pasta cimentícia nos agregados RCD, os agregados foram secos em estufa durante 24 horas e então pesados. O percentual de argamassa acoplado aos agregados RCD foi calculado pela Equação 9.

$$\text{Teor argamassa acoplado (\%)} = \frac{\text{ó á}}{} \times 100 \quad (9)$$

3.2.3. Capacidade de sequestro de CO_2 dos agregados RCD.

Ambas as frações dos agregados reciclados miúdo e graúdo foram ensaiados em duas condições distintas: como recebido e após carbonatação na câmara climática. A câmara climática utilizada foi o modelo UUC-RH-STDCO2-200/2018 da empresa Bass. Os parâmetros de ensaio adotados foram adaptados de Suescum-Morales *et al*. (2021) e seguiram duas condições distintas: a primeira adotou temperatura de 30 $\pm$ 2°C, umidade entre 65 $\pm$ 5% e concentração de CO_2 atmosférica ($\approx$ 0,04%), enquanto a segunda considerou o valor máximo do equipamento, 5% de CO_2 dentro da câmara. Ademais, foi adicionada água nas amostras nos teores de 0%, 30% e 50% da absorção de água dos agregados RCD calculada para potencializar a capacidade de sequestro de carbono.

Num primeiro momento, os agregados foram ensaiados para avaliar o comportamento de sequestro considerando as condições da câmara visando identificar os estágios de carbonatação acelerada, lenta e estável. Após os ensaios preliminares, foi adotado o tempo de 7 dias de exposição das amostras de ambos as granulometrias.

As amostras foram inicialmente pesadas e espalhadas em bandejas com massa conhecida de forma a garantir a não sobreposição de partículas, promovendo condições de exposição análogas para garantir a carbonatação idêntica das amostras (Figura 14a). Nos casos de adição de umidade, água foi acrescida (Figura 14b) e as amostras foram homogeneizadas de forma a garantir umedecimento total (Figura 14c). Em seguida, os agregados foram dispostos dentro da câmara climática e a cada 24 horas, as amostras foram retiradas da câmara, pesadas e, nos casos de acréscimo de umidade, a água foi adicionada nos teores de 30% e 50% da umidade dos agregados RCD e homogeneizada até atingir a data estipulada de 7 dias.

Figura 14 - Preparo amostras pré-inserção na câmara climática (a) amostra de areia RCD seca, (b) adição de água relativo ao teor de água absorvido da areia RCD, e (c) amostra de areia RCD após homogeneização da água adicionada.



Fonte: Do autor.

Para cálculo do teor de CO_2 capturado foram empregados os métodos de pesagem de massa e termogravimetria diferencial (TGA/DTG). O método de pesagem por massa seguiu as 31

diretrizes encontradas na literatura (He; Shi; Poon, 2018; Huntzinger *et al*., 2009; Liu; Meng, 2021) e calculou o teor de CO_2 capturado com base na Equação 6. A análise termogravimétrica foi realizada por meio do equipamento STA7000 series da marca Hitachi com cadinho de alumínio. A metodologia foi adaptada de Mazurana *et al*. (2022), com taxa de aquecimento de 20°C/min, fluxo do gás nitrogênio de 20 ml/min e aquecido de 20°C a 1000°C. Para remover a umidade, as amostras foram pré-aquecidas dentro do equipamento durante 10 minutos à temperatura de 105°C. O sequestro de CO_2 foi calculado pelas Equações 10 e 11, adaptadas da literatura (Jiang; Ling, 2020; Kaliyavaradhan; Ling; Hung, 2020).

$$CO_2 \text{ estimado } (\%) = \frac{\Delta_{\ 2}}{105^{\circ}} \text{ x } 100 \qquad (10)$$

Onde $\Delta_m CO_2$ corresponde à perda de massa da amostra devido à decomposição do $CaCO_3$ (520 – 950°C) e m105°C corresponde à massa da amostra seca dentro do TGA à 105°C.

$$CO_2 \text{ capturado } (\%) = \frac{_{2(\%)} - _{2(\%)}}{100 - _{2\ \ (\%)}} \text{ x } 100 \qquad (11)$$

Onde CO_2 estimado corresponde à perda de massa da amostra calculada na Equação 10 e CO_2 inicial corresponde à massa da amostra calculada antes de ser inserida na câmara climática.

3.2.4. Influência da carbonatação nas propriedades de argamassas recicladas.

Para avaliar a influência da carbonatação dos agregados reciclados miúdos quando aplicados a materiais cimentícios, foram dosadas 5 misturas de argamassas com diferentes percentuais de substituição: 0% de agregado reciclado (REF), 50% de substituição de agregado natural pelo reciclado não carbonatado (50% nRCD), 100% de substituição de agregado natural pelo reciclado não carbonatado (100% nRCD), 50% de substituição de agregado natural pelo reciclado carbonatado (50% cRCD) e 100% de substituição de agregado natural pelo reciclado carbonatado (100% nRCD), como exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Argamassas dosadas para avaliar o efeito da carbonatação nos agregados reciclados.

Legenda	Condição
Referência (REF)	0% agregado reciclado
Substituição parcial não carbonatada (50% nRCD)	50% agregado reciclado não carbonatado e 50% agregado natural
Substituição total não carbonatada (100% nRCD)	100% agregado reciclado não carbonatado
Substituição parcial carbonatada (50% cRCD)	50% agregado reciclado carbonatado e 50% agregado natural
Substituição total carbonatada (100% cRCD)	100% agregado reciclado carbonatado

Fonte: Do autor.

A influência da carbonatação nos agregados RCD foi avaliada conforme os padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e trabalhos na literatura, cujos ensaios estão expressos na Tabela 4. Foram moldados corpos de prova cilíndricos nas dimensões 5x10cm e o ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 7 e 28 dias, enquanto os demais foram ensaiados aos 28 dias. O ensaio de durabilidade contra ataque ácido foi conduzido conforme o trabalho de Kumar e Prasad (2019): os corpos de prova de argamassa foram imersos em uma solução de 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) durante 7 dias, sendo a massa das amostras pesadas antes e após o processo. A diferença de massa dos corpos de prova pré e pós ensaio registrou a resistência das argamassas contra o ataque de H_2SO_4. Ressalta-se a adoção desse método pelo fato das normativas do Brasil não apresentar ensaio relativo à durabilidade de compósitos cimentícios contra ataque de ácido sulfúrico.

Tabela 4 - Normas dos ensaios das propriedades das argamassas.

Referência	Norma/Paper	Ensaio
(ABNT, 2019)	ABNT NBR 7215	Moldagem dos corpos de prova 5x10cm e definição da resistência à compressão
(ABNT, 2016)	ABNT NBR 13276	Ajuste da trabalhabilidade e índice de consistência das argamassas
(ABNT, 2009)	ABNT NBR 9778	Massa específica e absorção de água das argamassas endurecidas
(ABNT, 2012)	ABNT NBR 9779	Absorção de água por capilaridade das argamassas endurecidas
(Kumar; Prasad, 2019)	Influência de materiais cimentícios suplementares nas características de resistência e durabilidade de concretos	Durabilidade de argamassas pela inserção de corpos de prova a solução de 5% de H_2SO_4 durante 7 dias

Fonte: Do autor.

3.2.5. Potencial financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados RCD em mercados de crédito de carbono.

A partir dos estudos da viabilidade da captura de CO_2 pelos agregados reciclados de concreto foi calculado o potencial de sequestro de carbono por esses materiais. Esse valor foi multiplicado ao dado mais atual relativa à coleta de RCD no Brasil, segundo o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (2022). O resultado dessa operação corresponde ao potencial de sequestro de carbono pelos RCD gerados no Brasil. Em seguida, foi realizada uma cotação do valor da “unit” de carbono comercializada em diversos ETS para se obter um valor médio do

direito de emissão de carbono. Com essa informação, o potencial de captura de carbono pelos agregados RCD será quantificado a partir da Equação 12.

ú ($) = 2 ∗ ∗ (12)

Os dados referentes ao valor das units do mercado de crédito de carbono foram retirados da ICAP (ICAP, 2022b), sendo considerados os valores na data mais atual possível para a análise e que contemplam atividades associadas à construção civil, identificado pelo código "buildings". Os ETS considerados estão registrados na Tabela 5.

Tabela 5 - ETS que comercializam CO_2 capturado considerando o setor da construção civil.

Localização	ETS
Austria, nacional	Austrian National Emissions Trading System
Nova Escócia, Canada	Canada – Nova Scotia
Québec, Canada	Canada – Québec Cap-and-Trade System
Beijing, China	China – Beijing pilot ETS
Shanghai, China	China – Shanghai pilot ETS
Alemanha, nacional	German National Emissions Trading System
Saitama, Japão	Japan - Saitama Target Emissions Trading System
Tokyo, Japão	Japan – Tokyo Cap-and-Trade Program
Coreia do Sul, nacional	Korea Emissions Trading Scheme
Nova Zelândia, nacional	New Zealand Emissions Trading Scheme
California, Estados Unidos	USA – California Cap-and-Trade Program

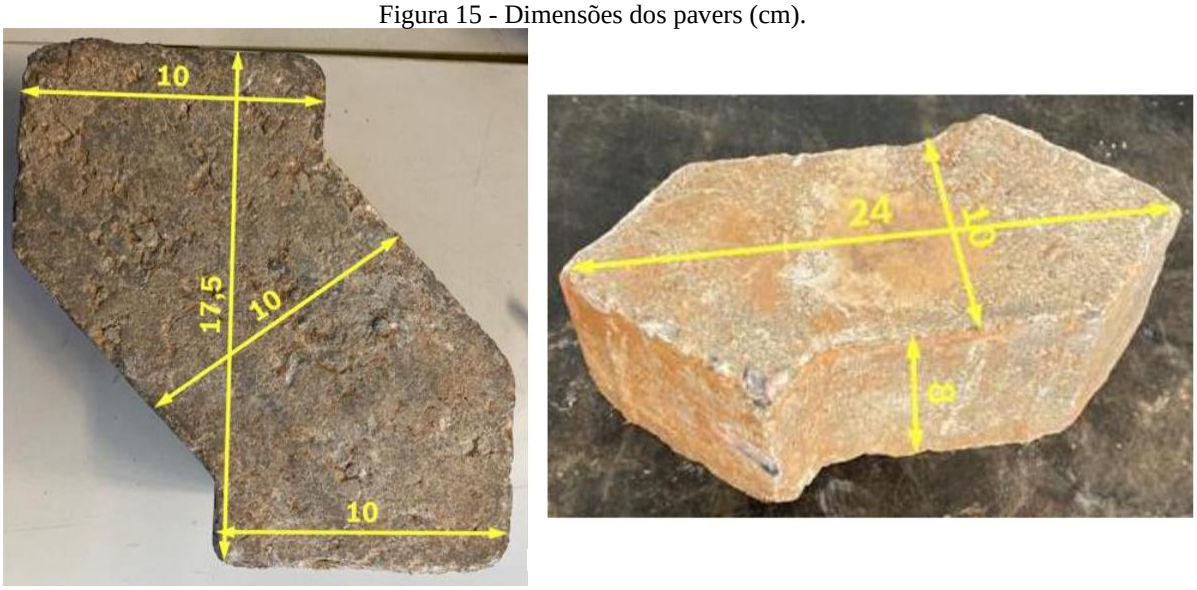
Fonte: Do autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da matéria prima

Os pavers ensaiados são do tipo Pavi S, com dimensões que seguem os padrões requeridos na NBR 9781 (ABNT, 2013). As dimensões, em centímetros (cm), estão ilustradas na Figura 15.

Figura 15 - Dimensões dos pavers (cm).



Fonte: Do autor.

Os resultados do ensaio de densidade dos pavers estão expressos na Tabela 6. Os resultados indicaram que a densidade média dos pavers nas condições seca e saturada superfície seca foram 2,19 g/cm^3 e 2,27 g/cm^3, respectivamente. A diferença das condições entre os poros preenchidos com ar e água ser de apenas de 0,08 g/cm^3 permite aferir a existência de poros nos blocos intertravados. O resultado de ABS média de 3,80% contribui com essa afirmação devido ao fato de corresponder ao percentual de água que preencheu os poros.

Tabela 6 - Densidade dos pavers de concreto.

Agregado	Densidade seca (ρs) [g/cm^3]	Densidade saturada superfície seca [g/cm^3]	Absorção água (ABS) [%]
Amostra 1	2,22	2,29	3,15
Amostra 2	2,16	2,26	4,46
Média	2,19	2,27	3,80

Fonte: Do autor.

O resultado da aplicação da fenolftaleína está indicado na Figura 16, que ilustra o fato de que o interior dos blocos manteve o pH alcalino devido à presença dos íons Ca^{2+} provenientes da matriz cimentícia, evidenciados pela coloração roxa da fenolftaleína. Entretanto, nota-se que

a borda lateral direita não apresentou o mesmo comportamento, tornando evidente o pH menos alcalino, decorrente da reação entre o carbono atmosférico e os componentes alcalinos da argamassa.

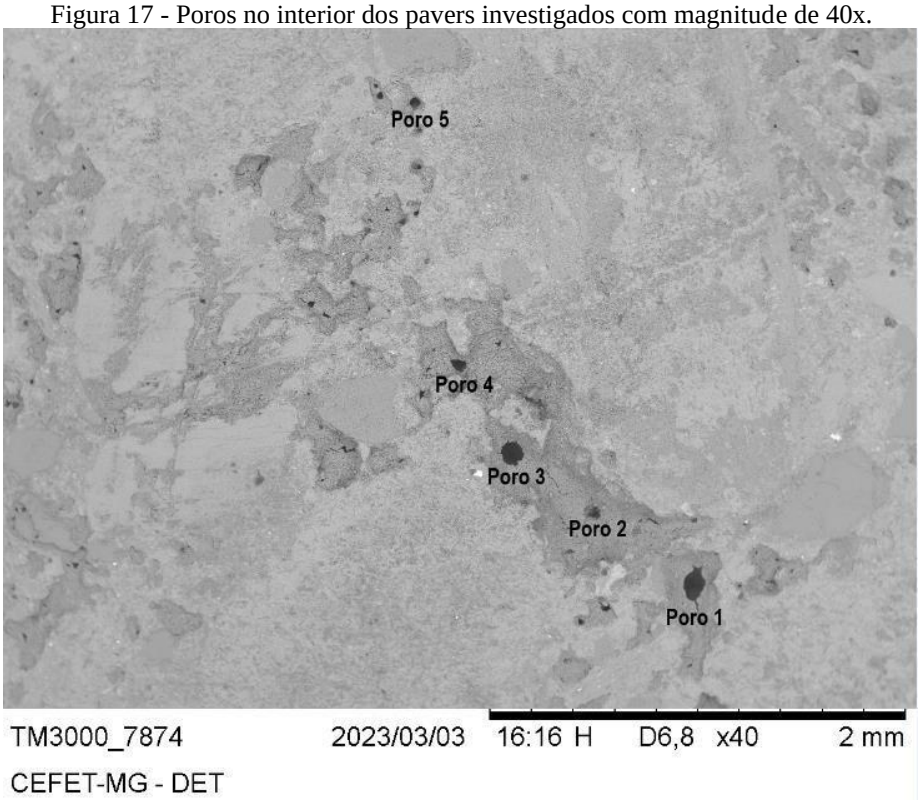
Figura 16 - Alcalinidade no interior do pavers.



Fonte: Do autor.

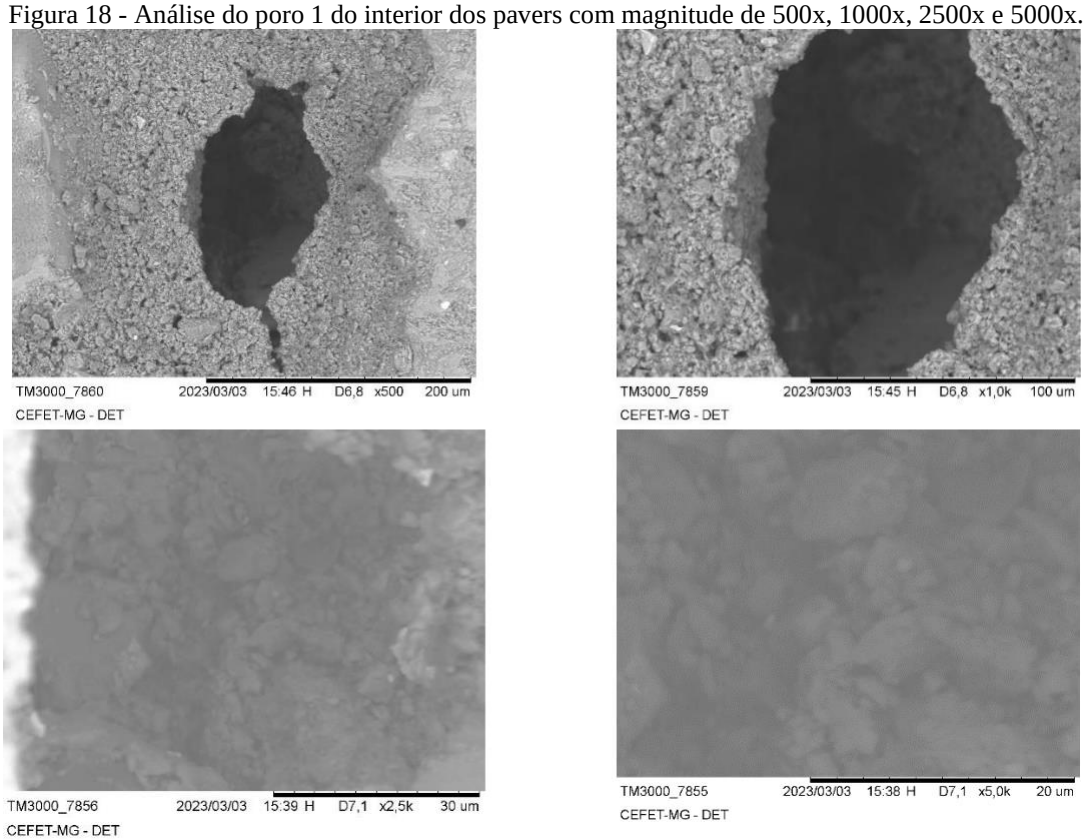
Os resultados dos ensaios do MEV estão expostos das Figuras 17-19. Os resultados da Microscopia revelaram que a amostra apresenta poros visíveis à resolução de 500x. Conforme aumenta-se a resolução (x2000 e x5000), observa-se que os poros estão preenchidos. A partir da análise MEV sugere-se a presença de poros no interior dos pavers que, em conjunto com os resultados de densidade e análise do pH por fenolftaleína, possibilita o potencial de carbonatação dos blocos intertravados.

Figura 17 - Poros no interior dos pavers investigados com magnitude de 40x.



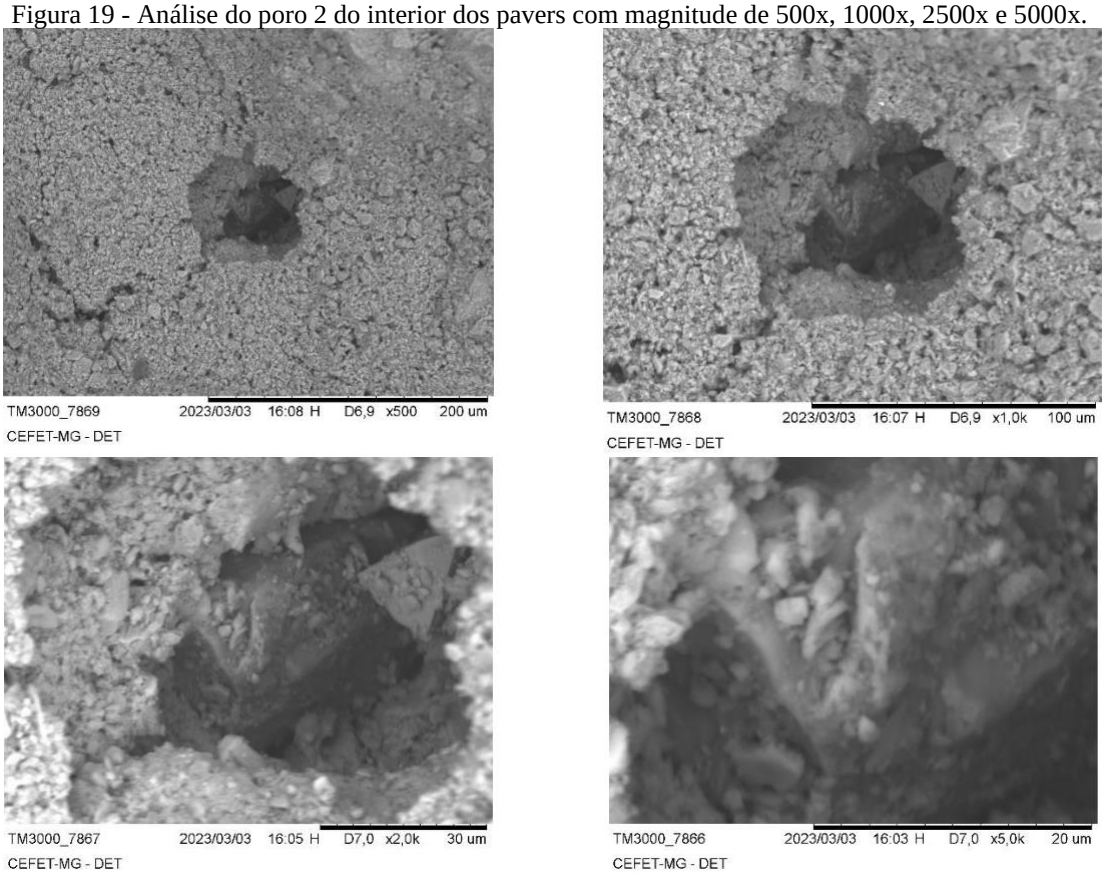
Fonte: Do autor.

Figura 18 - Análise do poro 1 do interior dos pavers com magnitude de 500x, 1000x, 2500x e 5000x.



Fonte: Do autor.

Figura 19 - Análise do poro 2 do interior dos pavers com magnitude de 500x, 1000x, 2500x e 5000x.



Fonte: Do autor.

4.2. Caracterização dos agregados

Os resultados da caracterização física dos agregados naturais e reciclados estão expostos na Tabela 7. Os resultados obtidos indicam que as areias RCD apresentaram menor densidade (2,37 g/cm^3), maior absorção de água (7,32%) e menor massa unitária (1196,00 Kg/m^3) em relação à areia natural (densidade de 2,66 g/cm³, absorção de água de 1,11% e de massa unitária 1268,67 Kg/m³) respectivamente. O mesmo comportamento foi identificado nas britas RCD. Foram obtidos menor densidade (2,22 g/cm^3), maior absorção de água (5,98%) e menor massa unitária (1245,78 Kg/m^3) em relação às britas naturais (densidade de 2,56g/cm³, absorção de água de 0,36% e massa unitária de 1291,33 kg/m³), respectivamente. Esses resultados sugerem maior porosidade dos materiais reciclados em relação aos naturais (Da Silva *et al*., 2022; Poon; Shui; Lam, 2004; Zhang *et al*., 2015a), o que indica piora do desempenho quando utilizados em materiais cimentícios, pois acabam afetando propriedades como trabalhabilidade, resistências mecânicas e durabilidade (De Andrade Salgado; De Andrade Silva, 2022; Gomes; Poggiali; Azevedo, 2019; Guimarães *et al*., 2020). Ademais, os resultados indicam maior teor de porosidade das areias RCD em comparação às britas RCD, o que indica maior potencial de

sequestro de CO_2 devido à maior porosidade (7,32% da areia RCD e 5,98% da brita RCD), uma vez que menores teores de poros dificultam a difusão do CO_2 entre as partículas (Hills; Pollard, 1997).

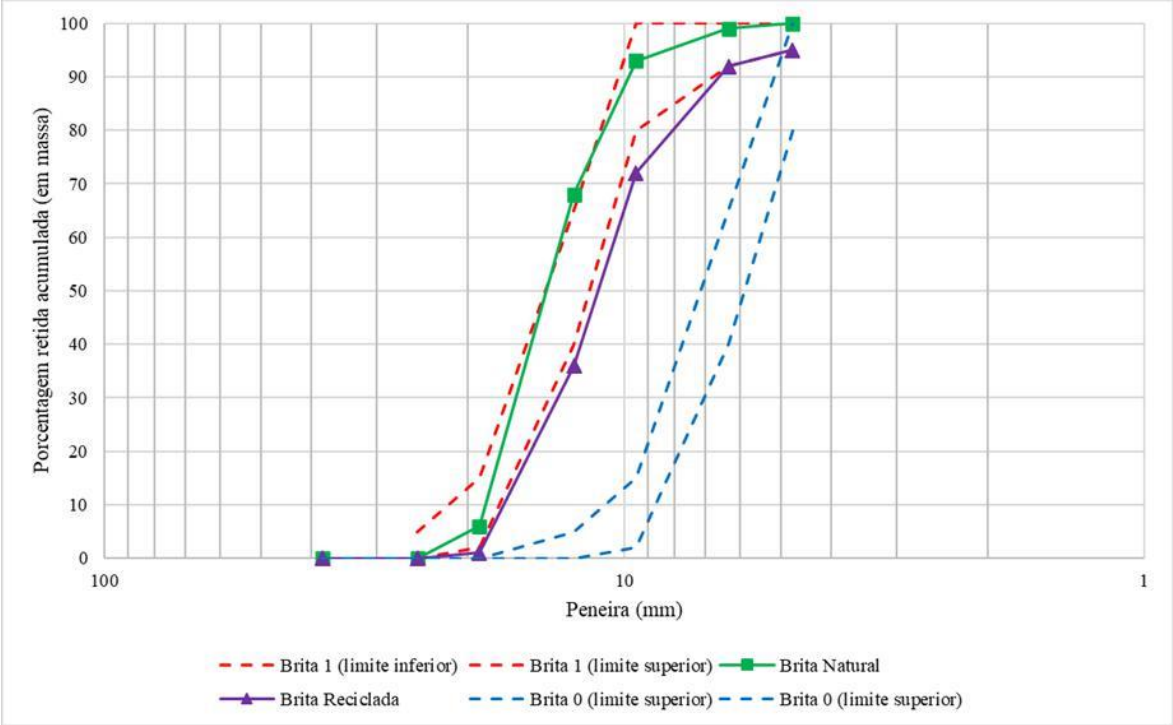
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados.

Agregado	Densidade (g/cm^3)	Absorção de água (%)	Massa unitária (Kg/m^3)
Natural Miúdo	2,66	1,11	1268,67
RCD Miúdo	2,37	7,32	1190,00
Natural Graúdo	2,56	0,36	1291,33
RCD Graúdo	2,22	5,98	1245,78

Fonte: Do autor.

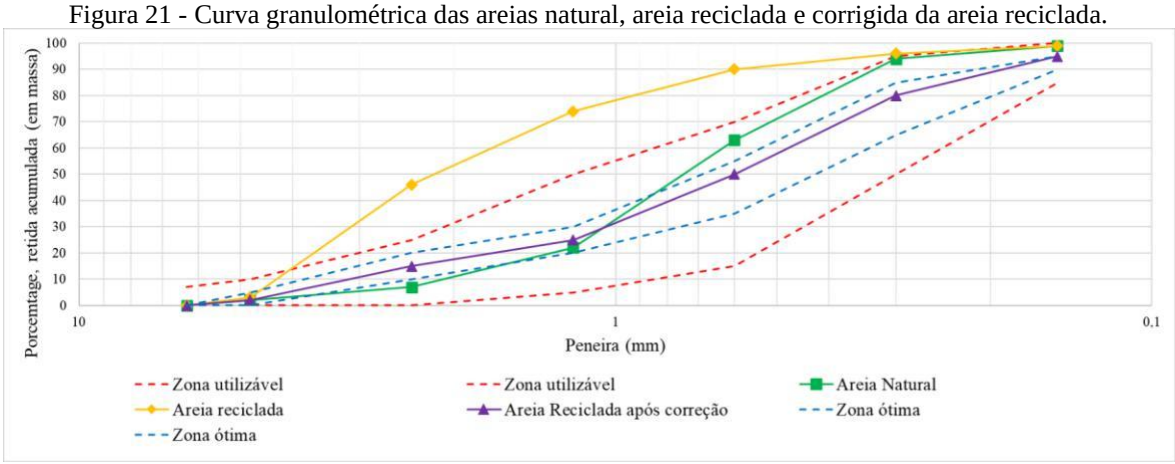
As curvas granulométricas dos agregados estão expostas nas Figuras 20 e 21. As britas natural e reciclada encontram-se dentro e próximas ao limite inferior da gradação das britas I, com módulo de finura de 6,99 para a brita natural e 6,68 para a reciclada, respectivamente. Por sua vez, a areia natural encontra-se dentro da zona utilizável, enquanto a reciclada encontra-se disposta fora dos limites utilizáveis como areia segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022b). Para o estudo de um material passível de ser utilizado na indústria da construção civil, a granulometria da fração miúda dos agregados RCD foi ajustada para possibilitar a aplicação nas argamassas. O módulo de finura das areias natural e reciclada após correção atingiram os valores 3,85 e 3,65, respectivamente.

Figura 20 - Curva granulométrica das britas natural e reciclada.



Fonte: Do autor.

Figura 21 - Curva granulométrica das areias natural, areia reciclada e corrigida da areia reciclada.

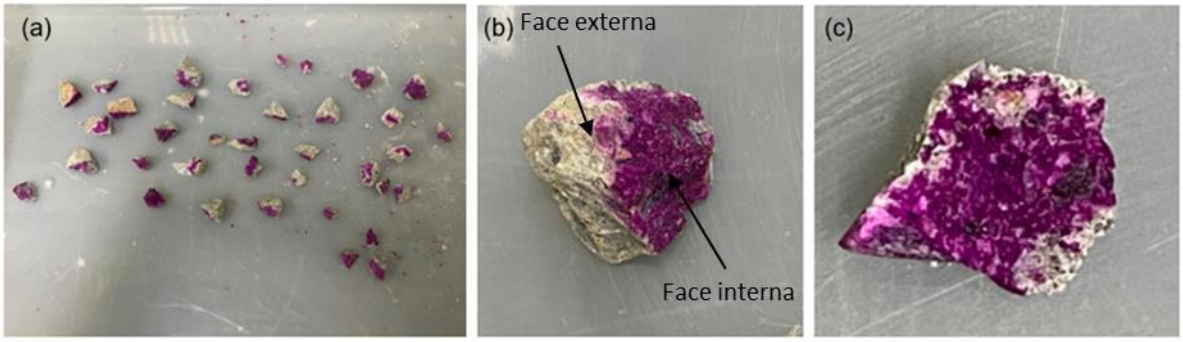


Fonte: Do autor.

A carbonatação das britas de RCD foi avaliada pela aplicação da solução de fenolftaleína. As britas RCD foram rompidas até seu interior ficar exposto para então ser aplicada a fenolftaleína. O resultado está representado na Figura 22a, enquanto as Figuras 22b e 22c ilustram o detalhamento de algumas das britas RCD rompidas. Conforme é possível observar na Figura 24, a aplicação da fenolftaleína nas britas não alterou a coloração da superfície exterior do agregado, mas tornou rosado o interior, indicando a não carbonatação do interior do material. O fato da coloração roxa do interior das britas RCD indica o potencial de sequestro de CO_2 pelo material, pois confirma a presença dos íons Ca^{2+}, componente alcalino presente na argamassa acoplada ao agregado. Por meio do software de análise de imagens ImageJ, foi calculado que a

distância entre a região não carbonatada no interior e carbonatada na superfície das britas esteve 1,5 a 5,6 mm, indicando que a porosidade superficial se limita às regiões próximas à superfície do agregado.

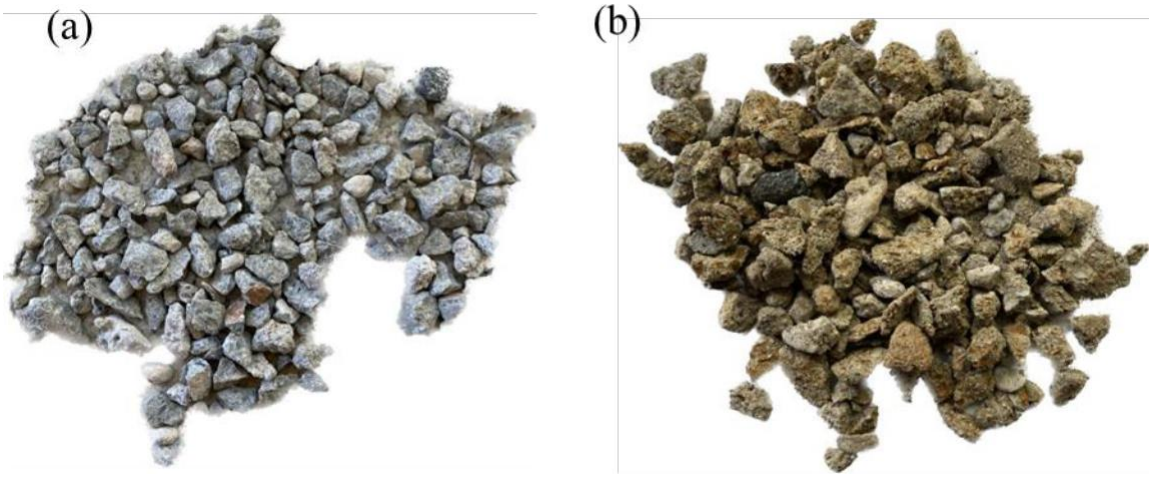
Figura 22 - Aplicação de fenolftaleína nas britas RCD.



Fonte: Do autor

O ensaio para determinar teor de argamassa aderido à superfície dos agregados reciclados por ataque ácido de HCl revelou a presença de 30,99% e 28,24% de argamassa aderida nos agregados miúdos e graúdos, respectivamente. Os valores obtidos estão condizentes com os encontrados na literatura, variando entre 25 – 70% (Brito; Saikia, 2013; De Juan; Gutiérrez, 2009). A Figura 23 ilustra os agregados antes e depois do ensaio. É possível observar a mudança da coloração cinza, característica dos agregados reciclados produzidos com concreto (ARCO), para amarelada, oriunda da reação com o HCl.

Figura 23 - Aparência da brita RCD devido a remoção da argamassa aderida à superfície (a) antes e (b) depois do ataque de ácido sulfúrico.



Fonte: Do autor.

O resultado da análise química dos agregados reciclados antes da carbonatação acelerada está expresso na Tabela 8. Foram identificados 67,8% e 66,1% de cálcio para as parcelas miúdas e graúdas, respectivamente, expresso na forma de CaO, que indica a possibilidade de

carbonatação e consequente sequestro de CO_2 (Dong *et al*., 2019; Fernández Bertos *et al*., 2004). Além disso, foram identificados 19,5% e 21,3% de SiO_2, provavelmente oriundo das areias e britas silicosas utilizadas para produção dos pavers utilizados como matéria prima para produção dos agregados reciclados.

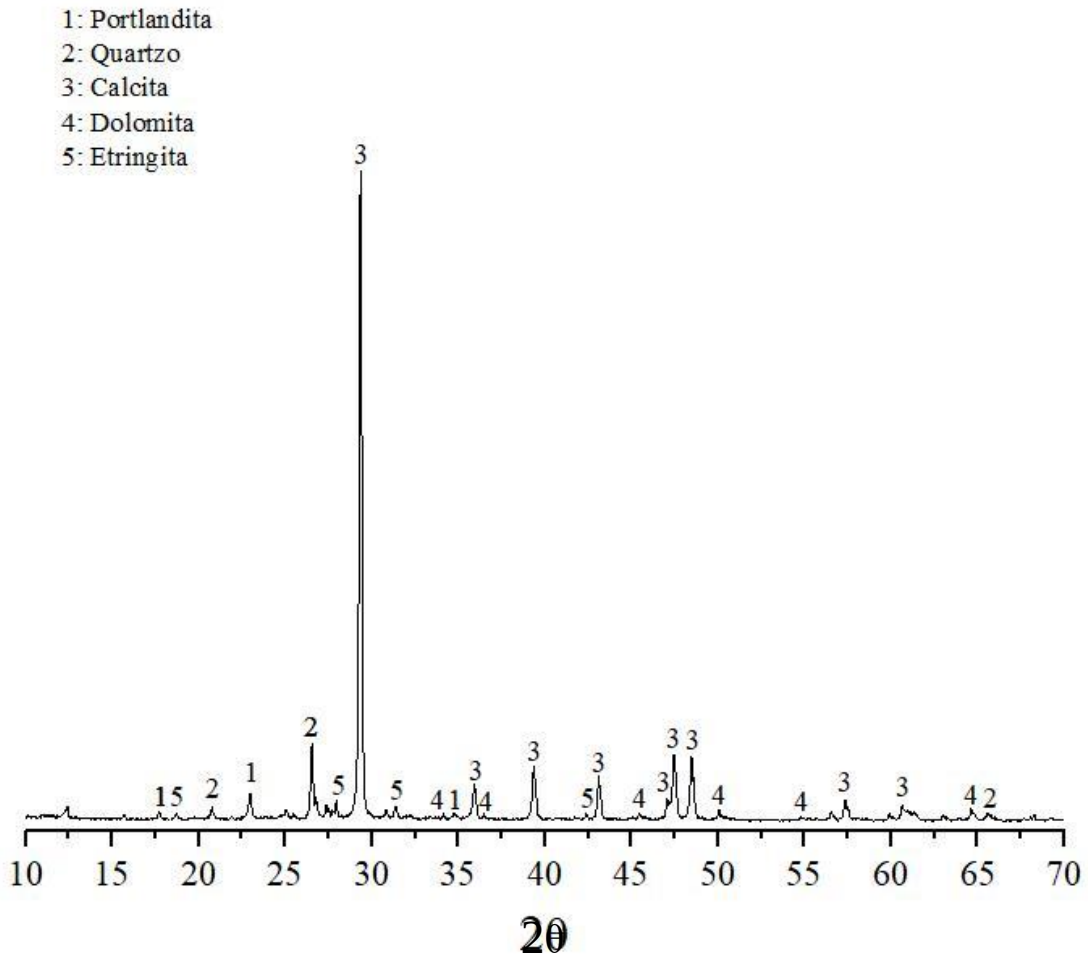
Tabela 8 - Composição química dos agregados RCD antes da carbonatação acelerada.

Composto	Miúdo (%)	Graúdo (%)
CaO	67,8	66,1
SiO_2	19,5	21,3
Fe_2O_3	3,9	4,0
Al_2O_3	4,6	4,8
K_2O	1,9	1,5
SO_3	1,3	1,3
TiO_2	0,4	0,4
SrO	0,3	0,4
MnO	0,1	0,1
Rb_2O	0,1	0,1

Fonte: Do autor.

A análise mineralógica da areia RCD foi realizada com fator de R_{bragg} igual a 21,9 e chi^2 final igual a 7,4. Foi constatado que 14,6 % das fases não foram identificadas, sendo possível a identificação de 85,4% das fases. Para simplificar as análises, foram identificados os principais picos relevantes ao processo de carbonatação, correspondendo ao $Ca(OH)_2$ (18º, 34º) e $CaCO_3$ (29,4º, 39,4º, 43,2º e 47,5º), respectivamente (Ding *et al*., 2023; Pu *et al*., 2021a). Também foram identificados os picos de SiO_2 (20,8º e 26,6º) (Chisholm, 2005). As principais fases identificadas foram carbonato de cálcio ($CaCO_3$), (Tyutyunnik *et al*., 2013), portlandita ($Ca(OH)_2$) (Desgranges *et al*., 1993), quartzo (SiO_2) (Antao *et al*., 2008), etringita (Moore; Taylor, 1968) e dolomita (Antao et al., 2004). O difratrograma está apresentado na Figura 24 e os percentuais de cada fase identificada estão expostos na Tabela 9.

Figura 24 - Difratrograma das fases identificadas dos agregados RCD.



Fonte: Do autor.

Tabela 9 - Cristalinidade identificada dos agregados de RCD.

Fase	% cristalinidade
Carbonato de cálcio – $CaCO_3$	57,5
Quartzo – SiO_2	5,9
Portlandita – $Ca(OH)_2$	0,5
Dolomita – $CaMg(CO_3)_2$	34,5
Etringita – $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$	1,6

Fonte: Do autor.

Com base nos resultados dispostos na Figura 24 e Tabela 9, observa-se que o alto percentual de carbonato de cálcio (57,5%) e baixos teores de portlandita (0,5%), respectivamente. Os baixos teores de $Ca(OH)_2$ e altos teores de $CaCO_3$ devem-se à carbonatação da areia RCD, em que ocorre o consumo do $Ca(OH)_2$ em contato com o dióxido de carbono atmosférico, produzindo $CaCO_3$ (Borges *et al*., 2023; Pu *et al*., 2021a). Além disso, observa-se alta concentração de cálcio (Ca) em diversas fases no constituinte, comprovando a alta concentração de resíduos com presença de cimento. Entretanto, ainda existe potencial de sequestro de CO_2

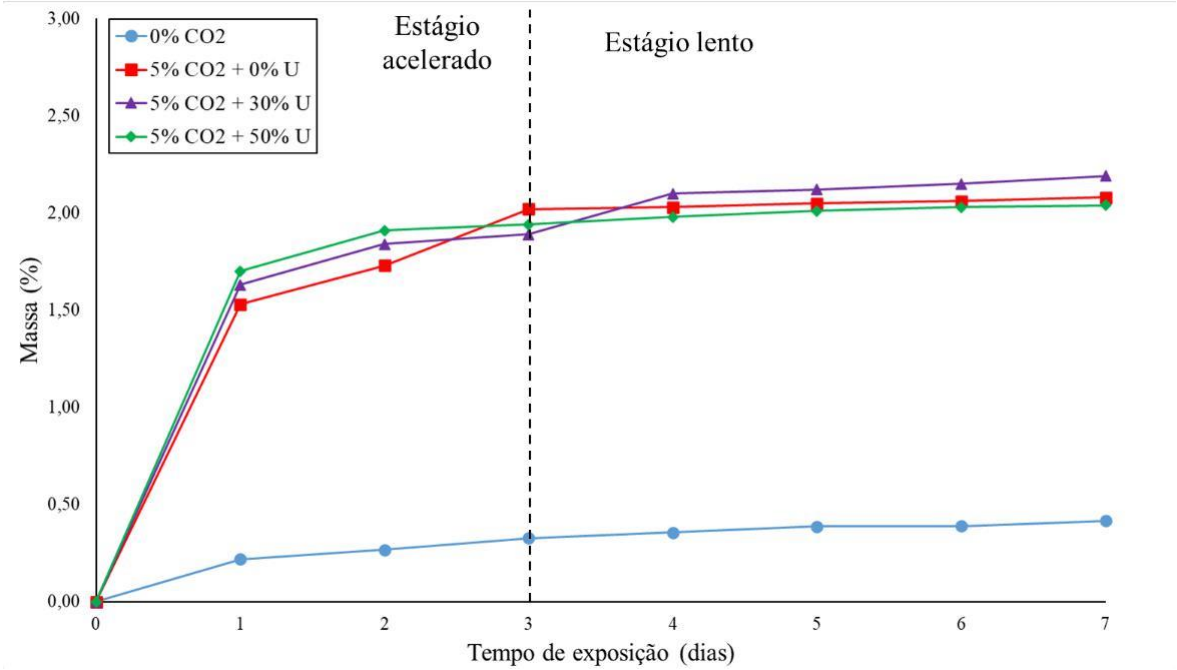
por meio da carbonatação devido à presença porosa nos agregados e à reserva alcalina ainda existente, identificada por meio da solução de fenolftaleína aplicada.

4.3. Capacidade de sequestro de CO_2 pelos agregados reciclados

4.3.1. Sequestro de CO_2 pelo método de ganho de massa

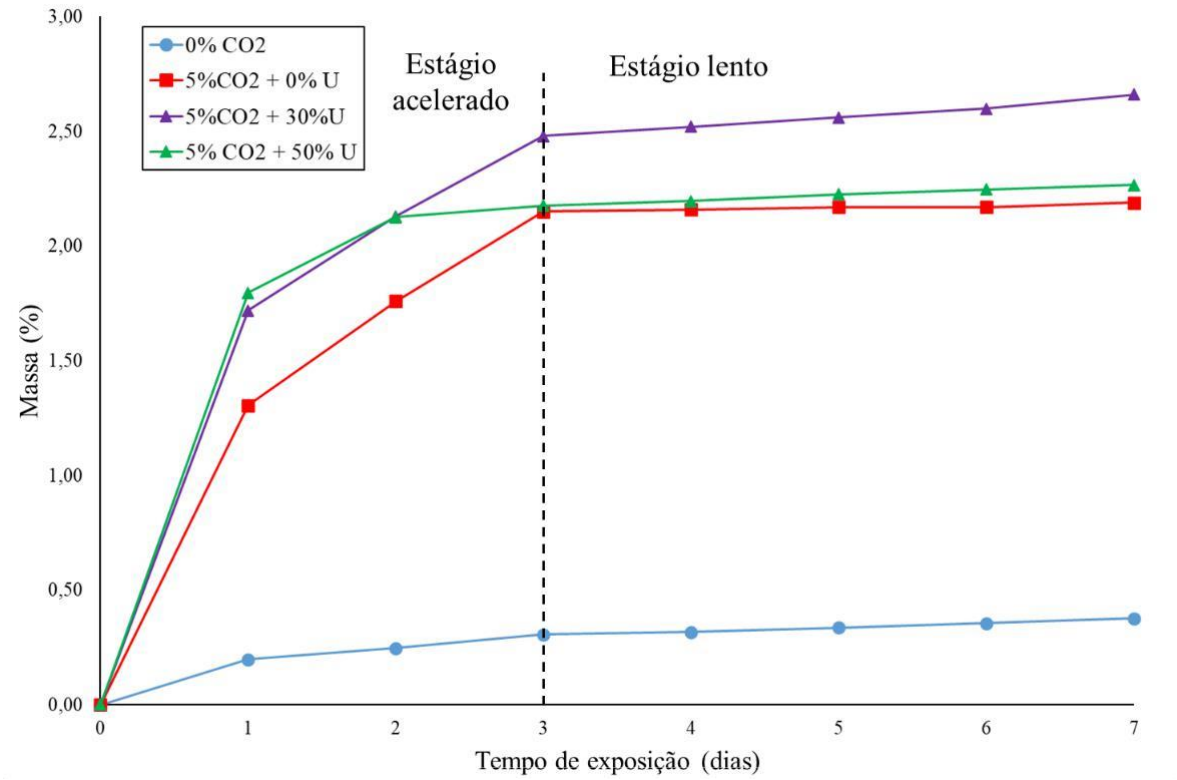
Os gráficos obtidos a partir do método de sequestro de carbono por ganho de massa dos agregados reciclados miúdos e graúdos estão expostos nas Figuras 27 e 28, respectivamente. A condição com 0% de CO_2 no interior da câmara climática foi realizada para averiguar o ganho exclusivo de umidade das amostras devido a presença de umidade (65 ± 10%) no interior da câmara. Já a condição de máxima saturação da câmara (5% CO_2) foi utilizada para a captura de carbono. Em ambas as frações granulométricas é possível observar que a inserção de CO_2 dentro da câmara elevou a taxa de ganho de massa dos materiais, indo de encontro aos resultados identificados na literatura (Kaliyavaradhan; Ling, 2017; Li; Wu, 2022). Além disso, observa-se que em ambos agregados o estágio mais representativo para o incremento de massa foi o estágio de crescimento rápido como identificado na literatura (Kou; Poon, 2012; Pu *et al.*, 2021b). O estágio de crescimento rápido de ganho de massa ocorreu até o terceiro dia, passando para o estágio lento após esse período. Ademais, as Figuras 25 e 26 indicam que as condições com maior incremento de massa para a areia e brita RCD foram as condições com 7 dias devido ao maior período de exposição do $Ca(OH)_2$ ao CO_2, aumentando o teor de carbonatação das amostras (Pu *et al.*, 2021b). Além disso, foi possível notar para ambos agregados RCD que, aos 7 dias, as condições com 30% de umidade adicionada foram as que mais apresentaram aumento de massa, resultado que confirma os dados observados na literatura pelo fato de que a presença de água adicionada pode melhorar as condições para a carbonatação, propiciando maior sequestro de carbono (Kaliyavaradhan; Ling, 2017; Pu *et al.*, 2021b).

Figura 25 - Ganho de massa da areia RCD ao longo do tempo, considerando diferentes condições de carbonatação (0% e 5% CO_2) e diferentes teores de umidade adicionada (0%, 30% e 50%).



Fonte: Do autor.

Figura 26 - Ganho de massa da brita RCD ao longo do tempo, considerando diferentes condições de carbonatação (0% e 5% CO_2) e diferentes teores de umidade adicionada (0%, 30% e 50%).



Fonte: Do autor.

Os resultados de ganho de massa estão expressos na Tabela 10. Em relação ao ganho umidade, simulado na condição com ausência de CO_2 no interior da câmara (0% CO_2), ambas as parcelas obtiveram valores próximos de ganho de massa, 0,42% para a areia RCD e 0,38% para brita RCD. Entretanto, quanto à condição de carbonatação acelerada (5% CO_2), foi possível observar que a fração graúda dos materiais reciclados ganhou mais massa em relação à miúda. Esse fato pode ser explicado devido à formação de um invólucro formado por duas camadas, uma interna, formada pela dissolução do C-S-H e etringita pelo contato com CO_2, e uma externa, formada pela do $CaCO_3$ gerado nas reações de carbonatação (Jiang; Shen; Poon, 2022). Esse revestimento acarreta a diminuição das reações de carbonatação por inibir a formação dos cristais de carbonato de cálcio na superfície e difusão interna do CO_2 nos agregados RCD (Thiery *et al*., 2013), sendo que agregados com partículas menores estão mais propensos a esse fenômeno (Zhang *et al*., 2023), fato que poderia explicar a diminuição do ganho de massa das areias RCD quando comparado às britas RCD. Além disso, a correção da granulometria da areia reciclada pode ter retirado partículas com maiores teores de cimento aderido em sua superfície, ocasionando no menor incremento de massa da areia RCD quando comparado às britas RCD. Ambas as frações a condição de 30% de umidade adicionada foi a que registrou maior incremento de massa, obtendo 2,19% e 2,66% de ganho para areia RCD e brita RCD, respectivamente.

Tabela 10 - Ganho de massa dos agregados RCD aos 7 dias pelo método de ganho de massa.

Agregado	0% CO_2 [%]	5% CO_2 + 0% Umidade [%]	5% CO_2 + 30% Umidade [%]	5% CO_2 + 50% Umidade [%]
areia RCD	0,42	2,08	2,19	2,04
brita RCD	0,38	2,19	2,66	2,27

Fonte: Do autor.

Considerando a melhor condição para ambos os agregados (30% de umidade adicionada), o percentual de CO_2 capturado foi calculado pela subtração entre o ganho de massa obtido na condição 5% CO_2 + 30% umidade e a condição simulando ganho de umidade (0% CO_2). Os resultados obtidos em ambas as frações estão ilustrados na Tabela 11. Foram obtidos 1,66% e 1,81% de CO_2 capturado para areia e brita RCD, respectivamente. Foi considerado o teor de argamassa acoplado à superfície dos agregados obtido durante a caracterização, 30,99% para areia RCD e 28,24% para brita RCD, para estimar o potencial de CO_2 capturado pelos agregados reciclados. Para simplificação e considerando que a quantidade de resíduos produzidas no Brasil é quantificado em toneladas (ton), calculou-se o valor de CO_2 sequestrado a cada tonelada de resíduo através da multiplicação do teor de CO_2 capturado por argamassa acoplada

pela tonelada (1000kg) de agregado. Ao final, foram obtidos os valores de 56 kg CO_2/tonelada ARCO e 64 kg CO_2/tonelada ARCO nas granulometrias miúdas e graúdas, respectivamente.

Tabela 11 - Potencial de captura de CO_2 dos agregados reciclados pelo método de massa considerando a condição 5% CO_2 + 30% umidade.

Agregado	Teor de CO_2 capturado (%)	Teor de argamassa acoplado (%)	CO_2 capturado/argamassa acoplado (%)	Potencial de captura/ton agregado
areia RCD	1,66	30,99	0,0535	54kg
brita RCD	1,81	28,24	0,064	64kg

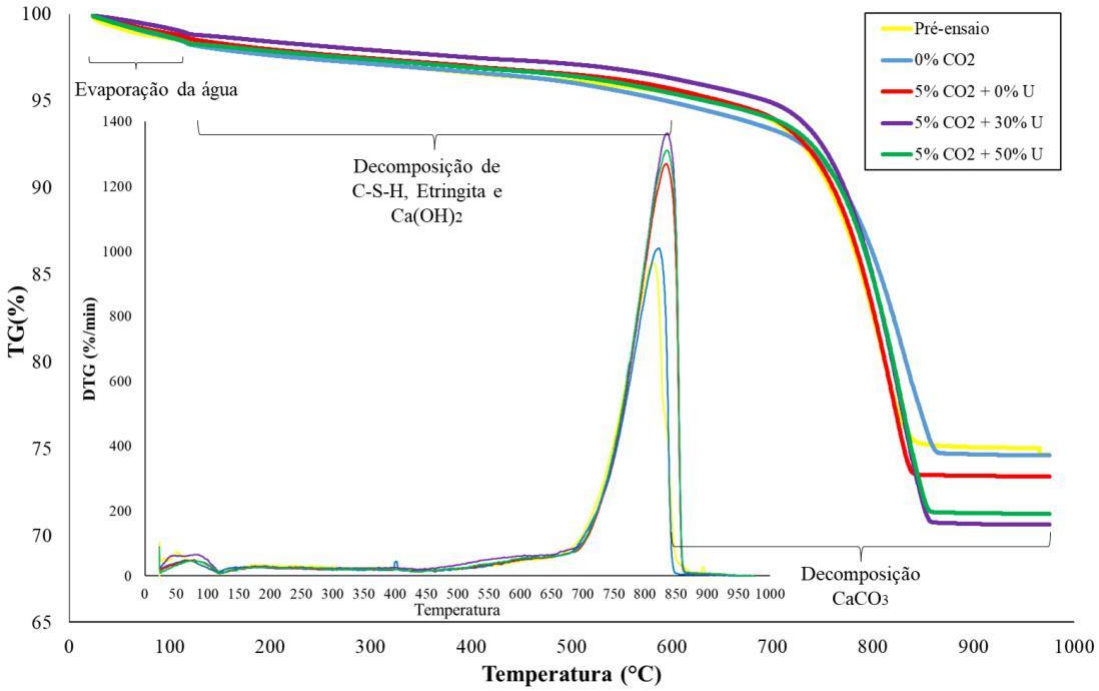
Fonte: Do autor.

4.3.2. Sequestro de CO_2 pelo método de termogravimetria

A outra metodologia empregada para determinação da capacidade de captura de carbono pelos agregados reciclados de concreto foi obtida através da termogravimetria. Os gráficos que contêm as curvas geradas dos agregados reciclados nas frações miúdas e graúdas antes do ensaio e após 7 dias de exposição na câmara climática estão ilustrados nas Figuras 27 e 28, respectivamente. Ambas as curvas TGA mostram uma discreta perda de massa entre 0 e 100°C devido à evaporação da umidade presente nas amostras, fato que pode ser observado pelo leve abaulamento existente nas curvas DTG. Ademais, de 100°C até 600°C observa-se uma discreta perda de massa das curvas TGA devido à decomposição dos compostos Etringita, silicato de cálcio hidratado, portlandita e cristais de carbonato de cálcio menos cristalinos (Junior *et al*., 2013; Scrivener; Snelling; Lothenbach, 2018; Xuan; Zhan; Poon, 2016). Entretanto, todas as amostras de ambos agregados mostram o mesmo comportamento: perda considerável de massa entre 600 – 900°C. As curvas DTG revelam que essa faixa de temperatura se refere à decomposição da calcita bem cristalina (Scrivener; Snellings; Lothenbach, 2018; Xuan; Zhan; Poon, 2016).

A partir das curvas TGA observa-se que os agregados RCD miúdos e graúdos tiveram menor perda de massa na condição pré-ensaio, o que permite concluir que o ensaio colaborou para acelerar a carbonatação dos materiais RCD. As curvas das areias RCD estabilizaram entre 70 e 75%, indicando perda de massa das amostras de 25 a 30%. As condições 5% CO_2 + 30%U e 5% CO_2 + 50%U foram as que apresentaram maior perda de massa, indicando maior decomposição das amostras.

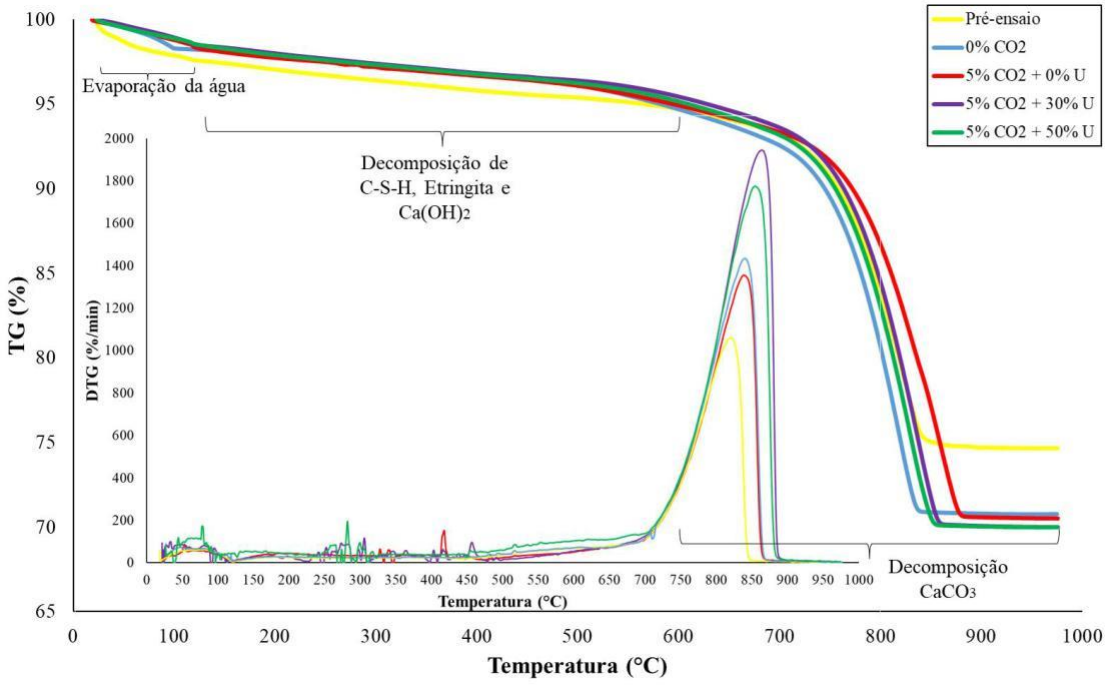
Figura 27 - Curvas TGA/DTG da areia reciclada.



Fonte: Do autor.

Por sua vez, as britas RCD (Figura 28) também estabilizaram entre 70 – 75%, indicando perdas de massa entre 25 e 30%. Análogo às areias RCD, as condições de 5% CO_2 + 30%U e 5% CO_2 + 50% U foram as que mais apresentaram decréscimo de massa, o que também é confirmado nas curvas DTG, sendo as curvas verde e roxa as com maiores amplitude.

Figura 28 - Curvas TGA/DTG do agregado graúdo reciclado



Fonte: Do autor.

A partir das curvas DTG, foram adotados os valores sugeridos pela literatura (Xuan; Zhan; Poon, 2016) entre 650 e 900°C para abranger a maior concentração possível de cristais de $CaCO_3$ calcinados durante a TGA, minimizando os erros. Para o valor de CO_2 inicial, foi calculado pelas Equações 9 e 10 para a situação pré-ensaio os valores de 20,07% para as areias RCD e 19,84% para as britas RCD. Os resultados obtidos à condição inicial calculada estão de acordo com os resultados relatados na literatura sobre a maior capacidade de sequestro de CO_2 por materiais com menores partículas (Li; Mo; Unluer, 2022) devido à maior área superficial, potencializando o contato e as taxas de reações de carbonatação (Kikuchi; Kuroda, 2011; Zhang *et al*., 2015a), e pelo fato de que os grãos menores tendem a ter uma maior concentração de cálcio exposto ao CO_2 atmosférico presente nas argamassas acopladas à sua superfície.(Fang; Xuan; Poon, 2017; Verian; Ashraf; Cao, 2018; Xuan; Zhan; Poon, 2016).

Os resultados para a captura de carbono pelo método de termogravimetria para as demais condições testadas (0% CO_2, 5% CO_2 + 0%U, 5% CO_2 + 30%U e 5% CO_2 + 50%U) estão expostos na Tabela 12, que expõe a variação entre os teores de CO_2 obtidos na condição pré-ensaio em relação às demais condições (ΔCO_2); o teor de CO_2 total capturado, sendo a soma entre a situação pré-ensaio e ΔCO_2; e o potencial de armazenamento de carbono de cada condição por tonelada de agregado, considerando o teor de argamassa acoplado específico para cada uma das frações.

Tabela 12 - Potencial de captura de CO_2 dos agregados reciclados pela termogravimetria.

Agregado	Teor de argamassa acoplado (%)	Condição	Δ CO_2 (%)	CO_2 Total capturado (%)	Potencial de captura/ton agregado
areia RCD	30,99	Pré-ensaio	-	20,07	62 kg
		0% CO_2	2,32	22,39	69 kg
		5%CO_2+0%U	4,97	25,04	78 kg
		5% CO_2 + 30% U	6,93	27,00	84 kg
		5% CO_2 + 50% U	6,49	26,56	82 kg
brita RCD	28,24	Pré-ensaio	-	19,84	56 kg
		0% CO_2	4,52	24,36	69 kg
		5%CO_2+0%U	5,46	25,30	71 kg
		5% CO_2 + 30% U	6,65	26,49	75 kg
		5% CO_2 + 50% U	6,35	26,19	74 kg

Fonte: Do autor.

Referente às demais situações (0% CO_2, 5% CO_2 + 0%U, 5% CO_2 + 30%U e 5% CO_2 + 50%U), o teor de CO_2 absorvido (ΔCO_2) apresentou variação entre 2,32 a 6,93% para areia RCD e 4,52 a 6,65%, para brita RCD, respectivamente (Tabela 12). Os resultados expressam que, em ambas as frações dos agregados reciclados, a condição 0% CO_2 foi a menos eficiente

quanto à captura de carbono (ΔCO_2 de 2,32% para areia RCD e 4,52% para brita RCD), enquanto as amostras expostas à condição com 5% CO_2 apresentaram maiores teores de captura de CO_2 (ΔCO_2 entre 4,97 a 6,93% para areia RCD e 5,46 a 6,65% para brita RCD), o que demonstra a importância da presença do CO_2 para o processo de carbonatação conforme relata a literatura (Li; Mo; Unluer, 2022). Ademais, as condições com 30% e 50% de umidade adicionada foram as que mais realizaram sequestro de CO_2, sendo a condição 5% CO_2 + 30% U a que mais realizou captura de carbono, correspondendo a 6,93% para areia RCD e 6,65% para brita RCD, respectivamente. Esses dados confirmam os resultados obtidos no método de ganho de massa e com demais dados da literatura, mostrando a influência da adição de umidade para potencializar a carbonatação (Li; Wu, 2022; Zhang; Cai; Jaworska, 2020).

Considerando a soma entre o valor pré-ensaio (20,07 para areia RCD e 19,84 para brita RCD) e ΔCO_2 calculado, o teor total de CO_2 capturado variou entre 22,39 – 27,00% para areia RCD e 24,36 – 26,49% para brita RCD, respetivamente (Tabela 12). Nota-se que a condição sem CO_2 (0% CO_2) registrou menores teores de carbono capturado (22,39% para areia RCD e 24,36% para brita RCD) quando comparada às condições com 5% de CO_2; e as condições com adição de 30% (27,00% para areia RCD e 26,49% para brita RCD) e 50% (26,56% para areia RCD e 26,19% para brita RCD) de umidade adicionada capturaram mais CO_2 do que as condições com 0% de umidade adicionada (25,04% para areia RCD e 25,30% para brita RCD), respectivamente. Comparando as condições, o sequestro de carbono das amostras com 30% foi superior as de 50% de umidade adicionada, indicando maior potencial de captura de carbono por carbonatação pela adição de teores limitados de umidade até 40% devido à não obstrução dos poros com água, potencializando as reações entre CO_2 atmosférico e a portlandita presente nos agregados (Kaliyavaradhan; Ling, 2017; Kaliyavaradhan; Ling; Hung, 2020; Pu *et al*., 2021b).

É importante relatar que o teor total de CO_2 capturado pelas areias recicladas miúdas superou o valor das britas recicladas (Tabela 12), confirmando os resultados da literatura (Li; Mo; Unluer, 2022). Considerando o potencial de captura de carbono por tonelada de agregado, as areias RCD obtiveram em todas as condições maior potencial de sequestro de CO_2 em relação as britas RCD, variando entre 62 kg/ton – 84 kg/ton para areia RCD e 56 kg/ton – 75 kg/ton para brita RCD, respectivamente.

4.4. Influência da carbonatação nas propriedades de argamassas recicladas.

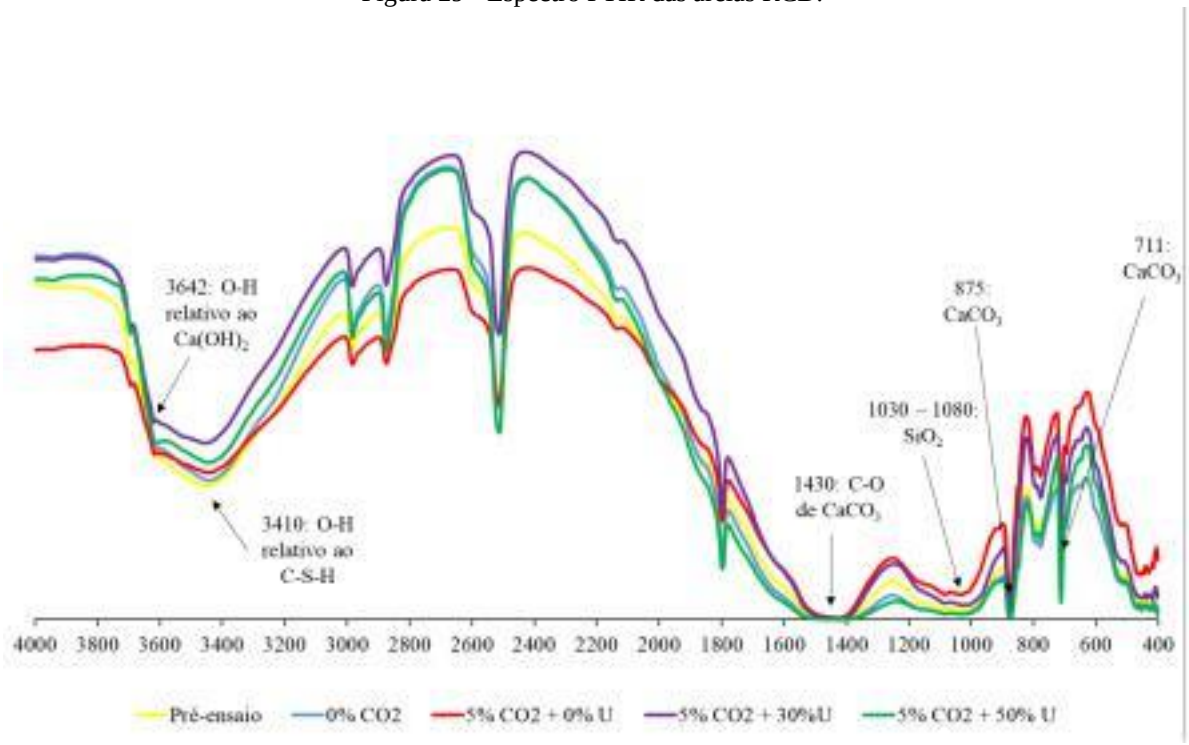
4.4.1. Caracterização dos agregados após a carbonatação

A influência da carbonatação na composição química dos agregados reciclados miúdos e graúdos analisados por FTIR está expressa nas Figura 29 e 30. As amostras foram avaliadas nas condições pré-ensaio e após 7 dias em cada uma das condições de carbonatação (0%, 5%CO_2 + 0%U, 5%CO_2 + 30%U e 5%CO_2 + 50%U). É importante destacar que a vibração das bandas após 1600 cm^{-1} são indicativos da água quimicamente interligada, enquanto a banda 1430cm^{-1} e as bandas menores a 1000 cm^{-1} correspondem a silicatos e carbonato de cálcio presentes (Mollah *et al*., 2000). Algumas bandas específicas merecem destaque: a vibração entre 3640 - 3642 cm^{-1} refere-se ao composto O-H associada ao $Ca(OH)_2$ (Pu *et al*., 2021a), em 3410cm^{-1} a O-H relativa ao C-S-H (Shao *et al*., 2014). A banda 1650cm^{-1} associa-se ao composto H-O-H da água quimicamente ligada a amostra (Sáez *et al*., 2020), enquanto em 1430cm^{-1} demonstra a vibração simétrica de C-O de $CaCO_3$ (Zhang *et al*., 2015a). As bandas relativas à faixa 1400-1500 cm^{-1}, 875cm^{-1} e 711 indicam a presença de $CaCO_3$ na amostra, sendo a última específica da calcita (Ramachandran; Beaudoin, 2002; Sáez *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2015a); e as bandas relativas a 1030-1080 cm^{-1} são relacionadas a Si-O, respectivamente (Zhang *et al*., 2015a).

Avaliando os resultados das areias RCD (Figura 29), observa-se que todas as condições apresentaram o mesmo comportamento, sugerindo a homogeneidade da composição das amostras analisadas. A vibração das bandas 3640 – 3642 cm^{-1} e 3410 cm^{-1} revelam a presença de O-H referente a $Ca(OH)_2$ e C-S-H respectivamente, indicando que todas as condições ainda apresentam potencial para carbonatação. Entretanto, nota-se a diminuição da amplitude das curvas, principalmente na banda 3410 cm^{-1}, nas condições em que foi adicionado CO_2 no interior da câmara, mostrando o consumo do O-H presentes na portlandita e C-S-H para formação do $CaCO_3$ durante a carbonatação. Por sua vez, as vibrações em 875 cm^{-1}, 711 cm^{-1} e 1400-1500 cm^{-1} indicam a presença de C-O, o que esteve aparente em todas as condições. Isso indica que houve a formação de $CaCO_3$ em todas as amostras, o que está de acordo com as análises TGA-DTG pelo fato de todas terem apresentado degradação de $CaCO_3$ durante o ensaio. Ademais nota-se que as maiores vibrações (picos) foram encontradas nas condições 5%CO_2 + 30%U e 5%CO_2 + 50%U, o que corresponde aos maiores teores de carbonatação, como calculado no TGA-DTG. Além disso, nota-se o abaulamento de todas as curvas nas bandas 1030-1080 cm^{-1} referentes a SiO_2, indicando a presença de sílica, das quais a curva

vermelha, referente à condição 5%CO_2 + 0%U, demonstra estiramento ligeiramente maior, indicando maiores teores de SiO_2 na amostra analisada.

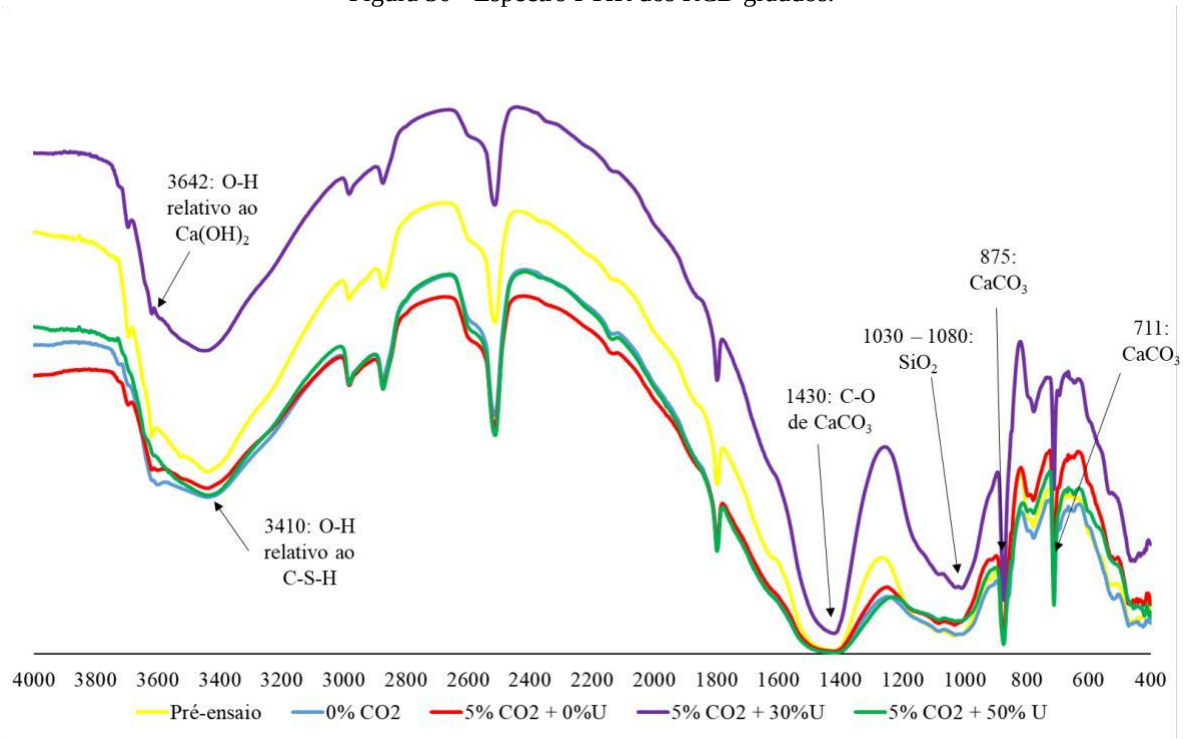
Figura 29 - Espectro FTIR das areias RCD.



Fonte: Do autor.

O espectro das britas RCD (Figura 30) revelou comportamento similar em todas as amostras, sugerindo que as amostras estão homogêneas. Nota-se a vibração das bandas referentes à O-H em 3640-3642cm^{-1} e 3410cm^{-1}, indicando existência potencial para carbonatação. Em relação às bandas referentes ao $CaCO_3$, nota-se vibração em 1430cm^{-1} e das bandas abaixo de 1000 cm^{-1}, o que mostra a presença de carbonato de cálcio em todas as amostras. Esse resultado está de acordo com os obtidos na TGA-DTG, que apresentou teor de carbonatação em todas as condições. As curvas referentes as condições 5%CO_2 + 30%U foi a que apresentou os maiores picos, indicando maior teor de $CaCO_3$ nas amostras. Ademais, nota-se nas curvas o estiramento das bandas 1030 – 1080 cm^{-1} referente a SiO_2, principalmente nas curvas roxa (5%CO_2 + 30%U), indicando maiores teores de sílica na amostra testada, o que pode impactar o resultado final do sequestro de carbono uma vez que a sílica presente nas amostras não reage com o CO_2 durante a carbonatação, impactando os resultados finais das análises.

Figura 30 - Espectro FTIR dos RCD graúdos.



Fonte: Do autor.

Conforme descrito no tópico 4.3.1, foi observado nas Figuras 25 e 26 que o tempo correspondente ao estágio acelerado de carbonatação dos agregados reciclados atingiu seu limite aos 3 dias de exposição, sendo esse o período de tempo adotado para carbonatação dos agregados reciclados. Foi selecionada a condição de carbonatação 5% CO_2 + 30% U por apresentar o maior ganho de massa. Foram carbonatadas amostras da brita RCD, para comparação das propriedades pré e após carbonatação, e somente as areias RCD para serem aplicadas nas argamassas.

Os resultados das propriedades físicas dos materiais reciclados antes e depois do processo de carbonatação acelerada está expressa na Tabela 13. Foram consideradas as propriedades densidade e absorção de água, pois são duas propriedades afetadas pela carbonatação que são importantes para o desempenho de argamassas (Li; Mo; Unluer, 2022; Shi *et al*., 2018; Zhan *et al*., 2014). As propriedades foram avaliadas pelos mesmos ensaios previamente utilizados para caracterização, utilizando as referidas normas técnicas brasileiras NBR 16916 para RCD miúdo (ABNT, 2021c) e NBR 16917 para RCD graúdo (ABNT, 2021b).

Tabela 13 - Caracterização dos agregados reciclados antes e após carbonatação.

Agregado	Pré-carbonatação		Pós-carbonatação (5% CO_2 + 30% U durante 7 dias de exposição)	
	Densidade (g/cm^3)	Absorção de água (%)	Densidade (g/cm^3)	Absorção de água (%)
Miúdo	2,37	7,32	2,44	7,17
Graúdo	2,22	5,98	2,25	3,12

Fonte: Do autor.

A areia RCD apresentou melhorias na densidade e absorção de água após a carbonatação (2,44 g/cm³ e 7,17%) em relação à condição pré-carbonatação (2,37g/cm³ e 7,32%). Por sua vez, a brita RCD apresentou um leve incremento da densidade e diminuição considerável da absorção de água após a carbonatação (2,25g/cm³ e 3,12%) em relação à condição pré-carbonatação (2,22g/cm³ e 5,98%). Os resultados estão de acordo com literatura, que explica o aumento da densidade e a diminuição da absorção de água após a carbonatação pela diminuição do volume de poros devida à formação de cristais de $CaCO_3$ durante o processo de carbonatação, reduzindo o tamanho dos poros e também fissuras e trincas presentes nos agregados produzidos com RCD (Kashef-Haghighi; Ghoshal, 2013; Li; Mo; Unluer, 2022).

4.4.2. Dosagem das argamassas

A dosagem das argamassas está exposta na Tabela 14. Foram dosadas argamassas considerando areia natural para referência (REF), aplicação parcial de areia reciclada não carbonatada (50nRCD), aplicação total de areia reciclada não carbonatada (100nRCD), aplicação parcial de areia reciclada carbonatada (50cRCD), aplicação total de areia reciclada carbonatada (100cRCD), respectivamente.

Tabela 14 - Teores de materiais para a produção de 1m³ de argamassa.

Traço – 1:3:0,65 em volume				
Argamassa	Materiais / Kg			
	Cimento	Areia Natural	Areia RCD	Água
REF	479,67	1439,02	-	311,79
50nRCD	479,67	719,51	674,84	311,79
100nRCD	479,67	-	1349,67	311,79
50cRCD	479,67	719,51	684,46	311,79
100cRCD	479,67	-	1368,92	311,79

Fonte: Do autor.

Devido ao aumento da porosidade, a literatura destaca problemas de trabalhabilidade e de compósitos cimentícios produzidos com RCD (Gomes; Bezerra; Rodrigues, 2022; Gomes; Guimarães, 2021). Para evitar problemas relativos à moldagem, a relação água/materiais secos foi ajustada previamente às moldagens a partir do índice de consistência conforme a NBR 54

13276 (ABNT, 2016) para a argamassa com composição mais crítica, 100%, uma vez que a literatura relata melhorias em propriedades relacionadas com trabalhabilidade de materiais cimentícios após o processo de carbonatação (Infante Gomes *et al*., 2021b; Liang *et al*., 2020b).

O resultado do ensaio de trabalhabilidade da condição 100nRCD está expresso na Figura 31. Após os testes iniciais, foi definido o valor para a relação água/cimento de 0,65, pois apresentou trabalhabilidade satisfatória para moldagens (155mm). Foi escolhida a substituição do traço em volume para manter a mesma proporção de material final, preservando o teor de cimento no volume das argamassas. A substituição em massa resultaria no aumento do volume de agregado fino quando a areia reciclada fosse utilizada devido à menor densidade do agregado reciclado em relação ao natural.

Figura 31 - Resultado do pré-teste do ensaio de trabalhabilidade da argamassa 100nRCD.



Fonte: Do autor.

4.4.3. Influência da carbonatação dos agregados miúdos reciclados nas propriedades das argamassas

Os resultados das propriedades físicas das argamassas estão expressos na Tabela 15. Observou-se maior trabalhabilidade das argamassas produzidas com agregado natural (223,33 mm) quando comparado com as argamassas produzidas com agregado RCD não carbonatado nas condições 100nRCD (220,00 mm) e 50nRCD (221,67 mm). Esses resultados ressaltam a diminuição da trabalhabilidade de materiais cimentícios produzidos com materiais RCD devido

ao aumento da porosidade do material, indicada pela maior absorção de água e menor densidade dos reciclados em relação aos naturais, confirmando resultados da literatura (Salles *et al*., 2021). Em relação à condição carbonatada (cRCD), ambas as argamassas produzidas nas condições de 50% e 100% de substituição de areia natural por areia RCD carbonatada revelaram maiores valores de trabalhabilidade (228,33 mm para 50% e 241,67 mm para 100%) em relação às demais, o que indica a eficiência da carbonatação acelerada para melhoria dessa propriedade (Zhang *et al*., 2015b).

Tabela 15 - Propriedades físicas índice de consistência, densidade e absorção de água das argamassas.

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Densidade (g/cm³)	Absorção de água (%)
REF	223,33	1,90	11,26
50nRCD	221,67	1,85	12,58
100nRCD	220,00	1,82	13,40
50cRCD	228,33	1,86	11,90
100cRCD	231,67	1,85	13,31

Fonte: Do autor.

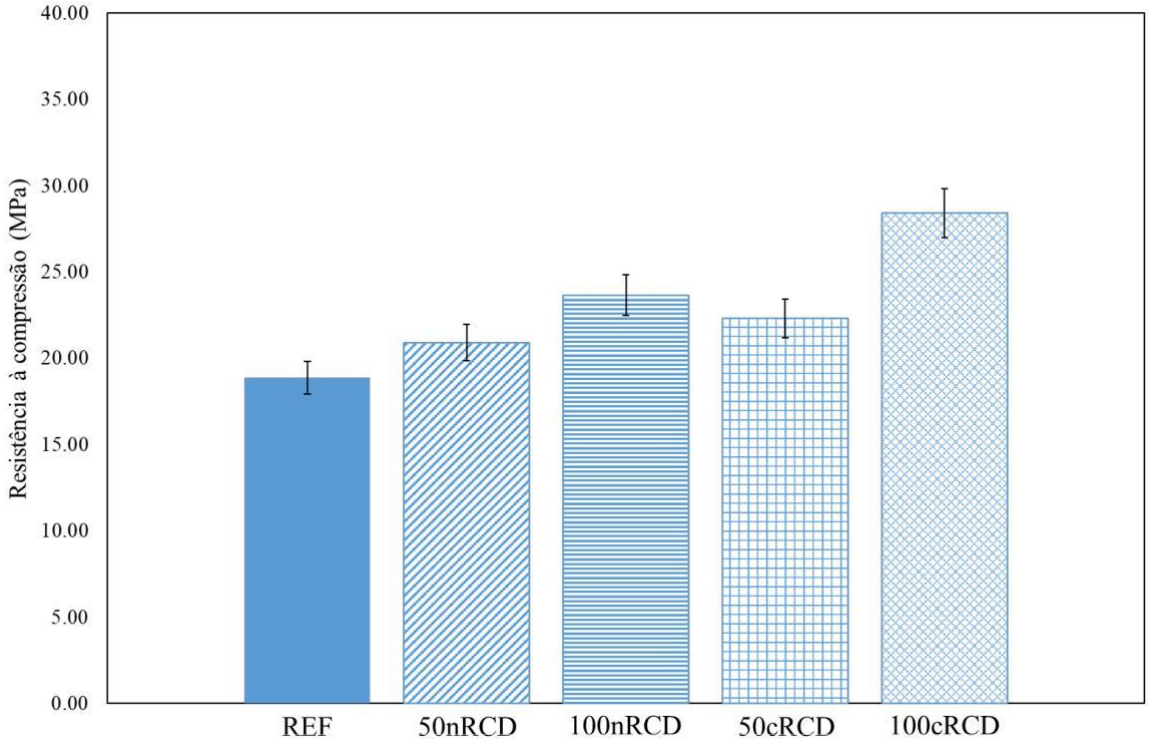
Em relação à densidade, a Tabela 15 indica que a argamassa de referência apresentou maior valor (1,90 g/cm³) em relação às demais. Por sua vez, as condições com a substituição parcial e total de areia natural pelas areias recicladas não carbonatadas e carbonatadas obtiveram resultados próximos. As condições com substituição parcial apresentaram diferença de 0,01g/cm³ para as condições 50nRCD (1,85 g/cm³) e 50cRCD (1,86g/cm³). As condições com substituição total apresentaram diferença de 0,03g/cm³ para a condição não carbonatada (1,82 g/cm³) para a carbonatada (1,85 g/cm³). Os resultados expressam a influência da densidade dos agregados: a argamassa REF, produzida exclusivamente com areia natural (2,66g/cm³), obteve maior densidade em relação às misturas produzidas com areias recicladas nas condições pré (2,37 g/cm³) e pós (2,44 g/cm³) carbonatação acelerada. Além disso, observa-se a influência positiva da carbonatação quando se comparam as argamassas com substituição total: 1,82 g/cm³ para a condição 100nRCD e 1,85 g/cm³ para a condição 100cRCD.

Em relação à absorção de água, observa-se na Tabela 15 o mesmo comportamento em relação às demais propriedades físicas analisadas. A argamassa REF obteve o menor valor (11,26%) quando comparada às demais condições, que apresentaram 12,58% para 50nRCD, 13,40% para 100nRCD, 11,90% para 50cRCD e 13,31% para 100cRCD. De forma análoga, a menor absorção de água da areia natural expressa na Tabela 7 (1,11%) influenciou os resultados, levando aos menores valores de absorção nas argamassas REF, 50cRCD e 50nRCD, respectivamente. Ademais, observa-se a diminuição do valor da absorção de água das argamassas 100cRCD (13,31%) em relação a 100nRCD (13,40%), correspondendo ao

decréscimo de 0,67% provocado pela carbonatação das areias RCD, o que pode ser explicado pela diminuição do valor de absorção dos agregados RCD miúdos antes (7,32%) e depois da carbonatação (7,17%), conforme expresso na Tabela 14.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 estão expostos na Figuras 32. Observa-se que na idade de 7 dias, todas as argamassas produzidas com RCD miúdo obtiveram valores médios superiores aos da argamassa de referência (18,88 MPa). As misturas com 50% de substituição obtiveram média de 20,89 MPa e 22,29 MPa para as condições não carbonatada e carbonatada, respectivamente. Em relação à substituição total, as argamassas produzidas com areia RCD carbonatada o valor médio de 28,39 MPa, enquanto a não carbonatada obteve a média de 23,64 MPa. A partir dos resultados, é possível observar que a carbonatação auxiliou no ganho de resistência mecânica das argamassas devido à diminuição da porosidade e ao fechamento dos poros e trincas pelo $CaCO_3$ produzido durante a carbonatação do RCD miúdo, fortalecendo a zona de transição interfacial presente entre os agregados e a argamassa (Poon; Shui; Lam, 2004; Shi *et al*., 2018). Além disso, ressalta-se o aumento da resistência à compressão das argamassas produzidas com areias recicladas em relação à natural. Esse ganho de resistência pode ser explicado pela maior hidratação da matriz cimentícia devido à maior porosidade das areias RCD, possibilitando maior ganho de resistência da pasta cimentícia (Elane *et al*., 2011); pelo efeito filler das areias RCD devido à melhor gradação da curva da areia RCD após o ajuste conforme mostrado na Figura 23, diminuindo o teor de vázios presente na zona de transição interfacial das argamassas pelo preenchimento com grãos de areia RCD de menor dimensão (Garg; Shrivastava, 2023; Shi *et al*., 2018); e pelo fato dos pavers utilizados para produção das areias RCD apresentarem resistência à compressão de 46,32 MPa resultou em agregados reciclados de melhor qualidade, contribuindo para o aumento da resistência a compressão das argamassas recicladas (Le; Bui, 2020).

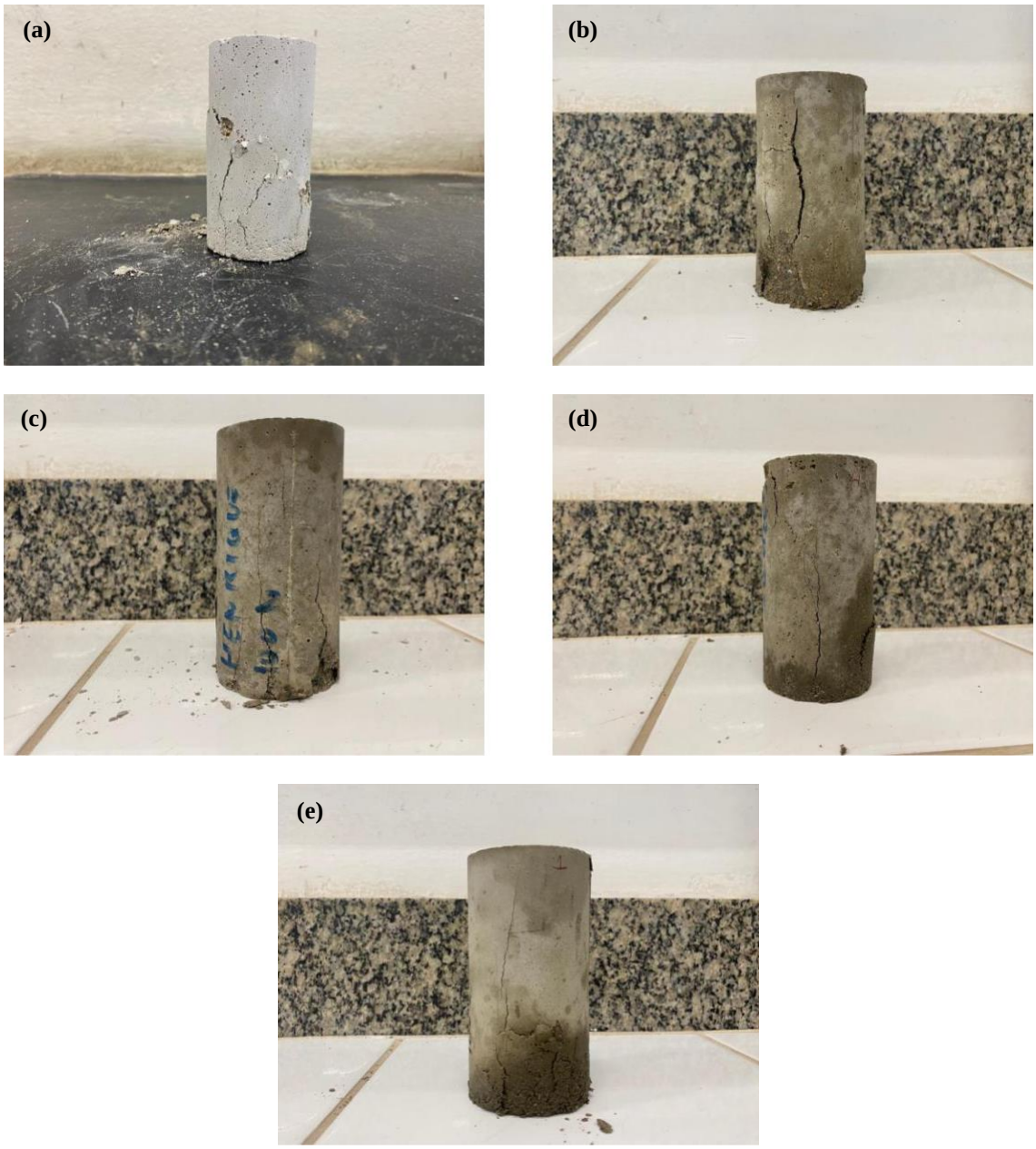
Figura 32 - Resistência à compressão de argamassas aos 7 dias.



Fonte: Do autor.

O aspecto das argamassas após o rompimento aos 7 dias está expresso na Figura 33. É possível notar que o corpo de prova da argamassa de referência apresentou esmagamento da superfície comprimida, levando ao aparecimento de trincas que se espalharam por todo o corpo de prova. Tal comportamento indica falha ocasionada pelo rompimento da pasta de cimento. As argamassas recicladas apresentaram o mesmo comportamento: rompimento devido ao esmagamento da superfície de aplicação da tensão com efeito cisalhante, que se estendeu por todos os corpos de prova e ocasionou na formação de fissuras, indicando o colapso dos corpos de prova. Isso indica maior coesão e resistência das argamassas recicladas quando comparadas à natural, mostrando a maior resistência mecânica das argamassas RCD. Outras Figuras relativas às argamassas após rompimento estão dispostas no Anexo A.

Figura 33 - Aspectos dos corpos de prova das argamassas após rompimento aos 7 dias (a) argamassa REF, (b) argamassa 50nRCD, (c) argamassa 100nRCD, (d) argamassa 50cRCD e (e) argamassa 100cRCD.

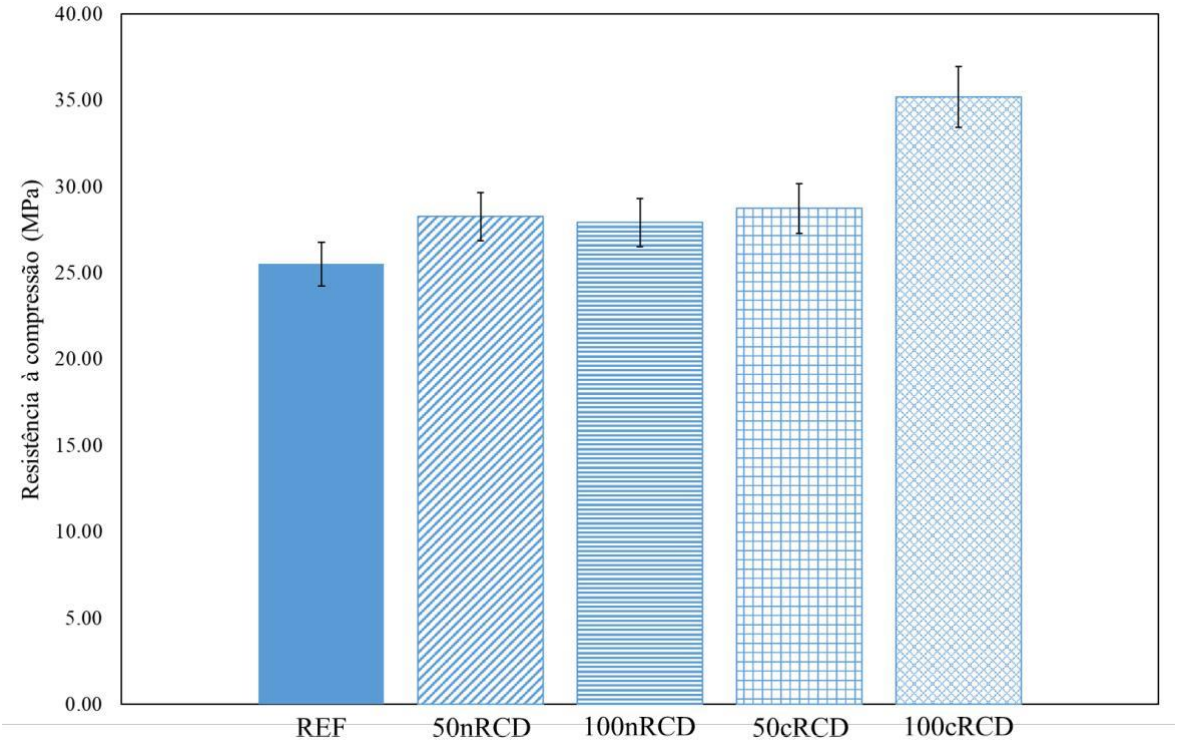


Fonte: Do autor.

As resistências dos corpos de prova das argamassas aos 28 dias está expressa na Figura 34. Na idade de 28 dias, as argamassas de referência apresentaram o mesmo comportamento de 7 dias: obtiveram menor resistência mecânica à compressão do que as misturas produzidas com materiais reciclados (25,49 MPa), o que pode ser explicado pela menor hidratação da matriz cimentícia devido à menor porosidade do agregado natural (Elane *et al*., 2011); pelo efeito filler da areia RCD devido à melhor distribuição da granulometria da areia RCD após o ajuste, levando à diminuição dos vázios presentes na ZTI (Braga; De Brito; Veiga, 2014; Jesus *et al*.,

2019); e pelo fato dos agregados reciclados serem produzidos a partir de blocos de concreto de resistência à compressão de 46,32 MPa (De Andrade Salgado; De Andrade Silva, 2022). Considerando a aplicação do material reciclado, todas as misturas atingiram resistências superiores. A ordem crescente dos valores de resistência à compressão atingidas pelas argamassas foi 27,90MPa (100nRCD) < 28,24MPa (50nRCD) < 28,72MPa (50cRCD) < 35,17MPa (100cRCD) para as misturas, respectivamente. Nota-se que as condições com 50% de substituição de areia natural pela reciclada obtiveram valores aproximados de resistência à compressão (28,24 MPa para 50nRCD e 28,72 MPa para 50cRCD), porém para as argamassas produzidas com 100% de areia RCD, houve diferença da condição não carbonatada (27,90 MPa) para a carbonatada (35,17 MPa). A exposição da areia RCD à carbonatação acelerada levou ao aumento de aproximadamente 20,67% de resistência à compressão, confirmando estudos presentes na literatura que tratam a carbonatação como uma alternativa para melhoria das propriedades dos agregados reciclados (Shi *et al.*, 2016, 2018). Os resultados confirmam a influência positiva da carbonatação como forma de beneficiamento dos materiais reciclados devido aos maiores valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias, ressaltando o potencial de aplicabilidade dos agregados reciclados miúdos dentro da indústria da construção civil em condições de substituição total.

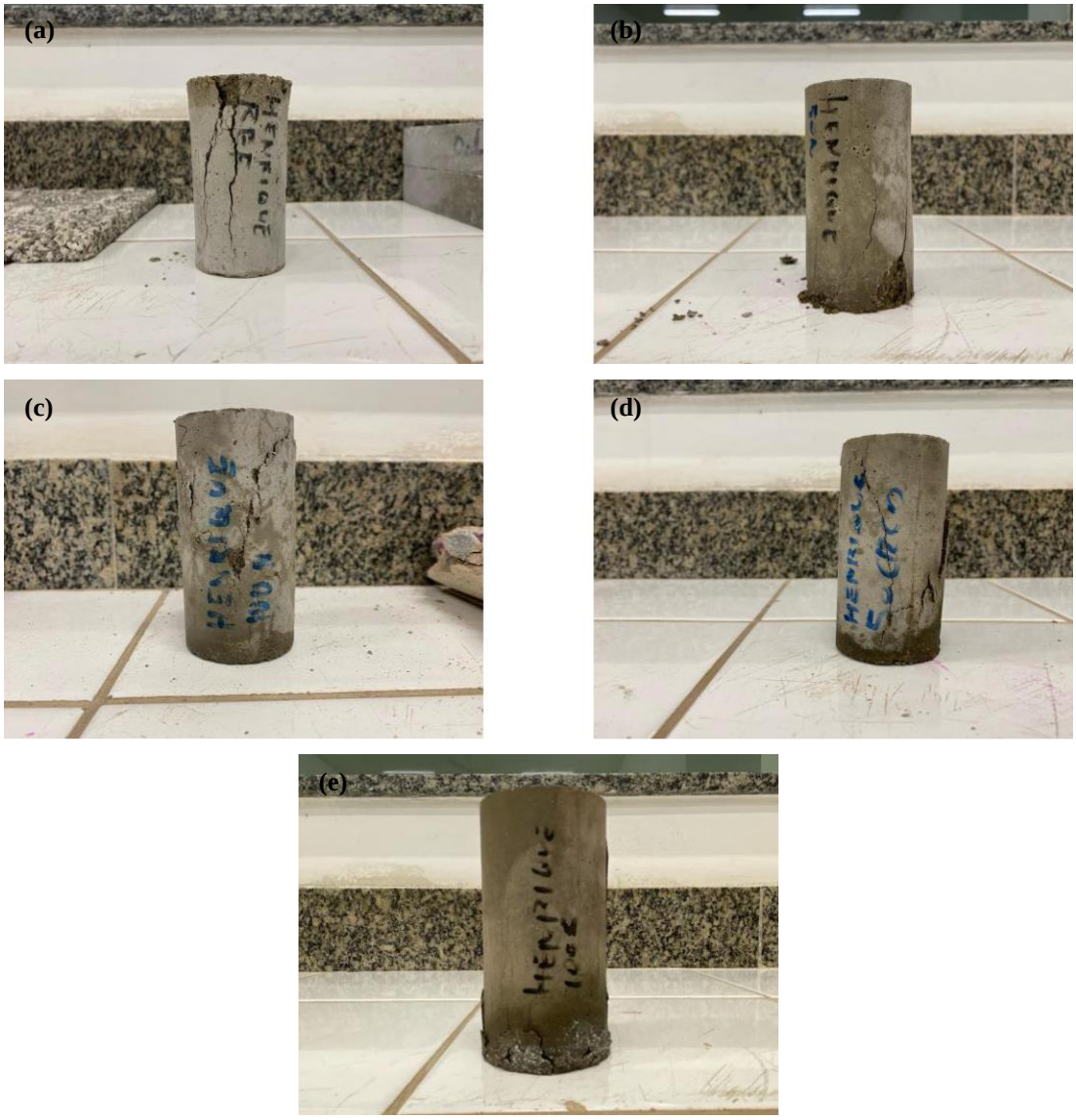
Figura 34 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Do autor.

O aspecto das argamassas após o rompimento aos 28 dias está expresso na Figura 35. É possível notar que o corpo de prova da argamassa de referência apresentou o esmagamento da superfície em que a carga foi aplicada, levando à formação de trincas e ao desprendimento de material e ao colapso do corpo de prova. Isso indica a menor resistência mecânica da argamassa produzida pela areia natural. Por sua vez, as argamassas recicladas apresentaram rompimento devido ao esmagamento da superfície de aplicação da tensão com efeito cisalhante, que se estendeu por todos os corpos de prova e ocasionou na formação de fissuras, indicando o colapso dos corpos de prova. Isso indica maior coesão e resistência das argamassas recicladas quando comparadas à natural, mostrando a maior resistência mecânica das argamassas RCD. Outras Figuras relativas às argamassas após rompimento estão dispostas no Anexo B.

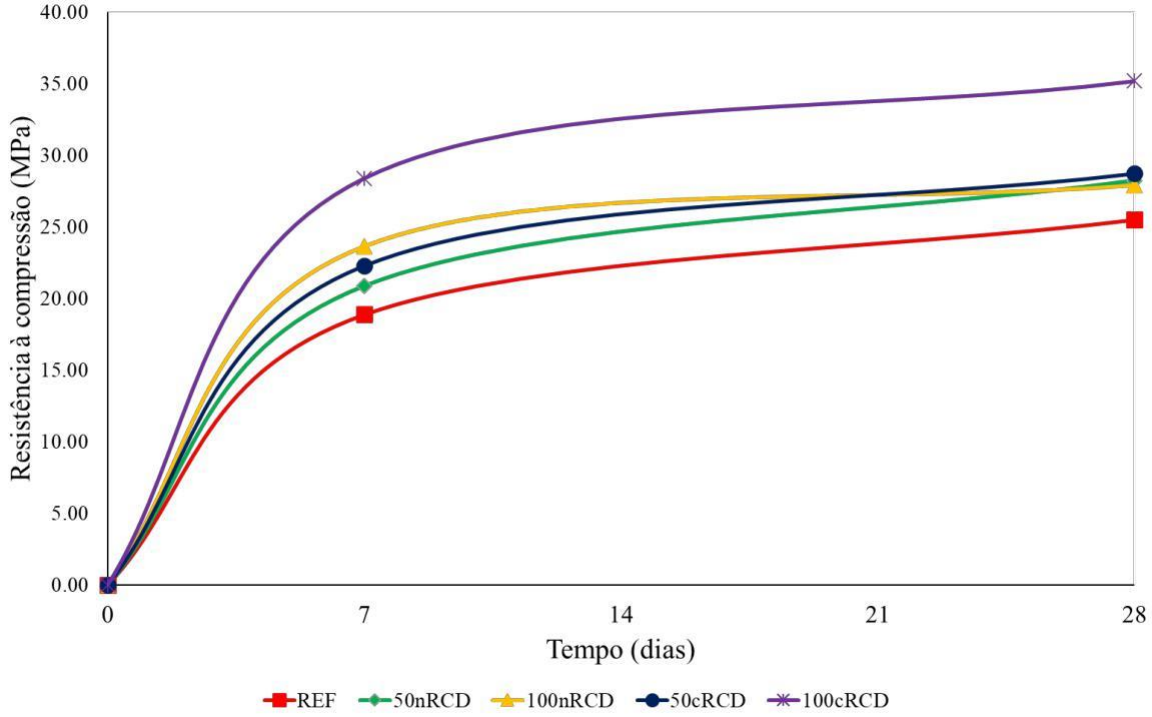
Figura 35 - Aspectos dos corpos de prova das argamassas após rompimento aos 28 dias (a) argamassa REF, (b) argamassa 50nRCD, (c) argamassa 100nRCD, (d) argamassa 50cRCD e (e) argamassa 100cRCD.



Fonte: Do autor.

Considerando ganho de resistência à compressão (Figura 36), observa-se que todas as argamassas apresentaram o mesmo comportamento: ganho de resistência nas idades de 7 dias e 28 dias. Os valores atingidos aos 7 dias corresponderam a 74,05% para a argamassa REF, 73,95% para 50nRCD, 84,71% para 100nRCD, 77,61% para 50cRCD e 80,73% para 100cRCD, respectivamente. Ademais, os resultados mostram a viabilidade da aplicação de areias RCD produzidas de concreto em argamassas pelo fato de ambas as misturas de substituição parcial e total apresentarem valores superiores de resistência à compressão quando comparado ao agregado convencional, confirmando o potencial de aplicação promissor dos RCD miúdos dentro da indústria da construção civil.

Figura 36 - Curvas de resistência à compressão das argamassas.

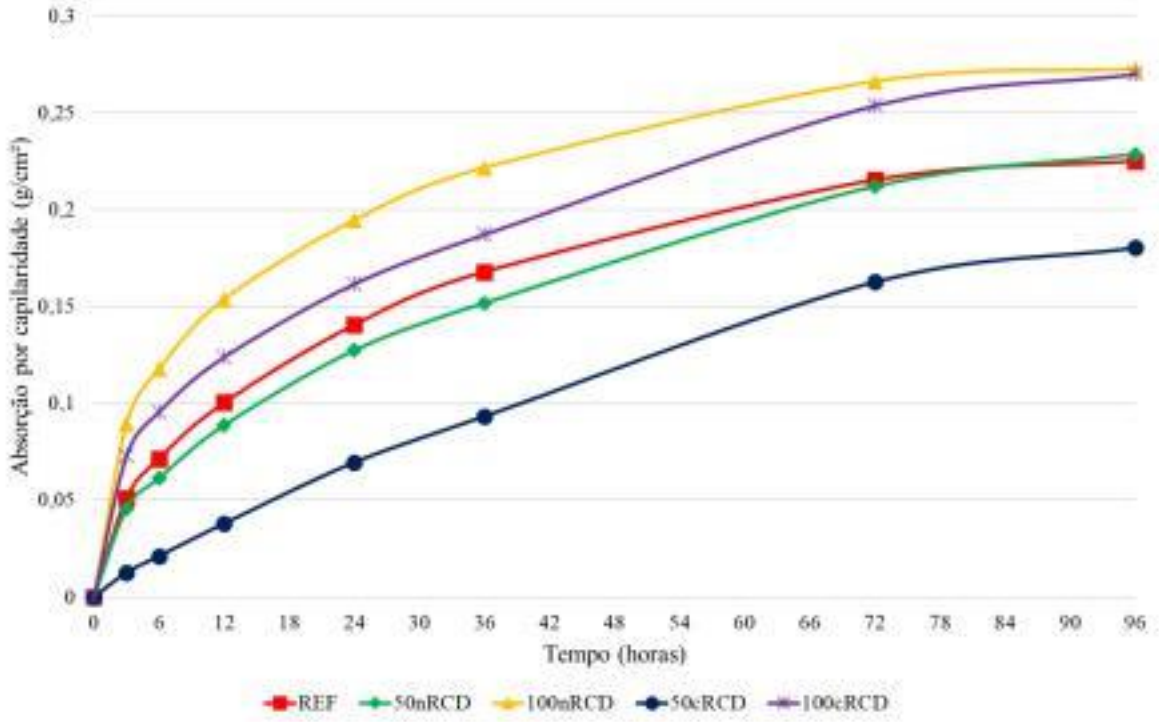


Fonte: Do autor.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade estão expostos na Figura 37. A partir das curvas é possível notar que todas as argamassas apresentaram o mesmo comportamento em relação à absorção de água por capilaridade, indicando coerência nos ensaios. Observa-se que as argamassas com substituição parcial de areia natural pelo RCD miúdo apresentaram as menores curvas. Ao final do experimento, a argamassa 50cRCD apresentou o menor valor, 18,02%, seguida das misturas REF e 50nRCD obtiveram valores próximos, 22,50% para REF e 22,84% para 50nRCD. Nota-se que as argamassas com substituição total apresentaram as curvas com os maiores valores, 26,99% para 100cRCD e 27,25% para 100nRCD, além de a condição carbonatada apresentar menor curva quando

comparada a não carbonatada. Os resultados podem ser explicados pela propriedade absorção de água exposta na Tabela 15, em que a condição 50cRCD (13,31%) diminuiu em relação à 50nRCD (13,40%), mostrando a eficiência do processo de carbonatação para melhoria dessa propriedade em argamassas, conforme relatado na literatura (Infante Gomes *et al*., 2021; Mazurana *et al*., 2022).

Figura 37 - Absorção de água por capilaridade das argamassas testadas.



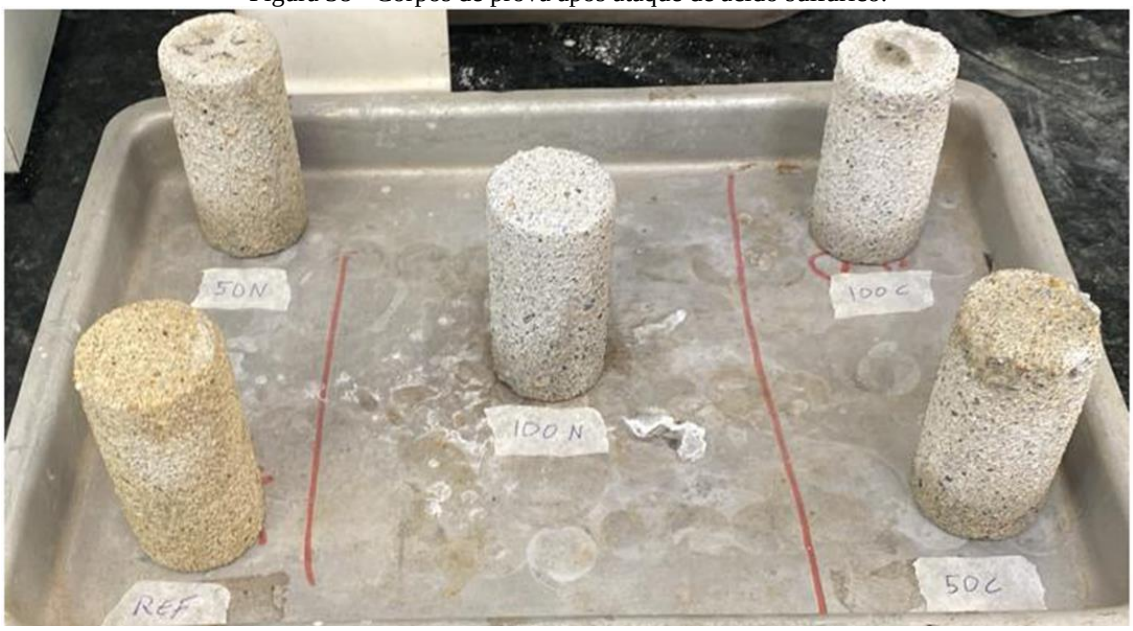
Fonte: Do autor.

A partir dos resultados expressos na Figura 37 é possível identificar que a carbonatação auxiliou no processo de resistência à absorção de água por capilaridade. A provável causa é a diminuição do volume de poros nos agregados reciclados devido à formação de cristais de $CaCO_3$, que diminuíram a absorção de água dos RCD miúdos, melhorando as propriedades das argamassas produzidas e ocasionando uma melhor resistência à penetração de água por capilaridade nos corpos de prova (Thomas *et al*., 2013). Além disso, devido ao efeito filler das areias recicladas é possível um menor volume de poros interconectados, o que dificulta a difusão da água e acaba sendo potencializado pela carbonatação (Borges *et al*., 2023). Esse fato explicaria a diminuição da capilaridade entre as duas argamassas de substituição parcial, em comparação à REF, apesar do fato da areia natural apresentar menor valor para absorção de água em relação às areias recicladas carbonatadas.

O aspecto dos corpos de prova após o ataque de H_2SO_4 está exposto na Figura 38. Nota-se

para produção das argamassas. Ressalta-se a influência da coloração dos agregados nos corpos de prova: as argamassas REF e com substituição parcial, 50nRCD e 50cRCD, apresentaram coloração amarelada devido à presença de areia natural, enquanto as misturas 100nRCD e 100cRCD expuseram coloração acinzentada, característica dos agregados reciclados de concreto devido à argamassa acoplada à superfície (Braymand *et al*., 2017; Seo; Choi, 2014).

Figura 38 - Corpos de prova após ataque de ácido sulfúrico.

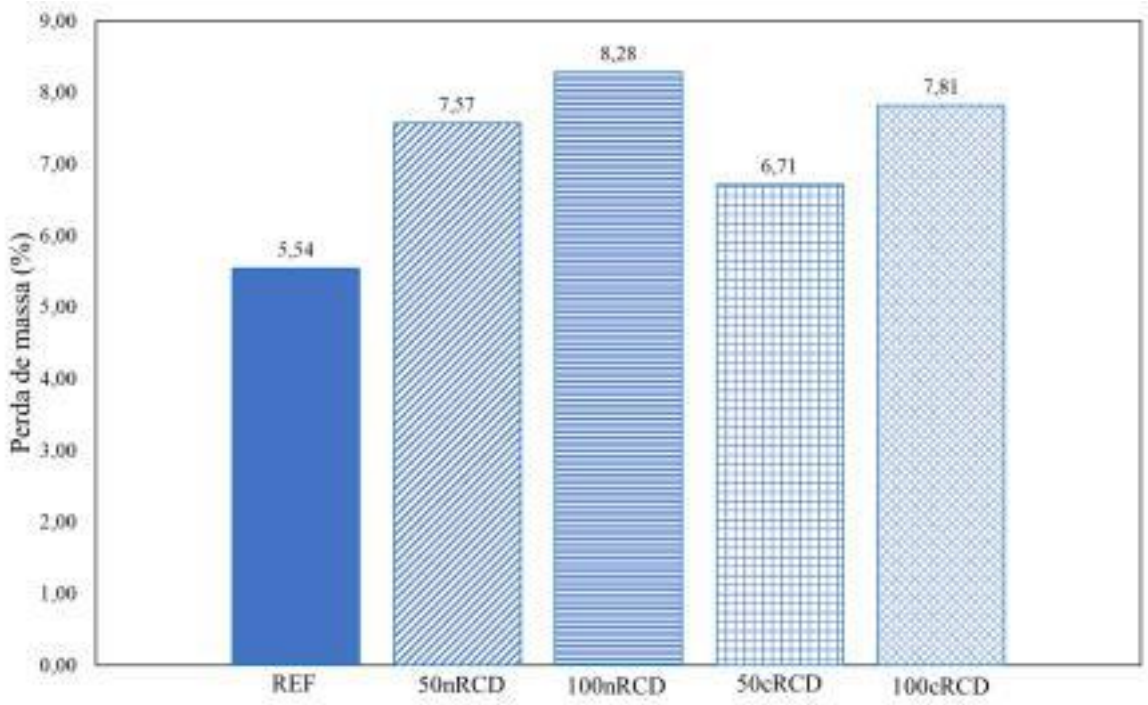


Fonte: Do autor.

Os resultados de resistência a ataque ácido estão expressos na Figura 39. Observa-se que, ao final dos 7 dias de exposição na solução de 5% de H_2SO_4, a diminuição da massa das argamassas após o ataque registrada foi de 5,54% para REF, 7,57% para 50nRCD, 8,28% para 100nRCD, 6,71% para 50cRCD e 7,81% para 100cRCD. A mistura de referência foi a que apresentou menor decréscimo, o que pode ser explicado pela composição da areia natural ser mais resistentes à corrosão quando comparada com o cálcio presente nas argamassas acopladas aos materiais RCD. Em seguida, observa-se que a perda de massa foi proporcional ao teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados devido aos maiores teores de cálcio (Evangelista; De Brito, 2010). Consequentemente, as misturas produzidas com aplicação total de agregados reciclados apresentaram maior decréscimo em relação às de substituição parcial. Considerando a influência da carbonatação, ressalta-se que em ambas as condições de substituição, parcial e total dos agregados naturais por RCD, as argamassas produzidas com os agregados reciclados carbonatados apresentaram maiores resistências em relação à condição não carbonatada, o que mostra influência positiva da carbonatação na durabilidade das argamassas. A diminuição da porosidade, resultante das reações de carbonatação, corrobora

para diminuir a difusão dos íons corrosivos que atacam a pasta cimentícia, preservando a estrutura externa dos corpos de prova (Rostami; Shao; Boyd, 2011).

Figura 39 - Perda de massa após ataque de ácido sulfúrico.



Fonte: Do autor.

4.5. Potencial financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados RCD em mercados de crédito de carbono.

Para calcular o potencial financeiro do sequestro de CO_2 pelos agregados usando a Equação 12, foram utilizados os dados referentes ao potencial de captura de CO_2 pelos agregados, os valores mais atuais referentes à quantidade de RCD coletado no Brasil e o valor da *unit* dos principais ETS existentes. O valor mais atual da unit dos principais mercados de crédito de carbono (ETS) existentes foi extraído da *International Carbon Action Partnership* (ICAP) (ICAP, 2023b). Uma *unit* corresponde ao direito de emissão de uma tonelada de CO_2. A lista com o valor de cada ETS está expressa na Tabela 16. É importante destacar que países com moedas mais valorizadas em relação ao dólar estadunidense (USD) apresentam valores de *unit* superior em relação às desvalorizadas. Nota-se que a *unit* com maior preço encontrado foi o do ETS da Nova Zelândia (48,11 USD), cuja moeda nacional (Dólar neozelandês/NZD) esteve taxada entre 1,47 – 1,58 para cada USD em 2022 (Finance, 2023a), enquanto os menores valores negociados foram os ETS de Saitama (1,06 USD) e Tokio (4,94 USD), cuja moeda nacional (Iene japonês/JPY) esteve entre 0,0087 – 0,0076 por USD em 2022 (Finance, 2023b).

Dentre os mercados selecionados, o real brasileiro (BRL) encontra-se mais próximo da moeda chinesa (Yuan chinês/CNY), de forma que 1 BRL equivale a 1,45 CNY (Finance, 2023c), sendo os valores das *units* negociadas nos ETS chineses os mais próximos da realidade brasileira.

Tabela 16 - Preço da *unit* de carbono para cada um dos ETS considerados em 2022.

ETS	Preço médio da *unit* em 2022 (USD)
Austrian National Emissions Trading System	31,59
Canada – Nova Scotia	26,64
Canada – Québec Cap-and-Trade System	28,08
China – Beijing pilot ETS	17,44
China – Shanghai pilot ETS	5,90
German National Emissions Trading System	31,58
Japan - Saitama Target Emissions Trading System	1,06
Japan – Tokyo Cap-and-Trade Program	4,94
Korea Emissions Trading Scheme	17,99
New Zealand Emissions Trading Scheme	48,11
USA – California Cap-and-Trade Program	28,08

Fonte: Do autor.

Os resultados expostos nas Tabelas 11 e 12 revelam o potencial de sequestro de CO_2 das areias RCD (54 – 84 kg de CO_2/tonelada de RCD) e britas RCD (56 – 75 kg de CO_2/tonelada de RCD), respectivamente. O valor de RCD utilizado foi extraído dos dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Segundo a ABRELPE, os dados mais atuais revelam que foram coletadas 48.375.275 toneladas de RCD no ano de 2021 (ABRELPE, 2022). Multiplicando esses valores, estima-se que o potencial de captura de CO_2 pelo RCD miúdo varie entre 2,61 – 4,06 megatoneladas e do RCD graúdo entre 2,71 – 3,63 megatoneladas.

Considerando esses dados, o potencial de ganho financeiro total pela comercialização das megatoneladas do CO_2 capturados pelos agregados RCD nos ETS selecionados está apresentado na Tabela 17. Os valores calculados mostram que, considerando o menor valor de ETS (ETS Saitama), seria possível a captação de recursos entre 2,77 – 4,31 milhões de USD para a areia reciclada e 2,87 – 3,85 milhões de USD para a brita reciclada. Considerando o ETS neozelandês, os valores variariam entre 125,68 – 195,50 milhões de USD para areia RCD e 130,33 – 174,55 milhões de USD para brita RCD. Considerando ambos ETS chineses, a captação variaria entre 15,57 – 70,59 milhões de USD para a areia RCD e 18,27 – 63,11 milhões de USD brita RCD, indicando um potencial parecido de captação de recursos para o Brasil considerando a aplicação de captura de CO_2 por meio de resíduos de construção e demolição em ETS que negociem produtos associados ao setor de construção.

Tabela 17 - Valor total de comercialização do CO_2 capturado pelos RCD.

ETS	Valor de venda da megatonelada do CO_2 capturado (Milhões USD)			
	RCD Miúdo		RCD Graúdo	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
Austrian National Emissions Trading System	82,52	128,37	85,58	114,61
Canada – Nova Scotia	69,59	108,25	72,17	96,95
Canada – Québec Cap-and-Trade System	73,35	114,10	76,07	101,88
China – Beijing pilot ETS	45,56	70,87	47,25	63,27
China – Shanghai pilot ETS	15,51	23,97	15,98	21,41
German National Emissions Trading System	82,50	128,33	85,55	114,58
Japan - Saitama Target Emissions Trading System	2,77	4,31	2,87	3,85
Japan – Tokyo Cap-and-Trade Program	12,90	20,07	13,38	17,92
Korea Emissions Trading Scheme	46,99	73,10	48,74	65,27
New Zealand Emissions Trading Scheme	125,68	195,50	130,33	174,55
USA – California Cap-and-Trade Program	73,35	114,10	76,07	101,88

Fonte: Do autor.

5. CONCLUSÕES

As conclusões do trabalho são:

1. Foi constatado que os agregados reciclados produzidos de concreto britado nas granulometrias miúdas e graúdas foram capazes de realizar o sequestro de carbono através do processo de carbonatação e, ao serem aplicados em argamassas, os agregados reciclados miúdos carbonatados mostraram influenciar positivamente na performance das argamassas quando comparado a condição não carbonatada.

2. Os ensaios de caracterização da matéria prima revelaram potencial de sequestro de CO_2 pela presença de porosidade e alta alcalinidade presente no interior dos pavers. Da mesma forma, a caracterização física e química de ambas as frações dos agregados indicou potencial para captura de carbono por carbonatação devido à presença de porosidade e reserva alcalina, identificada pelos teores de CaO nas formas de $CaCO_3$ e $Ca(OH)_2$. Além disso, os teores de argamassa acoplados à superfície dos agregados e a análise do pH pela aplicação de fenolftaleína mostrou alcalinidade nos agregados, indicando a presença de íons alcalinos Ca^{2+}, que reagem durante a carbonatação.

3. O uso de câmara climática para carbonatação dos agregados mostrou-se efetivo para acelerar as reações, aumento da capacidade de sequestro de carbono calculado pelos métodos de ganho de massa e TGA-DTG. A capacidade de absorção calculada variou entre 54 – 84 kg de CO_2 / tonelada de areia reciclada e 56 – 75 kg de CO_2 / tonelada de brita reciclada.

4. Os teores de CO_2 capturado, caso aplicados em mercados de crédito de carbono voltados para a área da construção civil, poderiam ser comercializados na forma de *units* envolvendo o CCUS dos agregados reciclados, geraria ganhos entre 2,77 – 195,50 milhões de USD para o RCD miúdo e 2,87 – 174,55 milhões de USD para o RCD graúdo, respectivamente.

5. A carbonatação influenciou as propriedades físicas densidade e absorção de água dos agregados, elevando a densidade e diminuindo absorção de água. Esses indicativos sugerem diminuição da porosidade do material. A aplicação das areias RCD em argamassas sugere aumento de trabalhabilidade, diminuição da absorção de água e aumento da densidade das argamassas. A influência da carbonatação nas areias recicladas elevou a resistência mecânica à compressão e durabilidade por absorção de água por capilaridade e resistência ao ataque do ácido H_2SO_4 das argamassas avaliadas nesse trabalho, sendo um indicativo de melhoria nas propriedades dos materiais.

6. Ao final, a carbonatação acelerada dos agregados reciclados carbonatados mostrou-se efetiva quanto: ao potencial de captura de carbono de agregados reciclados de concreto 68

carbonatados; ao aumento do desempenho de argamassas devido a melhoria de propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade; e ao possível potencial de ganho financeiro pela aplicação dos agregados reciclados carbonatados em mercados de crédito de carbono, sendo uma perspectiva relevante para aplicação dentro da indústria da construção civil.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se:

1. Avaliar a capacidade de captura de carbono por meio da carbonatação acelerada em outras condições de temperatura, umidade e concentração de CO_2 no interior da câmara nos agregados reciclados de concreto;
2. Avaliar a capacidade de captura de carbono por meio da carbonatação acelerada em agregados reciclados produzidos de outras fontes conforme a NBR 15116, como agregados reciclados cimentícios e mistos;
3. Estudar a influência da carbonatação na microestrutura dos agregados reciclados visando compreender as alterações promovidas pelo consumo dos materiais cimentícios existentes nos materiais cimentícios produzidos com RCD;
4. Estudar a influência da aplicação de agregados reciclados carbonatados em concretos;
5. Investigar o uso de outras metodologias para cálculo de sequestro de CO_2 com a realizada nesse trabalho visando comparar o teor de carbono capturado;
6. Estudar formas de padronizar as amostras utilizadas de RCD para cálculo de CO_2 capturado por termogravimetria;
7. Desenvolver métodos para separar a argamassa acoplada aos RCD para cálculo de carbono capturado visando otimização das análises e potencialização dos métodos de captura de CO_2 por carbonatação; e
8. Avaliar os efeitos da carbonatação em RCD reciclados na ITZ de concretos e argamassas produzidos com outros agregados em vista a estabelecer os mecanismos de ganho de desempenho mecânico observados neste estudo para a situação de substituição total (100cRCD).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABDULLAH, A.; MOHAMMED, A. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. **Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX**, p. 77–85, 2019.

ABNT. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2009.

ABNT. NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. 2012.

ABNT. NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. 2013.

ABNT. **ABNT NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de pares e tetos - Determinação do índice de consistência. p. 6, 2016.

ABNT. NBR 7215 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

ABNT. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios**. , 2021a.

ABNT. **ABNT NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021b.

ABNT. **ABNT NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021c.

ABNT. **ABNT NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021d.

ABNT. **ABNT NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. , 2022a.

ABNT. NBR 7211 - Agregados para concreto - requisitos. 2022b.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2022.

ACI. **ACI CRC 18517: Guideline Development for Use of Recycled Concrete Aggregates in New Concrete**. , 2019.

AHMAD, S. Accelerated carbon dioxide sequestration. Em: **Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 81–101.

AL-WAKED, Q. *et al*. Enhancing the aggregate impact value and water absorption of demolition waste coarse aggregates with various treatment methods. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01267, 2022.

AMSEN, E. **CCS and CCU. Mind explaining what these are again?** Disponível em: <https://journeytozerostories.neste.com/circular-economy/ccs-and-ccu-mind-explaining-what-these-are-again#755437d7>. Acesso em: 29 nov. 2022.

ANTAO, S. M. *et al*. State-of-the-art high-resolution powder x-ray diffraction (HRPXRD) illustrated with Rietveld structure refinement of quartz, sodalite, tremolite, and meionite. **The Canadian Mineralogist**, v. 46, p. 1501–1509, 2008.

APARICIO, P. *et al*. Behaviour of concrete and cement in carbon dioxide sequestration by mineral carbonation processes. **Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio**, v. 61, n. 3, p. 220–228, 2022.

ASIAN DEVELOPMENT BANK, A. **The Korea emissions trading scheme: Challenges and emerging opportunities**. Mandaluong City: [s.n.].

BELLO, L. DEL. **India gets ready to launch a national carbon market**. Disponível em: <https://www.energymonitor.ai/policy/carbon-markets/india-gets-ready-to-launch-a-national-carbon-market>. Acesso em: 29 nov. 2022.

BEN GHACHAM, A. *et al*. Valorization of waste concrete through CO2 mineral carbonation: Optimizing parameters and improving reactivity using concrete separation. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 869–878, 2017.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 10–11, p. 1021–1030, 2010.

BORGES, P. M. *et al*. Mortars with recycled aggregate of construction and demolition waste: Mechanical properties and carbon uptake. **Construction and Building Materials**, v. 387, n. May, 2023.

BRASIL. Resolução nº 307 de 5 de Julho de 2002. **Ministério do Meio Ambiente.**, p. 4, 2002.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. p. 187, 2020.

BRASIL. Lei Nº14.120/2021. 2021a.

BRASIL. Pl 528/2021. v. 2020, 2021b.

BRASIL. Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2022.

BRAYMAND, S. *et al*. Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 5, p. 1393–1407, 2017.

BRITO, J. DE; SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. [s.l.] Springer, 2013.

CARBOCLAVE. **Next Generation Cement Products Green and Resilient**. Disponível em: <http://www.carboclave.com/#technology>. Acesso em: 27 dez. 2022.

CBIC. Informativo econômico PIB 02/06/2022. p. 1–9, 2022a.

CBIC. Informativo econômico PIB 04/03/2022. p. 8, 2022b.

CEN. BS EN 12620 Aggregates for concrete. 2008.

CHANG, J.; FANG, Y.; SHANG, X. The role of β-C2S and γ-C2S in carbon capture and strength development. **Materials and Structures**, v. 49, n. 10, p. 4417–4424, 2016.

CHANG, R. *et al*. Tuning crystal polymorphisms and structural investigation of precipitated calcium carbonates for CO2 mineralization. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 1659–1667, 2017a.

CHANG, R. *et al*. Calcium carbonate precipitation for CO2 storage and utilization: A review of the carbonate crystallization and polymorphism. **Frontiers in Energy Research**, v. 5, n. JUL, p. 1–12, 2017b.

CHEN, S. *et al*. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, n. May, p. 112537, 2022.

DA SILVA, S. R. *et al*. Relationship between the mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. December 2021, 2022.

DE ANDRADE SALGADO, F.; DE ANDRADE SILVA, F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, n. December 2021, p. 104452, 2022.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.

DE LEEUW, N. H.; PARKER, S. C. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 102, n. 16, p. 2914–2922, 1998.

DELBEKE, J. *et al*. The Paris agreement. **Towards a Climate-Neutral Europe: Curbing the Trend**, p. 24–45, 2019.

DESGRANGES, L. *et al*. Hydrogen thermal motion in calcium hydroxide: Ca(OH)2. **Acta Crystallographica B**, v. 49, p. 812–817, 1993.

DIN. Aggregates for Mortar and Concrete - Part 100: Recycled Aggregates. 2002.

DONG, H. *et al*. Microstructure and carbon storage capacity of hydrated magnesium carbonates synthesized from different sources and conditions. **Journal of CO2 Utilization**, v. 34, n. April, p. 353–361, 2019.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

FANG, X.; XUAN, D.; POON, C. S. Empirical modelling of CO2 uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 4, 2017.

FANG, Y.; CHANG, J. Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 360–365, 2015.

FERNÁNDEZ BERTOS, M. *et al*. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO2. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193–205, 2004.

FINANCE, G. **NZD/USD**. Disponível em: <https://www.google.com/finance/quote/USD-NZD?sa=X&ved=2ahUKEwiBkNL18NqCAxXbr5UCHduyBlwQmY0JegQIFhAr>. Acesso em: 22 nov. 2023a.

FINANCE, G. **JPY/USD**. Disponível em: <https://www.google.com/finance/quote/JPY-USD?sa=X&ved=2ahUKEwiX25Dk8NqCAxUhqpUCHUe2A-QQmY0JegQIBhAr>. Acesso em: 22 nov. 2023b.

FINANCE, G. **CNY/BRL**. Disponível em: <,>. Acesso em: 22 nov. 2023c.

GALAN, I. *et al*. Sequestration of CO2 by concrete carbonation. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 8, p. 3181–3186, 15 abr. 2010.

GÁLVEZ-MARTOS, J. L. *et al*. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166–178, 1 set. 2018.

GB/T 50082-2009. **GB/T 50082-2009: Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete (English Version)**. **China Building Industry Press.** Beijing, China, 2009.

GHOSH, J. *et al*. Models of BRICs' Economic Development and Challenges for EU Competitiveness. **Probation Journal**, p. 85, 2009.

GIERGICZNY, Z. *et al*. Performance of concrete with low CO2 emission. **Energies**, v. 13, n. 17, 2020.

GOMES, C. L.; BEZERRA, A. C. S.; RODRIGUES, C. S. Influência da compensação de água na dosagem de concretos com agregados de RCD. **4º congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis**, p. 573–582, 2022.

GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; DE AZEVEDO, R. C. Concretes with recycled aggregates of construction and demolition waste and mineral additions: A bibliographic analysis. **Revista Materia**, v. 24, n. 2, 2019.

GOMES, H. C. *et al*. Carbonation of Aggregates from Construction and Demolition Waste Applied to Concrete: A Review. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 1097, 21 abr. 2023.

GOMES, H. C.; GUIMARÃES, M. G. A. **Aplicabilidade de agregados reciclados em concretos para a mitigação de impactos advindos da indústria da construção civil**. [s.l.] CEFET-MG, 2021.

GUIMARÃES, M. G. A. *et al*. Incorporação de resíduos de construção e demolição e pó-de-pedra em dosagens experimentais de argamassa para mitigação de impactos ambientais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25337–25349, 2020.

HAIDER, H. *et al*. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste Management in Riyadh, Saudi Arabia. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 12, 2022.

HASAN, M. M. F.; ZANTYE, M. S.; KAZI, M. K. Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective. **Computers and Chemical Engineering**, v. 166, n. May, 2022.

HE, P.; SHI, C.; POON, C. S. Methods for the assessment of carbon dioxide absorbed by cementitious materials. Em: **Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials**. [s.l.] Elsevier, 2018. v. 2p. 103–126.

HILLS, C. D.; POLLARD, S. J. T. The influence of interference effects on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement-solidified hazardous waste forms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 52, n. 2–3, p. 171–191, 1997.

HOSSEINI ZADEH, A. *et al*. CO2 treatment of recycled concrete aggregates to improve mechanical and environmental properties for unbound applications. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122180, 2021.

HUA, Y.; DONG, F. China's Carbon Market Development and Carbon Market Connection : A Literature Review. **Energies MDPI**, 2019.

HUNTZINGER, D. N. *et al*. Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 6, p. 1986–1992, 2009.

HYVERT, N. *et al*. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO2 pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 11, p. 1582–1589, 2010.

ICAP. International Carbon Action Partnership Status Report 2022. 2022.

ICAP. **ICAP ETS Map**. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets>. Acesso em: 16 jan. 2023a.

ICAP. **ETS prices**. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices>. Acesso em: 3 maio. 2023b.

INFANTE GOMES, R. *et al*. CO2 sequestration by construction and demolition waste aggregates and effect on mortars and concrete performance - An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, 2021a.

INFANTE GOMES, R. *et al*. CO2 sequestration by construction and demolition waste aggregates and effect on mortars and concrete performance - An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, n. September, 2021b.

INTERNATIONAL CARBON ACTION PARTNERSHIP, I. China national ETS. n. November, p. 1–7, 2021.

INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL AGENCY, I. 20 Years of Carbon Capture and Storage. **20 Years of Carbon Capture and Storage**, 2016.

INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL AGENCY, I. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level. 2021.

INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL AGENCY, I. **Carbon capture, utilisation and storage**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>. Acesso em: 30 nov. 2022.

JIANG, Y.; LING, T. C. Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing. **Journal of CO2 Utilization**, v. 36, n. November 2019, p. 135–144, 2020.

JSA. JIS A 5021 Recycled aggregate for concrete-class H. 2011.

JUNIOR, A. N. *et al*. CO2 sequestration by high initial strength Portland cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 113, p. 1577–1584, 2013.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T.; HUNG, K. CO2 sequestration of fresh concrete slurry waste: Optimization of CO2 uptake and feasible use as a potential cement binder. **Journal of CO2 Utilization**, v. 42, n. August, p. 101330, 2020.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T.-C. Potential of CO2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste-An overview. **Journal of CO2 Utilization**, v. 20, p. 234–242, jul. 2017.

KASHEF-HAGHIGHI, S.; GHOSHAL, S. Physico-chemical processes limiting CO2 uptake in concrete during accelerated carbonation curing. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 16, p. 5529–5537, 2013.

KHALILPOUR, R. Multi-level investment planning and scheduling under electricity andcarbon market dynamics: Retrofit of a power plant with PCC (post-combustion carbon capture) processes. **Energy**, v. 64, p. 172–186, 2014.

KIKUCHI, T.; KURODA, Y. Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 9, n. 1, p. 115–124, 2011.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

KOU, S. C.; ZHAN, B. J.; POON, C. S. Use of a CO2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 22–28, 2014.

KUMAR, V. V.; PRASAD, R. D. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. **Advances in concrete construction**, v. 7, n. 2, p. 75–85, 2019.

LEKAKH, S. N. *et al*. Kinetics of Aqueous Leaching and Carbonization of Steelmaking Slag. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, v. 39, n. February, p. 10, 2008.

LI, L. *et al*. Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 52– 62, 2017.

LI, L.; WU, M. An overview of utilizing CO2 for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. **Journal of CO2 Utilization**, v. 60, n. March, p. 102000, jun. 2022.

LI, N.; MO, L.; UNLUER, C. Emerging CO2 utilization technologies for construction materials: A review. **Journal of CO2 Utilization**, v. 65, p. 102237, nov. 2022.

LI, Y. *et al*. Effects of carbonation treatment on the crushing characteristics of recycled coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 408–420, 2019.

LI, Y. *et al*. An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of recycled concrete aggregates cured by CO2. **Construction and Building Materials**, v. 236, 2020.

LIANG, C. *et al*. Carbonation behavior of recycled concrete with CO2 curing recycled aggregate under various environments. **Journal of CO2 Utilization**, v. 39, 2020a.

LIANG, C. *et al*. Utilization of CO2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, 2020b.

LINDSEY, R.; DAHLMAN, L.; BLUNDEN, J. **Climate Change: Global Temperature**. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. Acesso em: 28 nov. 2022.

LINDSEY, R.; DLUGOKENCKY, E. **Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide**. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.

LIU, B. *et al*. New perspectives on utilization of CO2 sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

LIU, X. *et al*. Carbonation behavior of calcium silicate hydrate (C-S-H): Its potential for CO2 capture. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, n. P3, p. 134243, 2022.

LIU, Z.; MENG, W. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review. **Journal of CO2 Utilization**, v. 44, 2021.

LU, B. *et al*. **Carbon dioxide sequestration on recycled aggregates**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018.

LU, B. *et al*. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 421–428, 2019.

MASTALI, M.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; PACHECO-TORGAL, F. 7 - Carbon dioxide sequestration on mortars containing recycled aggregates: a hot area for startup development.

Em: PACHECO-TORGAL, F. *et al*. (Eds.). **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2020. p. 143–159.

MAZURANA, L. *et al*. Determination of CO2 capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 2, p. 1071–1080, 3 jan. 2022.

MOLLAH, M. Y. A. *et al*. Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 267–273, 2000.

MONKMAN, S.; SHAO, Y. Carbonation Curing of Slag-Cement Concrete for Binding CO2 and Improving Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 296–304, 2010.

MU, Y. *et al*. Carbonation characteristics of γ-dicalcium silicate for low-carbon building material. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 322–331, 2018.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014, 2014.

NAGATAKI, S.; SAEKI, T.; LIDA, K. **Recycled-concrete as aggregate**. Canada: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, ON (Canada), 1998. Disponível em: <conference: CANMET/ACI international symposium on sustainable development of the cement and concrete industry, Ottawa (Canada), 21-23 Oct 1998>.

NAWAZ, M.; SULEMAN, H.; MAULUD, A. S. Carbon Capture and Utilization: A Bibliometric Analysis from 2007–2021. **Energies**, v. 15, n. 18, 2022.

NEDUNURI, A. S. S. S.; MOHAMMED, A. YAR; MUHAMMAD, S. Carbonation potential of concrete debris fines and its valorization through mineral carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 310, n. July, p. 125162, dez. 2021.

NEW ZELAND EMITION TRADING SCHEMES, N. E. Information for disposal facility operators on their ETS obligations. p. 2, 2013.

NOGRADY, B. China launches world's biggest carbon market. **Nature**, 2021.

OCDE, O. FOR E. C. AND D. Carbon Market Platform. 2022.

OECD. Climate and Carbon. n. 1, 2013.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179–185, 2002.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PETER, M. A. *et al*. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PFLEGER, M. P.; VILL, M. Forced Carbonation of Recycled Concrete Aggregates. **Acta Polytechnica CTU Proceedings**, v. 33, p. 467–472, 2022.

PHUNG, Q. T. *et al*. Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO2 pressure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 376–390, 2015.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. v. 18, p. 461–468, 2004.

POSSAN, E. *et al*. CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147–161, 2017.

PU, Y. *et al*. Accelerated carbonation treatment of recycled concrete aggregates using flue gas: A comparative study towards performance improvement. **Journal of CO2 Utilization**, v. 43, p. 101362, 2021a.

PU, Y. *et al*. Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122671, maio 2021b.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete, science and technology Principles, Techniques, and Applications**. Norwich, New York, U.S.: Noyes Publication / William Andrew Publishing, 2002. v. 1

REIS, E. D. *et al*. Bonding of Carbon Steel Bars in Concrete Produced with Recycled Aggregates: A Systematic Review of the Literature. **C Journal of Carbon Research**, v. 12, n. 10, 2022.

RODRIGUEZ LOPEZ, J. M.; ENGELS, A.; KNOLL, L. Understanding carbon trading: Effects of delegating CO2 responsibility on organizations' trading behaviour. **Climate Policy**, v. 17, n. 3, p. 346–360, 3 abr. 2017.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J. Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3345–3355, 2011.

RUSSO, N.; LOLLINI, F. Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 51, p. 104290, 2022.

SÁEZ, I. F. *et al*. Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117336, 2020.

SALLES, P. V. *et al*. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177–196, set. 2021.

SCHUBNELL, M. Thermogravimetry and gas analysis, Part 1: Basic principles and overview. **Mettler Toledo User Com**, v. 45, p. 1–9, 2017.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. [s.l.] Crc Press, 2018.

SEO, D. S.; CHOI, H. B. Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 72–77, 2014.

SERENG, M. *et al*. Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO2 Uptake. **MDPI Applied Sciences**, v. 11, n. 6571, p. 22, 2021.

SHAO, Y. *et al*. Accelerated Carbonation of Portland Limestone Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 1, p. 117–124, 2014.

SHAW, R.; MUKHERJEE, S. The development of carbon capture and storage (CCS) in India: A critical review. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 2, n. February, p. 100036, 2022.

SHI, C. *et al*. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466–472, 2016.

SHI, C. *et al*. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO2 and pozzolan slurry. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 130–138, 2018.

SHI, C.; WU, Y. Studies on some factors affecting CO2 curing of lightweight concrete products. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 8–9, p. 1087–1092, 2008.

SILPA, K. *et al*. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Washington DC: World Bank: Urban Development Series, 2018.

SILVA, R. V. *et al*. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 22–32, 2015.

SMITH, B. **Infrared spectral interpretation: a systematic approach**. [s.l: s.n.]. v. 36

SUESCUM-MORALES, D. *et al*. Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO2 sequestration. **Journal of CO2 Utilization**, v. 46, 2021.

SUESCUM-MORALES, D.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J. M.; JIMÉNEZ, J. R. Use of carbonated water to improve the mechanical properties and reduce the carbon footprint of cement-based materials with recycled aggregates. **Journal of CO2 Utilization**, v. 57, 2022.

TAM, V. W. *et al*. CO2 concrete and its practical value utilising living lab methodologies. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 3, p. 100131, 2021.

TAM, V. W. Y. *et al*. Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. Mechanical properties of CO2 concrete utilising practical carbonation variables. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126307, 2021.

TAM, V. W. Y. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. Microstructure and chemical properties for CO2 concrete. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120584, 2020.

THOMAS, C. *et al*. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054–1065, 2013.

TORRENTI, J. M. *et al*. The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. July, 2022.

TU, Z. *et al*. Effects of limestone powder on CaCO3 precipitation in CO2 cured cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 9–16, 2016.

TYUTYUNNIK, ALEXANDER. P. *et al*. K2CaV2O7: a pyrovanadate with a new layered type of structure in the A2BV2O7 family. **Dalton Transactions**, v. 42(4), p. 1057–1064, 2013.

UNITED NATINOS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, U. The adoption of the kyoto protocol of t he united nations framework convention on climate change. v. 1, p. 21, 1998.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, U. **Emissions Tradings**. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/mechanisms/emissions-trading>. Acesso em: 29 nov. 2022.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, U. **Mineral commodity summaries 2021**. [s.l: s.n.].

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 133, n. October 2017, p. 30–49, 2018.

VERNON-PARRY, K. D. Scanning electron microscopy: an introduction. **III-Vs Review**, v. 13, n. 4, p. 40–44, jul. 2000.

WANG, D.; NOGUCHI, T.; NOZAKI, T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, n. 117980, p. 10, 2019.

WANG, D.; XIAO, J.; DUAN, Z. Strategies to accelerate CO2 sequestration of cement-based materials and their application prospects. **Construction and Building Materials**, v. 314, p. 125646, jan. 2022.

WANG, J. *et al*. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117366, 2020.

WASIM, M. *et al*. Future directions for the application of zero carbon concrete in civil engineering – A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. December 2021, p. e01318, 1 dez. 2022.

WEI, Z. *et al*. Clinkering-free cementation by fly ash carbonation. **Journal of CO2 Utilization**, v. 23, n. November 2017, p. 117–127, 2018.

WORLDBANK. Putting a Price on Carbon with an ETS. n. April 2014, p. 3, 2012.

WU VIENNA. **Shares of material flows by material group. Visualisation based upon the UN IRP Global Material Flows Database.** , 2022. Disponível em: <materialflows.net/visualisation-center>. Acesso em: 15 abr. 2023

XUAN, D.; POON, C. S. 16 - Sequestration of carbon dioxide by RCAs and enhancement of properties of RAC by accelerated carbonation. Em: DE BRITO, J.; AGRELA, F. B. T.-N. T. IN E. AND R. C. (Eds.). **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2019. p. 477–497.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67–74, 2016.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. A maturity approach to estimate compressive strength development of CO2-cured concrete blocks. **Cement and Concrete Composites**, v. 85, p. 153– 160, 2018.

YAN, J.; ZHANG, Z. Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). **Applied Energy**, v. 235, n. November 2018, p. 1289–1299, 2019.

ZAJAC, M. *et al*. Impact of microstructure on the pe[1] M. Zajac, J. Skocek, S. Adu-Amankwah, L. Black, M. Ben Haha, Impact of microstructure on the performance of composite cements: Why higher total porosity can result in higher strength, Cem. Concr. Compos. 90 (2018) 178. **Cement and Concrete Composites**, v. 90, n. March, p. 178–192, 2018.

ZAJAC, M. *et al*. CO2 mineralisation of Portland cement: Towards understanding the mechanisms of enforced carbonation. **Journal of CO2 Utilization**, v. 38, n. November 2019, p. 398–415, 2020.

ZAKKOUR, P.; DIXON, T.; COOK, G. Financing early opportunity CCS projects in emerging economies through the carbon market: Mitigation potential and costs. **Energy Procedia**, v. 4, p. 5692–5699, 2011.

ZHAN, B. *et al*. Experimental study on CO2 curing for enhancement of recycled aggregate properties. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 3–7, 2014.

ZHAN, B. J.; POON, C. S.; SHI, C. J. Materials characteristics affecting CO2 curing of concrete blocks containing recycled aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 50–59, 2016.

ZHANG, D.; CAI, X.; JAWORSKA, B. Effect of pre-carbonation hydration on long-term hydration of carbonation-cured cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 231, n. 117122, p. 11, 2020.

ZHANG, D.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. **Journal of CO2 Utilization**, v. 21, p. 119–131, 2017.

ZHANG, D.; SHAO, Y. Early age carbonation curing for precast reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 134–143, 2016.

ZHANG, J. *et al*. Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 11, 2015a.

ZHANG, J. *et al*. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 1–7, 2015b.

ZHANG, N. *et al*. Mitigation of carbon dioxide by accelerated sequestration in concrete debris. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109495, 2020.

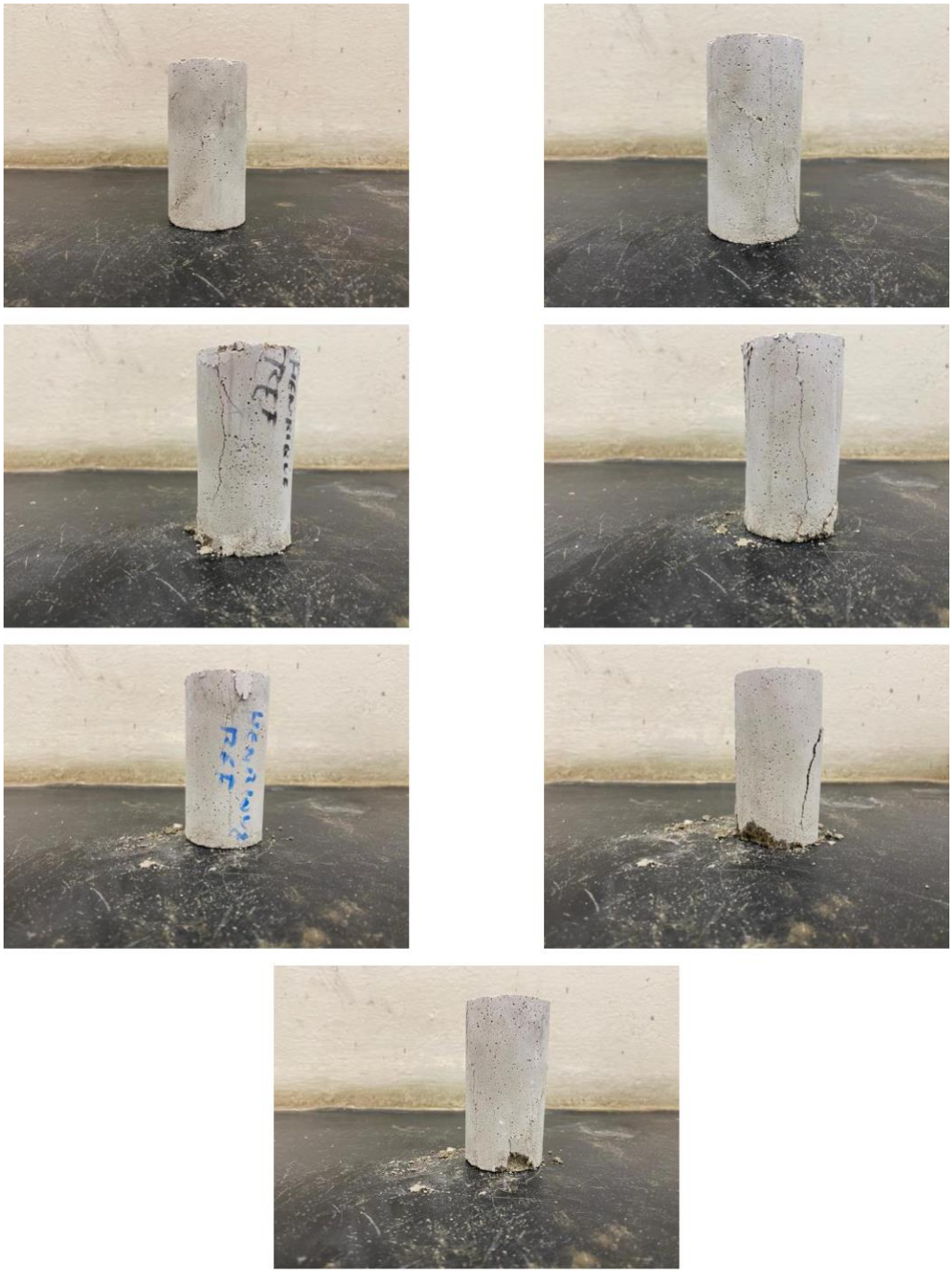
ZHANG, N. *et al*. Potential for CO2 mitigation and economic benefits from accelerated carbonation of construction and demolition waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, n. August, p. 112920, 2022.

ZHOU, K.; LI, Y. Carbon finance and carbon market in China : Progress and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 536–549, 2019.

ZHU, C. *et al*. Embodied carbon emissions and mitigation potential in China's building sector: An outlook to 2060. **Energy Policy**, v. 170, n. September, p. 113222, 2022.

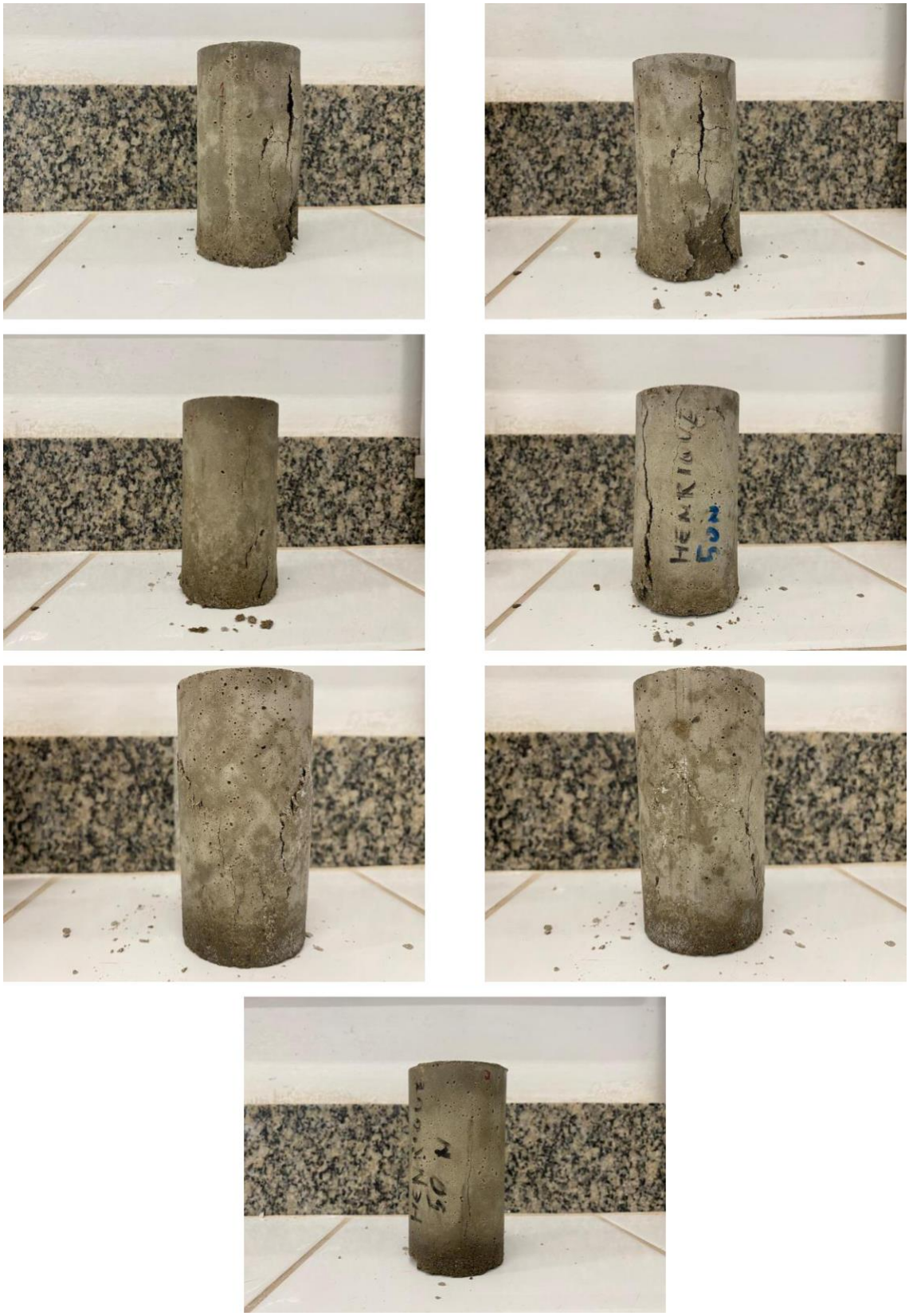
ANEXO A - CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS ROMPIMENTO AOS 7 DIAS

Figura A1 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa de referência (REF).



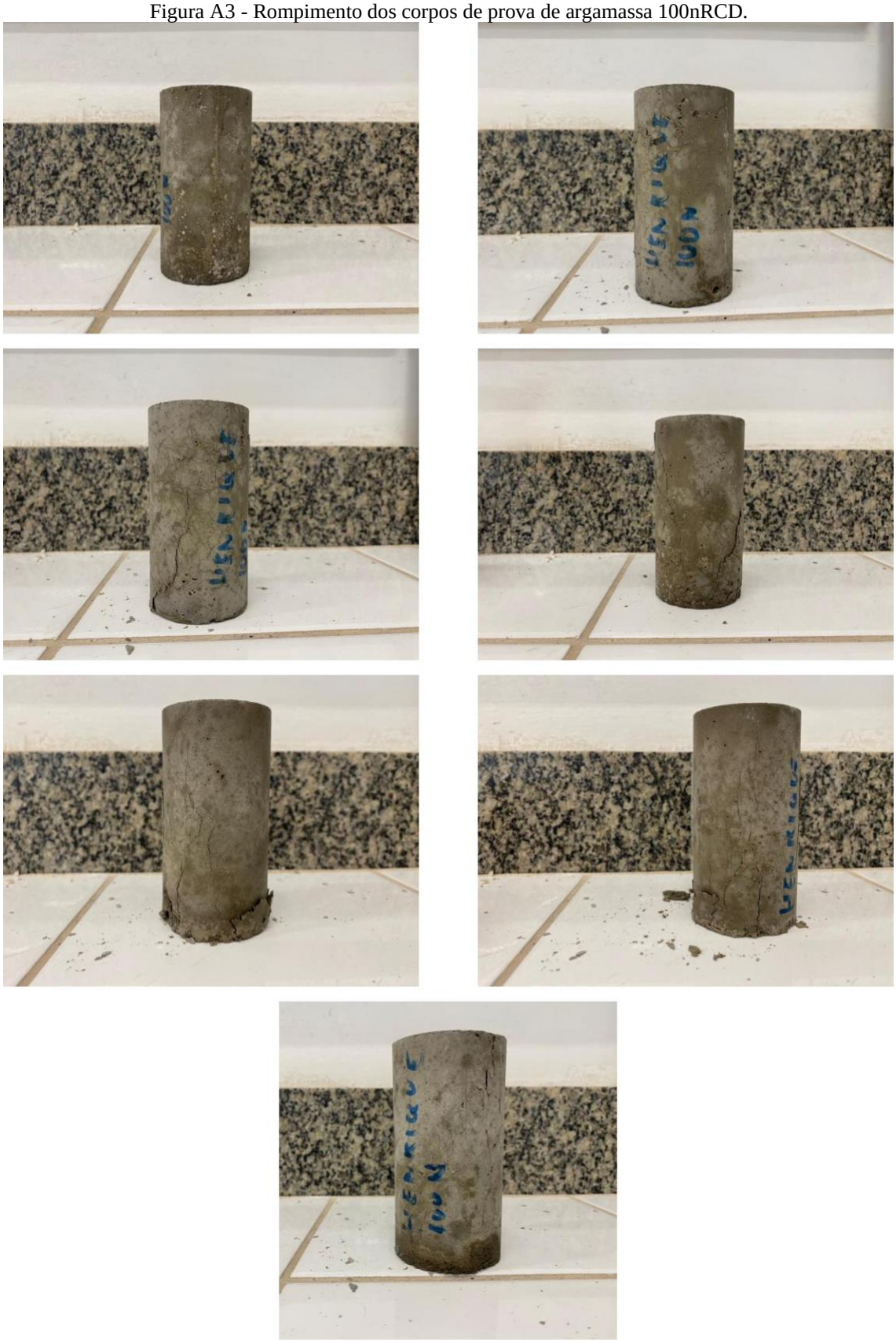
Fonte: Do autor.

Figura A2 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50nRCD.



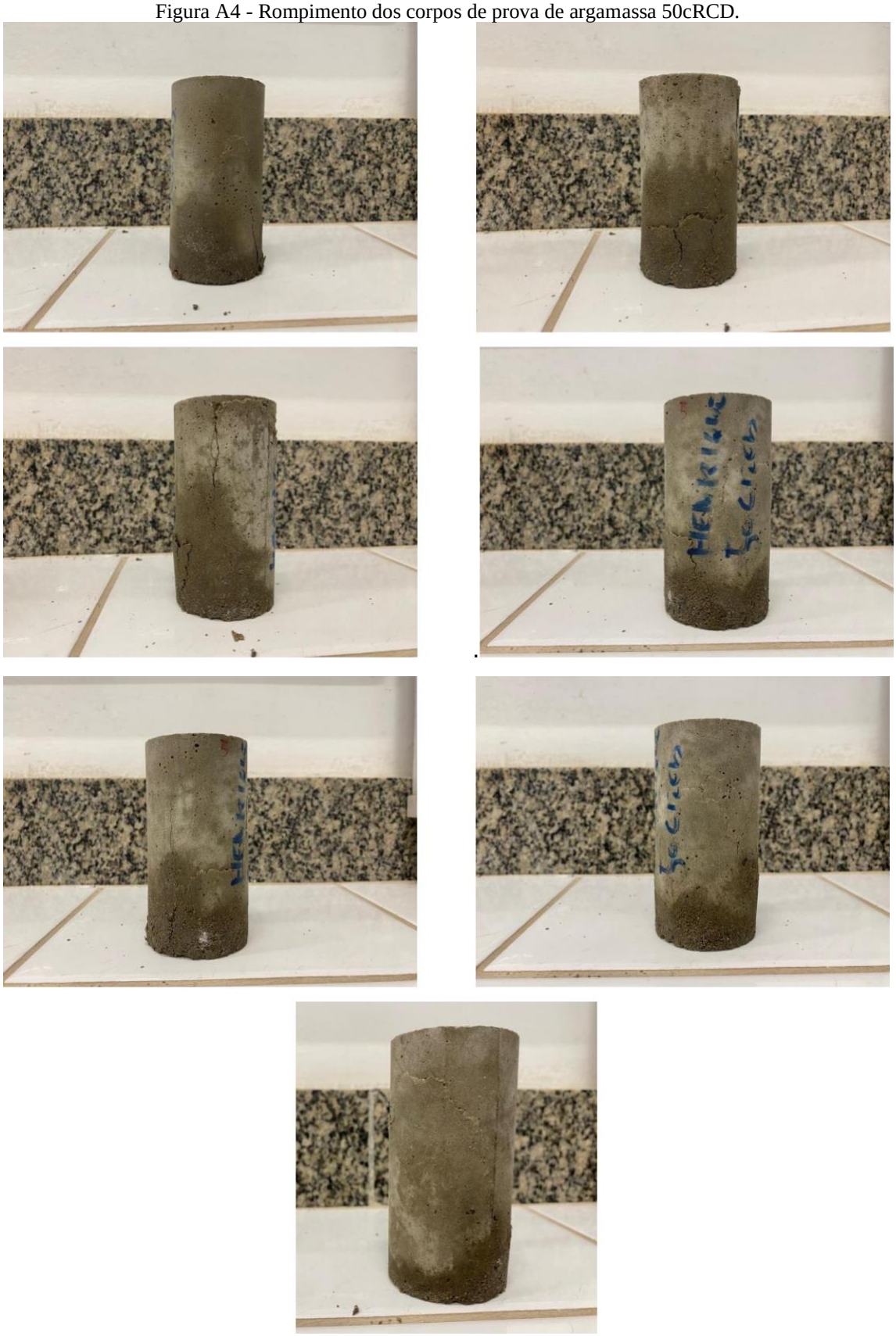
Fonte: Do autor.

Figura A3 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100nRCD.



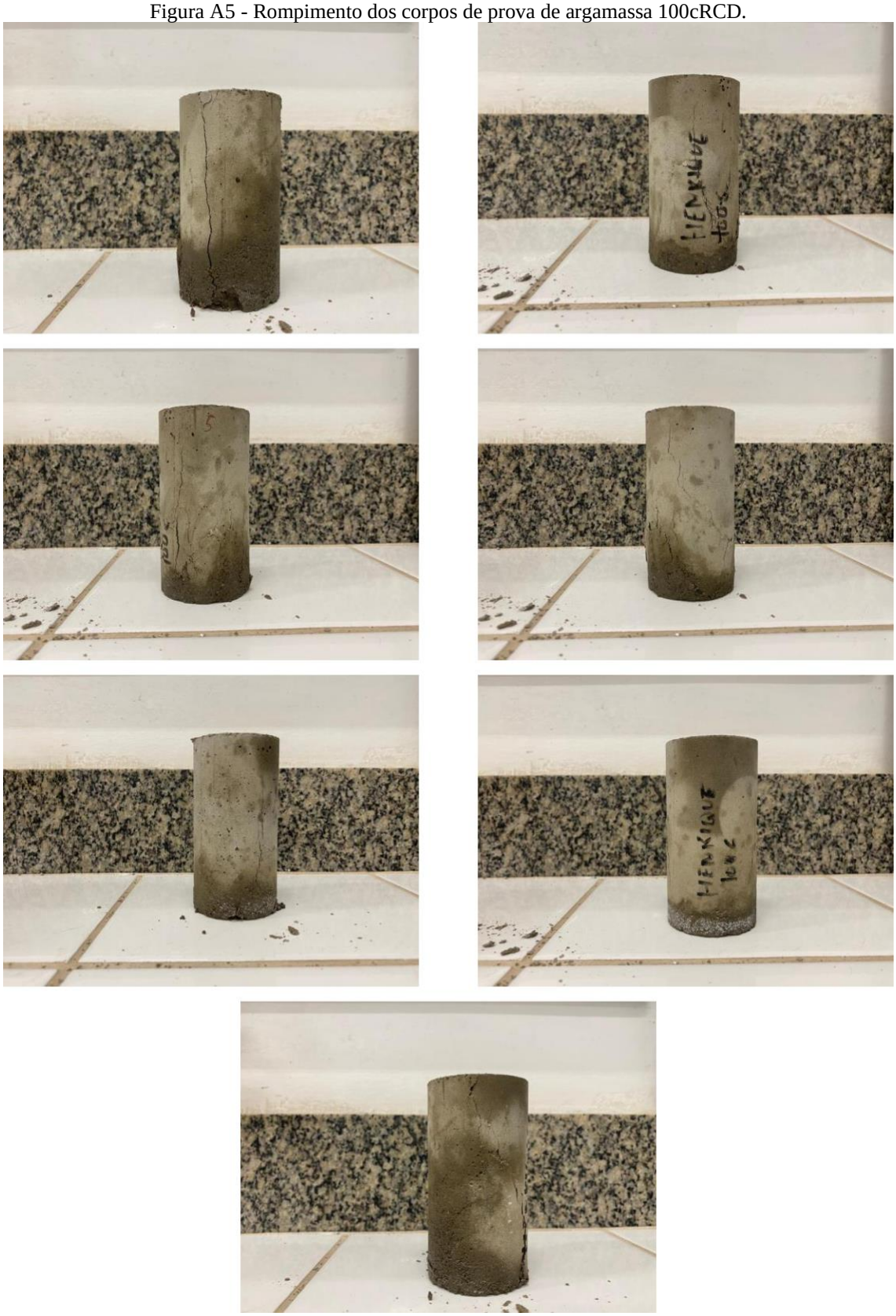
Fonte: Do autor.

Figura A4 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50cRCD.



Fonte: Do autor.

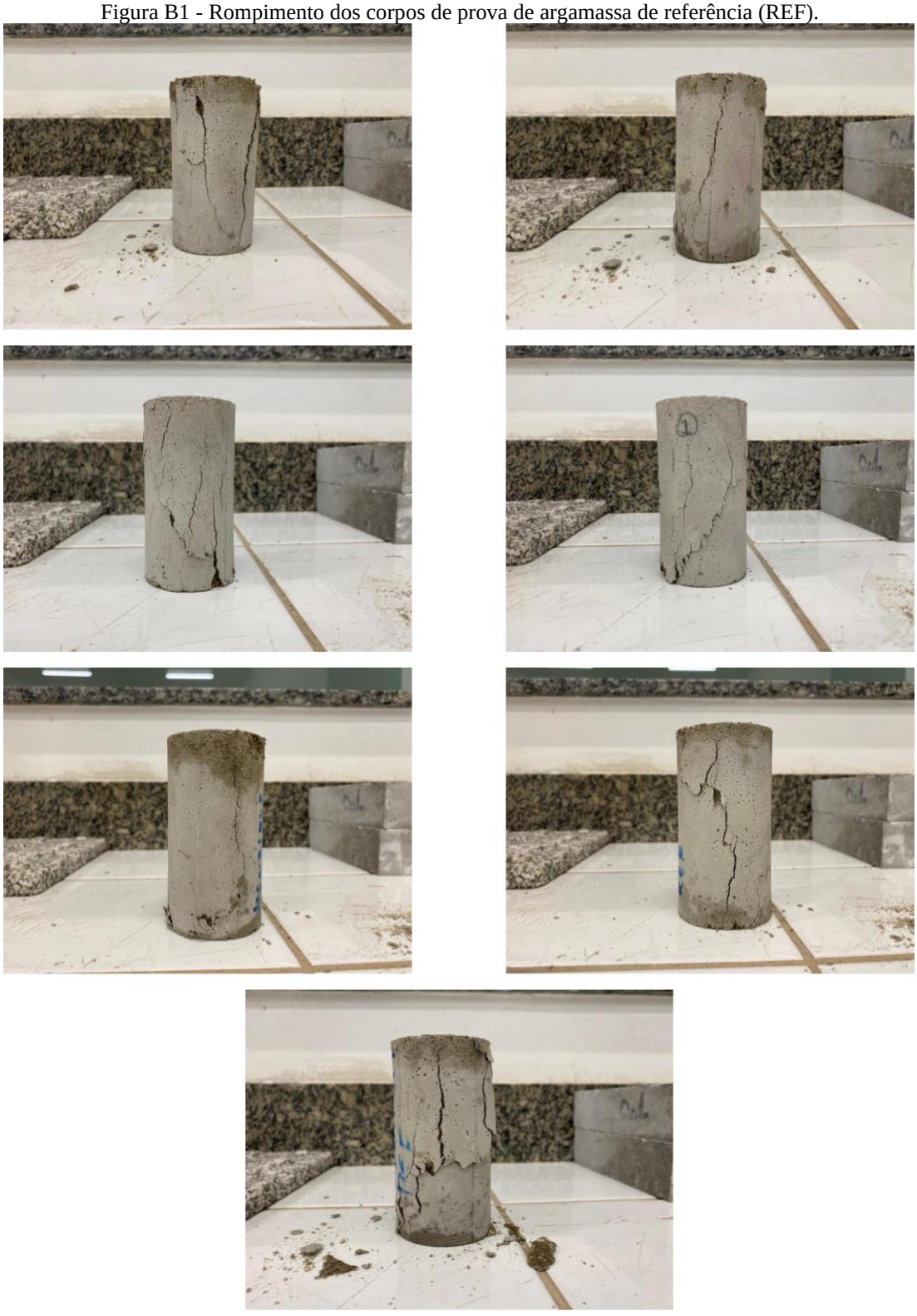
Figura A5 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100cRCD.



Fonte: Do autor.

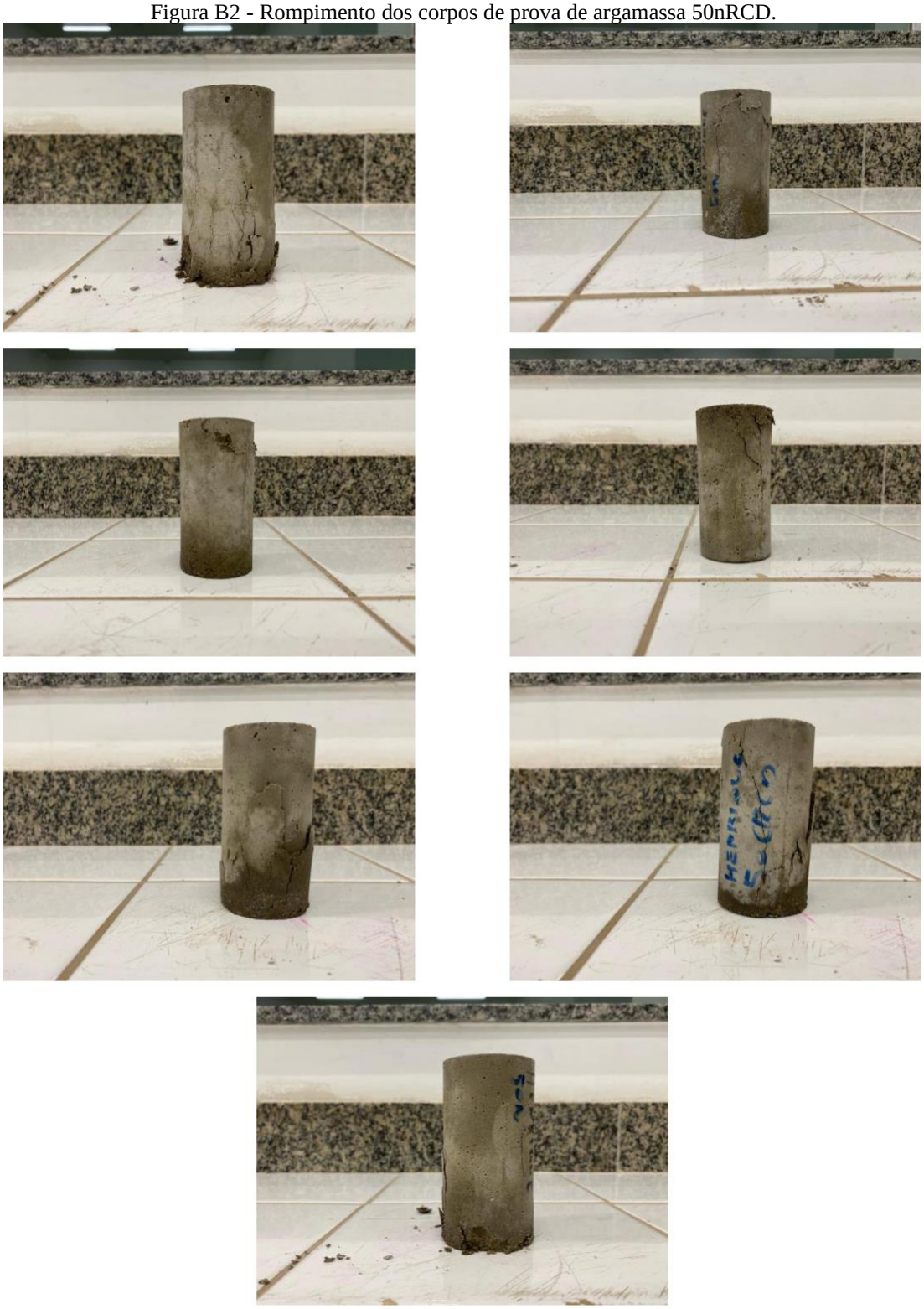
ANEXO B - CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS ROMPIMENTO AOS 28 DIAS

Figura B1 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa de referência (REF).



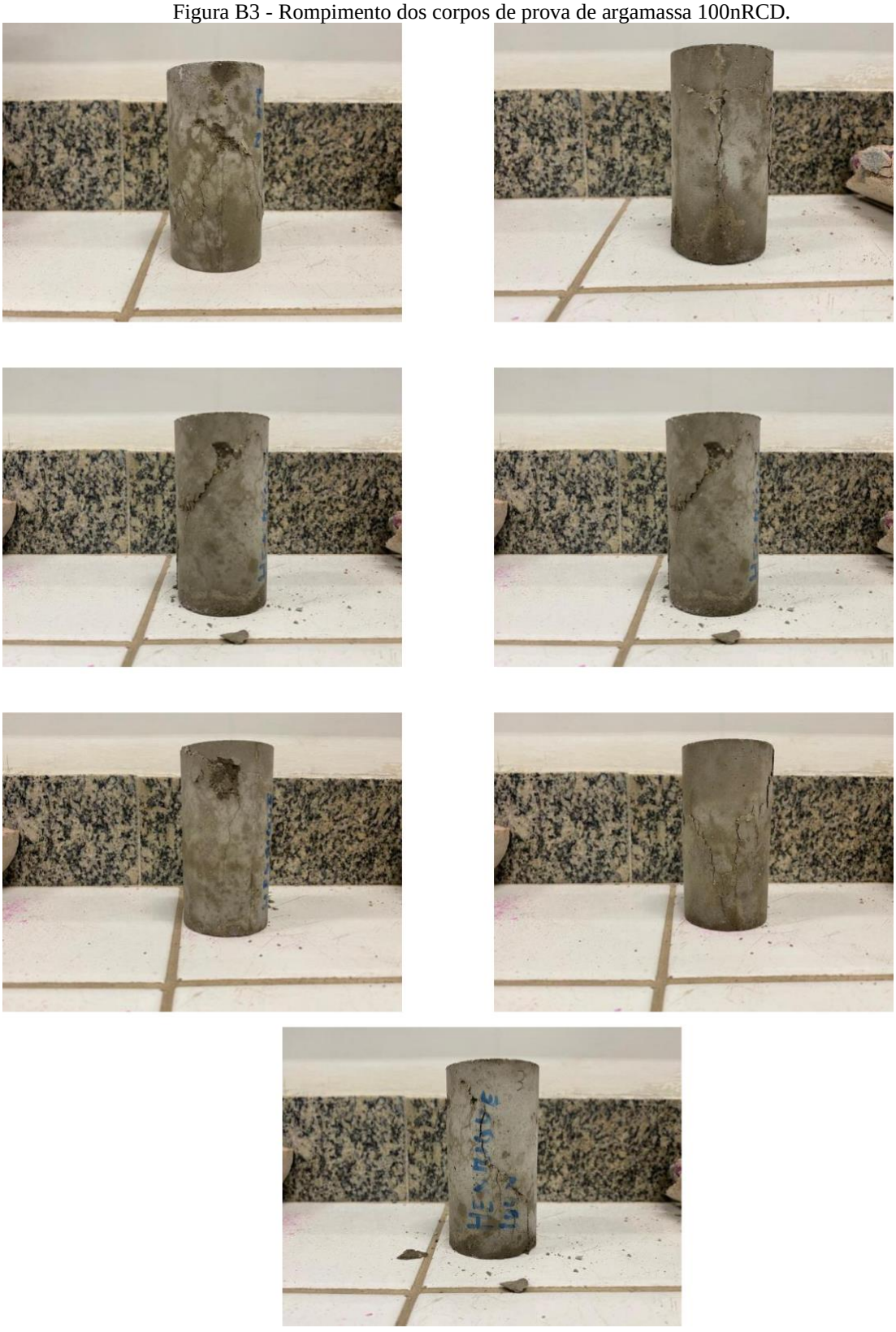
Fonte: Do autor.

Figura B2 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50nRCD.



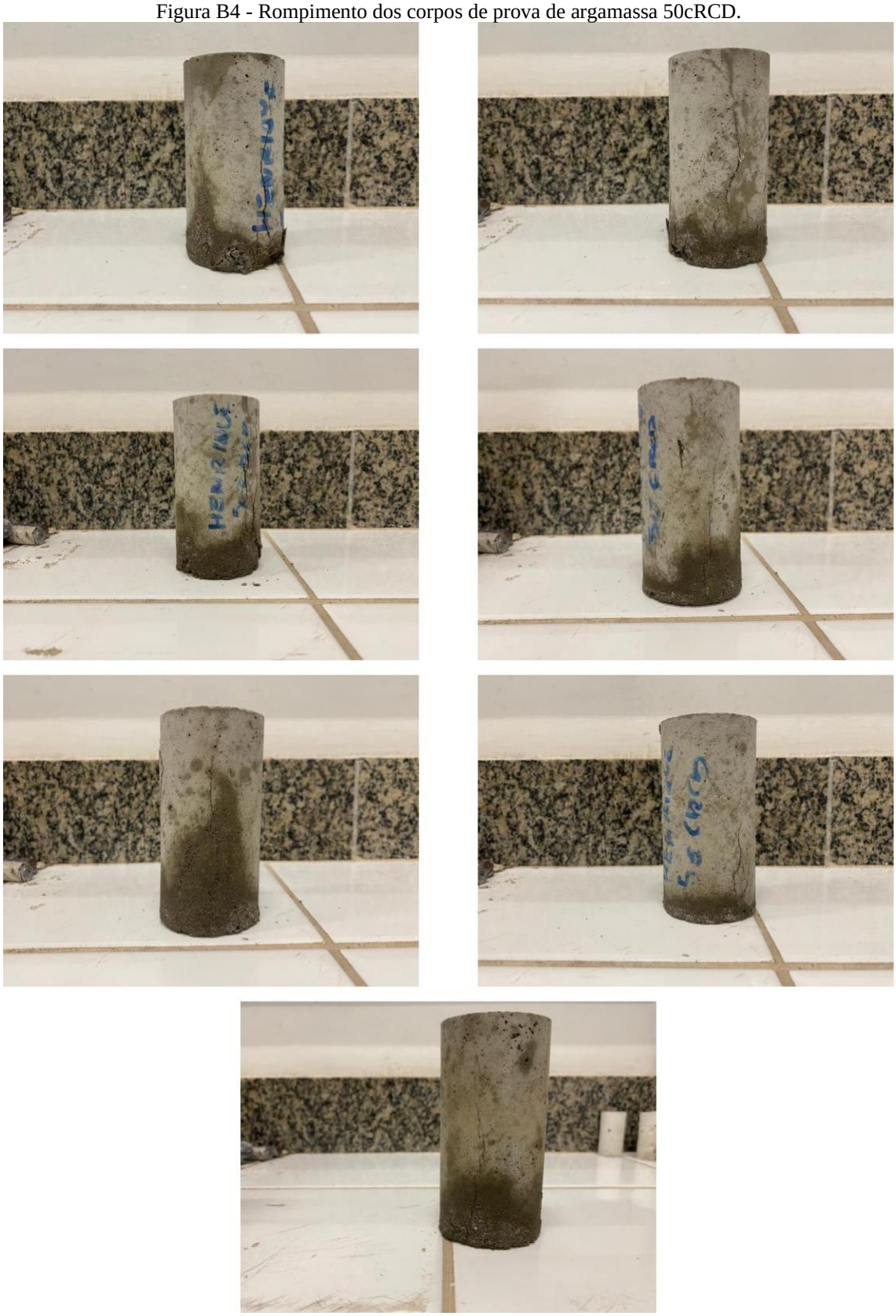
Fonte: Do autor.

Figura B3 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 100nRCD.



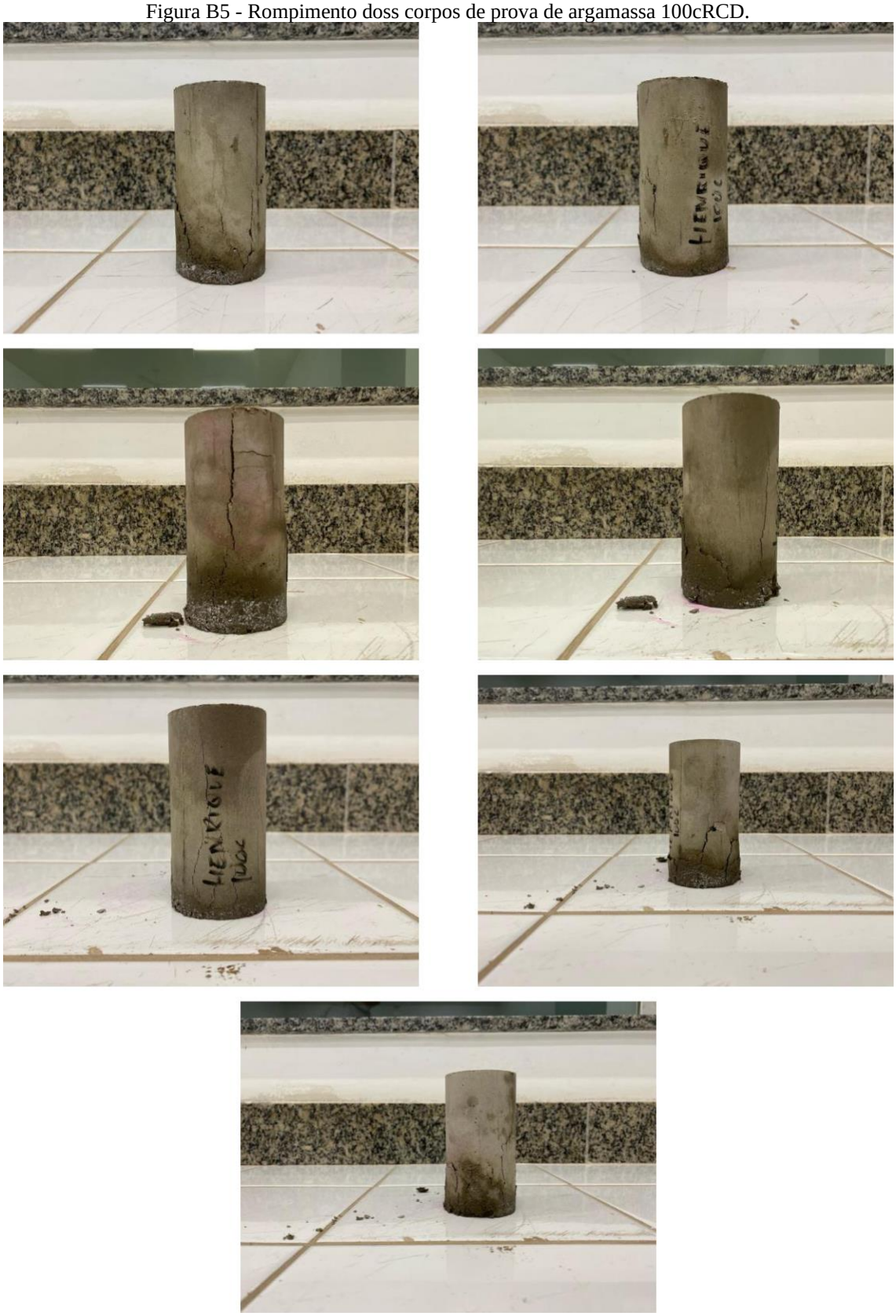
Fonte: Do autor.

Figura B4 - Rompimento dos corpos de prova de argamassa 50cRCD.



Fonte: Do autor.

Figura B5 - Rompimento doss corpos de prova de argamassa 100cRCD.



Fonte: Do autor.