

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:  
Construção e Infraestrutura



ESCOLA DE ENGENHARIA  
UFRGS

**Victor Saldanha Cassel**

# **Tratamento com uso de CO<sub>2</sub> de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO<sub>2</sub>**



PPGCI

Porto Alegre  
2024

VICTOR SALDANHA CASSEL

**TRATAMENTO COM USO DE CO<sub>2</sub> DE AGREGADOS  
GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETOS  
CONTROLADOS: PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS E  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub>**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

**Prof. Denise C. C. Dal Molin**  
Dr., USP, Brasil  
Orientadora

**Prof. Edna Possan**  
Dr., UFRGS, Brasil  
Coorientadora

Porto Alegre  
2024

VICTOR SALDANHA CASSEL

**TRATAMENTO COM USO DE CO<sub>2</sub> DE AGREGADOS  
GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETOS  
CONTROLADOS: PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS E  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub>**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:

Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 04 de abril de 2024.

**Prof. Denise C. C. Dal Molin**  
Dr., USP, Brasil  
Orientadora

**Prof. Edna Possan**  
Dr., UFRGS, Brasil  
Coorientadora

**Prof. Ana Carolina Badalotti Passuelo**  
Coordenadora PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)**  
Ph.D., University of Sheffield, Reino Unido

**Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUCRS)**  
Dr., UFRGS, Brasil

**Prof. Alex Neves Junior (UFMT)**  
Dr., UFRJ, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial os meus pais, Beatris e Bruno, e o meu irmão, André, pelo carinho e amor durante o mestrado. Sem o apoio de vocês eu não teria chegado até aqui.

À minha família pelo carinho e torcida de sempre, para que eu conquiste os meus objetivos. Um agradecimento especial aos meus avós maternos (*in memoriam*), Helena e Vicente, e aos meus avós paternos, Magda e Gilberto, pelo amor incondicional que sempre recebi de vocês.

Aos meus amigos, de longa data e mais recentes, pelo carinho e apoio de sempre, especialmente nos momentos mais difíceis. Sei que estive mais ausente na etapa final do mestrado, mas saibam que sou muito grato pela nossa amizade.

Aos meus amigos que fiz durante o mestrado, pela ajuda de sempre e parceria nos momentos divertidos e nos perrengues que passamos juntos, principalmente no laboratório e na salinha de materiais. Em especial às companhias na ida e volta da UFRGS, o nosso famoso “ônibus”, também pelos desabafos e contribuições nas pesquisas de cada um. A amizade de vocês tornou o mestrado muito mais leve, e que continue assim no doutorado.

Às minhas orientadoras, Denise e Edna, por terem me recebido de maneira acolhedora como orientando, além de todas as palavras de incentivo e apoio em todas as etapas do mestrado. Sou muito grato por ser aluno de duas professoras que são referências na área acadêmica.

Aos demais professores do grupo de materiais do NORIE que participaram da minha caminhada até a conclusão do mestrado, Angela, Daniel, Fernanda e, em especial, Laís, por todo carinho e apoio que recebo desde a época em que trabalhamos juntos quando eu era bolsista de iniciação científica, quando tomamos conta do laboratório com os ensaios de chuva dirigida.

Aos professores Alex e Jairo, pelas excelentes contribuições com o trabalho desde a qualificação, especialmente na realização alguns ensaios.

Aos colegas do grupo de captura de CO<sub>2</sub> e tratamento de agregados reciclados, pela parceria que sempre tivemos, mesmo que à distância. Sem a ajuda de vocês, o processo seria bem mais difícil.

Aos técnicos do laboratório Airton e Ari, pelo auxílio e parceria na realização de ensaios realizados no laboratório. Agradeço também aos bolsistas do LAMTAC/NORIE que participaram do trabalho, principalmente nos dias de moldagem.

À empresa Votorantim Cimentos pela doação do cimento CP IV utilizado neste trabalho.

À CAPES, pelo financiamento com a bolsa de mestrado, e à UFRGS, pela infraestrutura disponibilizada do laboratório.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos!

“A ciência é a melhor ideia que os humanos já tiveram.  
Quanto mais pessoas abraçarem essa ideia, melhor.”

*(Bill Nye)*

## RESUMO

CASSEL, V. S. **Tratamento com uso de CO<sub>2</sub> de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO<sub>2</sub>**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

O setor da construção civil contribui consideravelmente com o aquecimento global, uma vez que a produção do cimento é responsável por 5% a 8% das emissões antropogênicas globais de CO<sub>2</sub>. Atualmente, estão em desenvolvimento alternativas para a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), as quais tem aplicação no tratamento de agregados reciclados de concreto (ARC), em um processo conhecido como mineralização do CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho consiste na avaliação da influência do tratamento com CO<sub>2</sub> de ARC nas propriedades físicas (massa específica e absorção de água), microestruturais (microtomografia de raios-x, microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers) e na captura de CO<sub>2</sub>. Também engloba a avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados tratados (ARCC) ou não (ARC) com CO<sub>2</sub>. Para isso, foram produzidos concretos para processamento e produção de resíduos, utilizando dois tipos de cimento (CP IV e CP V ARI) e duas relações água/cimento (0,55 e 0,65). Por meio das etapas de cominuição e peneiramento, partículas de agregado graúdo com dimensão entre 4,75 e 19 mm foram selecionadas para tratamento com CO<sub>2</sub> em câmara de carbonatação (UR 60%, CO<sub>2</sub> 15%, tempo 24 horas). A determinação da captura de CO<sub>2</sub> pelo ARC foi realizada por termogravimetria. Os resultados indicam que a carbonatação dos agregados foi parcial, e que a relação água/cimento influenciou mais na difusão de CO<sub>2</sub> que o tipo de cimento. O ARC IV\_65 obteve a maior quantidade de CO<sub>2</sub> capturado (12,81 kgCO<sub>2</sub>/ton). Em relação às propriedades físicas, o ARC IV\_65 obteve o maior aumento da massa específica (3,03%) e a maior redução da absorção de água (7,32%) após o tratamento. A análise de variância (ANOVA) indicou que o efeito isolado da mineralização influenciou nestas propriedades. Por microtomografia de raios-x constatou-se que a porosidade de todos os tipos de ARC diminuiu, enquanto no ensaio de microscopia eletrônica de varredura constatou-se que a profundidade de carbonatação não alcançou a região da argamassa aderida próxima à zona de transição interfacial. A avaliação da microdureza Vickers para o ARC IV\_65 indicou que esta propriedade foi aprimorada com o tratamento com CO<sub>2</sub>. Para os concretos produzidos com ARC e ARCC, foi constatado que o efeito isolado do tratamento influenciou positivamente na resistência à compressão; contudo, esta variável não influenciou no módulo de elasticidade. Diante dos resultados obtidos, é possível constatar que o tratamento melhorou as propriedades físicas e microestruturais dos ARC e promoveu o uso e captura de CO<sub>2</sub>. O protocolo de tratamento pode ser aprimorado, de modo a se obter carbonatação completa do ARC, aumentando a captura de CO<sub>2</sub> e o desempenho de concretos produzidos com este material. Dessa forma, o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> de ARC poderá ser utilizado em escala industrial, contribuindo com o desenvolvimento sustentável da construção civil.

**Palavras-chave:** Captura e uso de carbono. Mineralização do CO<sub>2</sub>. Agregado reciclado de concreto.

## ABSTRACT

CASSEL, V. S. **Use of CO<sub>2</sub> for the treatment of controlled coarse aggregates recycled concrete: microstructural properties and CO<sub>2</sub> capture.** 2024. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

The construction sector contributes considerably to global warming, since cement production is responsible for 5% to 8% of global anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. Alternatives for carbon capture, use and storage (CCUS) are currently being developed, which have applications in the treatment of recycled concrete aggregates (RCA), in a process known as CO<sub>2</sub> mineralization. In this sense, the objective of the present work is to evaluate the influence of CO<sub>2</sub> treatment of RCA on physical properties (bulk density and water absorption), microstructural properties (x-ray microtomography, scanning electron microscopy and Vickers microhardness) and CO<sub>2</sub> capture. It also encompasses the evaluation of the mechanical properties of concrete produced with aggregates treated (CRCA) or not (RCA) with CO<sub>2</sub>. To achieve this, concrete was produced for processing and waste production, using two types of cement (CP IV and CP V ARI) and two water/cement ratio (0.55 and 0.65). Through the comminution and sieving steps, coarse aggregate particles with dimensions between 4.75 and 19 mm were selected for treatment with CO<sub>2</sub> in a carbonation chamber (RH 60%, CO<sub>2</sub> 15%, time 24 hours). Determination of CO<sub>2</sub> capture by RCA was carried out using thermogravimetry. The results indicate that the carbonation of the aggregates was partial, and that the water/cement ratio influenced CO<sub>2</sub> diffusion more than the type of cement. The RCA IV\_65 obtained the highest amount of CO<sub>2</sub> captured (12.81 kgCO<sub>2</sub>/ton). Regarding physical properties, RCA IV\_65 obtained the greatest increase in bulk density (3,03%) and the greatest reduction in water absorption (7,32%) after treatment. Analysis of variance (ANOVA) indicated that the isolated effect of mineralization influenced these properties. Using x-ray microtomography it was found that the porosity of all types of RCA decreased, while in the scanning electron microscopy test it was found that the depth of carbonation didn't reach the region of the adhered mortar close to the interfacial transition zone. Vickers microhardness assessment for RCA IV\_65 indicated that this property was improved with CO<sub>2</sub> treatment. For concrete produced with RCA and CRCA, it was found that the isolated effect of the treatment positively influenced the compressive strength; however, this variable didn't influence the elastic modulus. Given the results obtained, it is possible to verify that the treatment improved the physical and microstructural properties of RCA and promoted the use and capture of CO<sub>2</sub>. The treatment protocol can be improved to obtain complete carbonation of the RCA, increasing CO<sub>2</sub> capture and the performance of concrete produced with this material. In this way, the treatment by mineralization of CO<sub>2</sub> from RCA can be used on an industrial scale, contributing to the sustainable development of civil construction.

**Keywords:** Carbon capture and utilization. CO<sub>2</sub> mineralization. Recycled concrete aggregate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo .....	24
Figura 2 - CCS e CCUS na indústria da construção civil.....	26
Figura 3 - Relação entre área superficial e captura de CO <sub>2</sub> .....	29
Figura 4 - Carbonatação dos concretos produzidos na Dinamarca durante o ciclo de vida .....	30
Figura 5 - Profundidade de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> de cimentos com e sem adições pozolânicas .....	31
Figura 6 - Curvas TG de pastas de cimento.....	33
Figura 7 – Análise termogravimétrica (TGA), onde (a) coleta das amostras, (b) resultados da TGA.....	33
Figura 8 - Composição do agregado graúdo reciclado de concreto (ARC), onde (a) desenho esquemático, (b) ilustração real .....	37
Figura 9 - Aspecto dos agregados após o processo de britagem, onde (a) concreto de alta resistência, (b) concreto de baixa resistência.....	38
Figura 10 - Correlação entre o teor de argamassa aderida e absorção de água .....	42
Figura 11 - Influência do teor de saturação do ARC na consistência do concreto .....	45
Figura 12 - Zonas de transição interfacial do concreto com ARC .....	46
Figura 13 - Mecanismo de mineralização do CO <sub>2</sub> em materiais cimentícios.....	50
Figura 14 - Desenho esquemático do tratamento de ARC por mineralização do CO <sub>2</sub> .....	50
Figura 15 - Protocolo dinâmico, onde (a) desenho esquemático da câmara de carbonatação, (b) imagem da câmara de carbonatação .....	51
Figura 16 - Diagramas simplificados da carbonatação, onde (a) gás-sólida, (b) líquido-sólida .....	52
Figura 17 - Relação do teor de umidade do ARC com (a) ganho de massa, (b) porcentagem de carbonatação .....	55
Figura 18 - Efeito da concentração de CO <sub>2</sub> em (a) captura de CO <sub>2</sub> , (b) grau de carbonatação	57
Figura 19 - Relação tempo de carbonatação x redução da absorção de água.....	58
Figura 20 - Microestrutura do ARC antes e depois do tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub> , onde (a) zona de transição interfacial antes do tratamento, (b) zona de transição interfacial após o tratamento, (c) microfissuras antes do tratamento, (d) microfissuras após o tratamento, (e) porosidade antes do tratamento, (f) porosidade após o tratamento .....	62
Figura 21 - Segmentação dos poros do ARC com base em imagem de BSE, onde (a) imagem de BSE mostrando a interface do ARC, (b) tiras sucessivas adjacentes à ZTI, (c) segmentação dos poros para as tiras isoladas.....	63
Figura 22 - Resistência à compressão (círculo) e densidade (cruz) dos três concretos ao longo do tempo .....	65
Figura 23 - Fluxograma de pesquisa .....	67
Figura 24 - Análise termogravimétrica (TGA) do (a) CP IV, (b) CP V ARI.....	70
Figura 25 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	71
Figura 26 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural, onde (a) etapas I, (b) etapa III.....	73
Figura 27 - Diagrama de dosagem.....	76

Figura 28 - Processo de beneficiamento dos resíduos de concreto .....	78
Figura 29 - Distribuição granulométrica dos ARC e ARCC .....	81
Figura 30 - Câmara de sazonalização, onde (a) desenho esquemático, (b) em ambiente climatizado.....	82
Figura 31 - Disposição dos ARC em bandejas para o tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub> .	83
Figura 32 - Amostras para a análise termogravimétrica, onde (a) ARC, (b) ARCC.....	85
Figura 33 - Disposição das amostras em bandejas para o ensaio de massa específica.....	91
Figura 34 - Preparação das amostras para o MEV, onde (a) parada de hidratação em álcool isopropanol, (b) armazenamento em embalagens com sílica gel .....	93
Figura 35 - Amostras para o MEV após a metalização .....	94
Figura 36 - Forma de indentação Vickers, onde D = diagonal e h = profundidade .....	95
Figura 37 - Amostra para o ensaio de microdureza Vickers .....	96
Figura 38 - Grade de pontos de indentação .....	97
Figura 39 - TGs e DTGs dos ARC NC e CA, onde (a) IV_55, (b) IV_65, (c) V_55, (d) V_65 .....	102
Figura 40 - Captura de CO <sub>2</sub> dos ARC .....	106
Figura 41 - Efeito isolado da relação água/cimento na captura de CO <sub>2</sub> .....	107
Figura 42 - Resultados ANOVA para a massa específica, onde (a) efeito isolado da mineralização, (b) efeito combinado da relação água/cimento e tipo de cimento, (c) efeito combinado da relação água/cimento e mineralização, (d) efeito combinado da relação água/cimento, tipo de cimento e mineralização.....	111
Figura 43 - Resultados ANOVA para a absorção de água, onde (a) efeito isolado do tipo de cimento, (b) efeito isolado da mineralização.....	113
Figura 44 - Porosidade dos ARC e ARCC .....	114
Figura 45 - Mapas de distribuição dos principais elementos dos ARC e ARCC obtidas por EDS.....	117
Figura 46 - Mapa de contorno e histograma do ensaio de microdureza Vickers (MHV), onde (a) IV_65 – NC, e (b) IV_65 - CA .....	123
Figura 47 - Efeito isolado do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão aos (a) 28 dias, (b) 63 dias.....	127
Figura 48 - Resultados ANOVA da resistência à compressão, onde (a) efeito isolado da mineralização, (b) efeito isolado da idade, (c) efeito combinado da relação água/cimento e tipo de cimento, (d) efeito combinado da relação água/cimento, tipo de cimento e mineralização, (e) efeito combinado do tipo de cimento, mineralização e idade.....	128
Figura 49 - Efeito isolado do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade .....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de influência da captura de CO <sub>2</sub> .....	27
Tabela 2 - Distribuição granulométrica dos agregados após o processo de britagem.....	39
Tabela 3 - Massa específica e unitária de ARC de diferentes estudos .....	41
Tabela 4 - Absorção de água de ARC de diferentes estudos.....	43
Tabela 5 - Captura de CO <sub>2</sub> de ARC após o tratamento .....	60
Tabela 6 - Variação da massa específica e absorção de água do ARC após o tratamento .....	61
Tabela 7 – Caracterização física e mecânica do CP IV e CP V ARI .....	69
Tabela 8 - Caracterização química por FRX do CP IV e CP V ARI.....	69
Tabela 9 - Caracterização física do agregado miúdo.....	71
Tabela 10 - Caracterização física do agregado graúdo natural utilizado na etapa I e etapa III	72
Tabela 11 - Resultado da curva de dosagem experimental .....	75
Tabela 12 - Traço dos concretos.....	76
Tabela 13 - Caracterização dos concretos mestres no estado endurecido .....	78
Tabela 14 - Rendimento dos agregados após o processo de beneficiamento .....	79
Tabela 15 - Identificação dos tipos de ARC e ARCC .....	80
Tabela 16 - Composição granulométrica (média) dos ARC e ARCC.....	80
Tabela 17 - Protocolo de tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub> .....	85
Tabela 18 - Aspecto das amostras de ARC e ARCC para o ensaio de microtomografia de raios-x .....	92
Tabela 19 - Traço unitário dos concretos (CARC).....	98
Tabela 20 - Graus de saturação dos ARC.....	99
Tabela 21 - Ensaio de CARC no estado endurecido.....	101
Tabela 22 – Difusão de CO <sub>2</sub> no ARC.....	104
Tabela 23 - Teores dos principais compósitos.....	105
Tabela 24 - ANOVA para variável dependente captura de CO <sub>2</sub> .....	107
Tabela 25 - Caracterização dos ARC .....	108
Tabela 26 - Resultados de massa específica e absorção de água.....	109
Tabela 27 - ANOVA para variáveis dependentes massa específica e absorção de água .....	110
Tabela 28 - Imagens dos ARC e ARCC obtidas no ensaio de $\mu$ CT .....	114
Tabela 29 - Imagens dos ARC e ARCC obtidas no ensaio de MEV.....	116
Tabela 30 - Resultados de microdureza Vickers (MHV) .....	122
Tabela 31 - Quantitativo de material e propriedades do estado fresco de CARC .....	124
Tabela 32 - Resultados de resistência à compressão aos 28 e 63 dias.....	125
Tabela 33 - ANOVA para variável dependente resistência à compressão .....	126
Tabela 34 - Resultados de módulo de elasticidade.....	130
Tabela 35 - ANOVA para variável dependente módulo de elasticidade.....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu$ CT: Microtomografia de raios-x  
a/c: Relação água/cimento  
AGN: Agregado graúdo natural  
ANOVA: Análise de variância  
ARC: Agregado graúdo reciclado de concreto  
ARCC: Agregado graúdo reciclado de concreto carbonatado  
ASTM: Sociedade americana de testes e materiais  
BSE: Elétrons retroespalhados  
C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico  
C<sub>3</sub>S: Silicato tricálcico  
Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de cálcio  
CA: Carbonatado  
CaCO<sub>3</sub>: Carbonato de cálcio  
C-A-H: Aluminato de cálcio hidratado  
CaO: Óxido de cálcio  
CARC: Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto  
CCS: Captura e armazenamento de carbono  
CCU: Captura e utilização de carbono  
CCUS: Captura, utilização e armazenamento de carbono  
CEN/TR: Comitê europeu de normalização / relatório técnico  
CO<sub>2</sub>: Dióxido de cálcio  
CONAMA: Conselho nacional do meio ambiente  
CP IV: Cimento Portland pozolânico  
CP V ARI: Cimento Portland de alta resistência  
C-S-H: Silicato de cálcio hidratado  
CV: Coeficiente de variação  
DTG: Derivada da termogravimetria  
Ec: Módulo de elasticidade  
EDS: Espectrômetro de energia dispersiva  
Fc28: Resistência à compressão aos 28 dias  
FRX: Fluorescência de raios-x  
GEE: Gases do efeito estufa  
H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: Ácido carbônico

IPR: Instituto de petróleo e recursos naturais  
IPT: Instituto de pesquisas tecnológicas  
KOH: Hidróxido de potássio  
LAMTAC: Laboratório de materiais e tecnologia do ambiente construído  
MEV: Microscopia eletrônica de varredura  
MHV: Microdureza Vickers  
NaOH: Hidróxido de sódio  
NBR: Norma brasileira  
NC: Não-carbonatado  
NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção  
ODS: Objetivos de desenvolvimento sustentável  
ONU: Organização das nações unidas  
pH: Potencial de hidrogênio  
PVA: Álcool polivinílico  
RCD: Resíduos de construção e demolição  
TGA: Análise termogravimétrica  
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UNILA: Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
ZTI: Zona de transição interfacial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	20
1.2	HIPÓTESES DE PESQUISA .....	21
1.3	DELIMITAÇÕES .....	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
2.1	CAPTURA DE CO <sub>2</sub> EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	23
2.1.1	Carbonatação em materiais cimentícios .....	23
2.1.2	Captura, utilização e estocagem de carbono (CCUS).....	24
2.1.3	Parâmetros de influência da captura de CO <sub>2</sub> .....	27
2.1.4	Análise termogravimétrica para determinação da captura de CO <sub>2</sub> .....	32
2.2	AGREGADO RECICLADO DE RCD.....	34
2.2.1	Agregados graúdos reciclados de concreto (ARC).....	36
2.2.2	Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto (CARC) .....	44
2.3	TRATAMENTO DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC) .....	48
2.3.1	Tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub> .....	49
2.3.2	Captura de CO <sub>2</sub> através do tratamento por mineralização.....	59
2.3.3	Agregados graúdos reciclados de concreto tratados com CO <sub>2</sub> (ARCC) .....	60
2.3.4	Concreto com ARCC .....	63
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	<b>67</b>
3.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	67
3.1.1	Variáveis dependentes .....	67
3.1.2	Variáveis independentes .....	68
3.1.3	Variáveis fixas .....	68
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS .....	68
3.2.1	Cimento .....	68
3.2.2	Agregado miúdo .....	70
3.2.3	Agregado graúdo natural (AGN).....	72
3.2.4	Água.....	74

3.3	ETAPA I – PRODUÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)	74
3.3.1	Produção dos concretos mestres	74
3.3.2	Beneficiamento dos resíduos	78
3.4	ETAPA II – TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS ARC	81
3.4.1	Tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub>	81
3.4.1.1	Condição de sazonalidade	81
3.4.1.2	Protocolo de tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub>	83
3.4.2	Determinação da captura de CO <sub>2</sub>	85
3.4.2.1	Análise termogravimétrica (TG e DTG)	85
3.4.2.2	Metodologia de cálculo	86
3.4.3	Propriedades físicas dos ARC e ARCC	89
3.4.3.1	Teor de argamassa aderida	89
3.4.3.2	Índice de forma	90
3.4.3.3	Massa unitária	90
3.4.3.4	Massa específica	90
3.4.3.5	Absorção de água	91
3.4.4	Propriedades microestruturais dos ARC e ARCC	91
3.4.4.1	Microtomografia de raios-x (μCT)	91
3.4.4.2	Microscopia eletrônica varredura (MEV)	93
3.4.4.3	Microdureza Vickers (MHV)	95
3.5	ETAPA III – APLICAÇÃO DOS ARC E ARCC EM CONCRETOS	97
3.5.1	Definição dos traços	97
3.5.2	Saturação dos ARC	99
3.5.3	Produção dos corpos de prova	99
3.5.4	Propriedades no estado fresco	100
3.5.5	Propriedades no estado endurecido	100
4	RESULTADOS	102
4.1	DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO <sub>2</sub>	102
4.1.1	Análise termogravimétrica (TGA)	102
4.1.2	Captura de CO <sub>2</sub>	105
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ARC E ARCC	108
4.2.1	Propriedades físicas	108
4.2.2	Propriedades microestruturais	113
4.2.2.1	Microtomografia de raios-x (μCT)	113

4.2.2.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	115
4.2.2.3	Microdureza Vickers (MHV).....	121
4.3	<b>CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETO RECICLADO (CARC) .....</b>	<b>123</b>
4.3.1	<b>Propriedades no estado endurecido.....</b>	<b>124</b>
5	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
5.1	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>135</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE A – Captura de CO<sub>2</sub> – Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey .....</b>	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE B – Caracterização física dos ARC e ARCC – Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey .....</b>	<b>152</b>
	<b>APÊNDICE C – Imagens obtidas com aproximação de 150x no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE D - Resultados individuais do ensaio de Microdureza Vickers (MHV).....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE E – Propriedades de CARC no estado endurecido – Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey .....</b>	<b>159</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um dos maiores problemas enfrentados pela humanidade nos dias de hoje, sendo a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) uma das principais causas (IPCC, 2022). O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é um dos principais GEE emitidos na atmosfera, sendo responsável por 76% do processo de aquecimento global (NOAA, 2021). Atualmente as emissões globais de  $\text{CO}_2$  são maiores do que em qualquer outro período da história, atingindo a marca de 36,3 Gt em 2021 (IEA, 2022).

No contexto da construção civil, o cimento é um material com alto impacto ambiental na sua produção, com 5% a 8% das emissões antropogênicas de  $\text{CO}_2$  do mundo sendo atribuídas à sua produção ( $\text{CO}_2$ .EARTH, 2020). Na produção do clínquer, principal componente do cimento, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e formação do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), seguido da liberação de  $\text{CO}_2$  para o meio ambiente. Esta reação é inerente ao processo e representa 63% das emissões (SNIC, 2019). O restante das emissões de  $\text{CO}_2$  da produção do cimento consistem no uso de combustíveis fósseis e no consumo de energia elétrica.

Nos últimos anos, os principais *Roadmaps* tecnológicos do cimento publicados apresentam alternativas para alcançar o zero líquido de emissões até 2050 da indústria cimenteira (SNIC, 2019; CEMBUREAU, 2020; GCCA, 2021). Entre as principais alternativas, estão: uso de adições ou substitutos do clínquer, conhecidos como “materiais cimentícios suplementares” (MCS); uso de combustíveis alternativos ao fóssil; maior eficiência térmica e energética; ações para promover a captura e utilização ou armazenamento de carbono (CCUS - do inglês “*Carbon Capture, Utilisation and Storage*”).

A CCUS é considerada a alternativa com maior potencial de contribuição, e sua estimativa de redução das emissões da indústria cimenteira até 2050 varia de 38 Mt de  $\text{CO}_2$  (SNIC, 2019) a 1370 Mt de  $\text{CO}_2$  (GCCA, 2021). De acordo com o *Roadmap* tecnológico brasileiro do cimento (SNIC, 2019), os principais desafios para a implementação da CCUS são: aumento dos custos relacionados à energia elétrica; desenvolvimento de políticas públicas para regulamentar o processo de operação; e os elevados custos das etapas de captura, transporte e armazenamento do  $\text{CO}_2$ , considerando o baixo valor agregado do produto.

Nos materiais cimentícios, a CCUS pode ser aplicada através da reação de carbonatação mineral (mineralização) (HARGIS et al., 2021; SCHNEIDER et al., 2011). Dessa forma, materiais como concreto, argamassa e pasta de cimento podem ser considerados um sumidouro de carbono, devido ao potencial de fixação permanente do CO<sub>2</sub> em sua matriz.

A carbonatação ocorre em diferentes etapas do ciclo de vida de materiais cimentícios, e o potencial de captura de CO<sub>2</sub> do material é diferente em cada uma delas, sendo o período pós-demolição a etapa com maior potencial, devido ao aumento da área superficial exposta ao ambiente (ANDRADE; SANJUÁN, 2018; KALIYAVARADHAN; LING, 2017; PADE; GUIMARAES, 2007). Dessa forma, os resíduos de materiais cimentícios possuem um papel fundamental na captura de CO<sub>2</sub>.

Estes resíduos fazem parte do grupo denominado Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Segundo a resolução do CONAMA 307/2002, estes resíduos podem ser reutilizados na construção civil como agregados reciclados (RA), em substituição aos agregados naturais (NA) (CONAMA, 2002).

Devido à crescente demanda por novas construções para o desenvolvimento urbano, a produção anual de RCD ultrapassou a marca de 3 bilhões de toneladas (AKHTAR; SARMAH, 2018). China, Índia e Estados Unidos são os países com maior índice de geração de RCD, produzindo 1,13 bilhão, 530 milhões e 519 milhões de toneladas por ano, respectivamente. Em 2018, o total de RCD gerado na União Europeia foi de 835 milhões de toneladas, representando 36% dos resíduos de todas as atividades econômicas e pessoas físicas no continente europeu (EUROSTAT, 2020).

No Brasil, foram coletadas mais de 48 milhões de toneladas de RCD no ano de 2021, com crescimento de 2,9% em relação ao ano anterior (ABRELPE, 2022). Os resíduos de materiais cimentícios e cerâmicos representam cerca de 90% dos RCD que podem ser reutilizados na construção civil (CONTRERAS et al., 2016; FERREIRA et al., 2019). Apesar do potencial de reciclagem, apenas 6,14% destes resíduos são reutilizados (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Um dos principais motivos para o baixo índice de reciclagem dos RCD consiste no fato de que estes materiais, na forma de agregado reciclado, possuem algumas propriedades inferiores aos agregados naturais. No caso dos agregados graúdos reciclados de concreto (ARC), a

argamassa aderida apresenta, normalmente, alta porosidade e elevado coeficiente de absorção de água e, portanto, as propriedades no estado fresco e endurecido de concretos produzidos com agregados reciclados podem ser prejudicadas (POON et al., 2023; SHI et al., 2016).

Nesse sentido, o uso de técnicas de tratamento de ARC são desejáveis para aprimorar as propriedades destes materiais. Diversos autores citam que o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, através da carbonatação, é uma das técnicas mais abordadas nas pesquisas atuais (SHI et al., 2016; TAM et al., 2020; LIU et al., 2021; PU et al., 2021, 2023). Este tratamento pode preencher os poros e microfissuras da argamassa aderida do ARC, e tornar o material mais denso. Além disso, promove a aplicação da CCUS na indústria da construção civil com a utilização do CO<sub>2</sub> e sua captura permanente na matriz cimentícia.

Embora os mecanismos da mineralização tenham sido abordados com maior frequência, poucos estudos avaliaram o potencial de captura CO<sub>2</sub> do material durante o tratamento de ARC, como forma de estimar sua contribuição na redução das emissões da indústria da construção (LI et al., 2022; SERENG et al., 2021). Outra lacuna de pesquisa consiste na falta de pesquisas que avaliem a influência das características do concreto que deu origem ao resíduo (como o tipo de cimento e a relação água/cimento) na eficiência do tratamento.

Em vista do que foi discutido neste capítulo, espera-se que o aumento de pesquisas nesta área possa viabilizar tecnicamente o uso de ARC em novas construções e contribuir com a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, a construção civil auxilia na disseminação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente os objetivos 12 e 13, que tratam sobre o consumo e produção responsáveis e ação contra a mudança global do clima, respectivamente.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo geral da pesquisa:

**Avaliar a eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> de agregados graúdos reciclados de concretos controlados quanto às suas propriedades físicas e microestruturais, e à captura de CO<sub>2</sub>.**

Objetivos específicos da pesquisa:

- Avaliar a influência do tipo de cimento e da relação água/cimento do concreto que deu origem ao agregado graúdo reciclado na eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>;
- Avaliar o efeito do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, em substituição total ao agregado natural;
- Avaliar a influência das propriedades mecânicas do concreto que deu origem ao agregado graúdo reciclado com as propriedades mecânicas do concreto produzido com este material.

## 1.2 HIPÓTESES DE PESQUISA

A principal hipótese de pesquisa consiste no fato de que o consumo e tipo de cimento do concreto que originou o resíduo influencia na eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> do ARC. Além disso, espera-se que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com estes agregados tratados com CO<sub>2</sub> sejam aprimoradas em comparação com os concretos produzidos com agregados sem tratamento, sendo próximas com o concreto convencional.

## 1.3 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimita-se ao estudo da eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> de agregados graúdos reciclados de concreto, a partir de uma condição de sazonalidade e um protocolo definidos com base na revisão bibliográfica, incluindo a análise das propriedades físicas e microestruturais deste material após o tratamento e o potencial de captura de CO<sub>2</sub>. Além disso, foram utilizados dois tipos de cimento (CP IV e CP V ARI) e duas relações água/cimento (0,55 e 0,65) na produção do concreto que deu origem ao agregado reciclado, de forma a avaliar sua influência na eficiência do tratamento. A avaliação dos concretos produzidos com os agregados reciclados consistiu na análise do abatimento do tronco de cone e massa específica (estado fresco) e na resistência à compressão aos 28 e 63 dias, e no módulo de elasticidade aos 63 dias (estado endurecido).

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentado o contexto e a justificativa do tema de pesquisa, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos, delimitação e estrutura do trabalho. No capítulo 2 são abordados os principais tópicos desta pesquisa: captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios, incluindo a reação de carbonatação, a tecnologia CCUS, principais parâmetros que influenciam no potencial de captura e sua quantificação a partir da análise termogravimétrica; agregado reciclado de RCD, com foco nos agregados graúdos reciclados de concreto (ARC) e na sua utilização em concretos estruturais; e tratamento dos ARC, incluindo as principais técnicas e a discussão sobre o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, potencial de captura de CO<sub>2</sub>, propriedades dos ARC após o tratamento e sua influência no concreto produzido com este material.

No capítulo 3 está descrito o programa experimental, com a apresentação do fluxograma de pesquisa no primeiro item. Após, são apresentados os níveis de cada tipo de variável da pesquisa, os materiais utilizados e sua caracterização e a descrição dos procedimentos e métodos utilizados em cada etapa do programa experimental.

Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados no capítulo 4, assim como as análises estatísticas e discussões. Por fim, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

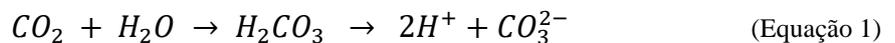
Este capítulo aborda a literatura relacionada com os principais tópicos desta pesquisa: processo de captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios; agregados graúdos reciclados de concreto (ARC), incluindo o processo de beneficiamento dos resíduos e suas propriedades que influenciam na qualidade dos concretos produzidos com substituição ao agregados naturais; e o tratamento de ARC por mineralização do CO<sub>2</sub>, bem como os protocolos de tratamento utilizados em pesquisas anteriores, parâmetros de influência e o desempenho de concretos produzidos com ARC tratados com CO<sub>2</sub> (ARCC).

### 2.1 CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

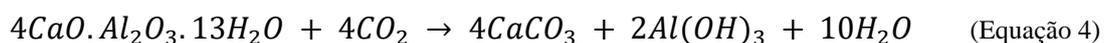
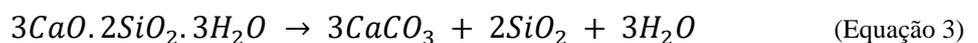
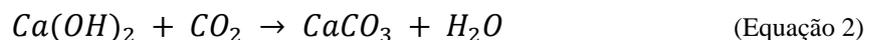
A discussão sobre a captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios se concentrou nos seguintes itens: processo de carbonatação, tecnologia CCUS, parâmetros de influência e quantificação da captura de CO<sub>2</sub> através da análise termogravimétrica.

#### 2.1.1 Carbonatação em materiais cimentícios

A carbonatação é um processo físico-químico que consiste na reação do CO<sub>2</sub> atmosférico com os compostos da matriz cimentícia (NEVILLE, 2016). A primeira etapa da carbonatação consiste na difusão do CO<sub>2</sub> através dos poros capilares do material cimentício (SERENG, 2020). Quando o CO<sub>2</sub> se dissolve com a água presente nos poros, ocorre a formação do ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Esta dissolução resulta na liberação de íons de hidrogênio, provocando a redução do pH do material. A Equação 1 representa esta reação.

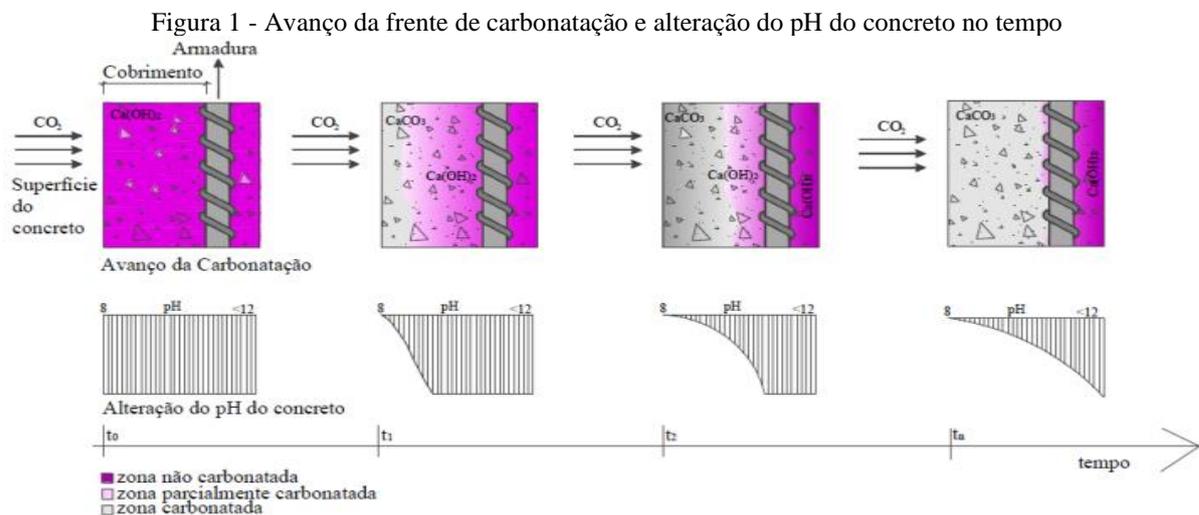


Após a formação do ácido carbônico, este composto reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), considerado o principal produto hidratado da carbonatação (NEVILLE, 2016). Entre os compostos carbonatáveis secundários do cimento estão o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (KALIYAVARADHAN; LING, 2017). As reações destes compostos com o CO<sub>2</sub> estão representadas nas Equações 2, 3 e 4.



Os hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) presentes no cimento também são compostos carbonatáveis (CASCUDO; CARASEK, 2011). Contudo, os sais formados nesta reação são considerados instáveis e tendem a reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , formando carbonatos de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) termodinamicamente estáveis, conforme representado na Equação 2.

Quando ocorre a carbonatação, o pH da solução dos poros da pasta diminui de um valor entre 12,6 e 13,5 para aproximadamente 9,0, reduzindo a alcalinidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Em estruturas de concreto armado, a carbonatação compromete a durabilidade pois, com a diminuição do pH, ocorre a despassivação da armadura, deixando o aço suscetível ao fenômeno da corrosão (POSSAN, 2010). A Figura 1 representa o avanço da frente de carbonatação ao longo do tempo até atingir a armadura.



Contudo, a carbonatação em materiais cimentícios aplicados sem armadura pode ser considerada benéfica do ponto de vista da sustentabilidade, devido à capacidade desses materiais em capturar  $\text{CO}_2$  do ambiente (PADE; GUIMARÃES, 2007; XI et al., 2016). Como a carbonatação é uma reação inversa ao processo de calcinação que ocorre na produção do clínquer, a captura de  $\text{CO}_2$  pode ser uma alternativa para compensar as emissões associadas à produção do cimento (POSSAN et al., 2017; RIGO, 2019).

### 2.1.2 Captura, utilização e estocagem de carbono (CCUS)

A tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, do inglês “*Carbon Capture, Utilization and Storage*”) tem sido abordada em pesquisas recentes e é considerada como uma das alternativas com potencial para alcançar o zero líquido de emissões globais de

CO<sub>2</sub> (HARGIS et al., 2021; DE KLEIJNE et al., 2022; MONTEIRO; ROUSSANALY, 2022; ZAJAC et al., 2022). Na prática, a CCUS é resultado da combinação de duas tecnologias separadas: captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês “*Carbon Capture and Storage*”) e captura e utilização de carbono (CCU, do inglês “*Carbon Capture and Utilization*”) (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2018).

A tecnologia CCS consiste na captura de CO<sub>2</sub> de fontes emissoras ou diretamente da atmosfera, transporte e armazenamento em local seguro, como reservatórios geológicos e poços de petróleo (IPCC, 2005). No caso da tecnologia CCU, após a captura, o CO<sub>2</sub> é utilizado em diversas indústrias como a cimenteira e química, como um produto de valor econômico e ambiental. Segundo Hepburn et al. (2019), a tecnologia CCUS pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio da substituição de recursos naturais e combustíveis fósseis e da captura permanente do CO<sub>2</sub>.

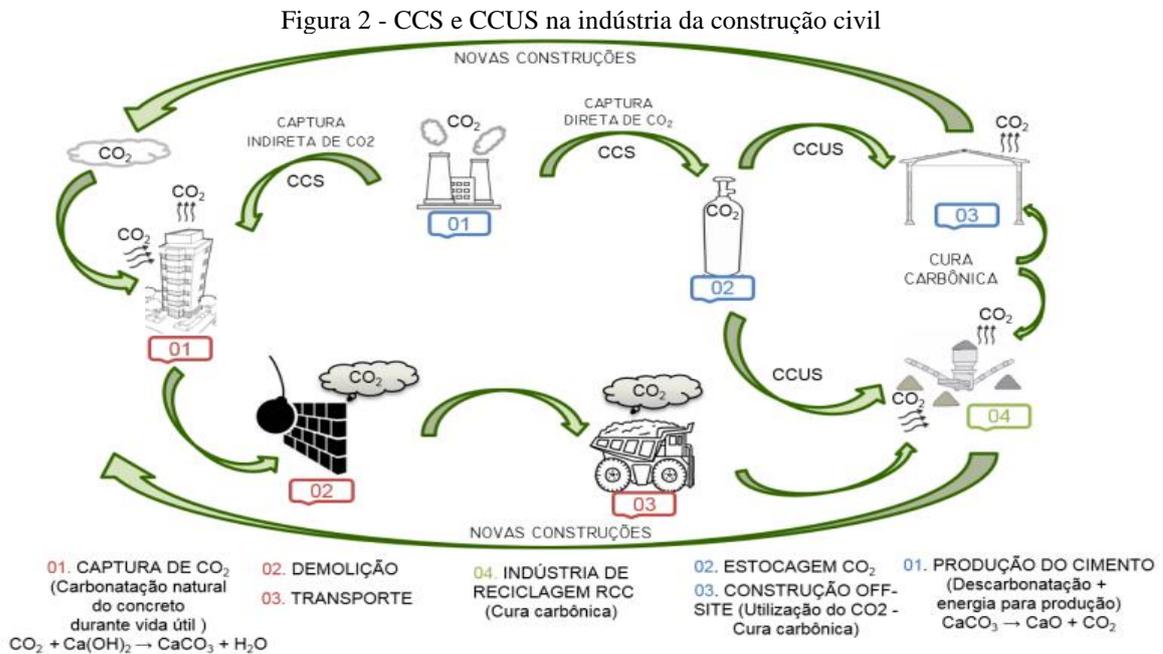
A captura de CO<sub>2</sub> pode ocorrer de duas maneiras: através do processo indireto ou direto (POSSAN, 2019). O processo direto consiste na captura do CO<sub>2</sub> que ocorre na aplicação da tecnologia CCS. No caso do processo indireto, este ocorre de forma natural, ou seja, sem interferência humana. A fotossíntese das plantas e a carbonatação durante e após a vida útil de materiais cimentícios são exemplos de captura de CO<sub>2</sub> por este método.

No que se refere à captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios, a carbonatação natural pode ocorrer em diferentes fases do ciclo de vida, desde sua produção até o período pós-demolição ou, no caso destes materiais serem reutilizados em novas construções, em um período conhecido como “vida secundária”, quando a economia circular for adotada (COLLINS, 2013). Estudos anteriores avaliaram o potencial de captura de CO<sub>2</sub> global de materiais cimentícios durante o ciclo de vida, em diferentes períodos (XI et al., 2016; GUO et al., 2021).

Xi et al. (2016) consideraram a carbonatação natural no concreto, argamassa, resíduos de materiais cimentícios e pó de forno de cimento no período de 1930 a 2013. Os autores concluíram que 4,5 Gt de CO<sub>2</sub> foi capturado neste período, o que representa uma compensação de 43% das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo de descarbonatação na produção do cimento. No estudo de Guo et al. (2021) foram considerados os mesmos materiais, porém dentro do período de 1930 a 2019. A estimativa de captura de CO<sub>2</sub> foi de

21,02 Gt, valor este que equivale a aproximadamente 55% das emissões da produção do cimento, excluindo as emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis.

Devido à baixa concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (0,03% a 1%) (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007), o processo de carbonatação natural em materiais cimentícios pode necessitar de um longo período para reabsorver a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida na produção do cimento (RIGO, 2019). Como forma de aumentar a compensação das emissões da indústria cimenteira, a tecnologia CCUS pode ser aplicada a partir da captura direta de CO<sub>2</sub> emitido na produção do clínquer e sua utilização em processos como a cura carbônica de elementos pré-fabricados e o tratamento de agregados reciclados da construção (POSSAN, 2019). A Figura 2 apresenta as possíveis aplicações da CCS e CCUS na construção civil.



Fonte: SELLA, 2022.

Embora a aplicação da tecnologia de captura de carbono na indústria ainda esteja em fase inicial, algumas empresas do setor da construção já estão contribuindo com as metas globais de neutralização das emissões de CO<sub>2</sub> até 2050. A *Heidelberg Materials*, empresa alemã de cimento e materiais de construção, é responsável pelo primeiro projeto de CCS em escala industrial, com capacidade de capturar 400.000 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente (BEUMELBURG, 2019). A empresa canadense *CarbonCure Technologies* aplica a tecnologia CCUS através da cura carbônica à mistura do concreto, alcançando a economia de aproximadamente 200.000 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas na atmosfera (CARBONCURE, 2023).

De acordo com Hanifa et al. (2023), a tecnologia CCUS ainda necessita ser otimizada de modo a reduzir as emissões diretas e indiretas devido ao consumo energético do processo e transporte do CO<sub>2</sub>. Atualmente, existem cerca de 40 instalações de CCUS em funcionamento em nível mundial, com uma capacidade de capturar 45 Mt de CO<sub>2</sub> anualmente (IEA, 2023). Para cumprir as metas globais de emissões, é estimado que o número de instalações seja 100 vezes maior até 2050.

### 2.1.3 Parâmetros de influência da captura de CO<sub>2</sub>

Os principais fatores que influenciam no processo de carbonatação e, consequentemente, na captura de CO<sub>2</sub> dos materiais cimentícios, são divididos em três categorias: (i) condições ambientais; (ii) condições de exposição; e (iii) características do material (POSSAN, 2019; SELLA, 2022). A Tabela 1 apresenta os parâmetros que constam em cada categoria.

Tabela 1 - Parâmetros de influência da captura de CO<sub>2</sub>

Categoria	Parâmetros
Condições ambientais	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Concentração de CO<sub>2</sub> (%)</li> <li>→ Temperatura (°C)</li> <li>→ Umidade relativa (%)</li> </ul>
Condições de exposição	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Ambiente interno, externo, protegido ou desprotegido da chuva</li> <li>→ Área superficial (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</li> </ul>
Características do material	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Relação água/aglomerante</li> <li>→ Composição química do aglomerante</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às condições ambientais, a temperatura e umidade relativa favoráveis para a carbonatação é melhor compreendida do que a concentração de CO<sub>2</sub> (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). Uma alta variação de temperatura pode influenciar a taxa de carbonatação, alterando a solubilidade de substâncias reagentes, como cálcio e CO<sub>2</sub>, e a condição de vapor da amostra (DROUET et al., 2019). Contudo, é consenso que uma variação entre 20 °C e 40 °C não possui influência na carbonatação, pois este processo é controlado pela difusão do CO<sub>2</sub> na estrutura de poros do material cimentício (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; NEVILLE, 2016).

A umidade relativa influencia na carbonatação pois, em ambientes com alta umidade ( $\geq 80\%$ ), a difusão de CO<sub>2</sub> é lenta, devido ao elevado grau de saturação dos poros. Por outro lado, quando o grau de saturação dos poros for baixo ( $\leq 40\%$ ), o CO<sub>2</sub> permanece no estado gasoso e

não reage com os produtos de hidratação da matriz cimentícia (NEVILLE, 2016). Diversos autores concordam que a faixa ideal de umidade relativa está entre 50% e 70% (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; KULAKOWSKI, 2002; PAULETTI, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

A concentração de CO<sub>2</sub> afeta significativamente tanto a difusão do gás como o grau de carbonatação, determinado pela formação do CaCO<sub>3</sub> (XU et al., 2022). O aumento deste parâmetro provoca alterações na microestrutura do material cimentício e pode não representar o potencial de captura de CO<sub>2</sub> em ambiente natural.

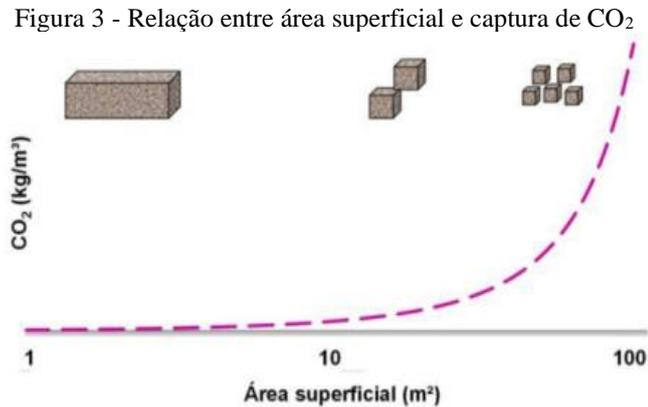
Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) citam que o uso de concentração de CO<sub>2</sub> de 5% é considerado o ideal para o ensaio de carbonatação acelerada, como forma de simular a carbonatação natural e o potencial de captura de CO<sub>2</sub> durante a vida útil. Outro estudo descreve que a utilização de concentração de CO<sub>2</sub> de 3% permite obter um grau de carbonatação mais representativo com as condições naturais (AUROY et al., 2018).

De acordo com Sereng (2020), a norma europeia PD CEN/TR 17310 sobre carbonatação e captura de CO<sub>2</sub> no concreto (CEN/TR, 2019) limita o uso de concentração de CO<sub>2</sub> de 3%, permitindo que a formação do CaCO<sub>3</sub> seja da mesma natureza e textura ao que ocorre na carbonatação natural. No entanto, este limite não foi considerado para o presente trabalho, por não se tratar de uma simulação da carbonatação natural em ambiente acelerado ou uma quantificação da captura de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida dos materiais cimentícios, e sim um processo de uso intencional de CO<sub>2</sub>.

As condições de exposição influenciam no potencial de captura de CO<sub>2</sub> devido à sua influência na umidade interna do material, caso o local de aplicação seja interno ou externo à edificação e protegido ou desprotegido da chuva. Segundo Neville (2016), a profundidade de carbonatação tende a ser maior em ambientes externos e protegidos da chuva pois, em locais desprotegidos da chuva, o grau de saturação dos poros aumenta e pode chegar a 100%, limitando a difusão do CO<sub>2</sub>.

Outro parâmetro importante dentro desta categoria consiste na área de exposição do material ao ambiente, conhecida como área superficial. A área superficial é a relação da área do material exposta ao ambiente com o volume, e é um dos principais parâmetros de influência no potencial de captura de CO<sub>2</sub> (ANDRADE; SANJUÁN, 2018). Nesse caso, quanto maior a

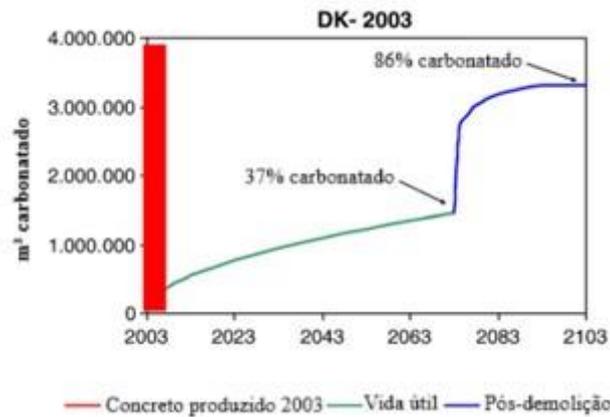
área superficial, menor será a profundidade de carbonatação necessária para atingir os compostos carbonatáveis da matriz cimentícia. A Figura 3 apresenta um gráfico que demonstra o crescimento exponencial na absorção de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de material, sendo este parâmetro diretamente proporcional ao aumento da área superficial.



A carbonatação natural ao longo da vida útil é geralmente limitada a uma pequena área superficial de material exposta ao ambiente, o que ocorre em elementos estruturais como pilares e vigas (KALIYAVARADHAN; LING, 2017). Nesse sentido, os resíduos de construção e demolição de materiais cimentícios têm maior potencial de captura de CO<sub>2</sub>. A depender do local onde o material permanecer após a sua demolição e trituração, é possível que o mesmo seja totalmente carbonatado antes de ser reaproveitado (COLLINS, 2013).

No estudo de Kjellsen, Guimarães e Nilsson (2005), os autores realizaram uma previsão de captura de CO<sub>2</sub> dos concretos em um período de 100 anos nos países nórdicos, incluindo a Dinamarca, Islândia, Noruega e Suécia. Considerando a carbonatação natural no período de 70 anos de vida útil e 30 anos após a demolição da estrutura, os concretos produzidos na Dinamarca obtiveram um grau de carbonatação de 37% durante a vida útil e alcançou a marca de 86% ao final dos 30 anos após a demolição, conforme ilustrado na Figura 4. Este foi o maior percentual entre os quatro países, devido ao alto índice de material triturado e reciclado na Dinamarca.

Figura 4 - Carbonatação dos concretos produzidos na Dinamarca durante o ciclo de vida



Fonte: Traduzido de KJELLEN, GUIMARÃES e NILSSON, 2005.

Além das condições ambientes e de exposição, algumas características do material cimentício também possuem influência no processo de carbonatação e, conseqüentemente, na captura de CO<sub>2</sub>. De acordo com Neville (2016), o principal parâmetro de controle da carbonatação é a porosidade do material, que é influenciada diretamente pelo tipo e consumo de cimento, ou seja, pela relação água/aglomerante utilizada na mistura, e pelo grau de hidratação da mistura.

Segundo Ferreira (2013), uma elevada relação água/aglomerante afeta diretamente a microestrutura do concreto endurecido, com o aumento da porosidade e redução das propriedades mecânicas do material. Logo, a velocidade e profundidade de carbonatação tende a ser maior em materiais com maior relação água/aglomerante (NEVILLE, 2016).

Considerando a carbonatação natural, em concretos com relação água/aglomerante acima de 0,60 é possível obter dados de profundidade carbonatada após um ano de exposição (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). O período mínimo necessário para a verificação deste dado é de 20 anos para concretos com relação água/aglomerante inferior a 0,50, indicando a facilidade de difusão de CO<sub>2</sub> em materiais mais porosos.

Outro fator que influencia no potencial de captura CO<sub>2</sub> do material é a composição química do cimento Portland utilizado, principalmente devido ao teor de clínquer, adições minerais e pozolanas (SELLA, 2022). A autora comenta que quanto maior o teor de clínquer, maior será a quantidade de óxido de cálcio (CaO) disponível para carbonatar.

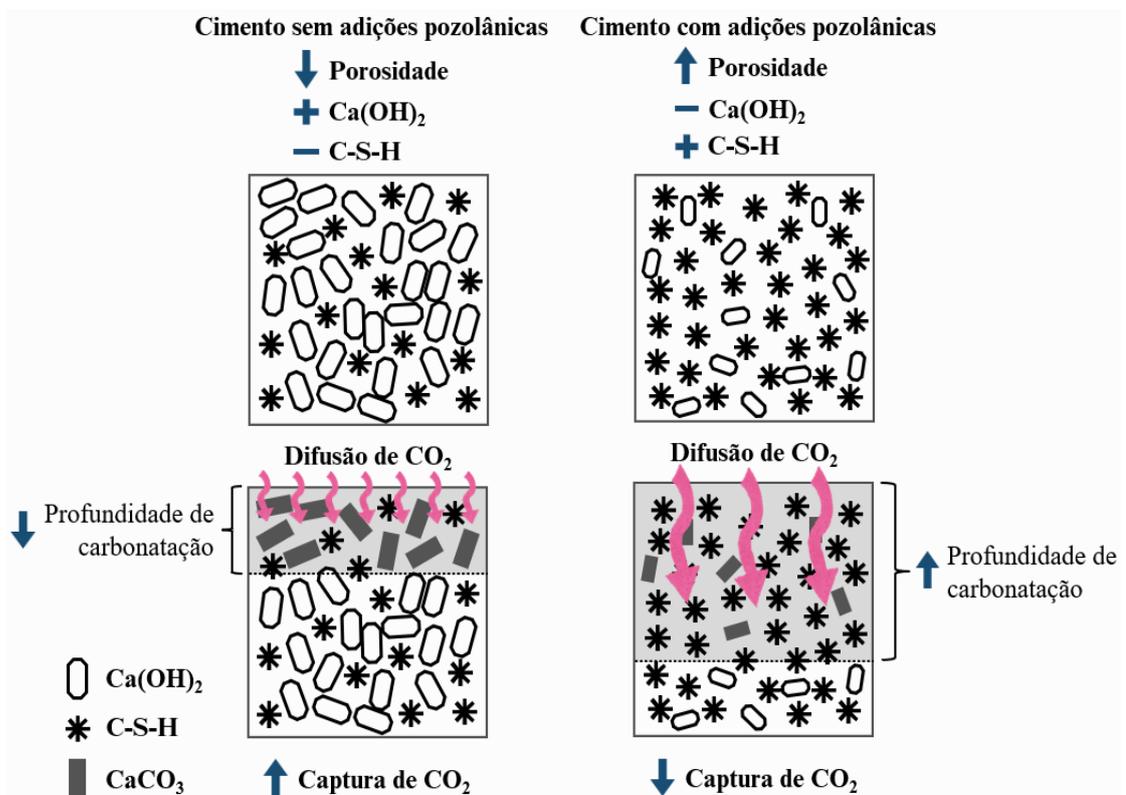
Segundo Stumpp (2003), cimentos com adições minerais ou com maior teor de clínquer podem apresentar uma pequena profundidade de carbonatação devido à proteção química imposta pela reserva alcalina do material e pelo refinamento dos poros causado pelas adições

e pelo grau de finura do cimento. Dessa forma, o avanço da frente de carbonatação ocorre após a reação com os produtos de hidratação, aumentando a captura de  $\text{CO}_2$  da matriz cimentícia ao longo do tempo (MAZURANA, 2019).

No caso dos cimentos com adições pozolânicas, o avanço da frente de carbonatação é facilitado devido à baixa reserva alcalina, o que não significa uma elevada captura de  $\text{CO}_2$  na matriz, considerando que este material possui uma quantidade pequena de  $\text{CaO}$  disponível para reagir com o  $\text{CO}_2$  (MAZURANA, 2019). Contudo, devido à maior formação de C-S-H em idades mais avançadas e, conseqüentemente, maior disponibilidade de  $\text{CaO}$  na sua composição, os materiais cimentícios com pozolanas podem apresentar um aumento das fases carbonatadas ao longo de sua vida útil (STUMPP, 2003).

Dessa forma, observa-se que a profundidade de carbonatação nem sempre está relacionada com a captura de  $\text{CO}_2$  (MAZURANA, 2019). A Figura 5 apresenta um desenho esquemático do comportamento de cimentos com e sem adições pozolânicas em relação à difusão de  $\text{CO}_2$ .

Figura 5 - Profundidade de carbonatação e captura de  $\text{CO}_2$  de cimentos com e sem adições pozolânicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.1.4 Análise termogravimétrica para determinação da captura de CO<sub>2</sub>

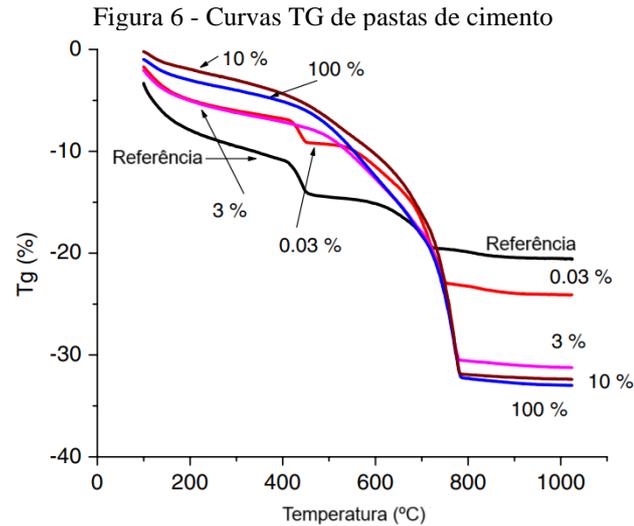
A análise termogravimétrica (TGA) consiste em uma técnica analítica que tem como intuito a determinação da variação de massa de uma amostra, através da sua decomposição, quando aquecida a uma taxa previamente definida, sendo constante ou dinâmica (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). Esta técnica tem sido amplamente utilizada em estudos de quantificação de captura de CO<sub>2</sub> a partir da verificação dos teores de Ca(OH)<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub> em amostras de materiais cimentícios não carbonatadas e carbonatadas (BORGES et al., 2023; SELLA, 2022; RIGO, 2019; NEVES JUNIOR et al., 2019).

Conforme a literatura, as faixas de decomposição que correspondem à desidroxilação do Ca(OH)<sub>2</sub> e à descarbonatação do CaCO<sub>3</sub> está em torno de 380-450 °C e 500-750 °C, respectivamente (TAYLOR, 1997; HEWLETT, 1998; VILLAIN; THIERY; PLATRET, 2007). Segundo Rostami et al. (2012), também é possível observar as alterações do C-S-H devido à carbonatação a partir das modificações dos picos referentes à água total combinada que ocorrem até 380 °C.

A análise consiste na visualização do início e fim dos picos dos principais compostos do material que sofreram decomposição durante o aquecimento da amostra. Esta visualização é possível a partir da plotagem das curvas termogravimétricas e suas derivadas (TGA e DTG) em *Software* específico.

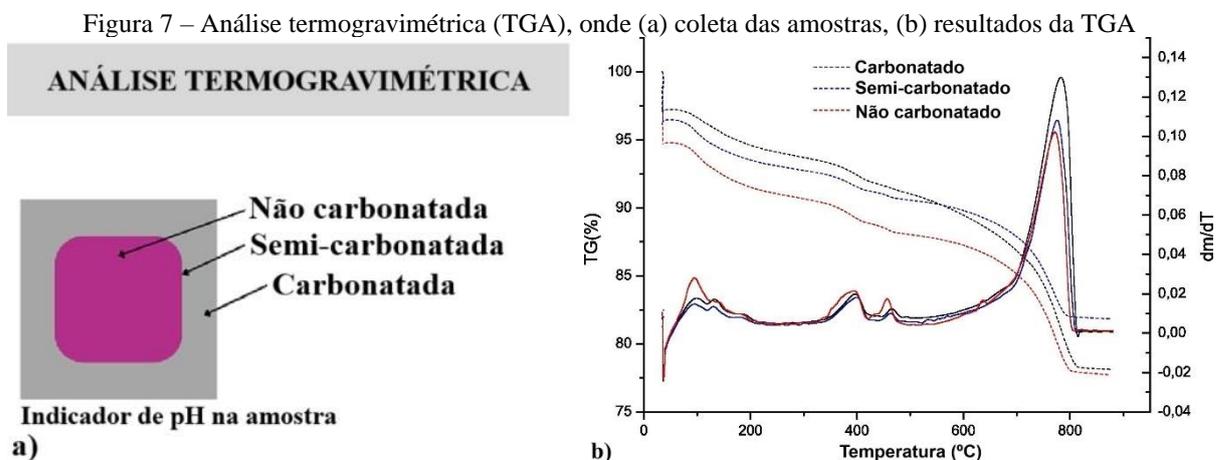
No estudo de Castellote et al. (2009) foram analisadas as fases de pastas de cimento submetidas à carbonatação acelerada em ambientes com diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (3%, 10% e 100%), em comparação com a carbonatação natural (0,03%). As amostras foram produzidas com relação a/c de 0,50, e permaneceram na câmara de carbonatação acelerada por 103 dias, quando estavam totalmente carbonatadas. As amostras expostas em ambiente natural permaneceram nesta condição por 8 meses, e foram analisadas por termogravimetria mesmo que não estivessem completamente carbonatadas.

O procedimento utilizado na coleta das amostras para a TGA não foi especificado, e a quantificação de captura de CO<sub>2</sub> não foi avaliada neste estudo. A Figura 6 representa as curvas termogravimétricas obtidas para os quatro cenários (além da referência), indicando o consumo total do Ca(OH)<sub>2</sub> a partir do cenário com 3% de CO<sub>2</sub> e carbonatação máxima para o cenário com 100% de CO<sub>2</sub>.



Em uma pesquisa sobre a avaliação do potencial de captura de  $\text{CO}_2$  a partir da análise termogravimétrica, foram produzidas argamassas com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural por agregado de resíduos de construção e demolição (25%, 50%, 75% e 100%) (BORGES et al., 2023). Os corpos de prova foram expostos em câmara de carbonatação acelerada com 3% de  $\text{CO}_2$  por 28 dias.

Para o procedimento de coleta das amostras foi utilizada uma solução de 1% de fenolftaleína, como forma de identificar as zonas não carbonatadas, semi-carbonatadas e carbonatadas, conforme a Figura 7a. As curvas termogravimétricas e suas derivadas estão representadas na Figura 7b e indicam a redução dos picos de C-S-H e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o aumento do pico de  $\text{CaCO}_3$  na amostra carbonatada de um dos traços produzidos, conforme o esperado.



Apesar de consistir em uma estimativa mais simples de se determinar a captura de CO<sub>2</sub>, a análise termogravimétrica possui alguns fatores que podem aumentar a variabilidade do ensaio (SELLA, 2022). Os principais fatores são: tipo de forno, tipo de cadinho, quantidade de material, granulometria dos grãos da amostra, fluxo de gás, razão de aquecimento, tipo de gás de purga e teor de umidade da amostra. Para que resultados confiáveis sejam obtidos, Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016) recomendam que estes fatores sejam mantidos em todos os ensaios de uma pesquisa.

## 2.2 AGREGADO RECICLADO DE RCD

No Brasil, a gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD) é preconizada pela resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esta resolução tem como intuito propor diretrizes, critérios e procedimentos para minimizar os impactos da alta geração de resíduos no país e classifica os diversos tipos de resíduos em quatro classes (A, B, C e D) (CONAMA, 2002). Os principais resíduos gerados na construção civil são: concreto, argamassa, cerâmica, asfalto, aço, madeira, gesso, vidro e tinta (OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016). No caso dos resíduos de concreto, estes são classificados como resíduo classe A, ou seja, podem ser reutilizados como agregado reciclado em concretos e argamassas de novas construções.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em relação aos possíveis riscos ao meio ambiente e à saúde pública, levando em consideração o processo que o originou e suas características e composição. Os resíduos são classificados em “classe I - perigosos”, “classe II - não perigosos”, “classe II A - não inertes” e “classe II B - inertes”, sendo esta última a classe onde os resíduos de construção e demolição estão inseridos. Portanto, não há restrições quanto à origem e composição para o reaproveitamento destes resíduos.

Para serem utilizados como agregados reciclados, os resíduos de construção e demolição devem passar por um processo de beneficiamento. Segundo Dos Santos (2020), o beneficiamento dos resíduos não difere muito em relação à produção de agregados naturais, pois ambos os processos envolvem as etapas de coleta, transporte, separação, cominuição, peneiramento e armazenamento até sua utilização.

O processo de beneficiamento do RCD tem como objetivo a produção de agregados reciclados com distribuição granulométrica definida e a classificação quanto à sua natureza (resíduo de concreto, resíduo cimentício ou resíduo misto), conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021). As principais etapas deste processo são: triagem, cominuição e peneiramento (ANGULO; ULSEN, 2023).

As usinas nacionais de reciclagem de RCD englobam principalmente a cominuição e o peneiramento (ANGULO, 2005). O objetivo da cominuição consiste em reduzir o tamanho das partículas dos resíduos e pode ser realizada através da britagem ou moagem, a depender da granulometria desejada do material (CHAVES, 1996).

A britagem consiste na ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbulas) ou impacto (britagem por impacto) e é o procedimento mais comum utilizado para a produção de agregados reciclados. O peneiramento é realizado para separar as partículas quanto à sua granulometria, definindo se o agregado reciclado será utilizado na fração graúda ( $>4,75\text{mm}$ ), miúda ( $>0,15\text{mm}$  e  $<4,75\text{mm}$ ) ou pó ( $<0,15\text{mm}$ ), conforme a definição da NBR 7211 (ABNT, 2022).

A energia e abertura da mandíbula durante a britagem, assim como a resistência e composição do material que deu origem ao resíduo, são fatores que influenciam na granulometria do agregado reciclado (LEITE, 2001; CORDEIRO, 2013; DOS SANTOS, 2020). Dessa forma, é de suma importância conhecer as características da matéria-prima do resíduo, pois isto contribui para garantir o emprego adequado como agregado reciclado (TENÓRIO, 2007).

A utilização de agregados reciclados em novos materiais é vista como a alternativa mais eficaz para o reaproveitamento de RCD e pode reduzir o impacto ambiental da construção civil (SERENG et al., 2021). Assim, é possível diminuir o descarte inadequado de resíduos e a exploração de matéria-prima como areia e brita, utilizados como agregados naturais (SANTOS; LEITE, 2018).

O nível de recuperação do RCD nos países desenvolvidos é maior do que no Brasil (AKHTAR; SARMAH, 2018). Países como Irlanda, Malta e Holanda atingem a marca de 100% de recuperação, enquanto em outros países europeus este nível supera os 90%, como a Alemanha, Áustria, Dinamarca, Itália e Portugal (EUROSTAT, 2018). Nos Estados Unidos,

terceiro país com maior geração de resíduos no mundo, 76% dos RCD são reciclados (EPA, 2018).

De acordo com Nunes e Mahler (2020), a maioria dos RCD utilizados como agregado reciclado na construção civil é aplicada em construções de estradas e obras de drenagem. Um exemplo desta utilização ocorreu na reforma do estádio Maracanã para a Copa do Mundo de 2014 (VINCIGUERRA et al., 2015). Na ocasião, 100% do concreto demolido (aproximadamente 42 mil m<sup>3</sup>) passou pelo processo de beneficiamento. A britagem do material resultou em agregado graúdo para ser utilizado em obras de reforço de subleito e sistemas de drenagem em volta ao estádio.

Na China, um edifício foi construído com 388 m<sup>3</sup> de concreto com 100% de agregado graúdo reciclado de RCD (LI, 2008). O autor comenta que este edifício foi o primeiro no país a incorporar uma quantidade significativa de agregado reciclado para concreto estrutural, e que os resultados de ensaios mecânicos e de durabilidade indicaram que o concreto atende aos requisitos de desempenho para o concreto convencional.

Devido à falta de agregados naturais com boa qualidade e à demanda por construções de infraestrutura para a Copa do Mundo de 2022, o governo do Qatar investiu em pesquisas para avaliar o uso de agregado reciclado de RCD em concreto estrutural (REID; AL-KUWARI; EL-GAMIL HASSAN, 2016). Os resultados indicaram que é possível substituir o agregado natural em até 20% por agregado reciclado, sem comprometer o desempenho do material.

Este teor de substituição está de acordo com o preconizado pela NBR 15116 (ABNT, 2021), que também limita a 20% de substituição do agregado natural por agregado reciclado de RCD e restringe a aplicação desses concretos apenas em locais com classe de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2023). Contudo, esta norma técnica especifica que o agregado graúdo reciclado de concreto (ARC) é o único tipo que pode ser utilizado em concretos estruturais, sendo este o material de estudo do presente trabalho.

### **2.2.1 Agregados graúdos reciclados de concreto (ARC)**

Os resíduos de concreto são produzidos a partir da demolição de estruturas de concreto, além de outros locais como fábricas de elementos pré-moldados e centrais de dosagem de concreto (BUTTLER, 2003). Após a britagem, este material é composto de no mínimo 90% por

agregado natural e argamassa aderida na fração graúda, conforme a NBR 9935 (ABNT, 2011).

A quantidade de argamassa aderida presente no ARC varia entre 25% e 70% (OUYANG et al., 2020). Os autores comentam que este valor depende das características do concreto que deu origem ao ARC, como resistência, porosidade e consumo de cimento, e das propriedades dos agregados naturais, incluindo a granulometria. Além disso, o teor de argamassa aderida é maior nos ARC de menor dimensão pois, em agregados com maior dimensão, a argamassa se desintegra do agregado natural através da zona de transição interfacial e, como normalmente possui menor resistência do que o agregado natural, pode virar areia ou material pulverulento (SERENG, 2020; BAI et al., 2020; SALGADO; SILVA, 2022). A Figura 8 ilustra a composição do ARC.

Figura 8 - Composição do agregado graúdo reciclado de concreto (ARC), onde (a) desenho esquemático, (b) ilustração real



Fonte: (a) Traduzido de SALGADO e SILVA, 2022; (b) Traduzido de BAI et al., 2020.

As propriedades dos ARC são afetadas pela presença da argamassa aderida, influenciando na redução da massa específica, aumento da porosidade e da absorção de água, em relação aos agregados naturais (SHI et al., 2016). Outro fator que influencia nas propriedades deste material são as microfissuras causadas pelo processo de britagem e um aumento da espessura da zona de transição interfacial entre a pasta de cimento envelhecida e o agregado graúdo natural, aumentando sua heterogeneidade (POON; SHUI; LAM, 2004).

Além disso, características como a distribuição granulométrica, forma e textura superficial, resistência à compressão e módulo de elasticidade também influenciam na qualidade do agregado reciclado e do concreto produzido com este material (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Segundo Cordeiro (2013), o conhecimento das propriedades dos agregados reciclados é fundamental para a produção de concretos sustentáveis, pois influenciam

diretamente no comportamento do novo material, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A seguir, são apresentadas as características dos ARC obtidas em estudos anteriores e sua influência nas propriedades de novos concretos.

Em relação à sua forma, os agregados graúdos são classificados da seguinte maneira: arredondado, irregular, lamelar, anguloso, alongado e lamelar angulado (NEVILLE, 2016). Segundo Dos Santos (2020), esta propriedade dos ARC está relacionada com o método de britagem e a qualidade do concreto que deu origem ao ARC.

Segundo Angulo (2000) e Leite (2001), os ARC geralmente são mais irregulares e angulares, com texturas mais ásperas e rugosas em comparação com os agregados naturais, devido à presença da argamassa aderida em sua composição. Estas características exigem uma quantidade maior de pasta na mistura do concreto, aumentando o custo do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No estudo de Dos Santos (2020), a autora produziu concretos de alta e baixa resistência para serem utilizados como agregado graúdo reciclado. Após o processo de britagem por mandíbulas, os dois materiais apresentaram formato diferente, sendo o agregado reciclado de concreto de alta resistência um pouco mais alongado e irregular, e o de baixa resistência mais arredondado e cúbico. A Figura 9 apresenta o aspecto dos agregados após a britagem.

Figura 9 - Aspecto dos agregados após o processo de britagem, onde (a) concreto de alta resistência, (b) concreto de baixa resistência



Fonte: DOS SANTOS, 2020.

A distribuição granulométrica também consiste em uma característica do ARC que depende do método de britagem utilizado e da qualidade do concreto que deu origem ao ARC (CORDEIRO, 2013). Segundo Hansen (1992), os britadores de mandíbulas fraturam uma quantidade pequena do agregado natural, diminuindo assim o teor de argamassa aderida dos

agregados graúdos e melhorando a qualidade do material produzido. Por outro lado, utilizar um britador de mandíbula seguido por um britador de impacto também pode reduzir a quantidade de argamassa aderida (NAGATAKI et al., 2004).

Park et al. (2018) explicam que, no caso do britador de mandíbula, o fator que determina a granulometria das partículas é a abertura da mandíbula, onde quanto menor for esta abertura, menor será a dimensão dos agregados reciclados. Dessa forma, a abertura deve ser maior quando o objetivo for a produção de ARC, como forma de reduzir o consumo energético do processo. A porcentagem de aproveitamento de agregados na fração graúda está na faixa entre 60% e 90% em relação ao volume total de resíduo (CORDEIRO, 2013).

Quando o método de britagem é mantido constante no processo de beneficiamento, a qualidade do material de origem passa a ter maior influência na granulometria do agregado reciclado. Na pesquisa de Sampaio et al. (2021), foram produzidos concretos com diferentes níveis de resistência e o aproveitamento de agregados graúdos durante o processo de britagem por mandíbulas foi avaliado. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica dos agregados após o processo de britagem

<b>Distribuição Granulométrica</b>	<b>&lt; 4,75 mm</b>	<b>4,75/8 mm</b>	<b>8/12,7 mm</b>	<b>12,7/19,1 mm</b>	<b>Total</b>
Concreto	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
16 MPa	25,98	10,04	30,86	33,12	100
54 MPa	24,65	10,84	32,60	31,91	100
85 MPa	22,19	11,70	33,77	32,34	100

Fonte: SAMPAIO et al., 2021.

A partir destes resultados, é possível observar que a porcentagem de agregado graúdo reciclado produzida sofre pouca variação entre os três níveis de resistência do concreto que deu origem ao ARC (16 MPa - 74,02%; 54 MPa - 75,35%; 85 MPa - 77,81%). Sampaio et al. (2021) explicam que, para concretos com baixa resistência (16 MPa), a pasta de cimento tende a desintegrar do agregado graúdo natural, resultando em uma quantidade maior de agregado miúdo e pó reciclado.

Por se tratar de um material mais poroso em relação aos agregados graúdos naturais, os ARC possuem massa específica e unitária inferiores (ANGULO, 2000; LEITE, 2001; CORDEIRO; 2013). No caso da massa específica, é necessário determinar esta propriedade dos agregados

reciclados para fins de dosagem do concreto produzido com este material, de modo a determinar o espaço ocupado por suas partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Logo, a utilização de agregados reciclados resulta em uma quantidade menor de material para ocupar o mesmo volume dos agregados naturais (CORDEIRO, 2013).

Zhao et al. (2013) comentam que a massa específica e unitária dos ARC está diretamente relacionada com a massa específica da pasta de cimento e dos agregados naturais, assim como o consumo de cimento da mistura do concreto que deu origem ao ARC. Como os agregados miúdos reciclados possuem maior teor de argamassa aderida, a densidade destes agregados tende a ser ainda menor em relação aos agregados graúdos reciclados (EVANGELISTA; DE BRITO, 2010; PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2020).

Outros fatores que influenciam na densidade dos ARC são: método de britagem adotado, com o intuito de eliminar a maior parte de argamassa aderida; e propriedades mecânicas do concreto que deu origem ao ARC, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior será a densidade do agregado reciclado (SANCHEZ, 2004). No estudo de Dos Santos (2020), os ARC produzidos a partir de concreto de alta resistência obtiveram um valor de massa específica 12% maior em relação ao concreto de baixa resistência, indicando a influência do concreto que deu origem ao ARC nesta propriedade.

Os valores convencionais de massa específica dos agregados naturais granítico e basáltico utilizados na produção de concretos estão entre 2,69 g/cm<sup>3</sup> e 2,80 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, e este valor pode reduzir entre 9,5% e 15,8%, para os agregados reciclados, incluindo outros tipos de RCD (NEVILLE, 2016). A Tabela 3 apresenta resultados obtidos de massa específica e unitária para os ARC de estudos anteriores, indicando a granulometria utilizada.

Tabela 3 - Massa específica e unitária de ARC de diferentes estudos

<b>Autor</b>	<b>Concreto do ARC - Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Granulometria (mm)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Gómez-Soberón (2002)	-	5 - 10	2,42	-
	-	10 - 20	2,41	-
Butler (2003)	14,6	4,75 - 19	2,59	1,29
	45,3	4,75 - 19	2,55	1,29
	52,1	4,75 - 19	2,57	1,29
Sanchez (2004)	-	4 - 16	2,45	-
Cabral (2007)	-	4,75 - 19	2,27	1,54
Cordeiro (2013)	15,0	4,75 - 19	2,71	1,35
	30,0	4,75 - 19	2,73	1,30
Thomas et al. (2019)	25,0	4 - 20	2,32	1,42
Dos Santos (2020)	16,0	4,75 - 19	2,46	1,53
	54,0	4,75 - 19	2,77	1,50
Oliveira (2023)	-	4,75 - 19	2,63	-
<b>MÉDIA</b>			2,53	1,39

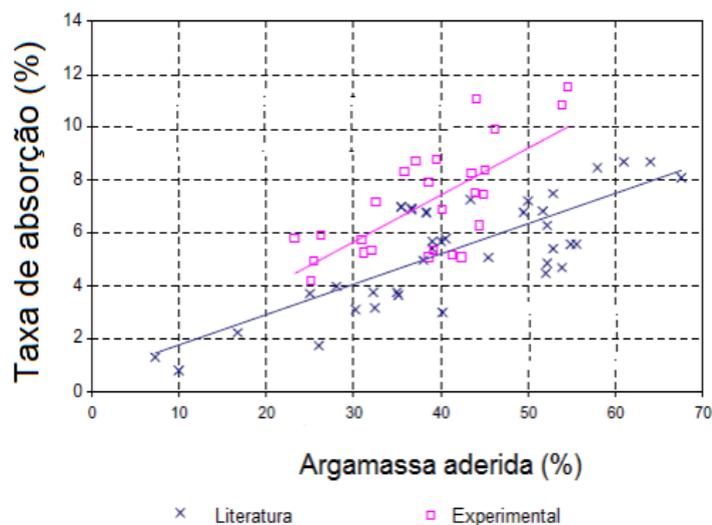
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os resultados de massa específica dos ARC, é possível observar que estão de acordo com a redução desta propriedade em comparação com os agregados graúdos naturais. A variação tanto da massa específica como da massa unitária entre os estudos citados pode ser justificada pela diferença da densidade dos agregados naturais utilizados na produção do concreto que deu origem ao ARC, além do método de britagem adotado e da massa específica do concreto de origem.

O teor de argamassa aderida presente no ARC também é responsável pelo aumento da absorção de água deste material (DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009). Isto ocorre devido à porosidade do concreto que deu origem ao ARC, influenciada pela relação água/aglomerante (SHI et al., 2016). A dimensão das partículas de agregado reciclado de concreto também influencia na absorção de água. Este parâmetro de influência está associado ao fato de que partículas menores de agregado reciclado possuem um teor de argamassa aderida maior em relação às partículas de maiores dimensões (SERENG, 2020).

A Figura 10 apresenta os resultados de absorção de água de agregados reciclados de concreto obtidos por De Juan e Gutiérrez (2009) em função da variação de argamassa aderida, comparando com os resultados encontrados na literatura. É possível observar que os dados encontrados na literatura são menores em relação ao estudo referenciado, indicando a importância da caracterização adequada deste material para sua utilização em novos materiais.

Figura 10 - Correlação entre o teor de argamassa aderida e absorção de água



Fonte: Traduzido de DE JUÁN e GUTIÉRREZ, 2009.

Segundo De Juán e Gutiérrez (2009), os agregados reciclados com teor de argamassa aderida inferior a 44% apresentam qualidade adequada para serem utilizados na produção de concretos estruturais. Como este valor ainda não é normatizado, mais estudos são necessários para determinar o limite ideal de argamassa aderida e aumentar o uso deste material na construção civil.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) determina que a absorção de água seja inferior a 7% para ARC, para serem utilizados em materiais cimentícios com e sem função estrutural. De acordo com

Angulo e Figueiredo (2011), é possível produzir agregados com absorção de água inferior a 3% em processos de beneficiamento dos resíduos onde a argamassa aderida seja removida quase em sua totalidade, sendo este um valor mais próximo da absorção de água dos agregados graúdos naturais (NEVILLE, 2016).

Esta informação está de acordo com os resultados encontrados na literatura apresentados no gráfico da Figura 10. A Tabela 4 apresenta os resultados de absorção de água encontrados em estudos anteriores para ARC.

Tabela 4 - Absorção de água de ARC de diferentes estudos

Autor	Concreto do ARC		Granulometria (mm)	Absorção de água (%)
	Resistência à compressão (MPa)	Relação água/cimento		
Gómez-Soberón (2002)	-	0,44	5 - 20	6,32
Butler (2003)	14,6	-	4,75 - 19	5,48
	45,3	-	4,75 - 19	6,41
	52,1	-	4,75 - 19	6,16
Poon et al. (2004)	-	-	5 - 20	6,92
Cabral (2007)	-	-	4,75 - 19	5,65
Cordeiro (2013)	30,0	-	4,75 - 19	5,30
Thomas et al. (2019)	25,0	-	4 - 20	5,30
Dos Santos (2020)	16,0	0,56	4,75 - 19	4,24
	54,0	0,50	4,75 - 19	4,51
Sereng (2020)	44,5	0,49	12 - 20	4,00
	75,0	0,32	12 - 20	3,60
MÉDIA				5,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os estudos de Gómez-Soberón (2002) e Poon et al. (2004), é possível observar a influência da dimensão dos ARC na absorção de água. Nota-se também que poucos estudos possuem a caracterização do concreto que deu origem ao ARC, incluindo a relação água/cimento e a dosagem utilizada na mistura. Este parâmetro é fundamental para relacionar as características do concreto com as propriedades do agregado reciclado produzido.

Conforme visto, as propriedades dos ARC tendem a ser prejudicadas em comparação com os agregados naturais, especialmente a massa específica e a absorção de água. Assim, as propriedades mecânicas e desempenho durante a vida útil de concretos produzidos com ARC devem ser analisadas para que este material possa ser utilizado em maior escala na construção civil (HAYLES; SANCHEZ; NOËL, 2018; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

### **2.2.2 Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto (CARC)**

Devido às diferenças nas propriedades entre os agregados naturais e reciclados, é esperado que as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado sejam modificadas, tanto no estado fresco quanto no endurecido. A seguir, são discutidas como a trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto são afetadas com o uso de ARC.

De acordo com Neville (2016), a substituição do agregado natural pelo ARC diminui a trabalhabilidade com qualquer quantidade de água e, ainda, aumenta a demanda de água para obter a mesma consistência de concretos com agregado natural. Além da influência na resistência à compressão do concreto, o maior consumo de água na mistura aumenta a retração por secagem e reduz o módulo de elasticidade do material.

A trabalhabilidade é avaliada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido como “*slump*”, preconizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020). Esta propriedade é influenciada pela umidade e forma dos agregados e pelo teor de substituição dos agregados naturais. Poon et al. (2004) explicam que, em concretos com alto teor de ARC, a coesão da mistura é afetada negativamente. Como a coesão tem impacto direto na homogeneidade do material no estado fresco, as propriedades mecânicas do concreto são prejudicadas, especialmente devido à dificuldade que a perda de coesão proporciona durante a concretagem.

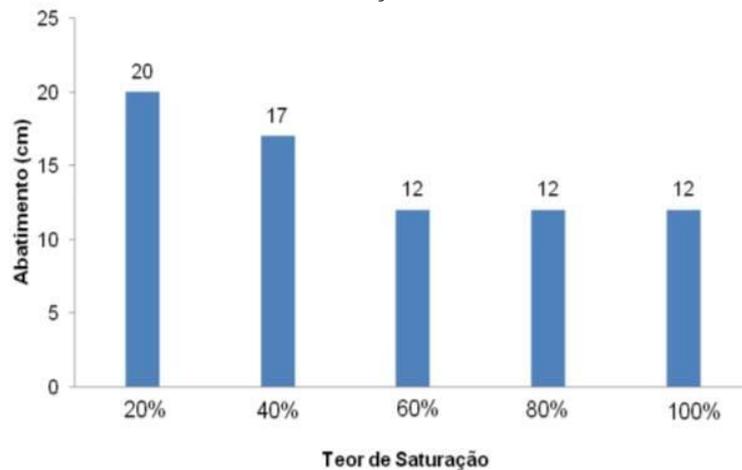
Como os ARC possuem uma elevada absorção de água, diversos autores recomendam que este material seja submetido a uma etapa de pré-saturação antes da mistura do concreto

(LEITE, 2001; ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; CORDEIRO, 2013; BAI et al., 2020). Segundo a literatura, esta etapa é considerada uma alternativa de minimizar os impactos negativos do uso de agregados reciclados nas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto.

Outro fator importante para a realização da etapa de pré-molhagem dos agregados reciclados é o processo de cura interna do concreto em idades mais avançadas, devido à migração da água presente nos poros dos agregados para a nova matriz cimentícia (ANGULO, 2000; LEITE, 2001). Por outro lado, quando o ARC é utilizado na mistura na condição de 100% de saturação, o novo concreto pode apresentar falha na zona de transição interfacial entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentícia (ETXEBERRIA et al., 2007).

O valor ideal de pré-saturação dos ARC foi analisado em estudos anteriores. Na pesquisa de Cordeiro (2013), os teores de saturação avaliados foram 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. No estado fresco, foi possível observar que quanto mais seco o agregado reciclado estiver, maior o valor de abatimento. Segundo a autora, os agregados com menor teor de saturação possuem mais água livre em sua superfície, o que dificulta a absorção de água do material e aumenta a consistência da mistura. A Figura 11 apresenta os resultados de abatimento obtidos.

Figura 11 - Influência do teor de saturação do ARC na consistência do concreto



Fonte: CORDEIRO, 2013.

Devido ao melhor desempenho mecânico entre os concretos produzidos com ARC, concluiu-se que 80% de pré-saturação é o valor próximo ao ideal para os agregados reciclados (CORDEIRO, 2013). Este valor é recomendado pela NBR 15116 (ABNT, 2021) e foi adotado em outros estudos (MALYSZ, 2018; DOS SANTOS, 2020).

A massa específica do concreto também é afetada com o uso de ARC em sua composição. Mehta e Monteiro (2014) explicam que a massa específica no estado fresco depende da forma, granulometria, densidade e porosidade dos agregados, propriedades estas que são modificadas nos agregados reciclados em comparação com os agregados naturais. Como há uma redução na densidade e aumento da porosidade dos agregados reciclados, a massa específica do concreto também é reduzida, influenciando na redução das propriedades mecânicas do material no estado endurecido (LEITE, 2001).

Diversos pesquisadores que realizaram estudos com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado graúdo natural pelo ARC concluíram que a resistência à compressão do material é reduzida à medida em que o nível de substituição aumenta (DE BRITO et al., 2016; DUAN; POON, 2014; KAZMI et al., 2020; XUAN; ZHAN; POON, 2016). Fatores como menor resistência do agregado reciclado e maior porosidade do resíduo de concreto contribuem para que as propriedades mecânicas do novo concreto sejam afetadas (SALGADO; SILVA, 2022).

Além disso, a redução da resistência à compressão ocorre devido ao fato de que o concreto produzido com ARC possui três zonas de transição interfacial: 1) uma antiga, entre o agregado graúdo natural e a argamassa aderida; e duas novas, 2) entre a argamassa aderida do agregado reciclado e a nova argamassa, 3) e entre o agregado graúdo natural e a nova argamassa. A Figura 12 ilustra as três zonas de transição do novo concreto.

Figura 12 - Zonas de transição interfacial do concreto com ARC



Fonte: Traduzido de WANG et al., 2020.

No concreto convencional, a zona de transição interfacial é a região que apresenta maior porosidade e onde as microfissuras se formam, sendo fundamental entender suas propriedades

e comportamento (NEVILLE, 2016). Mehta e Monteiro (2014) explicam que quando os componentes do concreto possuem alta rigidez, a rigidez do concreto é reduzida devido ao aumento de vazios e microfissuras na zona de transição, não permitindo a transferência de tensões na microestrutura do material.

Butler, West e Tighe (2011) explicam que, em concretos com menores resistências, o plano de ruptura ocorre ao redor do agregado reciclado, na zona de transição interfacial entre o agregado e a argamassa do novo concreto. No caso de concretos com maiores resistências, o plano de ruptura ocorre diretamente no agregado reciclado, devido à sua matriz ser menos resistente em relação à nova matriz cimentícia.

Salgado e Silva (2022) realizaram uma revisão da literatura sobre a utilização de agregados reciclados de RCD em concretos estruturais. Conforme estudos anteriores, os autores concluíram que o comportamento mecânico do concreto é diretamente proporcional à resistência do concreto que deu origem ao ARC, pois o concreto de alta resistência possui uma zona de transição interfacial mais densa e com menor porosidade (POON; SHUI; LAM, 2004; TABSH; ABDELFAH, 2009).

No entanto, existem outras evidências na literatura de que a resistência do concreto que deu origem ao ARC tenha pouca influência sobre a resistência do concreto produzido com ARC (BUTTLER, 2003; MALEŠEV; RADONJANIN; MARINKOVIĆ, 2010; CORDEIRO, 2013). Segundo Malesev, Radonjanin e Marinkovic (2010), o processo de beneficiamento do resíduo de concreto possui maior influência na resistência do novo concreto, em comparação com a resistência do concreto antigo, independente do teor de substituição do agregado gráudo natural.

Cordeiro (2013) avaliou a resistência à compressão de concretos produzidos com dois tipos de ARC, sendo estes diferenciados pela resistência do concreto que deu origem ao ARC (15 MPa e 30 MPa). A autora observou que a influência da resistência do concreto antigo ocorre somente quando o agregado reciclado for o elo mais fraco do material, ou seja, quando sua resistência é inferior em relação ao novo concreto.

O módulo de elasticidade é outra propriedade mecânica do concreto que é reduzida conforme o teor de ARC aumenta. Em estudos anteriores foi observado que o módulo de elasticidade pode reduzir entre 10% e 45% em concretos produzidos com ARC, em comparação com o

concreto convencional (HANSEN, 1992; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; ETXEBERRIA et al., 2007; EVANGELISTA; DE BRITO, 2010).

De acordo com Leite (2001), a qualidade do agregado graúdo influencia diretamente no módulo de elasticidade do concreto, devido a fatores como: densidade da zona de transição interfacial, dimensão máxima, forma, textura superficial e resistência. A redução do módulo de elasticidade é maior quando o ARC contém maior teor de argamassa aderida, devido à alta porosidade deste material. Cordeiro (2013) explica que a porosidade determina a rigidez do material e, também, a capacidade do agregado em limitar as deformações da matriz cimentícia.

Devido às propriedades inferiores dos ARC em comparação com os agregados naturais, e suas implicações nas propriedades do concreto produzido com este material, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que busquem alternativas de tratamento para estes agregados. Dessa forma, será possível utilizar este material em maior escala na construção civil, produzindo concretos cada vez mais sustentáveis.

### 2.3 TRATAMENTO DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC)

Nos últimos anos, diversos métodos de tratamento de ARC foram avaliadas em relação a sua eficácia e viabilidade de implementação. Segundo Shi et al. (2016), estes métodos consistem na remoção ou reforço da argamassa aderida, melhorando assim as propriedades do material. A depender do método de tratamento utilizado, o benefício técnico pode ser obtido a um custo razoável e de maneira sustentável (OUYANG et al., 2020).

As principais técnicas para remoção da argamassa aderida são: moagem mecânica, limpeza ultrassônica e pré-imersão em água ou ácido (PU et al., 2021). Segundo Tam, Butera e Le (2021), esses métodos se mostraram eficazes na minimização do teor de argamassa aderida presente no ARC. Porém, o principal desafio da implementação destas técnicas de tratamento consiste em reduzir a poluição do meio ambiente causada pelo líquido residual utilizado e os danos no material causado pela moagem mecânica (OUYANG et al., 2023).

Por outro lado, as técnicas de emulsão de polímero, biodeposição do carbonato de cálcio e mineralização do CO<sub>2</sub> promovem o reforço da argamassa aderida, tornando o material mais

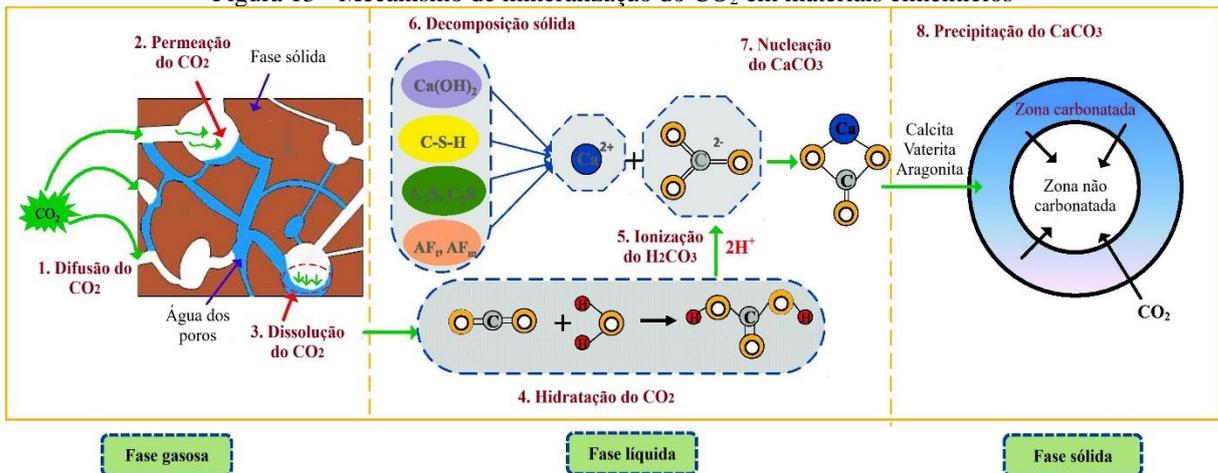
denso e com menor porosidade. O método de tratamento por emulsão de polímero consiste na adição de pequena quantidade de álcool polivinílico (PVA) em água para impregnação nos ARC com o uso de dessecadores e bombas de vácuo (KOU; POON, 2010). No caso da técnica de biodeposição do carbonato de cálcio, esta consiste na cura dos ARC com bactérias e imersão das partículas em solução com adição de fonte de cálcio (ZENG et al., 2019).

Em pesquisas de revisão bibliográfica sobre as diferentes técnicas de tratamento dos ARC, a mineralização do CO<sub>2</sub> foi considerada a técnica mais eficaz e viável para melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto produzido com este material, podendo ser utilizada em conjunto com outras técnicas de reforço da argamassa aderida (SHI et al., 2016; PU et al., 2021; OUYANG et al., 2023). Além disso, os autores explicam sobre a importância da utilização desta técnica em escala industrial, devido ao seu potencial de capturar CO<sub>2</sub> permanentemente através da aplicação da tecnologia CCUS.

### **2.3.1 Tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>**

O tratamento dos ARC por mineralização do CO<sub>2</sub> ocorre por meio da reação de carbonatação (item 2.1.1). A partir da reação química entre o CO<sub>2</sub> e os compostos hidratados da matriz cimentícia, o produto mineral carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) preenche os poros e microfissuras presentes na argamassa aderida do agregado reciclado, aprimorando suas propriedades (LI et al., 2022).

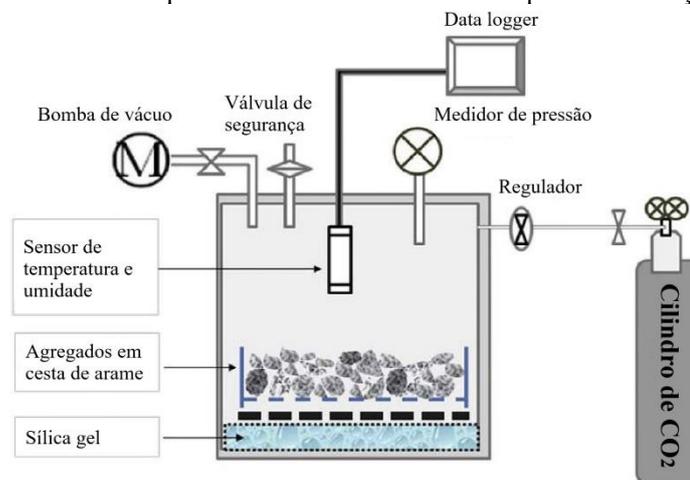
De acordo com Pu et al. (2021), a mineralização do CO<sub>2</sub> envolve oito etapas. Primeiramente, ocorre a difusão do gás através dos poros e microfissuras do material e sua dissolução na água, produzindo o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Após, a formação do CaCO<sub>3</sub> e do gel de sílica amorfa ocorre a partir da reação do ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) com os íons cálcio presentes nos compostos de hidratação como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), nos minerais de clínquer Portland não hidratado, incluindo o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) e silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), e nas outras fases hidratadas do cálcio como a etringita e hidratos de sulfoaluminato de cálcio (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004). Por fim, o CaCO<sub>3</sub> precipita nos poros e fissuras do agregado reciclado como calcita, vaterita e aragonita. A Figura 13 ilustra o mecanismo de mineralização em materiais cimentícios.

Figura 13 - Mecanismo de mineralização do CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios

Fonte: Traduzido de PU et al., 2021.

Segundo Fang e Chang (2015), à medida em que a mineralização ocorre, a difusão de CO<sub>2</sub> é limitada devido à precipitação do CaCO<sub>3</sub> e preenchimento dos poros superficiais do material e, portanto, a microestrutura do material pode permanecer inalterada. Contudo, devido à maior dureza e volume do CaCO<sub>3</sub> em comparação com os produtos hidratados da matriz cimentícia, a mineralização contribui para uma boa qualidade dos ARC.

O tratamento por mineralização em escala laboratorial ocorre convencionalmente em câmara de carbonatação conectada a um cilindro de CO<sub>2</sub> com alto grau de pureza, localizada em ambiente climatizado, permitindo assim a difusão do CO<sub>2</sub> no material, em condições semelhantes ao ensaio de carbonatação acelerada (SERENG, 2020). A Figura 14 representa um desenho esquemático da câmara de carbonatação utilizada em um estudo sobre o tratamento de ARC.

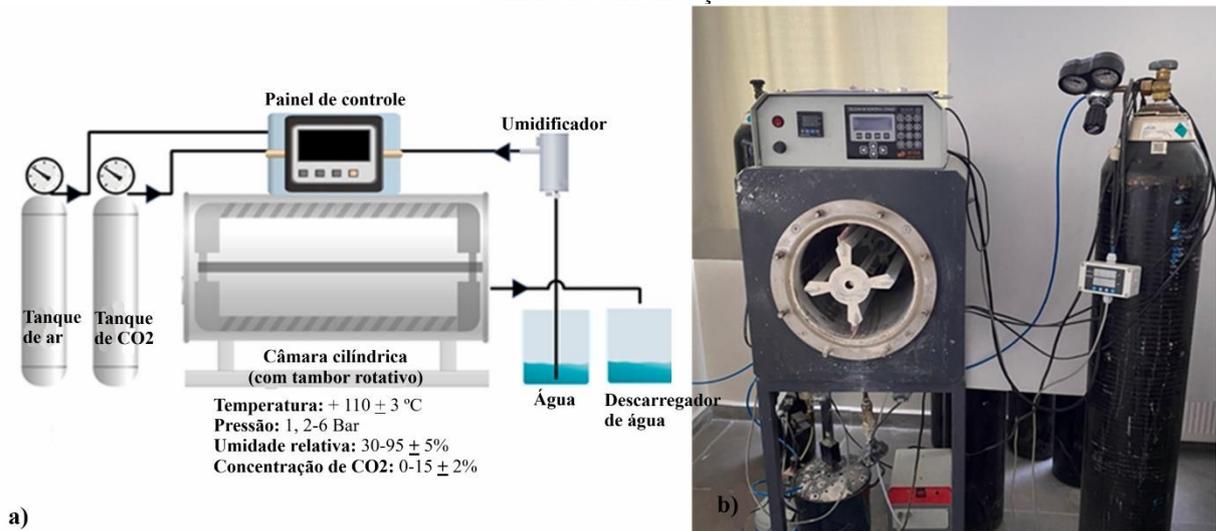
Figura 14 - Desenho esquemático do tratamento de ARC por mineralização do CO<sub>2</sub>

Fonte: Traduzido de KALIYAVARADHAN e LING, 2017.

De acordo com a literatura, existem dois tipos de protocolos para o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>: estático e dinâmico (SERENG, 2020; DÜNDAR et al., 2023; TORRENTI et al., 2022). O protocolo estático consiste em armazenar o material na câmara de carbonatação por tempo previamente definido, com umidade relativa, temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente e pressão do gás constantes durante o tratamento. O desenho esquemático ilustrado na Figura 14 é um exemplo de protocolo estático.

O protocolo dinâmico tem sido menos abordado na literatura, devido à sua complexidade de execução em escala laboratorial (SERENG, 2020). Em estudos em que este protocolo foi utilizado para o tratamento de ARC, um reator de carbonatação com tambor rotativo foi projetado (TORRENTI et al., 2022; DÜNDAR et al., 2023). A função do tambor rotativo é possibilitar que todas as partículas de ARC sejam expostas ao CO<sub>2</sub> de maneira homogênea, possibilitando um tratamento mais eficiente do material. O reator consiste em um ambiente controlado, com a possibilidade de regular os principais parâmetros de influência da mineralização do CO<sub>2</sub>. A Figura 15 ilustra o desenho esquemático do reator utilizado no estudo de Dündar et al. (2023).

Figura 15 - Protocolo dinâmico, onde (a) desenho esquemático da câmara de carbonatação, (b) imagem da câmara de carbonatação



Fonte: Traduzido de DÜNDAR et al., 2023.

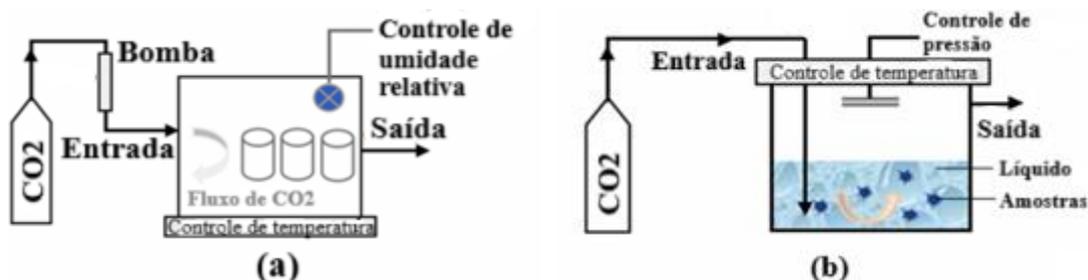
No estudo de Sereng (2020), os protocolos estático e dinâmico foram utilizados para o tratamento de ARC. O protocolo estático consistiu em testar os parâmetros de influência para otimizar a captura de CO<sub>2</sub>, como o teor de umidade do material, origem do ARC, granulometria, concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura. Estas variáveis foram utilizadas como

parâmetros de entrada para o protocolo dinâmico, onde o fluxo e pressão do gás foram analisadas, assim como a duração ideal para o tratamento.

De modo geral, o protocolo dinâmico apresentou melhores resultados em relação à captura de CO<sub>2</sub>. Para os agregados graúdos reciclados de concreto, a quantidade de captura de CO<sub>2</sub> aumentou em 25% do protocolo estático para o dinâmico, devido à regulação do fluxo e pressão do CO<sub>2</sub> que otimiza o processo; para o agregado miúdo, o potencial de captura de CO<sub>2</sub> foi atingido no protocolo estático, pois o refinamento dos poros de partículas de menor dimensão é mais rápido. Em relação à duração do tratamento, os agregados reciclados absorvem maior quantidade de CO<sub>2</sub> com apenas 6 horas no protocolo dinâmico do que em 24 horas de tratamento no protocolo estático (SERENG, 2020), o que pode ser de interesse para o âmbito industrial.

No que diz respeito às condições de exposição dos materiais no tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, a reação de carbonatação pode ser categorizada em dois principais tipos: carbonatação gás-sólida e líquido-sólida (FANG et al., 2021; LIANG et al., 2020). O método de armazenamento dos materiais em câmara climatizada é igual nos dois tipos, a diferença é a forma de exposição ao CO<sub>2</sub>. Enquanto na carbonatação gás-sólida ocorre conforme demonstrado no protocolo estático e dinâmico, na carbonatação líquido-sólida o material é imerso em uma mistura líquida e o CO<sub>2</sub> é injetado na câmara diretamente no líquido (LI; WU, 2022). A Figura 16 apresenta, de maneira simplificada, o diagrama dos dois tipos de carbonatação.

Figura 16 - Diagramas simplificados da carbonatação, onde (a) gás-sólida, (b) líquido-sólida



Fonte: Traduzido de LI e WU, 2022.

Embora a carbonatação gás-sólida seja abordada com maior frequência em estudos de tratamento de ARC, a carbonatação líquido-sólida tem sido avaliada nos últimos anos (SKOCEK; ZAJAC; BEN HAHA, 2020). Segundo Liu et al. (2021), a taxa de reação de carbonatação pode ser melhorada ao injetar CO<sub>2</sub> de forma contínua em uma solução contendo

amostras de material cimentício pois, nesse caso, a difusão de  $\text{CO}_2$  não seria limitada pela saturação dos poros do material, e a taxa de dissolução dos produtos hidratados é mais rápida do que na carbonatação gás-sólida, devido à saturação desta fase na solução líquida.

Estudos anteriores concluíram que a melhora das propriedades dos ARC pode ser obtida com apenas 10 minutos de carbonatação, promovendo uma redução na absorção de água e aumento da densidade do material tanto na fração graúda (LIU et al., 2021b) como na fração miúda (FANG et al., 2021). No entanto, apesar de apresentar resultados satisfatórios no efeito do tratamento em escala laboratorial, a carbonatação líquido-sólida não tem sido recomendada para aplicação na indústria devido à sua complexidade e alto consumo de energia (LI; WU, 2022).

Conforme discutido no item 2.1.3, as características do material cimentício e as condições ambientais influenciam na cinética e grau de carbonatação. Segundo Torrenti et al. (2022), estes parâmetros devem ser analisados de modo a otimizar o processo de tratamento dos ARC. Logo, este item apresenta uma revisão da literatura referente às condições ideais dos seguintes parâmetros de influência da mineralização do  $\text{CO}_2$ :

- Natureza e granulometria dos ARC;
- Teor de umidade dos ARC;
- Duração do tratamento;
- Concentração de  $\text{CO}_2$ ;
- Fluxo e pressão de  $\text{CO}_2$ ;
- Temperatura e umidade relativa do ambiente.

A origem dos ARC influencia na reação de carbonatação através do tipo e teor de cimento, principalmente pelo teor de cálcio dos produtos de hidratação disponíveis para reagir com o dióxido de carbono (SERENG, 2020). No caso de resíduos de concreto demolido, o teor de cálcio disponível é relativamente baixo devido à carbonatação natural que ocorre durante a vida útil do concreto (PU et al., 2021). Dessa forma, é recomendado que os agregados reciclados fiquem imersos em solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  antes do tratamento por mineralização, como forma de aumentar a eficácia do processo (ZHAN; XUAN; POON, 2018).

No entanto, devido à baixa produtividade e alto custo, esta prática não é considerada viável para a aplicação do tratamento em escala industrial (PU et al., 2021). Segundo Fang, Zhan e

Poon (2020), o uso de águas residuais provenientes de usinas de concreto pode substituir a solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sendo esta uma técnica mais prática e sustentável para adicionar fonte extra de cálcio disponível para a mineralização.

Outras características consistem na resistência à compressão no concreto que deu origem ao ARC e na relação água/cimento, que define o grau de porosidade e a permeabilidade, fatores que influenciam na difusibilidade do  $\text{CO}_2$  na sua microestrutura. De acordo com Zhan et al. (2014), o concreto com maior resistência possui maior quantidade de produtos de hidratação disponíveis para a mineralização, promovendo assim uma taxa maior na melhoria de propriedades como absorção de água e massa específica do ARC.

Outros estudos relataram que o concreto antigo de maior resistência à compressão possui menor porosidade, dificultando a difusão de  $\text{CO}_2$  (KOU; ZHAN; POON, 2014; LI et al., 2019). Assim, mais estudos são necessários para concluir sobre a influência da resistência à compressão do concreto que deu origem ao ARC na eficiência do tratamento.

A granulometria dos agregados reciclados é considerada um parâmetro importante no potencial de captura de  $\text{CO}_2$  durante o tratamento por mineralização. No geral, partículas de menores dimensões resultam em uma área superficial maior, aumentando assim a área de exposição do material ao  $\text{CO}_2$  e melhorando a eficiência do tratamento (LIANG et al., 2020). Os autores explicam que essas partículas possuem um teor maior de argamassa aderida e, portanto, maior quantidade de material disponível para a mineralização.

No estudo de Zhan et al. (2014), os agregados reciclados foram expostos ao tratamento com  $\text{CO}_2$  utilizando o protocolo estático (o tempo de exposição e a concentração de  $\text{CO}_2$  utilizada não foram especificadas). Os materiais com fração de 5-10 mm obtiveram um grau de carbonatação de 12% a mais do que para os agregados com fração de 10-14 mm e 20% a mais em relação aos agregados com fração de 14-20 mm.

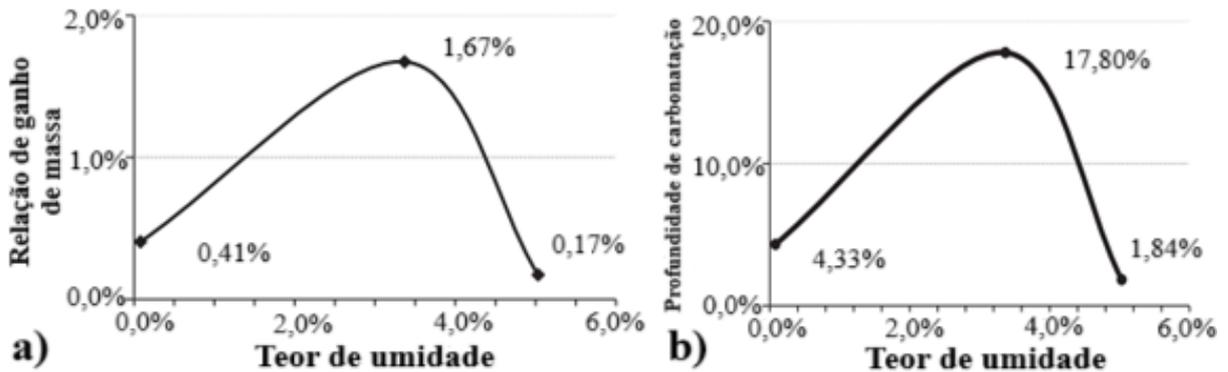
Em outro estudo onde o protocolo dinâmico foi utilizado, a taxa de absorção de  $\text{CO}_2$  foi avaliada em agregados miúdos (2,00-4,75 mm) e agregados graúdos (4,75-14,00 mm) (DÜNDAR et al., 2023). Devido a maior área superficial exposta ao  $\text{CO}_2$ , os agregados miúdos reciclados apresentaram uma taxa 60% maior de absorção de  $\text{CO}_2$  em relação aos agregados graúdos reciclados.

O teor de umidade dos ARC é considerado o parâmetro mais importante para a eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> (SERENG et al., 2021; PU et al., 2021; TORRENTI et al., 2022). Assim como ocorre para a carbonatação natural em materiais cimentícios, existe um teor de umidade ótimo que facilita a difusão e dissolução do CO<sub>2</sub> com os produtos de hidratação da matriz cimentícia.

Sereng et al. (2021) explicam que, se o teor de umidade for baixo, a quantidade de CO<sub>2</sub> dissolvido é pequena, enquanto um teor de umidade alto dificulta a difusão do gás, pois a taxa de difusão na água é mais lenta do que no ar. Devido à sua importância, este parâmetro foi avaliado em estudos anteriores, como forma de determinar o teor de umidade ótimo e a condição de sazonalamento (pré-tratamento) ideal para que se obtenha este teor.

No estudo de Zhan et al. (2014), ARC com fração de 10-14 mm foram utilizados para estudar o efeito do teor de umidade no ganho de massa e no grau de carbonatação. As condições de sazonalamento adotadas foram: a) secagem em estufa a 105 °C por 2 horas; b) material armazenado em ambiente climatizado; c) imersão em água por 2 horas. O teor de umidade obtido em cada cenário foi 0,08%, 3,37% e 5,03%, respectivamente. Os gráficos apresentados na Figura 17 indicam que o teor de umidade de 3,37% obteve os melhores resultados.

Figura 17 - Relação do teor de umidade do ARC com (a) ganho de massa, (b) porcentagem de carbonatação



Fonte: Traduzido de ZHAN et al., 2014.

A condição ideal de sazonalamento obtida por Zhan et al. (2014) foi replicada em outro estudo (GHOLIZADEH-VAYGHAN et al., 2020). Neste caso, a condição de armazenamento em ambiente climatizado foi comparada com o seguinte método: primeiro, o material é seco em estufa a 80 °C por 24 horas e, após, é colocado em câmara úmida com umidade relativa de 95% por 48 horas. O teor de umidade obtido nas duas condições foi 0,73% e 1,01%, respectivamente. Em relação ao aprimoramento das propriedades do material, o cenário de armazenamento do material em ambiente climatizado também se mostrou mais eficiente.

A umidade relativa e a temperatura do ambiente são parâmetros que influenciam no processo de mineralização do CO<sub>2</sub>, assim como foi discutido para a reação de carbonatação. Em relação à umidade relativa, o princípio é semelhante ao teor de umidade do material, ou seja, o ambiente não pode estar muito seco ou muito úmido para facilitar a difusão e dissolução do CO<sub>2</sub>. De acordo com estudos anteriores, é consenso que a umidade relativa do ar considerada ideal é de 50% a 70%, sendo a mesma faixa ideal obtida em estudos de carbonatação natural (FANG; XUAN; POON, 2017; LIANG et al., 2020; PU et al., 2021).

Em relação à temperatura, a faixa entre 20 °C e 30 °C tem sido utilizada por muitos pesquisadores, com resultados satisfatórios (KALIYAVARADHAN; LING, 2017; GHOLIZADEH-VAYGHAN et al., 2020; SERENG et al., 2021; KADDAH et al., 2022). Segundo Sereng et al. (2021), temperaturas mais altas diminuem a solubilidade do CO<sub>2</sub> e do cálcio, dificultando a captura de CO<sub>2</sub> na matriz cimentícia.

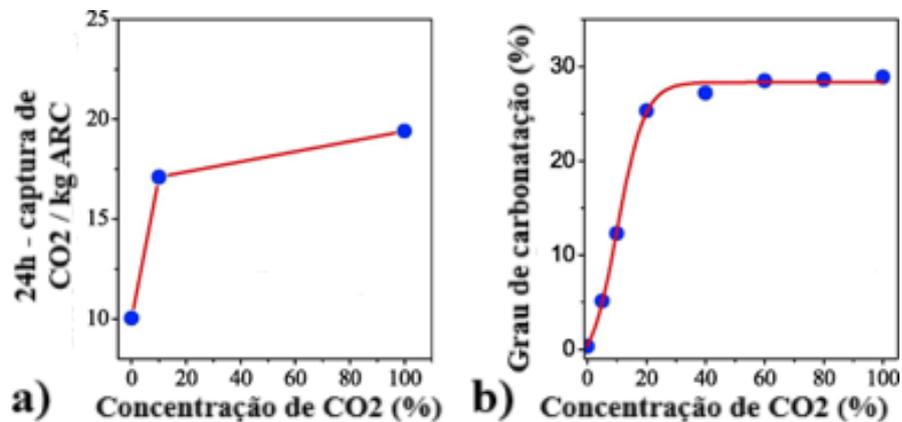
Em um estudo onde o protocolo dinâmico de mineralização foi utilizado, as temperaturas avaliadas foram 50 °C e 90 °C (DÜNDAR et al., 2023). Os autores concluíram que a temperatura de 90 °C foi mais favorável para o tratamento, e observaram a precipitação do CaCO<sub>3</sub> na forma de calcita, aragonita e vaterita, enquanto a vaterita não foi observada no material com tratamento a 50 °C. De acordo com Pu et al. (2021), temperaturas mais elevadas são benéficas para a formação de carbonatos de cálcio metaestáveis e promovem a lixiviação dos íons de cálcio do material cimentício reciclado.

É possível observar que diversas faixas de temperatura podem ser vantajosas para o tratamento de ARC. Entretanto, ainda é um parâmetro que necessita de mais estudos para identificar a faixa ideal a ser adotada.

A concentração de CO<sub>2</sub> possui influência direta na eficiência do tratamento por mineralização. Como a carbonatação natural é lenta devido à baixa concentração de CO<sub>2</sub> no ar, é necessário que o tratamento ocorra em ambiente com maior concentração, para acelerar o processo. Contudo, há um limite para este parâmetro pois, no caso do material ser exposto a um ambiente com elevada concentração de CO<sub>2</sub> por um longo período, o grau de descalcificação do C-S-H aumenta, promovendo um efeito adverso nas propriedades do material (LI et al., 2022).

Outro motivo para que uma elevada concentração de CO<sub>2</sub> não seja utilizada é o fato de que resultaria na imediata obstrução dos poros do material, dificultando a difusão do gás e gerando apenas consumo energético desnecessário do tratamento (PU et al., 2021). Estudos anteriores indicam que o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> é menos perceptível acima de 20% (FANG; XUAN; POON, 2017; LIANG et al., 2020; SERENG, 2020). A Figura 18 representa a estabilização da profundidade de carbonatação e do potencial de captura de CO<sub>2</sub> quando valores acima de 20% são utilizados.

Figura 18 - Efeito da concentração de CO<sub>2</sub> em (a) captura de CO<sub>2</sub>, (b) grau de carbonatação



Fonte: Traduzido de PU et al., 2021.

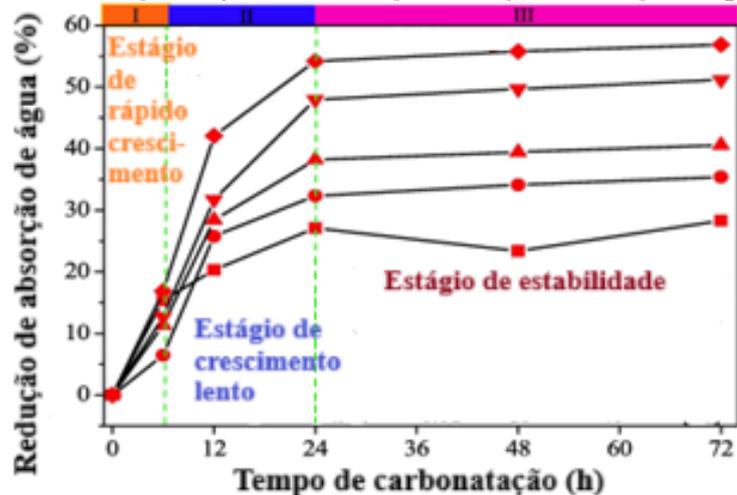
Em estudos onde o objetivo era adotar um protocolo de tratamento viável para ser aplicado em escala industrial, a concentração de CO<sub>2</sub> utilizada foi de 15% (SERENG, 2020; KADDAH et al., 2022; DÜNDAR et al., 2023). Este valor foi utilizado por ser a mesma concentração de CO<sub>2</sub> obtida em fornos de fábricas de cimento.

É fato que o grau de carbonatação aumenta ao longo do tempo em que o material está exposto ao CO<sub>2</sub> para o tratamento por mineralização (PU et al., 2021). Contudo, a carbonatação ocorre de maneira mais rápida no período inicial e depois desacelera, devido à redução da porosidade da argamassa aderida a partir da formação do CaCO<sub>3</sub> (KOU; ZHAN; POON, 2014).

Em alguns estudos, é possível verificar que as propriedades dos ARC podem ser aprimoradas em poucas horas de tratamento, a depender da condição de sazonalidade utilizada. No estudo de Gholizadeh-Vayghan et al. (2020), a massa específica e a absorção de água do material seco ao ar aumentou 0,94% e reduziu 27,38% com apenas 4 horas de tratamento, respectivamente. Outros autores obtiveram melhores resultados com 24 horas (LUO et al., 2018; SERENG, 2020) e 48 horas (DÜNDAR et al., 2023).

O estudo de Luo et al. (2018) demonstrou que o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  diminuiu em 42% e o teor de  $\text{CaCO}_3$  aumentou 95,5% durante 24 horas de tratamento, enquanto a captura de  $\text{CO}_2$  foi limitada após esse período, além de promover a densificação da zona de transição interfacial do ARC. A Figura 19 apresenta como a porcentagem de redução da absorção de água do material aumenta em até 24 horas de tratamento e estabiliza após este período, considerando 100% de concentração de  $\text{CO}_2$ .

Figura 19 - Relação tempo de carbonatação x redução da absorção de água



Fonte: Traduzido de PU et al., 2021.

A pressão e fluxo ideais de  $\text{CO}_2$  podem melhorar a captura de  $\text{CO}_2$  e as propriedades dos ARC (FANG; XUAN; POON, 2017). De acordo com Sereng (2020), o efeito da pressão é determinado pela imposição de uma sobrepressão no interior da câmara de carbonatação ou do reator, e o fluxo de  $\text{CO}_2$  é imposto pela mistura de  $\text{CO}_2$  presente no cilindro com o ar, onde o fluxo determina o tempo necessário para estabilizar a concentração de  $\text{CO}_2$  adotada no protocolo.

A pressão de  $\text{CO}_2$  foi avaliada em estudos com diferentes protocolos de tratamento por mineralização. É possível observar que, embora a maior pressão do gás facilita a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , isto dificulta a difusão do  $\text{CO}_2$  ao longo do tempo, impedindo que a zona interna do ARC seja carbonatada (PU et al., 2021).

Fang, Xuan e Poon (2017) concluíram que o aumento da pressão do  $\text{CO}_2$  em relação à pressão ambiente provoca um aumento insignificante na captura de  $\text{CO}_2$ . No estudo de Dündar et al. (2023), o mesmo foi observado para o protocolo dinâmico. Assim, a imposição de uma sobrepressão para o tratamento pode resultar em um consumo energético desnecessário.

A pressão excessiva do CO<sub>2</sub> também pode causar impacto negativo na qualidade dos ARC (ZHAN et al., 2017). Isto pode ser atribuído ao excesso de calor gerado sob alta pressão, gerando microfissuras no material e aumentando a absorção de água após o tratamento.

Sobre o fluxo de CO<sub>2</sub>, o efeito é semelhante ao da pressão do gás no processo de mineralização (PU et al., 2021). Segundo os autores, uma alta taxa de fluxo é benéfica para a difusão de CO<sub>2</sub> nos poros do material. Por outro lado, pode reduzir o teor de água livre e comprometer a dissolução do CO<sub>2</sub> com o cálcio. Outra desvantagem da alta taxa de fluxo consiste no elevado consumo de energia e custo para o tratamento.

Estudos anteriores indicam que a captura de CO<sub>2</sub> aumenta exponencialmente conforme o fluxo de CO<sub>2</sub> aumenta de 1,0 l/min para 5,0 l/min, e que o crescimento reduz para fluxos maiores (FANG; XUAN; POON, 2017; PU et al., 2020; SERENG, 2020). Dessa forma, é possível afirmar que um baixo fluxo é suficiente para obter uma taxa de captura de CO<sub>2</sub> satisfatória (SERENG, 2020).

Conforme a revisão da literatura sobre os parâmetros de influência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, observa-se que ainda não existe um protocolo ideal. De acordo com Dündar et al. (2023), a condição ideal de tratamento pode variar, dependendo das características do concreto que deu origem aos ARC, teor de umidade do material e das condições ambientais.

### **2.3.2 Captura de CO<sub>2</sub> através do tratamento por mineralização**

Conforme discutido no item 2.1, o potencial de captura de CO<sub>2</sub> de materiais cimentícios tem sido um assunto abordado com maior frequência nos últimos anos. Contudo, a quantificação da captura de CO<sub>2</sub> obtida por ARC através do tratamento por mineralização ainda é pouco difundida na literatura (SERENG, 2020).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados e os resultados de captura de CO<sub>2</sub> obtidos nos estudos encontrados. Como o foco do presente trabalho são os ARC, os resultados apresentados consideram apenas os materiais com esta fração granulométrica.

Tabela 5 - Captura de CO<sub>2</sub> de ARC após o tratamento

Autor	Concentração de CO <sub>2</sub> (%)	Umidade relativa / Temperatura	Duração do tratamento (horas)	Fluxo / Pressão de CO <sub>2</sub>	Captura de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t)	Técnica de quantificação de captura de CO <sub>2</sub>
Xuan, Zhan e Poon (2016)	100	50 ± 5% / 25 ± 3 °C	24	0,1 Bar e 5 Bar / -	7,90	Análise termogravimétrica (TGA)
Fang, Xuan e Poon (2017)	10	50% / -	24	0,1 Bar / 5,0 l/min	10,20	Análise termogravimétrica (TGA)
	100	50% / -	24	0,1 Bar / 5,0 l/min	12,10	
Sereng (2020)	15	60% / 20 °C	24	1 Bar / 0,9 l/min	9,60	Análise termogravimétrica (TGA)
Tiefenthaler et al. (2021)	≥ 20	50-70% / 25°C	2	0,95 Bar	8,20	Monitoramento da variação de massa dos ARC durante o tratamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como as condições de sazonalidade e o protocolo de tratamento utilizados foram diferentes em cada estudo, o potencial de captura de CO<sub>2</sub> obtido também sofreu variação. Outros fatores que influenciam nesta diferença de resultado é a natureza do concreto que deu do ARC, incluindo o tipo de cimento, relação água/cimento e resistência à compressão do material, e o processo de beneficiamento dos resíduos. No caso do estudo de Tiefenthaler et al. (2021), o estudo consistiu em uma aplicação do tratamento dinâmico em escala industrial, indicando o potencial tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> dos ARC.

### 2.3.3 Agregados graúdos reciclados de concreto tratados com CO<sub>2</sub> (ARCC)

Com o refinamento dos poros causado pela formação do CaCO<sub>3</sub> na microestrutura do ARC, as propriedades físicas e microestruturais do material são aprimoradas (SHI et al., 2016). Estudos anteriores avaliaram estas propriedades a partir de ensaios como: massa específica, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza Vickers (MHV, do inglês “*Microhardness Vickers*”).

A literatura mostra que a massa específica dos ARC tratados com CO<sub>2</sub> (ARCC) aumenta na ordem de 0,6-5,6% (PU et al., 2021). Segundo Xuan, Zhan e Poon (2016), este pequeno aumento se deve à maior densidade do CaCO<sub>3</sub> em comparação com o Ca(OH)<sub>2</sub>.

No estudo de LI et al. (2020), os ARC com fração granulométrica de 10-20 mm foram armazenados em câmara de carbonatação durante 7 dias, com concentração de CO<sub>2</sub> de 20%, temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 70 ± 5%. O aumento obtido para a massa específica foi de 0,93%, semelhante a outra pesquisa em que a duração do tratamento foi 4 horas (GHOLIZADEH-VAYGHAN et al., 2020). Em outros estudos utilizando os mesmos parâmetros, a massa específica aumentou 5,62% e 3,34%, respectivamente (ZHANG et al., 2015; WANG et al., 2020).

Em relação à absorção de água dos ARC, esta propriedade é considerada a mais crítica associada à microestrutura do material (POON et al., 2023). Estudos recentes indicam que a absorção de água pode ser reduzida em até 30% após o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, dependendo da qualidade do resíduo de concreto e do protocolo de tratamento (LI et al., 2017; LU et al., 2019; LUO et al., 2018; ZHAN et al., 2014; ZHANG et al., 2015; WANG et al., 2020).

Em um estudo onde um protocolo estático foi utilizado para simular sua aplicação em escala industrial, a absorção de água de agregados reciclados de concreto convencional (44,5 MPa) e alta resistência (75 MPa) reduziu em 18% e 3%, respectivamente (SERENG, 2020). Estes valores indicam a influência da qualidade do concreto que deu origem ao ARC na eficiência do tratamento. Neste estudo, a concentração de CO<sub>2</sub> utilizada foi de 15% e o tratamento foi realizado durante 24 horas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos em alguns dos estudos citados para os ensaios de massa específica e absorção de água no ARC e ARCC.

Tabela 6 - Variação da massa específica e absorção de água do ARC após o tratamento

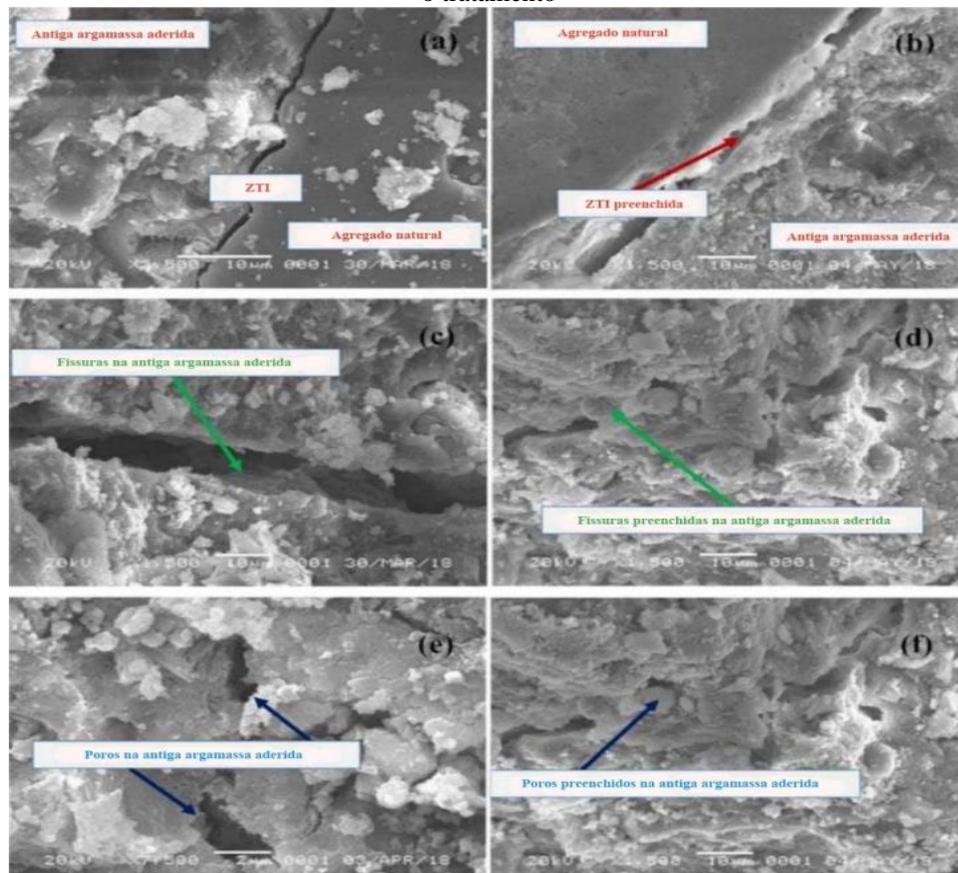
Referência	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		Variação (%)	Absorção de água (%)		Variação (%)
	ARC	ARCC		ARC	ARCC	
Zhan et al. (2014)	2620	2670	↑ 1,91	5,95	4,61	↓ 22,52
Li et al. (2017)	2597	2612	↑ 0,58	6,20	5,06	↓ 18,39
Luo et al. (2018)	2633	2660	↑ 1,02	3,25	2,40	↓ 26,15
Lu et al. (2019)	2504	2603	↑ 3,95	4,86	4,01	↓ 17,49
Gholizadeh-Vayghan et al. (2020)	2663	2688	↑ 0,94	5,26	3,82	↓ 27,38
Wang et al. (2020)	2573	2659	↑ 3,34	4,93	3,91	↓ 20,69

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem sido utilizado para avaliar qualitativamente a microestrutura de materiais cimentícios (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). No caso dos ARC e ARCC, o objetivo desta análise consiste em avaliar a densificação da zona de transição interfacial entre agregado graúdo natural e a argamassa aderida e a redução da porosidade do material, devido à formação do  $\text{CaCO}_3$  durante o tratamento (LI et al., 2020; LIANG et al., 2019; ZHAN et al., 2020; WANG et al., 2020).

Nas imagens obtidas no estudo de Liang et al. (2019), é possível observar que houve o refinamento dos poros e o preenchimento da zona de transição interfacial e das microfissuras do material após o tratamento. Importante ressaltar que, neste estudo, o processo de carbonatação dos ARC foi monitorado de maneira contínua com uma solução de 1% de fenolftaleína, e que o material foi retirado da câmara até que estivessem totalmente carbonatados. As imagens de MEV estão representadas na Figura 20.

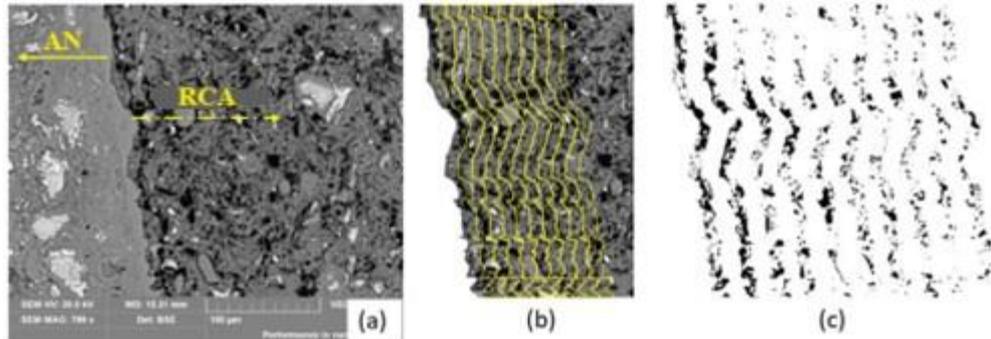
Figura 20 - Microestrutura do ARC antes e depois do tratamento por mineralização do  $\text{CO}_2$ , onde (a) zona de transição interfacial antes do tratamento, (b) zona de transição interfacial após o tratamento, (c) microfissuras antes do tratamento, (d) microfissuras após o tratamento, (e) porosidade antes do tratamento, (f) porosidade após o tratamento



Fonte: Traduzido de LIANG et al., 2019.

Imagens de elétrons retroespalhados (BSE, do inglês “*backscattering electron*”) podem ser utilizadas para verificar a redução de porosidade da argamassa aderida após o tratamento. No estudo de Zhan et al. (2020), os autores realizaram esta análise em região próxima à zona de transição interfacial a partir da exportação da imagem para um *software* específico, onde foi possível identificar os poros do material. As imagens estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Segmentação dos poros do ARC com base em imagem de BSE, onde (a) imagem de BSE mostrando a interface do ARC, (b) tiras sucessivas adjacentes à ZTI, (c) segmentação dos poros para as tiras isoladas



Fonte: ZHAN et al., 2020.

Devido à densificação da zona de transição interfacial após o tratamento, é esperado que a resistência do material nesta região aumente. Nesse sentido, o ensaio de microdureza Vickers foi relatado como um método confiável para avaliar esta propriedade (IGARASHI; BENTUR; MINDESS, 1996).

Estudos recentes avaliaram a microdureza do ARC e ARCC (DING et al., 2023; LI et al., 2019; XUAN; ZHAN; POON, 2016; ZHAN et al., 2020). Apesar do protocolo de tratamento ser diferente em cada estudo, o aumento da microdureza do material teve uma pequena variação entre os estudos, sendo todos na faixa de 10% a 20%.

Os resultados apresentados neste item indicam a eficiência do tratamento em escala laboratorial. Contudo, é necessária a realização de mais pesquisas que utilizem um protocolo de tratamento com foco na sua aplicação em escala industrial, avaliando o potencial de aprimoramento das propriedades dos ARC, visando sua utilização em novos materiais.

### 2.3.4 Concreto com ARCC

A partir do aprimoramento das propriedades físicas e microestruturais dos ARC após o tratamento, é esperado que o desempenho de concretos produzidos com este material seja superior em relação aos concretos com agregados sem tratamento. Este item apresenta os

resultados obtidos em estudos anteriores referentes ao desempenho no estado fresco e endurecido dos concretos.

Em relação ao estado fresco, verificou-se que a redução da absorção de água do ARC com tratamento aumenta a fluidez de novas misturas de concreto, reduzindo a perda de abatimento do material, em comparação com os agregados sem tratamento (LENG et al., 2023; LUO et al., 2018). Em concretos com 100% de substituição do agregado gráudo natural por agregados com e sem tratamento (ARC e ARCC), o abatimento obtido foi de 160 mm, 210 mm e 140 mm, respectivamente, indicando uma trabalhabilidade maior para agregados com menor absorção de água (TAM; BUTERA; LE, 2020). Neste caso, seria necessária uma quantidade menor de água nos concretos com ARC tratado para atingir a mesma trabalhabilidade, reduzindo a relação efetiva de água/cimento e, conseqüentemente, aumentando a resistência do material (PU et al., 2021).

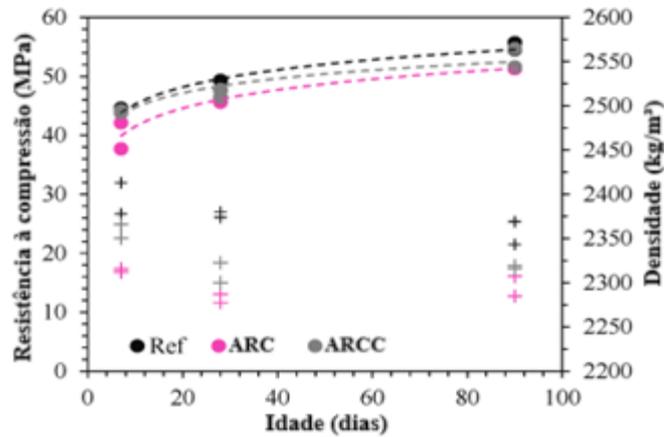
O aumento da massa específica do ARC após o tratamento contribui para que a massa específica do novo concreto seja maior com este material, em comparação com o concreto produzido com ARC sem tratamento (XUAN; ZHAN; POON, 2016). O estudo de Xuan, Zhan e Poon (2016) mostra que o uso dos dois tipos de agregado reciclado diminui a massa específica do concreto em relação ao agregado natural, e que a diferença da massa específica é proporcional ao aumento do teor de substituição.

De acordo com Lu et al. (2019), como os ARC sem tratamento apresentam maior absorção de água e menor massa específica, isto resulta em uma zona de transição interfacial mais fraca com a nova argamassa. O tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> dos ARC melhora a antiga e a nova zona de transição interfacial do concreto, resultando em um material com maior resistência à compressão e módulo de elasticidade (ZHAN et al., 2020).

Conforme estudos anteriores, as propriedades mecânicas no estado endurecido são aprimoradas com o uso de agregados gráudos reciclados de concreto com tratamento (LI et al., 2020; LU et al., 2019; LUO et al., 2018; WASEEM, 2022; XUAN; ZHAN; POON, 2016). Estes estudos mostram que o aumento da resistência à compressão aos 28 dias pode variar de 9,1% a 32%, na comparação de concretos com ARC e ARCC, com substituição total do agregado gráudo natural.

No estudo de Russo e Lollini (2022), a diferença obtida na resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias de concretos produzidos com 100% de agregado graúdo natural, 100% de ARC sem tratamento e 100% de ARC com tratamento foi relativamente pequena. Segundo os autores, as diferentes características dos concretos originais do agregado reciclado, como o consumo e tipo de cimento, resultaram em pouca diferença na absorção de água nos materiais com e sem tratamento. A Figura 22 apresenta o gráfico com os resultados da resistência à compressão e da densidade dos três tipos de concretos produzidos.

Figura 22 - Resistência à compressão (círculo) e densidade (cruz) dos três concretos ao longo do tempo



Fonte: Traduzido de RUSSO e LOLLINI, 2022.

O módulo de elasticidade é outra propriedade mecânica afetada devido ao tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> dos ARC. Com o refinamento dos poros e a maior densidade da zona de transição interfacial, o concreto produzido com este agregado se torna mais rígido (LUO et al., 2018). O aumento do módulo de elasticidade é estimado entre 6,45% a 27,33% (XUAN; ZHAN; POON, 2016; LUO et al., 2018; WANG et al., 2020; KAZMI et al., 2019; LI et al., 2018).

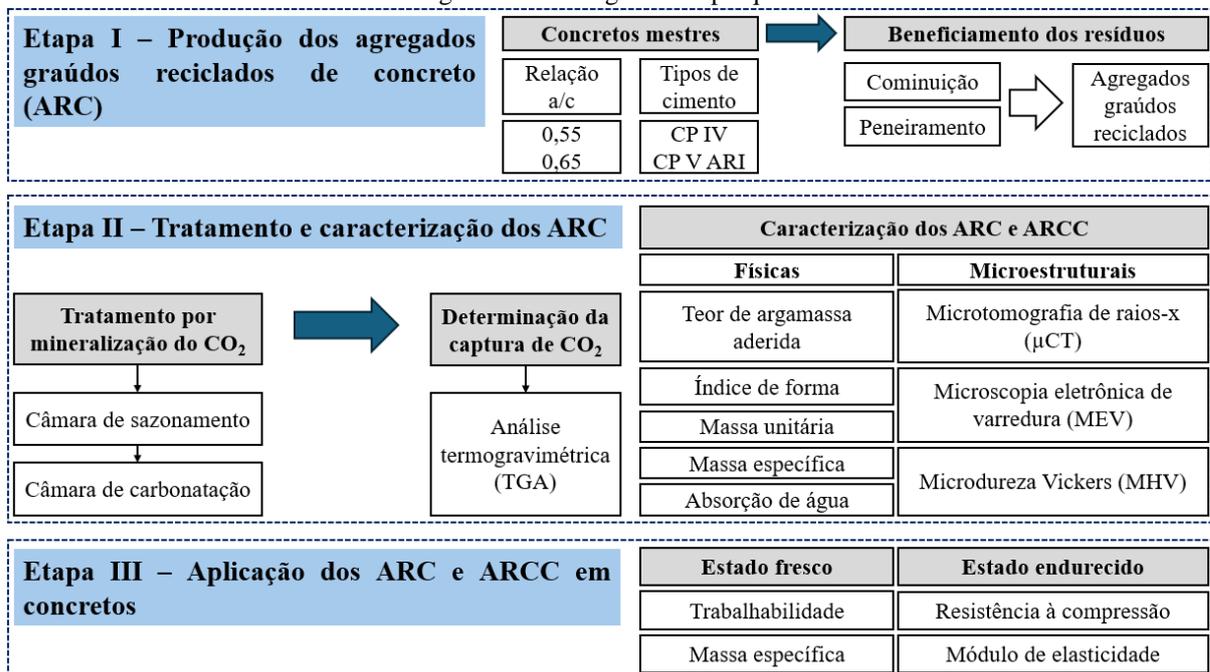
As diferenças encontradas na porcentagem de variação das propriedades mecânicas dos novos concretos entre os estudos citados podem ser explicadas pela origem dos ARC e pelo protocolo de tratamento adotado. De acordo com Pu et al. (2021), é possível observar que a concentração de CO<sub>2</sub> utilizada em cada estudo varia entre 15%, 20% e 100%, enquanto a duração do tratamento varia entre 4 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas, ou até o material ser totalmente carbonatado, influenciando diretamente na qualidade do agregado reciclado após o tratamento e na sua contribuição para o desempenho do novo concreto.

Conforme abordado neste item, a aplicação da tecnologia CCUS através do tratamento de ARC tem se mostrado eficaz em escala laboratorial. Com o intuito de promover a aplicação do tratamento em escala industrial, as perspectivas futuras de pesquisas sobre o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> em escala laboratorial e sua aplicação em materiais cimentícios consideram a avaliação do desempenho mecânico e durabilidade em concretos estruturais, incluindo a avaliação do ciclo de vida sobre os impactos ambientais e econômicos da utilização de agregados reciclados com tratamento.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o planejamento experimental para o desenvolvimento desta pesquisa, seguido da descrição de cada etapa. Como forma de cumprir os objetivos propostos, o presente trabalho foi dividido em três etapas: I) produção dos agregados graúdos reciclados de concreto (ARC); II) tratamento e caracterização dos ARC; III) aplicação dos ARC e ARCC em concretos. A Figura 23 apresenta o fluxograma de pesquisa.

Figura 23 - Fluxograma de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Este item descreve as variáveis de respostas, independentes, fixas e não controláveis definidas para o programa experimental.

##### 3.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes em uma pesquisa são as variáveis de resposta, ou seja, aquelas que são medidas ou analisadas. No presente trabalho, estas variáveis são: potencial de captura de CO<sub>2</sub>, massa específica, absorção de água e microdureza dos agregados graúdos reciclados de concreto não tratados e tratados com CO<sub>2</sub> (ARC e ARCC), assim como as propriedades dos concretos produzidos com estes agregados reciclados no estado fresco e endurecido, incluindo a trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

### 3.1.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes foram definidas de modo a avaliar a sua influência nas variáveis de resposta. Nesse sentido, optou-se por avaliar a influência do tipo de cimento (CP IV e CP V ARI) e da relação água/cimento (0,55 e 0,65) do concreto que deu origem aos agregados graúdos reciclados, a influência do tratamento com CO<sub>2</sub> dos ARC nas propriedades físicas e microestruturais e nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com estes materiais, além da idade dos ensaios mecânicos na etapa III do programa experimental (28 e 63 dias).

### 3.1.3 Variáveis fixas

Também conhecidas como variáveis controláveis, as variáveis fixas são aquelas que podem influenciar na variável de resposta, mas que não se tem a intenção de ser avaliada. Assim, as variáveis fixas do presente trabalho são: características dos agregados miúdos e graúdos naturais, método de dosagem dos concretos produzidos, teor de argamassa, procedimento de cura, teor de substituição dos agregados graúdos reciclados de concreto, processo de beneficiamento dos resíduos, condição de sazonalidade antes do tratamento, concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa na câmara de carbonatação, e o tempo de exposição dos ARC ao CO<sub>2</sub>.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir estão descritos os materiais utilizados neste trabalho, bem como os ensaios de caracterização e resultados.

### 3.2.1 Cimento

Os dois tipos de cimento utilizados foram o cimento Portland pozolânico (CP IV) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI). Inicialmente, sua caracterização se deu através da massa específica (NBR 16605, 2017) e da granulometria a laser, em granulômetro *Particle Size Analyser* (PSA) 1180 *liquid Anton-Paar*, utilizando álcool isopropílico como meio dispersante. Os resultados obtidos nos ensaios realizados do CP IV e CP V ARI, incluindo os do fabricante, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização física e mecânica do CP IV e CP V ARI

Ensaio	CP IV		Exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018)	CP V ARI		Exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018)	
	Resultados do fabricante	Resultados obtidos		Resultados do fabricante	Resultados obtidos		
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,68	2,67	-	3,09	3,01	-	
Tempo de pega (minutos)	Início	243	-	≥ 60	176	-	≥ 60
	Fim	325	-	≤ 720	232	-	≤ 600
Área superficial (cm <sup>2</sup> /g)	4336	-	-	4353	-	-	
Resíduo peneira 75µm (%)	0,50	-	≤ 8,0	0,12	-	≤ 6,0	
Diâmetro médio (µm)	-	-	-	-	12,00	-	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	-	-	-	23,6	-	≥ 14,0
	3 dias	17,2	-	≥ 10,0	37,9	-	≥ 24,0
	7 dias	21,5	-	≥ 20,0	44,2	-	≥ 34,0
	28 dias	34,5	-	≥ 32,0	52,7	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A caracterização química dos cimentos foi realizada através da espectrometria por fluorescência de raios-x (FRX). Neste ensaio, a metodologia de preparo das amostras foi de pastilha prensada e o equipamento utilizado para a análise foi RIX 2000 da marca Rigaku. A Tabela 8 apresenta os dados obtidos da caracterização química dos cimentos.

Tabela 8 - Caracterização química por FRX do CP IV e CP V ARI

Cimento	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	BaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F. <sup>1</sup>
<b>CP IV</b>	36,16	35,81	10,17	4,39	4,21	3,59	1,33	0,54	0,15	0,13	0,06	3,40
<b>CP V ARI</b>	63,18	18,43	3,53	2,80	4,23	2,76	0,86	0,24	-	0,17	0,12	3,60

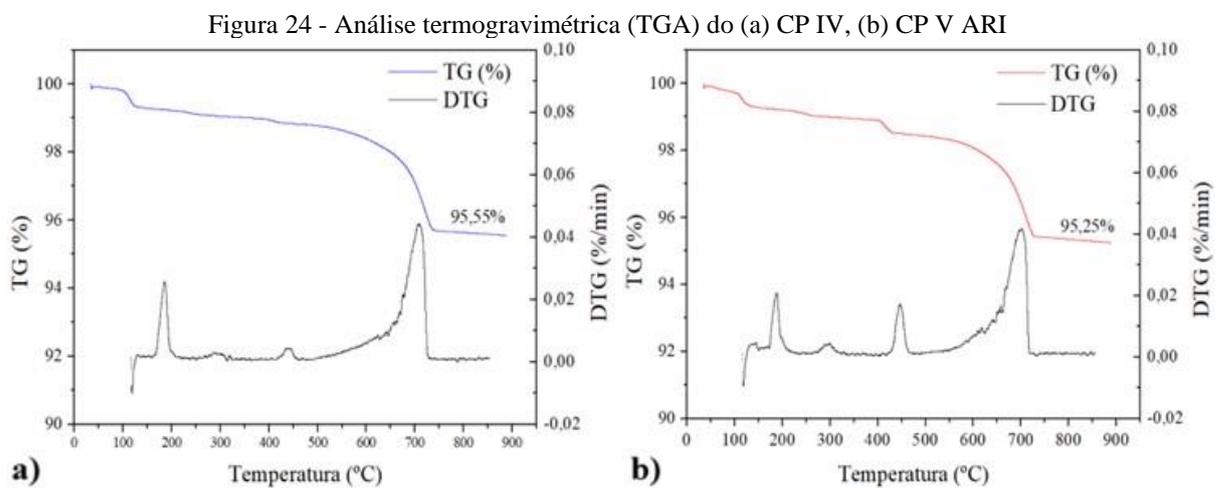
<sup>1</sup>P.F – Perda ao fogo

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise termogravimétrica foi realizada no equipamento STA 800 da marca *PerkinElmer*. Primeiro, foi necessário selecionar 1 grama de amostra com partículas de diâmetro inferior a 0,15 mm (peneira nº 100) para cada tipo de cimento e armazená-la em tubo *Eppendorf* até o momento da análise, para evitar o contato das amostras com a umidade. Antes do ensaio, a amostra permaneceu no equipamento e foi submetida a temperatura constante (isotérmica) de 35 °C por uma hora, para remover o teor de água livre (SCRIVENER; SNELLINGS;

LOTHENBACH, 2016). A seguir os parâmetros adotados para o ensaio: uso de cadinho de alumina aberto (sem tampa); massa inicial de cada amostra na faixa entre  $50 \pm 1$  mg; atmosfera de gás Nitrogênio (N<sub>2</sub>), com vazão de 30 ml/min; taxa de aquecimento de 10 °C/min; e intervalo de aquecimento entre 35 °C e 900 °C.

Os cimentos CP IV e CP V ARI obtiveram perda de massa de 95,55% e 95,25%, respectivamente. As Figuras 24a e 24b apresentam as curvas TG e suas derivadas (DTG). Observe-se que a maior perda de massa ocorreu entre 600 °C e 700 °C devido à descarbonatação do carbonato de cálcio presente nos cimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no trabalho foi a areia de origem quartzosa do Rio Jacuí, extraída de jazidas do município de Porto Alegre/RS. A caracterização consistiu na realização dos ensaios de composição granulométrica e dimensão máxima característica, massa específica, massa unitária e absorção de água. A Tabela 9 e Figura 25 apresentam os resultados obtidos nos ensaios e a distribuição granulométrica, respectivamente.

Tabela 9 - Caracterização física do agregado miúdo

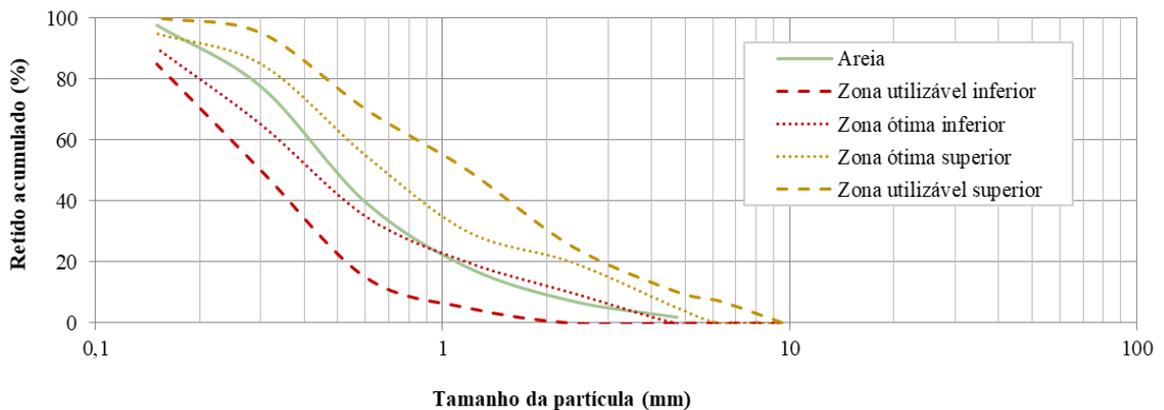
Propriedades avaliadas	Norma técnica	Resultado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,60
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,60
Absorção de água (%)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	1,71

**COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA**

Abertura de peneiras (mm)	% em massa (média)	
	Retido	Retido acumulado
4,75	1,80	1,80
2,36	5,33	7,13
1,18	11,07	18,20
0,6	21,38	39,58
0,3	37,95	77,53
0,15	20,25	97,78
Fundo	2,22	100,00
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	
Módulo de finura	2,42	

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3 Agregado graúdo natural (AGN)

O agregado graúdo natural da presente pesquisa foi a brita de origem basáltica. Para viabilizar a sua utilização na moldagem dos concretos, o material passou por um processo de lavagem em betoneira de tambor de eixo horizontal para eliminar substâncias indesejáveis. Os ensaios de caracterização realizados foram a composição granulométrica e dimensão máxima característica, massa específica, massa unitária, absorção de água e índice de forma.

Como forma de reduzir a variabilidade entre os concretos produzidos com os diferentes agregados reciclados desta pesquisa com o concreto “referência”, a granulometria do agregado graúdo natural utilizado na etapa III do programa experimental foi ajustada de modo a obter uma curva semelhante à dos agregados graúdos reciclados, definida após o processo de beneficiamento dos resíduos.

Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 10 e a distribuição granulométrica apresentada na Figura 26.

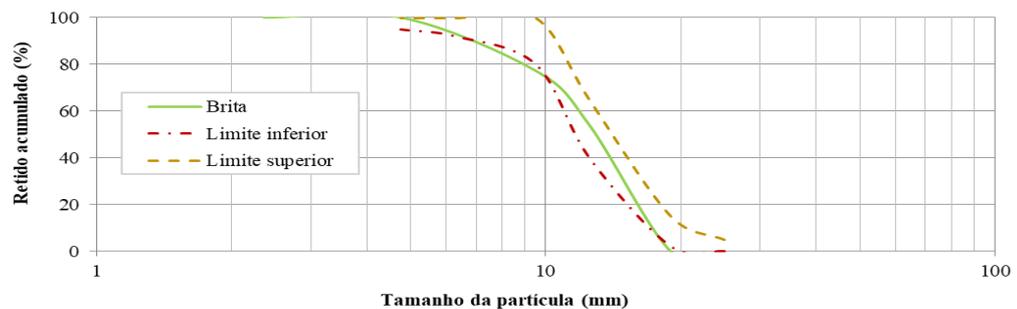
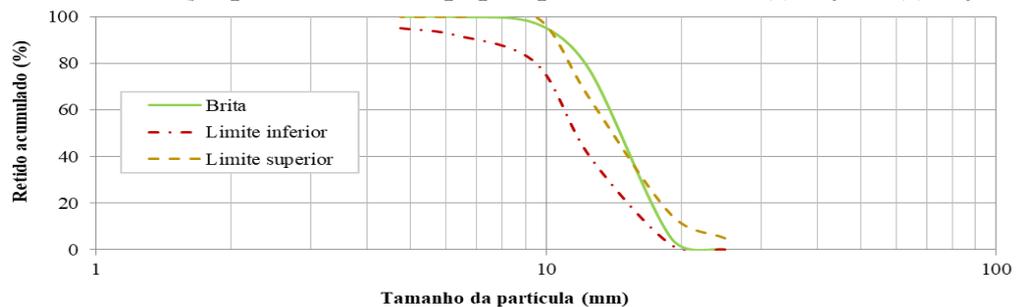
Tabela 10 - Caracterização física do agregado graúdo natural utilizado na etapa I e etapa III

Propriedades avaliadas	Norma técnica	AGN – Etapa I	AGN – Etapa III
		Resultado	Resultado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16917 (ABNT, 2021)	2,79	2,91
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,66	1,54
Absorção de água (%)	NBR 16917 (ABNT, 2021)	1,03	1,26
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)	2,15	2,13
Numeração	NBR 7211 (ABNT, 2022)	Brita 0 e 1	Brita 0 e 1

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>				
Abertura de peneiras (mm)	AGN – Etapa I		AGN – Etapa III	
	% em massa (média)		% em massa (média)	
	Retido	Retido acumulado	Retido	Retido acumulado
19	4,82	4,82	1,00	1,00
12,5	-	-	54,12	55,12
9,5	72,28	77,10	23,07	77,19
4,75	19,96	97,05	22,81	100,00
2,36	2,82	99,88	0,00	100,00
1,18	0,12	100,00	0,00	100,00
0,6	0,00	100,00	0,00	100,00
0,3	0,00	100,00	0,00	100,00
0,15	0,00	100,00	0,00	100,00
Fundo	0,00	100,00	0,00	100,00
Dimensão máxima característica (mm)	19		19	
Módulo de finura	7,02		6,78	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural, onde (a) etapas I, (b) etapa III



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Água

A água utilizada para a produção dos concretos do presente trabalho foi água potável proveniente da rede pública de abastecimento de Porto Alegre/RS.

## 3.3 ETAPA I – PRODUÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)

A primeira etapa do programa experimental consistiu na obtenção e caracterização das matérias-primas que foram utilizadas como resíduo. Em seguida, foi realizado o beneficiamento destes resíduos, incluindo a britagem e peneiramento do material, de modo a selecionar as partículas com dimensão adequada para serem reaproveitadas como agregado graúdo reciclado nas etapas seguintes.

### 3.3.1 Produção dos concretos mestres

Para melhor controle dos ARC, os resíduos considerados para a pesquisa foram obtidos a partir de concretos produzidos em laboratório, chamados de “concretos mestres”. Foram definidas quatro composições diferentes, variando o tipo de cimento (CP IV e CP V ARI) e a relação água/cimento (0,55 e 0,65), como forma de avaliar a influência de cada traço no potencial de captura de CO<sub>2</sub> e no aprimoramento das propriedades do ARC após o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>. Estes cimentos foram escolhidos devido ao fato de possuírem um alto (CP IV) e baixo (CP V ARI) teor de adições quimicamente ativas, de acordo com a especificação da NBR 16697 (ABNT, 2018). No caso da relação água/cimento, foram adotados valores usuais em estruturas de concreto armado localizadas em região urbana, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023).

O método de dosagem dos concretos produzidos nesta etapa foi o IPT/EPUSP (HELENE; TERIZAN, 1992), que consiste na determinação do teor ideal de argamassa na mistura de, no mínimo, três traços, fixando o valor de abatimento. Os três traços são denominados como: intermediário, com quantidade média de agregados e aglomerante; rico, com maior teor de aglomerante; e pobre, com menor teor de aglomerante. O resultado deste estudo de dosagem é apresentado em forma de diagrama, relacionando a resistência à compressão, relação água/cimento, teor de agregados secos e consumo de cimento obtidos experimentalmente para cada um dos traços.

A dosagem foi realizada tanto para o cimento Portland pozolânico (CP IV) como para o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), utilizando os mesmos teores de material seco (4,5, 6,0 e 7,5). A análise do traço para os dois tipos de cimento julgou-se necessária pois este material influencia na dosagem do concreto, principalmente na quantidade de água necessária para atingir o abatimento fixado, devido à diferença da granulometria dos grãos de cada cimento.

A dosagem iniciou-se com o traço rico 1:4,5 (cimento: agregados secos), onde foi definido o teor ideal de argamassa de 52% a partir de análise experimental do concreto, avaliando aspectos como homogeneidade e coesão da mistura. O ensaio do abatimento do concreto foi realizado conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020) e fixado em  $120 \pm 20$  mm. Após, foram desenvolvidos o traço intermediário (1:6,0) e pobre (1:7,5), utilizando o mesmo teor de argamassa obtido no traço rico.

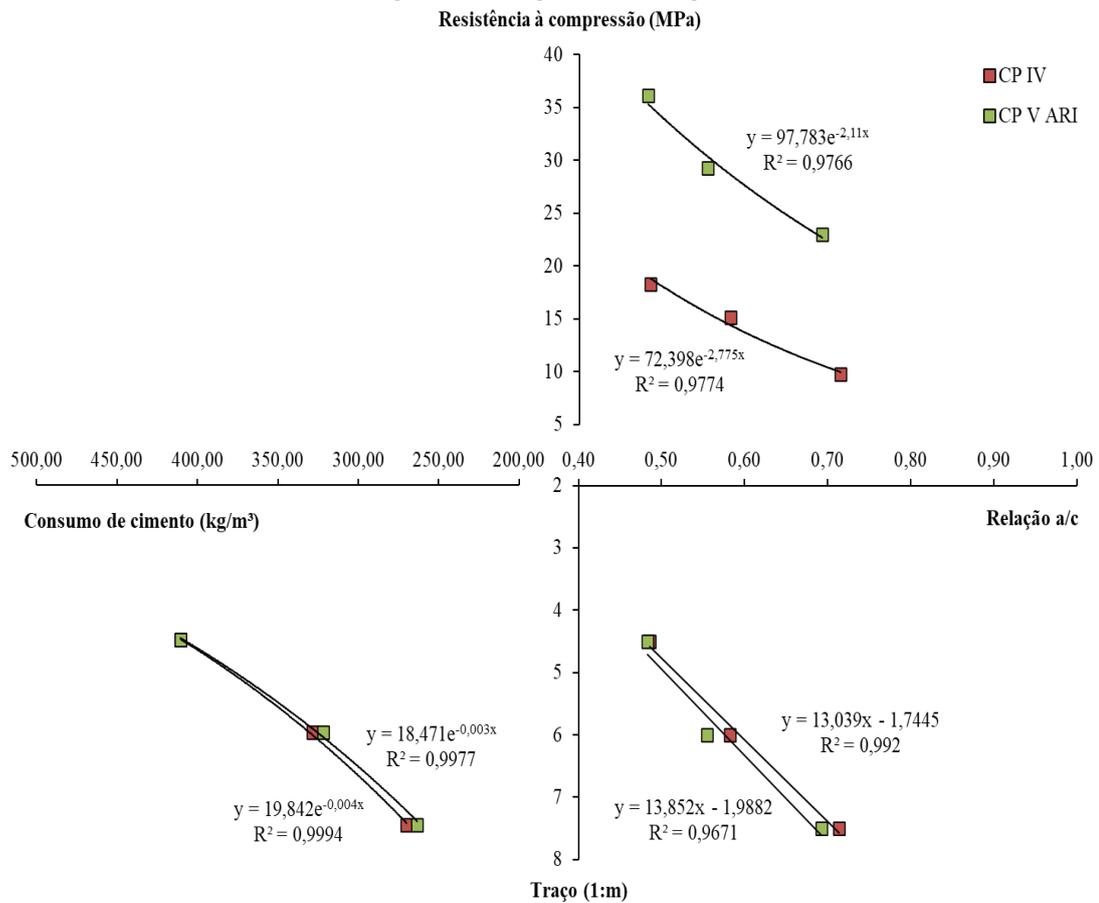
Para cada traço, foram moldados corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os resultados deste ensaio, assim como a relação água/cimento e o consumo de cimento dos traços são apresentados na Tabela 11 e no diagrama da Figura 27.

Tabela 11 - Resultado da curva de dosagem experimental

<b>Tipo de cimento</b>	<b>Traço unitário (1:m) (kg/kg)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>fc<sub>28</sub> potencial (MPa)</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>CP IV</b>	1:4,5	0,49	18,3	410,74
	1:6,0	0,58	15,1	328,46
	1,7,5	0,71	9,8	269,94
<b>CP V ARI</b>	1:4,5	0,48	36,2	410,39
	1:6,0	0,55	29,2	321,66
	1:7,5	0,69	23,0	263,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Diagrama de dosagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do diagrama de dosagem dos dois estudos realizados, foi possível obter os traços do concreto com o cimento Portland pozolânico (CP IV) e com o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) para as relações água/cimento fixas para este trabalho de 0,55 e 0,65. A Tabela 12 apresenta os traços obtidos para a produção dos concretos utilizados como matéria-prima dos resíduos.

Tabela 12 - Traço dos concretos

Identificação	Traço unitário					Slump (mm)	Massa específica (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)
	m	Cimento	Areia	Brita	a/c			
IV_55	5,43	1	2,34	3,08	0,55	115	2452	351,79
IV_65	6,73	1	3,02	3,71	0,65	115	2452	292,60
V_55	5,63	1	2,45	3,18	0,55	140	2510	349,58
V_65	7,02	1	3,17	3,85	0,65	140	2427	279,93

Fonte: Elaborado pelo autor.

A produção dos concretos foi realizada em misturador mecânico com capacidade de 320 litros, previamente imprimado com uma camada fina de argamassa de cimento e areia utilizados neste trabalho, para evitar a perda da argamassa durante a mistura. A ordem de colocação dos materiais na betoneira, em todas as misturas realizadas, seguiu o procedimento utilizado no LAMTAC/NORIE: brita, um terço da água, cimento, areia e o restante da água. O tempo entre a colocação do primeiro terço de água até a realização do ensaio de abatimento foi fixado em quatro minutos. Após o ensaio, a betoneira foi ligada novamente para misturar o material por mais 30 segundos antes de iniciar a moldagem dos corpos de prova.

Para os quatro traços definidos no programa experimental, foram moldados 25 corpos de prova cilíndricos 100 x 200mm. O processo de moldagem seguiu os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2016), incluindo o adensamento mecânico em mesa vibratória, executado em duas camadas de igual espessura, com vibração de quatorze segundos em cada camada para manter a uniformidade da moldagem do concreto.

Com o intuito de reduzir a evaporação da água e permitir a hidratação completa do cimento para garantir a qualidade do concreto, foi realizada a cura dos corpos de prova conforme preconizado na NBR 5738 (ABNT, 2016). A primeira etapa da cura consistiu no acondicionamento dos corpos de prova em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas após a moldagem, cobertos com lona plástica. Após, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade maior ou igual a 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios de caracterização e do processo de britagem do material.

A caracterização dos concretos teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e físicas do material, para contribuir na análise dos resultados das etapas seguintes da pesquisa. Para isso, foram realizados os ensaios de resistência à compressão (NBR 5739 (ABNT, 2018)), módulo de elasticidade (NBR 8522 (ABNT, 2021)) e absorção por capilaridade (NBR 9779 (ABNT, 2012)). As idades adotadas e os resultados obtidos para cada traço estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Caracterização dos concretos mestres no estado endurecido

Traço	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> ) – 72h
	7 dias	28 dias	63 dias	28 dias	> 28 dias
IV_55	11,0	17,1	21,2	33,5	0,759
IV_65	7,4	11,5	16,5	27,2	1,280
V_55	22,2	27,2	35,0	36,4	0,805
V_65	19,2	24,9	31,0	30,7	1,193

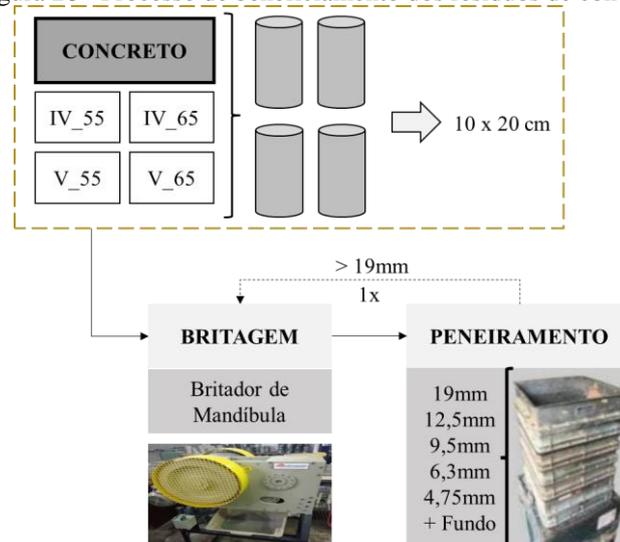
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.2 Beneficiamento dos resíduos

A etapa seguinte para obtenção dos agregados reciclados foi a cominuição dos materiais, realizado em um britador de mandíbulas. Posteriormente, o material foi colocado em um peneirador mecânico, separando os agregados graúdos dos miúdos.

O material selecionado foi o passante na peneira #19mm e retido na peneira #4,75mm, faixa do agregado graúdo natural tipo 0 e 1, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022). Os materiais retidos na peneira #19mm passaram novamente pelo britador, sendo este procedimento realizado apenas mais uma vez após a primeira britagem, como forma reduzir o consumo energético do processo. A Figura 28 demonstra o processo de beneficiamento dos resíduos.

Figura 28 - Processo de beneficiamento dos resíduos de concreto



Fonte: Adaptado de DESSUY, 2020.

Importante ressaltar que o material passante na peneira #4,75mm foi utilizado em outra pesquisa, sendo realizada na Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Após a seleção das partículas de agregado graúdo reciclado, os materiais foram peneirados de forma a padronizar a granulometria entre os traços e, assim, reduzir a variabilidade das propriedades do estado fresco e endurecido dos concretos produzidos com estes agregados (Etapa III). Nesta etapa, foram utilizadas as peneiras 12,5mm, 9,5mm e 4,75mm. O peneirador mecânico permaneceu ligado por 15 minutos, ou até que não houvesse material passante entre as peneiras.

Para os quatro traços dos concretos mestres foi observado que, para os 25 corpos de prova britados, o rendimento de agregados graúdos e miúdos foi semelhante. A Tabela 14 apresenta a porcentagem da fração graúda, utilizada na presente pesquisa, e da fração passante na peneira #4,75mm.

Tabela 14 - Rendimento dos agregados após o processo de beneficiamento

ARC	Quantidade de material produzido (kg)	% retida na peneira #4,75mm	% passante na peneira #4,75mm
IV_55	103,00	85,53	14,47
IV_65	96,50	77,78	22,22
V_55	108,00	85,42	14,58
V_65	106,50	79,81	20,19

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a granulometria dos materiais definida (Tabela 16 e Figura 29), as frações de cada traço de concreto dos agregados foram divididas em dois grupos: agregados graúdos reciclados de concreto (ARC) e agregados graúdos reciclados de concretos carbonatados (ARCC). A partir desta etapa, os agregados passam a ser identificados com NC (não carbonatado) e CA (carbonatado). A Tabela 15 apresenta a sigla dos oito tipos de agregado reciclado.

Tabela 15 - Identificação dos tipos de ARC e ARCC

Identificação	Tratamento por mineralização do CO <sub>2</sub>	
	Não	Sim
IV_55 - NC	X	
IV_55 - CA		X
IV_65 - NC	X	
IV_65 - CA		X
V_55 - NC	X	
V_55 - CA		X
V_65 - NC	X	
V_65 - CA		X

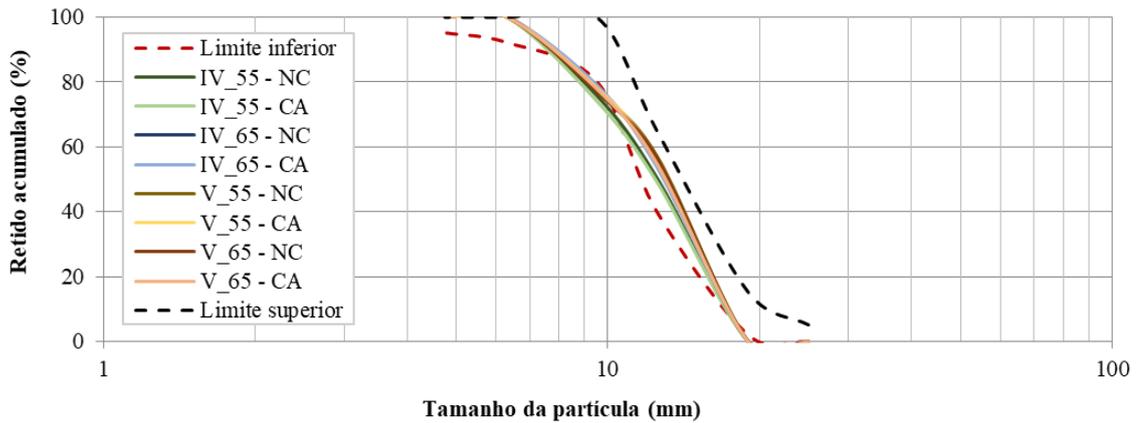
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 - Composição granulométrica (média) dos ARC e ARCC

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA		
Abertura de peneiras (mm)	ARC e ARCC	
	% em massa (média)	
	Retido	Retido acumulado
19	1,00	1,00
12,5	54,12	55,12
9,5	23,07	77,19
4,75	22,81	100,00
2,36	0,00	100,00
1,18	0,00	100,00
0,6	0,00	100,00
0,3	0,00	100,00
0,15	0,00	100,00
Fundo	0,00	100,00
Dimensão máxima característica (mm)	19	
Módulo de finura	6,78	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Distribuição granulométrica dos ARC e ARCC



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 ETAPA II – TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS ARC

Este item descreve a etapa de tratamento dos ARC com do CO<sub>2</sub>, a metodologia de quantificação de captura de CO<sub>2</sub> e dos ensaios de caracterização dos ARC com e sem tratamento.

#### 3.4.1 Tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>

Esta etapa consistiu na exposição dos agregados reciclados ao CO<sub>2</sub> para realizar mineralização, e foi dividida nas etapas de sazonalização e tratamento. A etapa de sazonalização teve como intuito equilibrar o teor de umidade dos agregados com a umidade relativa do ambiente climatizado onde a câmara de carbonatação utilizada no tratamento estava localizada, com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $50 \pm 5\%$ . Para a etapa do tratamento em si, o protocolo adotado foi definido com base em estudos anteriores que tiveram como intuito a simulação de um protocolo que pudesse ser replicado em escala industrial (SERENG, 2020; KADDAH et al., 2022).

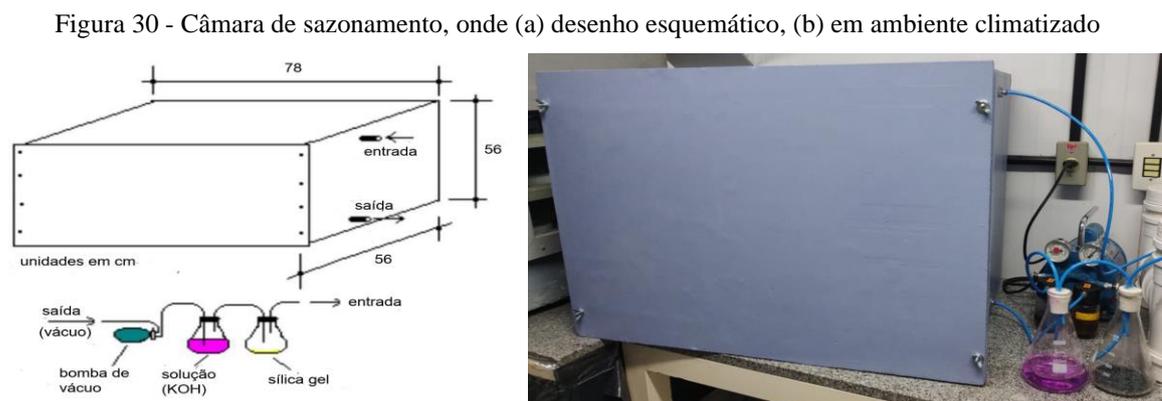
##### 3.4.1.1 Condição de sazonalização

Após a etapa de beneficiamento dos resíduos, os materiais foram armazenados em sacos de rafia e colocados em câmara úmida. O procedimento de equalização do teor de umidade dos agregados com a umidade relativa do ar para o processo de mineralização consistiu no armazenamento dos materiais em uma câmara de sazonalização. Esta câmara foi utilizada também para evitar a ocorrência da carbonatação natural dos agregados antes do tratamento, assim como em pesquisas anteriores realizadas no LAMTAC/NORIE (KULAKOWSKI, 2002; PAULETTI, 2004). Como forma de tornar a exposição ao CO<sub>2</sub> durante o tratamento a

única variável entre os agregados tratados e não tratados, os oito tipos de agregados reciclados ficaram armazenados na câmara de sazonalidade.

A câmara de sazonalidade consiste em uma caixa de chapas compensadas de madeira com tampa e possui capacidade de 245 litros. Conforme o procedimento utilizado na pesquisa de Pauletti (2004), após armazenar os materiais na câmara, as canalizações ligadas à caixa foram conectadas a uma bomba de vácuo, sendo utilizada para filtrar o ar do interior da câmara.

Durante a circulação do ar filtrado, o ar passa por uma solução de hidróxido de potássio (KOH) com água deionizada e 1% de fenolftaleína (com 70% de álcool etílico e 30% de água deionizada), onde o CO<sub>2</sub> presente no ar é absorvido. Antes de retornar à câmara, o ar passa por um recipiente com sílica gel, para retirar a umidade adquirida na reação com o KOH. A Figura 30 apresenta um desenho esquemático do processo de circulação do ar e a câmara de sazonalidade no ambiente climatizado.



Fonte: (a) PAULETTI, 2004; (b) Elaborado pelo autor.

Com o auxílio de um medidor de CO<sub>2</sub>, foi possível observar que cinco ciclos do ar com duração de 90 minutos cada (e intervalo de 120 minutos entre os ciclos, para o resfriamento da bomba de vácuo) seriam suficientes para que o CO<sub>2</sub> presente no ar do interior da câmara de sazonalidade fosse removido. Um termohigrômetro foi utilizado para monitorar a temperatura e umidade relativa na câmara durante o armazenamento dos agregados reciclados, em intervalos de 10 minutos.

Antes da circulação do ar, verificou-se que a umidade no interior da câmara permaneceu em  $90 \pm 5\%$ . Este aumento de umidade se deve ao fato de que os materiais estavam armazenados em câmara úmida até iniciar o processo de sazonalidade, sendo este procedimento adotado em

estudo anterior (PAULETTI, 2004). Após os cinco ciclos, a umidade reduziu e se manteve constante na faixa de  $70 \pm 5\%$ .

A próxima etapa consistiu na verificação da constância de massa dos agregados, ou seja, diferença entre duas medidas de 0,1 gramas no intervalo de 24 horas. Cada vez que a câmara foi aberta para esta verificação, a bomba de vácuo foi ligada por 30 minutos para a circulação de ar (PAULETTI, 2004).

#### 3.4.1.2 Protocolo de tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>

O processo de mineralização dos ARC foi realizado em duas câmaras de carbonatação de 227 litros cada, localizadas em ambiente climatizado no LAMTAC/NORIE. Os agregados reciclados foram colocados em bandejas de plástico com dimensões de 53 cm x 37 cm x 8,6 cm. Para que todas as partículas de agregados fossem expostas ao CO<sub>2</sub> durante o tratamento, foi definido que a camada de material não seria superior a 5 cm. A Figura 31 apresenta a disposição dos agregados nas bandejas, logo antes de serem colocados na câmara de carbonatação.

Figura 31 - Disposição dos ARC em bandejas para o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às condições do ambiente, os parâmetros de influência considerados foram a concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa no interior da câmara de carbonatação, pressão ambiente, fluxo de CO<sub>2</sub> a ser regulado na saída do gás do cilindro, vazão de ar e CO<sub>2</sub> para o preenchimento da câmara.

A concentração de CO<sub>2</sub> adotada no presente trabalho foi  $15 \pm 1\%$ , por corresponder à taxa recuperada na saída dos fornos de cimento (SERENG, 2020; KADDAH et al., 2022; DÜNDAR et al., 2023). A temperatura e umidade relativa foram inicialmente definidas na faixa de  $23 \pm 2$  °C e  $60 \pm 10\%$ , respectivamente. Estes dois parâmetros, assim como na câmara de sazonalidade, foram monitorados em intervalos de 10 minutos durante o tratamento

dos ARC através do termohigrômetro e registrou temperatura de  $26 \pm 1$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 5\%$ , dentro do limite considerado o ideal para a mineralização.

No início do tratamento, a temperatura e umidade da câmara eram 25,5 °C e 60%, respectivamente. Considerando que a carbonatação é uma reação exotérmica, a temperatura aumentou gradativamente até o final do tratamento. Em relação à umidade relativa, este parâmetro também aumentou durante o tratamento, visto que a reação de carbonatação aumenta o teor de água livre no interior do material, ocorrendo sua evaporação. Como a umidade da câmara se manteve na faixa ideal para o tratamento, não foi necessário colocar sílica gel na câmara para absorver o excesso de umidade.

O parâmetro de fluxo de CO<sub>2</sub> na saída do gás do cilindro foi definido conforme a literatura, sendo recomendado o valor de 5,0 l/min (FANG; XUAN; POON, 2017; SERENG, 2020). A vazão de ar e CO<sub>2</sub> foi regulada em 5,0 l/min e  $0,75 \pm 0,05$  l/min, respectivamente, a partir de um rotâmetro instalado ao lado de uma das câmaras de carbonatação. Uma câmara de 144 litros foi utilizada para a mistura do ar proveniente do compressor com o dióxido de carbono ( $15 \pm 1\%$  de CO<sub>2</sub>), antes de preencher as duas câmaras onde os agregados ficaram armazenados durante o tratamento.

Conforme apresentado no item 2.3.1.1, a duração do tratamento possui grande influência na sua eficácia, sendo que no estágio inicial a mineralização ocorre de maneira mais rápida e, após, o processo é estabilizado. Além disso, promover um tratamento dos ARC com longa duração poderia ser inviável de ser reproduzido na indústria (SERENG, 2020). Por esses motivos, o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação escolhido foi de 24 horas, contados a partir de 1 hora após o cilindro com dióxido de carbono ser acionado, para que o ambiente com  $15 \pm 1\%$  de CO<sub>2</sub> fosse estabilizado nas câmaras contendo os ARC.

Para resumir o protocolo de tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> utilizado na presente pesquisa, a Tabela 17 apresenta os parâmetros adotados descritos acima.

Tabela 17 - Protocolo de tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>

Fator de influência	Protocolo utilizado
Concentração de CO <sub>2</sub>	15 ± 1 %
Temperatura	26 ± 1 °C
Umidade relativa	65 ± 5 %
Fluxo de CO <sub>2</sub>	5,0 l/min
Tempo	24 horas

Fonte: Elaborado pelo autor.

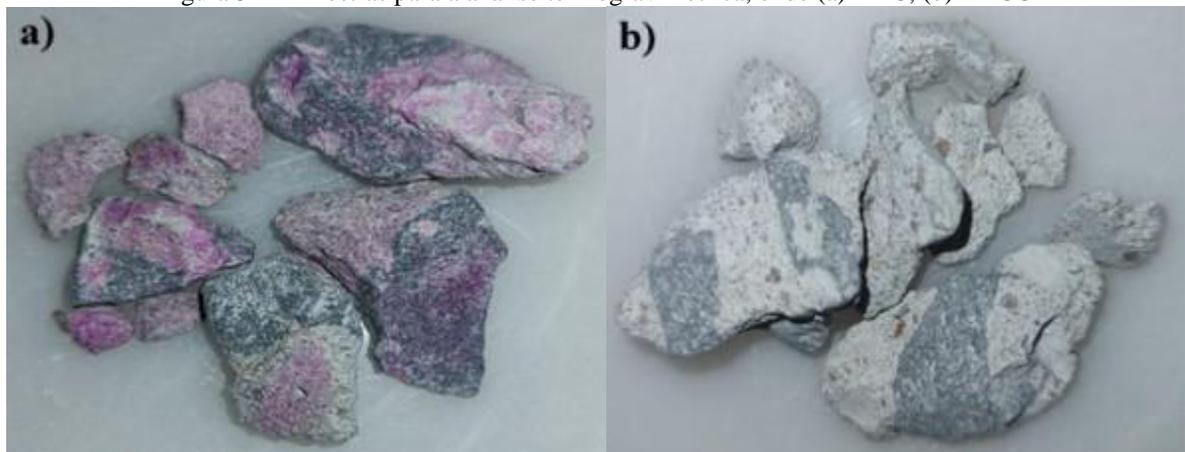
### 3.4.2 Determinação da captura de CO<sub>2</sub>

A metodologia para a determinação do potencial de captura de CO<sub>2</sub> dos diferentes tipos de ARC consistiu na realização da análise termogravimétrica (TGA), de modo a quantificar a perda de massa das amostras conforme o aumento da temperatura de exposição no equipamento.

#### 3.4.2.1 Análise termogravimétrica (TG e DTG)

Para o ensaio de análise termogravimétrica, foram selecionadas 50 gramas de cada tipo de ARC e ARCC para se obter três amostras representativas de cada agregado (SERENG, 2020). Para isso, foi aplicada uma solução com 1% de fenolftaleína dissolvida em álcool etílico 70% e água destilada 30% para observar o efeito da reação de carbonatação na superfície das amostras. Destas partículas, foram extraídas pequenas alíquotas de argamassa, considerando que o CO<sub>2</sub> é absorvido apenas pela argamassa aderida. A Figura 32 representa uma amostra de ARC e ARCC selecionado para esta etapa.

Figura 32 - Amostras para a análise termogravimétrica, onde (a) ARC, (b) ARCC



Fonte: Elaborado pelo autor.

A próxima etapa seguiu o procedimento adotado por Rigo (2019). Primeiro, realizou-se a coleta da argamassa aderida nas partículas em que havia agregado grão natural e, após, a moagem das amostras de argamassa com o auxílio de um almofariz e pistilo cerâmico, até atingir um tamanho de grão inferior a 0,15 mm em sua totalidade (peneira de malha *Mesh* #100). Por fim, as amostras foram armazenadas em tubos *Eppendorfs* e colocadas em caixa de acrílico vedada, evitando o contato do material com a umidade do ar. Importante ressaltar que, nas amostras de ARCC, toda a argamassa aderida foi considerada para moagem das amostras, incluindo a zona carbonatada e não carbonatada.

O equipamento utilizado neste ensaio é da marca *PerckingElmer*, modelo STA 8000, com atmosfera de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>). Assim como em pesquisas anteriores (RIGO, 2019; SELLA, 2022; BORGES et al., 2023), utilizou-se um fluxo de nitrogênio de 30 ml/min, cadinho de alumina e uma quantidade de 50 mg de cada amostra.

Conforme recomendado por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), o material foi submetido ao processo de isoterma a 35 °C pelo período de 1 hora, de modo a remover a água livre da amostra. Em seguida, foi aquecido de 35 °C a 900 °C, com razão de aquecimento de 10 °C/min.

Os dados obtidos na análise termogravimétrica foram exportados para o *software OriginPro* 8.5. Este programa foi utilizado para plotar os gráficos de TG e DTG e verificar a perda de massa do material em razão do aumento de temperatura e os picos de decomposição dos principais compostos (C-S-H, etringita, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio), respectivamente.

#### 3.4.2.2 Metodologia de cálculo

A determinação da captura de CO<sub>2</sub> das amostras seguiu a metodologia de Neves Junior et al. (2019). Inicialmente, foi determinada a perda de massa no início e final do pico de decomposição do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) nas amostras de ARC e ARCC, ou seja, na reação de descarbonatação. A partir da diferença dos valores de perda de massa foi calculada, por estequiometria, a parcela de CO<sub>2</sub> que compõe o CaCO<sub>3</sub>, conforme a Equação 5.



A quantidade de CO<sub>2</sub> capturado pela matriz cimentícia do ARC foi calculada pela diferença da parcela de CO<sub>2</sub> das amostras, sendo este valor dividido por 100 e multiplicado pela massa do material utilizado na análise termogravimétrica. A Equação 6 apresenta este cálculo.

$$CO_{2\text{cap}} = \left( \frac{CO_2\text{ TG}_{CA} - CO_2\text{ TG}_{NC}}{100} \right) * MCA \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

- $CO_{2\text{cap}}$  = CO<sub>2</sub> capturado (gramas);  
 $CO_2\text{ TG}_{CA}$  = CO<sub>2</sub> na amostra tratada (%);  
 $CO_2\text{ TG}_{NC}$  = CO<sub>2</sub> na amostra não tratada (%);  
 $MCA$  = Massa inicial da amostra (50 mg).

A Equação 7 foi empregada para a conversão do valor de captura em gramas (g) para kgCO<sub>2</sub>/t (quilogramas de CO<sub>2</sub> por tonelada de material).

$$CO_{2\text{cap}} \left( \frac{kgCO_2}{t} \right) = \left( \frac{CO_{2\text{cap}}(g)}{MCA(g)} \right) * 1000 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- $CO_{2\text{cap}} \left( \frac{kgCO_2}{t} \right)$  = CO<sub>2</sub> capturado (kgCO<sub>2</sub>/t);  
 $CO_{2\text{cap}}(g)$  = CO<sub>2</sub> capturado (gramas);  
 $MCA(g)$  = Massa inicial da amostra (50 mg).

A partir dos valores obtidos no início e final do pico de carbonato de cálcio das amostras de ARC não tratado, é possível calcular a capacidade máxima de carbonatação e o grau de carbonatação do material em estudo. Para isso, é preciso calcular o teor de óxido de cálcio (CaO) disponível na matriz cimentícia para reagir com o CO<sub>2</sub>, conhecido como CaO livre. Na Equação 8, calcula-se o teor de CaO equivalente ao CaCO<sub>3</sub> do cimento a partir da diferença de massa obtidas nas TG's dos cimentos antes e depois do pico de CaCO<sub>3</sub>.

$$CaO_{eq.CaCO_3} = (CO_2\text{ TG}_{An.CaCO_3} - CO_2\text{ TG}_{Dep.CaCO_3}) * \frac{MM_{CaO}}{MM_{CO_2}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

- $CaO_{eq.CaCO_3}$  = CaO equivalente ao CaCO<sub>3</sub> do cimento (%);  
 $CO_2\text{ TG}_{An.CaCO_3}$  = Massa da amostra da TG do cimento antes do CaCO<sub>3</sub> (%);  
 $CO_2\text{ TG}_{Dep.CaCO_3}$  = Massa da amostra da TG do cimento depois do CaCO<sub>3</sub> (%);

$MM_{CaO}$  = Massa molar do CaO (g/mol);  
 $MM_{CO_2}$  = Massa molar do CO<sub>2</sub> (g/mol).

O valor de CaO livre da matriz cimentícia é calculado pela diferença entre o teor de CaO obtido no ensaio de FRX (Tabela 8) e o CaO equivalente ao CaCO<sub>3</sub> dos cimentos. Este cálculo está representado na Equação 9.

$$CaO_{livre} = CaO_{FRX} - CaO_{eq.CaCO_3} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$CaO_{livre}$  = CaO livre do cimento (%);  
 $CaO_{FRX}$  = CaO do cimento obtidos no FRX (%);  
 $CaO_{eq.CaCO_3}$  = CaO equivalente ao CaCO<sub>3</sub> do cimento (%).

Por estequiometria, o valor de CaO livre é convertido na capacidade máxima de carbonatação do cimento, conforme a Equação 10.

$$CMC = CaO_{livre} * \left( \frac{MM_{CO_2}}{MM_{CaO}} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

$CMC$  = Capacidade máxima de carbonatação do cimento (%);  
 $CaO_{livre}$  = CaO livre do cimento (%);  
 $MM_{CO_2}$  = Massa molar do CO<sub>2</sub> (g/mol);  
 $MM_{CaO}$  = Massa molar do CaO (g/mol).

Antes de determinar o grau de carbonatação da amostra, é necessário calcular o valor máximo de CO<sub>2</sub> capturado, obtido pela diferença entre a parcela de CO<sub>2</sub> das amostras de ARC e ARCC. A Equação 11 apresenta este cálculo.

$$CO_{2\text{ máx.cap}} = CO_2 TG_{CA} - CO_2 TG_{NC} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$CO_2 máx.cap$  = CO<sub>2</sub> máximo capturado (%);

$CO_2 TG_{CA}$  = CO<sub>2</sub> equivalente em base a massa inicial da amostra carbonatada (%);

$CO_2 TG_{NC}$  = CO<sub>2</sub> equivalente em base a massa inicial da amostra não-carbonatada (%).

Por fim, o grau de carbonatação das amostras foi obtido a partir da relação entre o valor de CO<sub>2</sub> máximo capturado e a capacidade máxima de carbonatação das amostras, calculadas nas Equações 11 e 10, respectivamente. O cálculo do grau de carbonatação é apresentado na Equação 12.

$$GC = \left( \frac{CO_2 máx.cap}{CMC} \right) * 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$GC$  = Grau de carbonatação da amostra (%);

$CO_2 máx.cap$  = CO<sub>2</sub> máximo capturado (%);

$CMC$  = Capacidade máxima de carbonatação do cimento (%).

### 3.4.3 Propriedades físicas dos ARC e ARCC

Para a realização dos ensaios de caracterização física dos agregados foi necessário realizar o quarteamento de cada traço, conforme a NBR 16915 (ABNT, 2021). Nesta etapa, foram selecionadas duas amostras de aproximadamente 5 kg, para que os ensaios de massa específica e absorção de água fossem realizados em duplicata, sendo que a média dos resultados das duas amostras foi considerada como o resultado de cada ensaio. Importante ressaltar que os ensaios de índice de forma e massa unitária foram realizados apenas nos traços com agregados não tratados, considerando que não há evidências de que o tratamento altere estas propriedades (PU et al., 2021; LI et al., 2022).

#### 3.4.3.1 Teor de argamassa aderida

Este ensaio seguiu a metodologia de Abbas et al. (2009), sendo reproduzida em trabalhos anteriores (HAYLES; SANCHEZ; NOËL, 2018; OLIVEIRA, 2023). Inicialmente, foram selecionados 3 kg de ARC, sendo 2 kg com granulometria entre 19 mm e 9,5 mm e 1 kg com granulometria entre 4,75 e 9,5 mm. Antes do ensaio, as amostras de 3 kg foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas. Em seguida, o material foi armazenado em recipientes metálicos com solução de sulfato de sódio a 26% em peso. Após 24 horas de imersão, a amostra foi

submetida a cinco ciclos de congelamento e descongelamento (16 horas em *freezer* a -17 °C e 8 horas em estufa a 80 °C).

Ao final do último ciclo, as amostras foram retiradas da solução de sulfato de sódio e lavadas em peneira de 4,75 mm, para eliminar a argamassa aderida em sua totalidade. Após a lavagem, os agregados foram novamente colocados em estufa por 24 horas, para determinar a massa seca do agregado natural. O teor de argamassa aderida foi obtido através da Equação 13.

$$RMC = \left[ \frac{W_{RCA} - W_{OVA}}{W_{RCA}} \right] * 100 \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

$RMC$  = teor de argamassa aderida (%);

$W_{RCA}$  = massa inicial seca do agregado graúdo reciclado (kg);

$W_{OVA}$  = massa final seca do agregado graúdo natural (kg).

#### 3.4.3.2 Índice de forma

O ensaio do índice de forma foi realizado conforme a NBR 7809 (ABNT, 2019). O procedimento desta norma descreve que devem ser selecionadas 200 partículas de agregados proporcionais à quantidade de material das faixas granulométricas de 9,5-12,5 mm e 12,5-19,0 mm de cada amostra. Foi utilizado um paquímetro digital para medir o comprimento e espessura de cada grão selecionado e, após, foram calculados o índice de forma de cada grão e a média da amostra.

#### 3.4.3.3 Massa unitária

A massa unitária dos ARC foi determinada através do método C da NBR 16972 (ABNT, 2021). Este método, descrito no item 8.4 da norma, consiste em determinar a massa de um recipiente vazio, com volume conhecido. Após, deve-se preencher o recipiente com o material até sua capacidade máxima. Com o auxílio de uma haste de adensamento, é necessário nivelar a camada superior e, por fim, determinar a massa do recipiente com o seu conteúdo.

#### 3.4.3.4 Massa específica

A massa específica dos ARC e ARCC foi determinada de acordo com o procedimento descrito no item 7 da NBR 16917 (ABNT, 2021). Neste ensaio foram calculadas a massa específica do agregado na condição seca e na condição saturada superfície seca, conforme a

equação dos itens 8.1 e 8.2 da norma, respectivamente. A Figura 33 ilustra as duas amostras espalhadas em bandejas e submersas, sendo mantidas nessa condição pelo período de 24 horas.

Figura 33 - Disposição das amostras em bandejas para o ensaio de massa específica



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.4.3.5 Absorção de água

Assim como o ensaio de massa específica, a determinação da absorção de água dos oito tipos de ARC ocorreu conforme o item 7 da NBR 16917 (ABNT, 2021). A equação utilizada para calcular esta propriedade consta no item 8.3 da norma.

### 3.4.4 Propriedades microestruturais dos ARC e ARCC

A análise microestrutural dos ARC teve como intuito observar o efeito da formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) após o tratamento por mineralização do  $\text{CO}_2$  e verificar se houve redução da porosidade e a densificação da zona de transição interfacial. Para isso, os ensaios de microtomografia de raios-x ( $\mu\text{CT}$ ) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados.

O ensaio mecânico em escala micro realizado nos ARC e ARCC teve como objetivo avaliar a dureza da argamassa aderida próxima à zona de transição interfacial do material. O teste de microdureza Vickers (MHV) tem sido abordado na literatura como um método confiável para este tipo de avaliação em materiais cimentícios (IGARASHI; BENTUR; MINDESS, 1996; ZHAN et al., 2020), sendo empregado neste estudo.

#### 3.4.4.1 Microtomografia de raios-x ( $\mu\text{CT}$ )

A microtomografia de raios-x é uma técnica não destrutiva que permite verificar a porosidade de uma amostra através do escaneamento, que consiste em fatiar a amostra em diversas camadas, gerando diversas imagens 2D da amostra (SCHIAVON, 2019; BORGES *et al.*, 2023). Em amostras de argamassa e concreto, a pasta, os poros e os agregados podem ser

diferenciados, permitindo a análise da microestrutura destes materiais. Segundo Schabowicz et al. (2016), este ensaio proporciona três conjuntos de dados em relação à microestrutura da amostra: a) imagens da seção transversal; b) estrutura dos poros; c) imagens tridimensionais para diferenciar os poros e a pasta, no caso de materiais cimentícios.

Na presente pesquisa, a análise da porosidade por microtomografia de raios-x foi realizada nas amostras de ARC e ARCC. Conforme adotado em pesquisas anteriores (DA SILVA et al., 2022; ORTOLAN et al., 2023; BORGES et al., 2023), foram escolhidas amostras com dimensão máxima de, aproximadamente, 1 cm. Como o material a ser analisado foi produzido no processo de britagem dos resíduos, as amostras não possuem um aspecto cúbico regular, conforme apresentado na Tabela 18. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 50 °C durante o período de 24h, para remover a umidade sem alterar a microestrutura do material.

Tabela 18 - Aspecto das amostras de ARC e ARCC para o ensaio de microtomografia de raios-x

ARC	Não-carbonatado (NC)	Carbonatado (CA)
IV_55		
IV_65		
V_55		
V_65		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este ensaio foi realizado no equipamento *Bruker SkyScan* modelo 1173, com energia operacional de 130 kV, corrente elétrica de 61  $\mu\text{A}$  e resolução de 10  $\mu\text{m}$ , no Instituto de Petróleo e Recursos Naturais (IPR). As condições ambientais de ensaio foram  $21,5 \pm 3,5$  °C de temperatura e umidade relativa de  $< 70\%$ .

Após a realização do ensaio, foram utilizados os *softwares Data Viewer* e *CTAn*, para analisar as imagens do escaneamento das amostras e calcular a porosidade a partir da diferença de fase (pasta, agregados e poros), respectivamente. As imagens de representação 3D das amostras e da estrutura dos poros foram obtidas nos *softwares CTVox* e *CTVol*, respectivamente.

#### 3.4.4.2 Microscopia eletrônica varredura (MEV)

Este ensaio consiste em uma análise qualitativa da microestrutura dos ARC e ARCC. A etapa de preparação das amostras ocorreu de acordo com as recomendações de Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016).

Inicialmente, foi utilizada uma lixa diamantada em cada amostra, com o intuito de tornar a superfície parcialmente plana. A etapa seguinte consistiu em remover a água livre dos poros por meio da parada de hidratação. Para isso, as amostras foram pesadas e imersas em álcool isopropílico (isopropanol) em recipientes individuais, ou seja, um recipiente para cada tipo de ARC. O período de imersão no solvente adotado foi de 24 horas.

Após as 24 horas, as amostras foram retiradas dos recipientes, secas superficialmente com pano limpo e pesadas novamente, de forma a verificar a redução na massa do material devido à remoção da água na sua microestrutura. Em seguida, as amostras foram armazenadas em embalagens plásticas individuais com sílica gel. Cada embalagem foi colocada em um recipiente hermeticamente fechado, também com sílica gel, para evitar o contato das amostras com a umidade do ar. A Figura 34 representa as etapas descritas.

Figura 34 - Preparação das amostras para o MEV, onde (a) parada de hidratação em álcool isopropanol, (b) armazenamento em embalagens com sílica gel

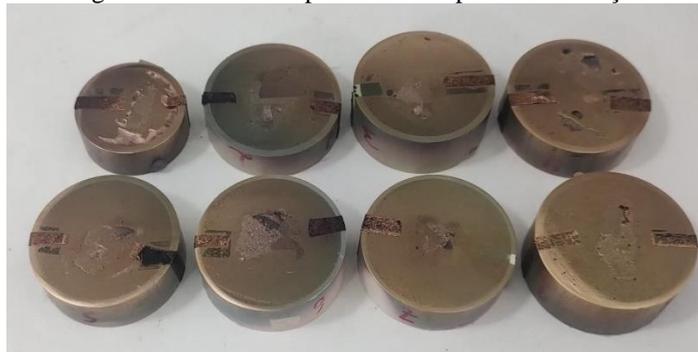


Fonte: Elaborado pelo autor.

As etapas seguintes foram realizadas para tornar a superfície das amostras perfeitamente planas, como forma de identificar a zona de transição interfacial com precisão no microscópio de varredura. Para isso, foi utilizado o procedimento adotado em estudo anterior (WILBERT; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2017).

As amostras foram embutidas com resina epóxi em pequenos tubos de PVC com 32 mm de diâmetro, e a secagem ocorreu em temperatura ambiente durante 24 horas. Após, foi realizado o lixamento por 3 minutos em cada uma das lixas d'água de carbeto de silício utilizadas, com malhas de 80, 220, 320, 400, 600 e 1200, nesta ordem. Finalizada a etapa de lixamento, as amostras foram polidas durante 15 minutos com pasta de alumina 1 e 0,3  $\mu\text{m}$ . A última etapa de preparação das amostras consistiu no revestimento com material condutor e deposição em ouro, em um processo conhecido como metalização. A Figura 35 apresenta as amostras prontas para o MEV.

Figura 35 - Amostras para o MEV após a metalização



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este ensaio foi realizado em um microscópio de varredura convencional de filamento de tungstênio, modelo MEV Zeiss EVO 10. Como forma de analisar a zona de transição interfacial e a porosidade próxima a esta região dos ARC através da diferença de fases, foram produzidas imagens de elétrons retroespalhados (BSE), assim como realizado em estudos anteriores (LU et al., 2019; ZHAN et al., 2020).

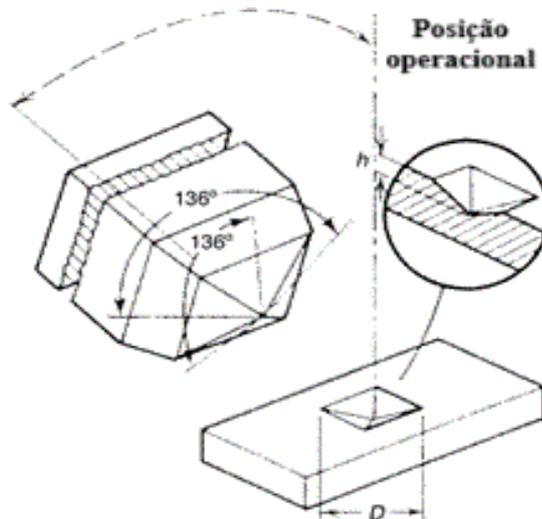
O microscópio possui o espectrômetro de energia dispersiva (EDS), sendo utilizado para avaliação do teor de elementos químicos de determinada região das amostras de ARC. Esta análise teve o objetivo de verificar se os mecanismos de mineralização do  $\text{CO}_2$  durante o tratamento alcançaram a zona de transição interfacial do ARC, com base na quantidade de carbono nesta região. Para isso, a análise de EDS foi realizada por mapa em dois locais diferentes.

Tanto as imagens de BSE quanto a análise de EDS foram realizadas em condições de vácuo, com tensão de 20 kV e distância de trabalho de 10 mm. As imagens BSE foram obtidas com aproximação de 150x e 2000x. Para a análise de EDS, os mapas foram gerados com aproximação de 1000x.

#### 3.4.4.3 Microdureza Vickers (MHV)

O teste de microdureza Vickers, também conhecido como microindentação, consiste na aplicação de determinada carga no material em análise com um penetrador em formato de diamante, em período previamente definido. A norma técnica que rege este ensaio é a ASTM E384-22 (ASTM, 2022) e, como não se refere a algum material específico, pode ser aplicada para materiais cimentícios (GLINICKI; ZIELINSKI, 2004). Conforme ilustrado na Figura 36, o ponto de aplicação da carga apresenta o formato do penetrador (piramidal de base quadrada), sendo possível medir as diagonais de indentação para determinar a área.

Figura 36 - Forma de indentação Vickers, onde D = diagonal e h = profundidade



Fonte: Traduzido de GLINICKI e ZIELINSKI, 2004.

Segundo a ASTM E384-22 (ASTM, 2022), o valor da microdureza Vickers é obtido conforme a Equação 14.

$$HV = \frac{2000 \times 10^3 \times P \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$HV$  = dureza Vickers (MPa);

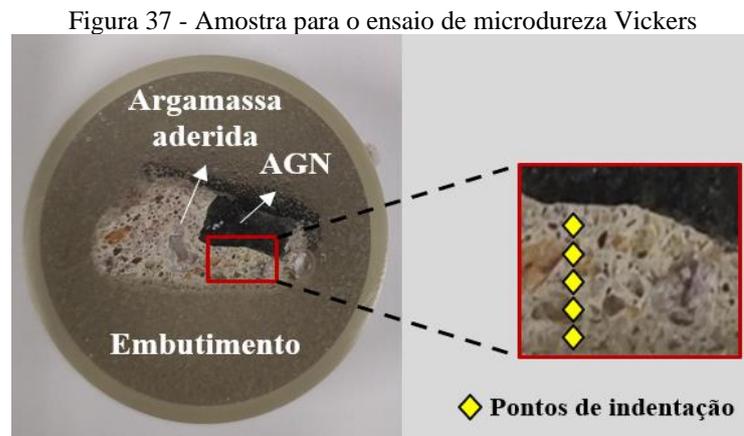
$P$  = carga (g);

$\alpha$  = ângulo de indentação ( $136^\circ$ );

$d$  = diagonal média de indentação ( $\mu\text{m}$ ).

Para permitir um maior número de medidas de microdureza por amostra, optou-se por realizar este ensaio em apenas dois tipos de ARC. Neste caso, por ser o tipo de ARC que contém uma zona de transição interfacial mais fraca, com o traço inicial mais pobre, o agregado IV\_65 (NC e CA) foi escolhido.

Antes da realização do ensaio, foi necessário preparar as duas amostras de maneira adequada, de modo a se obter resultados confiáveis. A preparação das amostras seguiu o mesmo procedimento utilizado na análise de MEV (excluindo a etapa de metalização), descrito no item 3.6.2.3. A Figura 37 apresenta o resultado desta etapa e o local dos pontos de indentação.

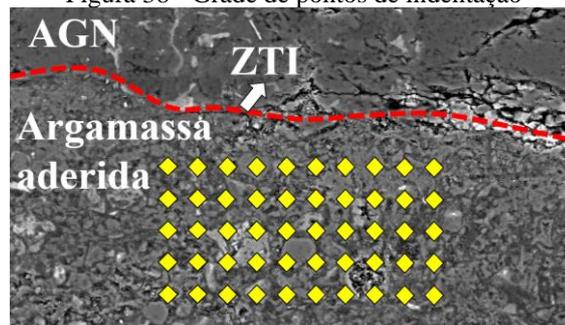


Fonte: Elaborado pelo autor.

Este ensaio foi realizado em um testador de microdureza digital Vickers da série HMV-G da marca *Shimadzu*, utilizando uma lente objetiva com aproximação de 10x e uma lente de medição de 50x. Embora outros estudos em materiais cimentícios tenham utilizado uma carga de 10 gramas para a medição dos pontos (ZHAN; XUAN; POON, 2018; LI et al., 2019; WANG et al., 2020; DING et al., 2023), observou-se no presente trabalho que, para uma medição mais precisa das diagonais de impressão, foi necessário aplicar uma carga de 100 gramas. O tempo de duração da aplicação da força foi de 15 segundos, seguindo o recomendado nestes mesmos estudos e na ASTM E384-22 (ASTM, 2022).

Assim como na pesquisa de Zhan et al. (2020), para garantir a separação suficiente entre os pontos de medição da microdureza e uma quantidade de dados que seja representativa, foram realizadas, em cada amostra, 50 medições na argamassa aderida do ARC em uma região próxima à zona de transição interfacial, conforme indicado na Figura 37. A Figura 38 ilustra a grade de pontos de indentação (5 x 10), com intervalo de 20  $\mu\text{m}$  entre os pontos. Vale ressaltar que os pontos na Figura 38 não representam o local exato da indentação neste ensaio.

Figura 38 - Grade de pontos de indentação



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 ETAPA III – APLICAÇÃO DOS ARC E ARCC EM CONCRETOS

Esta etapa consistiu na produção dos concretos com cada um dos diferentes agregados graúdos de concreto reciclado desta pesquisa, sendo denominados de “Concretos de ARC”. O objetivo desta etapa foi analisar a influência do tratamento por mineralização dos ARC na trabalhabilidade e massa específica (estado fresco) e nas propriedades mecânicas do concreto (estado endurecido), com substituição total ao agregado graúdo natural. Além disso, também foi analisada a influência da qualidade do concreto que deu origem aos ARC nas propriedades do estado fresco e endurecido.

#### 3.5.1 Definição dos traços

Com o objetivo de produzir uma matriz cimentícia mais resistente do que a argamassa aderida dos ARC e, assim, possibilitar a avaliação da resistência mecânica dos agregados, o tipo de cimento utilizado foi o CP V ARI e a relação água/cimento adotada foi 0,45. O estudo de dosagem deste cimento realizado na etapa I, descrito no item 3.3.1, serviu como parâmetro para a definição dos traços. Neste caso, o teor de argamassa foi majorado de 52% para 54% pois, devido a forma mais lamelar e irregular dos ARC, os concretos produzidos com agregados reciclados demandam um maior teor de argamassa para preencher os vazios dos agregados graúdos (DOS SANTOS, 2020). A Tabela 19 apresenta a identificação das diferentes misturas produzidas e o traço unitário utilizado.

Tabela 19 - Traço unitário dos concretos (CARC)

Identificação	Traço unitário					
	m	Cimento	Areia	Agregado gráúdo natural	Agregado gráúdo reciclado	a/c
<b>REFERÊNCIA</b>	4,0	1	1,7	2,3	-	0,45
<b>CARC - IV_55 - NC</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - IV_55 - CA</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - IV_65 - NC</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - IV_65 - CA</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - V_55 - NC</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - V_55 - CA</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - V_65 - NC</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45
<b>CARC - V_65 - CA</b>	4,0	1	1,7	-	2,3	0,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de possuir o mesmo traço unitário do concreto referência, a quantidade de ARC foi diferente do agregado gráúdo natural, para que o volume de material fosse constante em cada betonada. Como a massa específica do agregado reciclado é inferior à do natural, é necessária uma quantidade menor na mistura. A Equação 15 mostra o cálculo realizado na substituição dos agregados gráúdos.

$$M_{AGR} = M_{AGN} \times \frac{\gamma_{AGR}}{\gamma_{AGN}} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

$M_{AGR}$  = massa do agregado gráúdo reciclado (kg);

$M_{AGN}$  = massa do agregado gráúdo natural (kg);

$\gamma_{AGR}$  = massa específica do ARC (kg/dm<sup>3</sup>);

$\gamma_{AGN}$  = massa específica do agregado gráúdo natural (kg/dm<sup>3</sup>).

### 3.5.2 Saturação dos ARC

Antes da produção dos concretos, os ARC passaram pela etapa de pré-molhagem, com o objetivo de compensar a diferença de absorção dos agregados naturais e dos reciclados. Para alcançar o teor de 80% de pré-saturação, recomendado pela NBR 15116 (ABNT, 2021), foi necessário determinar a massa do material seco em estufa por 24 horas. Após, o material permaneceu submerso por mais 24 horas e, em seguida, foi submetido ao processo de retirada do excesso de água por escoamento em peneiras com abertura inferior a 4,75 mm, para que a massa saturada com superfície seca fosse determinada. Os agregados graúdos reciclados permaneceram nas peneiras para realizar a secagem ao ar, e sua massa foi monitorada até atingir um teor de saturação próximo a 80%. Por fim, o material foi pesado para obter a quantidade a ser colocada na betoneira para a mistura.

Como este procedimento foi realizado em dias diferentes para cada tipo de ARC, e a temperatura e umidade relativa do ar influenciam no processo de secagem dos materiais, o tempo necessário para obter o teor de saturação desejado variou de 30 minutos a 2 horas. A Tabela 20 apresenta os graus de saturação obtidos.

Tabela 20 - Graus de saturação dos ARC

ARC	Grau de saturação (%)
IV_55 - NC	73,92
IV_55 - CA	78,55
IV_65 - NC	71,08
IV_65 - CA	77,86
V_55 - NC	71,78
V_55 - CA	77,83
V_65 - NC	73,59
V_65 - CA	79,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5.3 Produção dos corpos de prova

A produção dos concretos foi realizada em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimida com uma camada fina de cimento, agregado miúdo natural e água (procedimento descrito no item 3.3.1). Para esta moldagem, a ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte: cimento, areia e uma quantidade inicial de água, com o intuito de produzir uma camada para proteger os agregados reciclados, evitando uma possível quebra dos grãos e

alteração da granulometria durante a mistura. Este procedimento foi realizado em pesquisas anteriores no LAMTAC/NORIE (CORDEIRO, 2013; MALYSZ, 2018).

Por último, os agregados reciclados foram colocados em sua totalidade e a quantidade final de água foi adicionada para obter a relação água/cimento desejada. Assim como na moldagem para a obtenção da matéria-prima deste trabalho, o tempo de mistura dos materiais foi fixado em quatro minutos até a realização do ensaio de abatimento e, após, mais 30 segundos antes de iniciar a moldagem dos corpos de prova.

Para os nove traços definidos, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm para a realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. O processo de moldagem seguiu os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2016), incluindo o adensamento mecânico em mesa vibratória executado em duas camadas de igual espessura, com vibração de quatorze segundos em cada camada para manter a uniformidade da moldagem do concreto.

A cura dos corpos de prova foi realizada conforme preconizado pela NBR 5738 (ABNT, 2016), como descrito no item 3.3.1. Nas primeiras 24 horas, os corpos de prova permaneceram em temperatura ambiente e cobertos com lona plástica. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade maior ou igual a 95%, onde permaneceram até as idades dos ensaios mecânicos.

#### **3.5.4 Propriedades no estado fresco**

No estado fresco dos concretos foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone (*slump test*) para avaliar a trabalhabilidade da mistura, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), e o ensaio de massa específica, conforme a NBR 9833 (ABNT, 2009).

#### **3.5.5 Propriedades no estado endurecido**

Para avaliar as propriedades mecânicas dos concretos foram realizados os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade em prensa hidráulica, modelo EMIC MCT30 PC 200i. A Tabela 21 apresenta as normas técnicas de cada ensaio, idades adotadas e número de corpos de prova por traço.

Tabela 21 - Ensaio de CARC no estado endurecido

<b>Ensaio</b>	<b>Norma técnica</b>	<b>Idades de ensaio</b>	<b>Nº de corpos de prova por traço</b>
Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)	28 dias	3
		63 dias	2
Módulo de elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2021)	63 dias	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados da pesquisa e suas análises. Entre os resultados obtidos, estão: determinação da captura de CO<sub>2</sub>, caracterização física e microestrutural dos ARC e ARCC, quantitativo de material dos traços de CARC, assim como os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

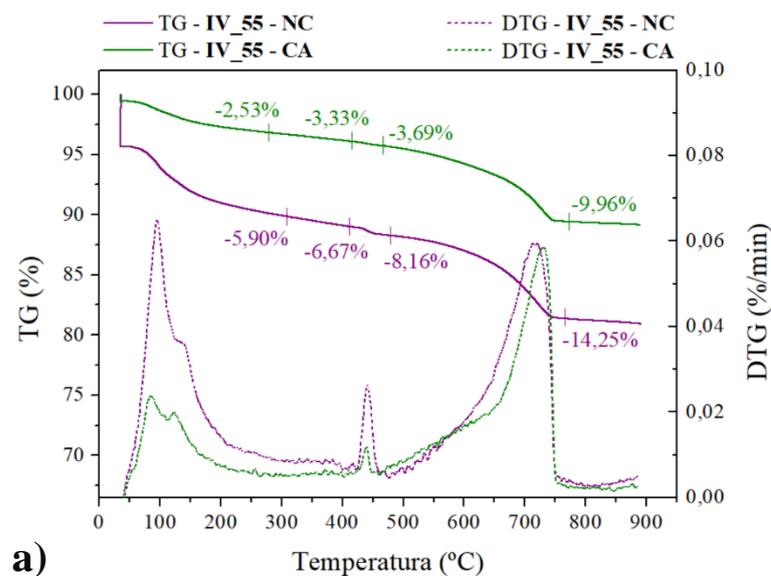
### 4.1 DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

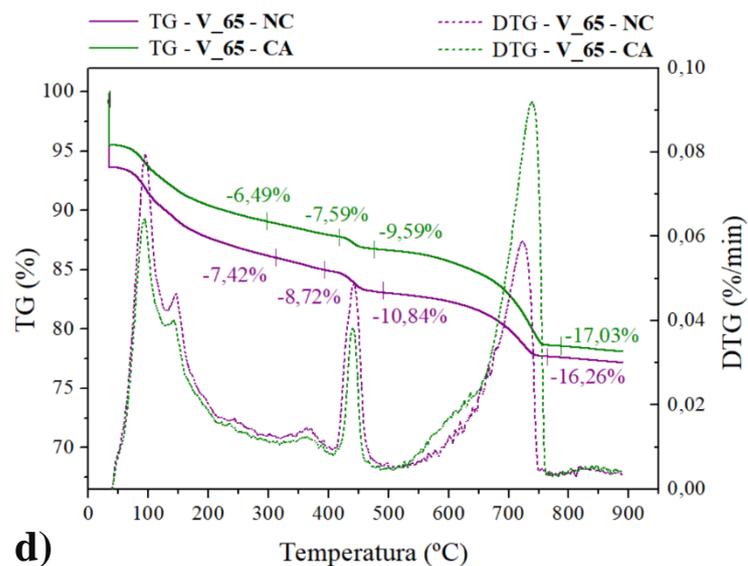
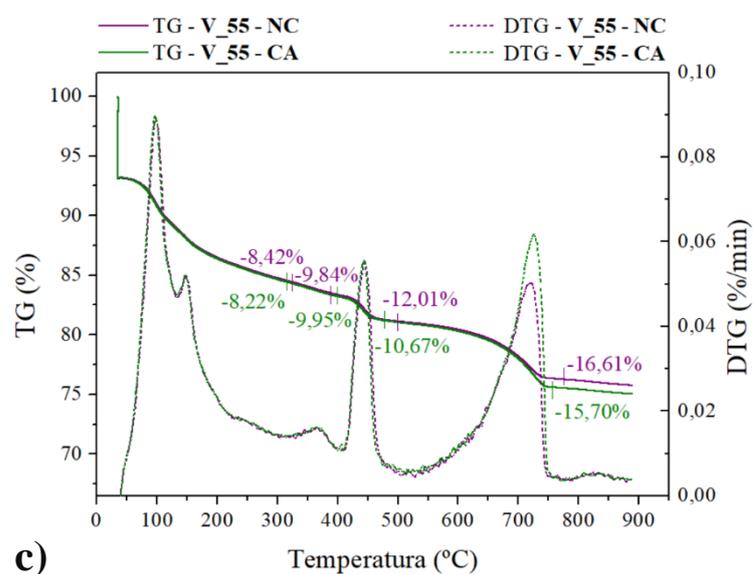
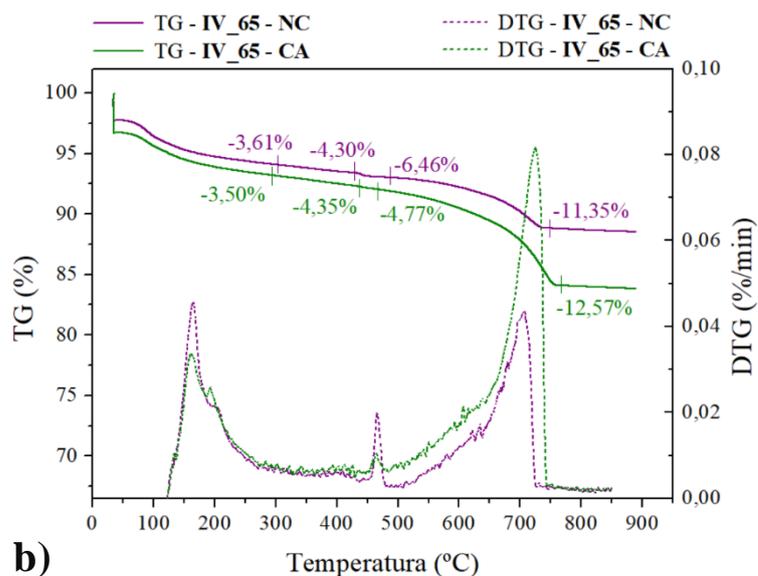
Este item apresenta os gráficos obtidos a partir do ensaio de termogravimetria, a profundidade de carbonatação dos ARC e o resultado do cálculo da captura de CO<sub>2</sub>. Importante ressaltar que os resultados apresentados representam a média entre as combinações dos traços NC e CA das duplicatas das amostras analisadas.

#### 4.1.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Os gráficos de análise termogravimétrica (TGA) e suas derivadas (DTG) foram divididos entre os pares dos traços de ARC não carbonatadas (NC) e carbonatadas (CA), para fins de comparação entre os picos de decomposição do C-S-H e etringita, hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). A Figura 39 apresenta os gráficos obtidos.

Figura 39 - TGs e DTGs dos ARC NC e CA, onde (a) IV\_55, (b) IV\_65, (c) V\_55, (d) V\_65





Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os gráficos da Figura 39, é possível observar que o aumento do pico de  $\text{CaCO}_3$  (entre 500 e 750 °C) nas amostras carbonatadas foi maior para os traços IV\_65 e V\_65. Isso indica que a relação água/cimento do traço teve maior influência na difusão de  $\text{CO}_2$  durante o tratamento em comparação com o tipo de cimento pois, além de influenciar na porosidade do material, o aumento da relação água/cimento favorece a formação de produtos hidratados para reagir com o  $\text{CO}_2$ , formando o  $\text{CaCO}_3$  (NEVES JUNIOR et al., 2012).

O pico de  $\text{Ca(OH)}_2$  (entre 400 e 500 °C) foi maior para os traços produzidos com o CP V ARI, devido à maior quantidade de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) em sua composição. Para os traços carbonatados, o pico de  $\text{Ca(OH)}_2$  sofreu uma pequena redução, indicando que o hidróxido de cálcio não foi totalmente consumido pela reação de carbonatação, ou seja, os ARC foram parcialmente carbonatados, conforme observado na Tabela 22, em que são apresentados os aspectos visuais da difusão de  $\text{CO}_2$  nos ARC, a partir da aspensão de fenolftaleína.

Tabela 22 – Difusão de  $\text{CO}_2$  no ARC

IV_55	IV_65
	
V_55	V_65
	

Fonte: Elaborado pelo autor

As imagens apresentadas comprovam que as amostras não foram totalmente carbonatadas durante o tratamento, estando de acordo com os resultados apresentados nos gráficos de TG e DTG. Observa-se que, conforme ilustrado Figura 5 (item 2.1.3), a profundidade de carbonatação foi maior para os ARC produzidos com o cimento pozolânico (CP IV).

A carbonatação parcial dos ARC também foi observada em estudos anteriores que utilizaram um protocolo de tratamento de curta duração, com tempo previamente definido, como forma de avaliar a profundidade de carbonatação dentro desse período (SERENG, 2020;

GHOLIZADEH-VAYGHAN et al., 2020). De acordo com a conclusão destes estudos e com o observado no presente trabalho, verifica-se que o protocolo de sazonalidade (pré-tratamento) e alguns parâmetros como temperatura, concentração e fluxo de  $\text{CO}_2$  devem ser aprimorados, de forma que o tratamento possa ser realizado de maneira completa em menor tempo.

#### 4.1.2 Captura de $\text{CO}_2$

A partir do ensaio de análise termogravimétrica, foi determinado o teor de C-S-H e etringita, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), através da diferença de perda de massa das amostras de ARC no início e final de pico destes compósitos. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 23 - Teores dos principais compósitos

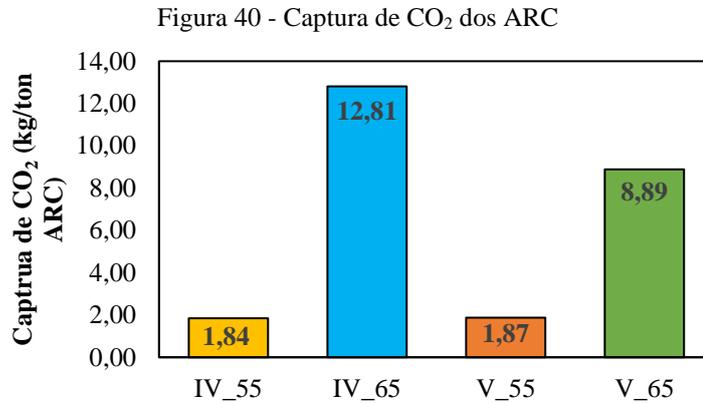
ARC	Teor de Etringita e C-S-H (%)		Teor de $\text{Ca(OH)}_2$ (%)		Teor de $\text{CaCO}_3$ (%)	
	NC	CA	NC	CA	NC	CA
IV_55	5,90	2,53	0,65	0,31	6,09	6,28
IV_65	3,61	3,50	0,33	0,28	4,89	7,81
V_55	8,42	8,22	2,20	1,99	4,60	5,02
V_65	7,42	6,49	1,86	1,14	5,42	7,44

Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução do teor de C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  indica o consumo destes produtos de hidratação pela reação de carbonatação, resultando no aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$ . A maior quantidade de reserva alcalina do CP V ARI em comparação com o CP IV explica o maior teor de C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  nos traços de ARC produzidos com este cimento. Embora o C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  sejam os principais compostos carbonatáveis, existem outros compostos secundários na matriz cimentícia e, portanto, não há correlação linear entre a taxa de captura de  $\text{CO}_2$  e a redução do teor de C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  (SERENG, 2020).

Em relação ao teor de  $\text{CaCO}_3$ , a Tabela 23 mostra que o aumento é mais acentuado para os traços IV\_65 e V\_65, conforme observado nos gráficos TG e DTG da Figura 39. Devido à maior porosidade destes ARC, a velocidade de difusão de  $\text{CO}_2$  foi maior durante as 24 horas de tratamento. Assim, a quantidade de captura de  $\text{CO}_2$  absorvida por cada tipo de ARC indica

que os traços com maior relação água/cimento apresentaram maior potencial de captura de CO<sub>2</sub> durante o tratamento, conforme apresentado na Figura 40.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença de captura de CO<sub>2</sub> entre os tipos de ARC indica que, de fato, a difusão de CO<sub>2</sub> durante o tratamento é influenciada pela porosidade do material (relação água/cimento) e pela reserva alcalina da matriz (tipo de cimento). Além disso, a maior captura de CO<sub>2</sub> do ARC IV\_65 em comparação com o ARC V\_65 se deve ao fato de que, para um curto período de exposição do material ao CO<sub>2</sub>, a porosidade apresenta maior influência na carbonatação em relação à reserva alcalina da matriz. Como o CP V ARI possui um maior teor de clínquer e, portanto, um ganho de resistência mecânica mais acentuado, e maior reserva alcalina, o ARC produzido com este cimento apresenta menor porosidade em relação ao ARC produzido com o CP IV e mesma relação água/cimento.

Analisando os resultados obtidos no presente trabalho, verifica-se que a captura de CO<sub>2</sub> dos ARC IV\_65 e V\_65 estão próximos dos valores encontrados na literatura e na aplicação industrial do tratamento, apesar das diferenças do protocolo de tratamento utilizado e das características do concreto antigo, conforme apresentado na Tabela 5 (XUAN; ZHAN; POON, 2016; FANG; XUAN; POON, 2017; SERENG, 2020; TIEFENTHALER et al., 2021). Como a carbonatação foi parcial para os quatro tipos de ARC, é possível estimar que o potencial de captura de CO<sub>2</sub> dos ARC produzidos com relação água/cimento igual a 0,65 seja maior em comparação com os resultados de outros estudos, sendo necessário o aprimoramento do protocolo de tratamento.

A análise estatística dos resultados obtidos de captura de CO<sub>2</sub> foi realizado por meio da análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 95%, para observar

o efeito isolado e combinado da relação água/cimento e do tipo de cimento na quantidade de captura de CO<sub>2</sub>. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - ANOVA para variável dependente captura de CO<sub>2</sub>

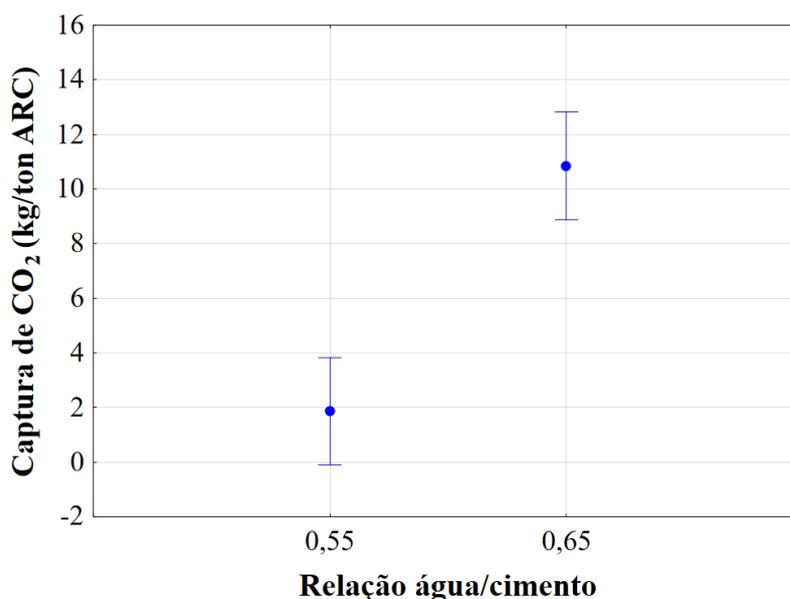
CAPTURA DE CO <sub>2</sub>						
Variáveis	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor - p	Significância
Relação a/c	323,2347	1	323,2347	49,41458	0,000014	Significativo
Tipo de cimento	15,1822	1	15,1822	2,32098	0,153550	Não significativo
Relação a/c * Tipo de cimento	15,6210	1	15,6210	2,38807	0,148218	Não significativo
Erro	78,4954	12	6,5413			

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a Tabela 24, apenas a relação água/cimento apresentou diferença significativa na captura de CO<sub>2</sub>, enquanto a variação do tipo de cimento não influenciou neste parâmetro, a partir do protocolo de tratamento utilizado. Além disso, a interação entre as duas variáveis também não apresentou diferença significativa, indicando que, independentemente do tipo de cimento do material, a captura de CO<sub>2</sub> será maior para os ARC com relação água/cimento de 0,65, prevalecendo o efeito da porosidade da matriz. A Figura 41 apresenta o efeito isolado da relação água/cimento do ARC na captura de CO<sub>2</sub>.

Figura 41 - Efeito isolado da relação água/cimento na captura de CO<sub>2</sub>



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ARC E ARCC

Este item apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e microestrutural dos ARC e ARCC. Para análise mais precisa dos resultados em que os ensaios foram realizados em duplicata, foi realizada a análise estatística como forma de identificar as variáveis que apresentaram diferença significativa.

### 4.2.1 Propriedades físicas

Primeiramente, são apresentados os resultados dos ensaios que foram realizados apenas nos ARC sem tratamento (Tabela 25).

Tabela 25 - Caracterização dos ARC

ARC	Teor de argamassa aderida (%)	Índice de forma	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
IV_55	43,17	1,97	1,31
IV_65	41,69	2,15	1,35
V_55	46,77	2,08	1,29
V_65	47,23	2,06	1,39

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que os quatro tipos de ARC apresentam valores próximos para o teor de argamassa aderida, índice de forma e massa unitária, apesar da diferença da resistência à compressão do concreto que deu origem aos resíduos. O mesmo procedimento e equipamento de britagem do material pode ter contribuído para que os resultados obtidos fossem próximos, resultando em agregados alongados e lamelares. Isso indica que estas propriedades, que influenciam na dosagem e qualidade do novo concreto produzido com este resíduo, podem ser consideradas como variáveis fixas do presente trabalho.

Os ensaios de massa específica e absorção de água foram realizados nos ARC e ARCC, como forma de analisar o efeito do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> nas características físicas do material. A Tabela 26 apresenta os resultados médios obtidos nos dois ensaios, assim como a variação de cada propriedade entre as amostras com e sem tratamento para os diferentes tipos de ARC.

Tabela 26 - Resultados de massa específica e absorção de água

ARC	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Variação (%)	Absorção de água (%)		Variação (%)
	ARC	ARCC		ARC	ARCC	
IV_55	2,52	2,53	↑ 0,33	6,32	6,24	↓ 1,27
IV_65	2,47	2,54	↑ 3,03	6,42	5,95	↓ 7,32
V_55	2,50	2,52	↑ 0,70	5,89	5,78	↓ 1,87
V_65	2,50	2,53	↑ 1,16	6,19	5,77	↓ 6,79

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 26 mostram que a carbonatação parcial provocou a densificação da matriz cimentícia e a redução da porosidade dos materiais, causando o aumento da massa específica e a redução da absorção de água para os quatro tipos de ARC. Isso indica que o tratamento com CO<sub>2</sub> foi eficaz no aprimoramento das propriedades físicas do material.

Analisando os valores de massa específica para cada tipo de ARC e ARCC e sua variação, é possível perceber que os valores estão de acordo com os encontrados na literatura, na ordem de 0,6-5,6%, independente do protocolo de tratamento utilizado (PU et al., 2021). Para a absorção de água, foi verificado que o aprimoramento desta propriedade depende do protocolo de tratamento dos ARC, pois a maior difusão de CO<sub>2</sub> permite que a redução da absorção de água seja maior.

Em estudos onde a duração do tratamento permitiu que a carbonatação do material fosse completa, a absorção de água alcançou uma redução na faixa de 15-30% (ZHAN et al., 2014; LUO et al., 2018; LU et al., 2019; WANG et al., 2020). No estudo de Sereng (2020), a diferença entre as características do concreto antigo, especialmente a relação água/cimento, influenciou na eficiência do tratamento em relação à absorção de água. Neste caso, o concreto com maior relação água/cimento obteve a maior redução desta propriedade após o tratamento.

Dessa forma, é possível concluir que a carbonatação parcial obtida no presente estudo resultou na redução da absorção de água dos ARC, mas em menor nível comparado com o potencial de redução apresentado em estudos anteriores. Por outro lado, os ARC com maior relação água/cimento apresentaram uma redução maior, estando diretamente proporcional com a taxa de armazenamento de CO<sub>2</sub> obtida para cada tipo de ARC.

A análise estatística realizada nesta etapa teve como intuito observar o efeito isolado e combinado das seguintes variáveis: relação água/cimento, tipo de cimento e o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>. Assim como na etapa anterior, a ANOVA considerou um nível de significância de 95%. A Tabela 27 apresenta o resultado desta análise para a massa específica e absorção de água.

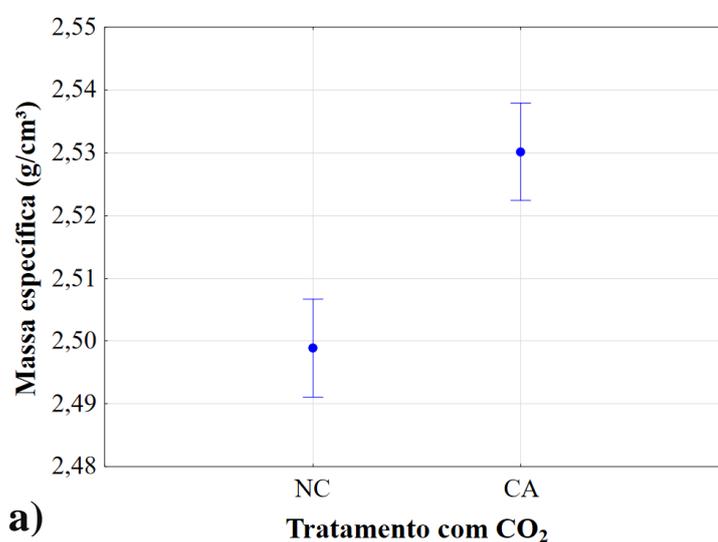
Tabela 27 - ANOVA para variáveis dependentes massa específica e absorção de água

<b>MASSA ESPECÍFICA</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SS</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor - p</b>	<b>Significância</b>
Relação a/c	0,0001	1	0,0001	2	0,254833	Não significativo
Tipo de cimento	0,0000	1	0,0000	0	0,746333	Não significativo
<b>Mineralização</b>	<b>0,0039</b>	<b>1</b>	<b>0,0039</b>	<b>43</b>	<b>0,000176</b>	<b>Significativo</b>
<b>Relação a/c * Tipo de cimento</b>	<b>0,0005</b>	<b>1</b>	<b>0,0005</b>	<b>6</b>	<b>0,040621</b>	<b>Significativo</b>
<b>Relação a/c * Mineralização</b>	<b>0,0019</b>	<b>1</b>	<b>0,0019</b>	<b>20</b>	<b>0,001960</b>	<b>Significativo</b>
Tipo de cimento * Mineralização	0,0005	1	0,0005	5	0,050927	Não significativo
<b>Relação a/c * Tipo de cimento * Mineralização</b>	<b>0,0006</b>	<b>1</b>	<b>0,0006</b>	<b>7</b>	<b>0,031452</b>	<b>Significativo</b>
Erro	0,0007	8	0,0001			
<b>ABSORÇÃO DE ÁGUA</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SS</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor - p</b>	<b>Significância</b>
Relação a/c	0,0049	1	0,0049	0,09	0,768365	Não significativo
<b>Tipo de cimento</b>	<b>0,4489</b>	<b>1</b>	<b>0,4489</b>	<b>8,51</b>	<b>0,019395</b>	<b>Significativo</b>
<b>Mineralização</b>	<b>0,2970</b>	<b>1</b>	<b>0,2970</b>	<b>5,63</b>	<b>0,045079</b>	<b>Significativo</b>
Relação a/c * Tipo de cimento	0,0552	1	0,0552	1,05	0,336267	Não significativo
Relação a/c * Mineralização	0,1369	1	0,1369	2,59	0,145933	Não significativo
Tipo de cimento * Mineralização	0,0004	1	0,0004	0,01	0,932764	Não significativo
Relação a/c * Tipo de cimento * Mineralização	0,0030	1	0,0030	0,06	0,816805	Não significativo
Erro	0,4222	8	0,0528			

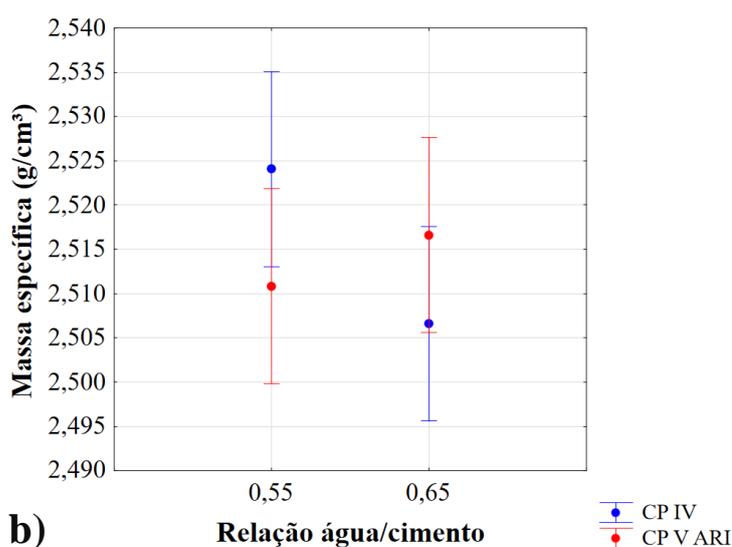
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a análise estatística da massa específica, é possível observar que o efeito isolado do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> possui diferença significativa, ao contrário das características do concreto antigo dos tipos de ARC. Considerando o efeito combinado das variáveis, apenas a interação do tipo de cimento com a mineralização não apresentou diferença significativa. Entre todos os efeitos, a mineralização foi o parâmetro que mais influenciou na massa específica, conforme o valor da coluna “Teste F”. A Figura 42 apresenta os gráficos com os efeitos isolados e combinados das variáveis que apresentaram diferença significativa.

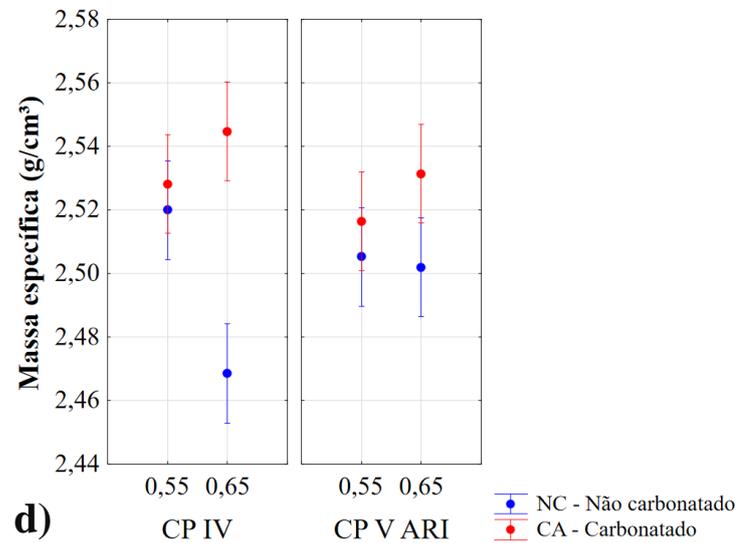
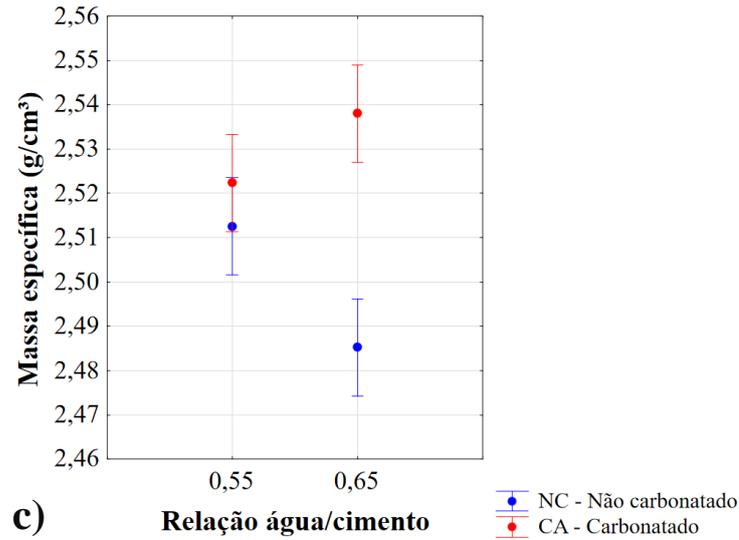
Figura 42 - Resultados ANOVA para a massa específica, onde (a) efeito isolado da mineralização, (b) efeito combinado da relação água/cimento e tipo de cimento, (c) efeito combinado da relação água/cimento e mineralização, (d) efeito combinado da relação água/cimento, tipo de cimento e mineralização



a)



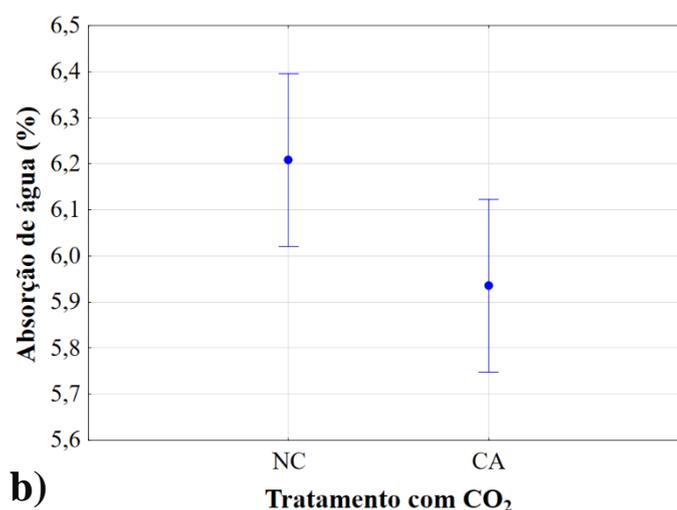
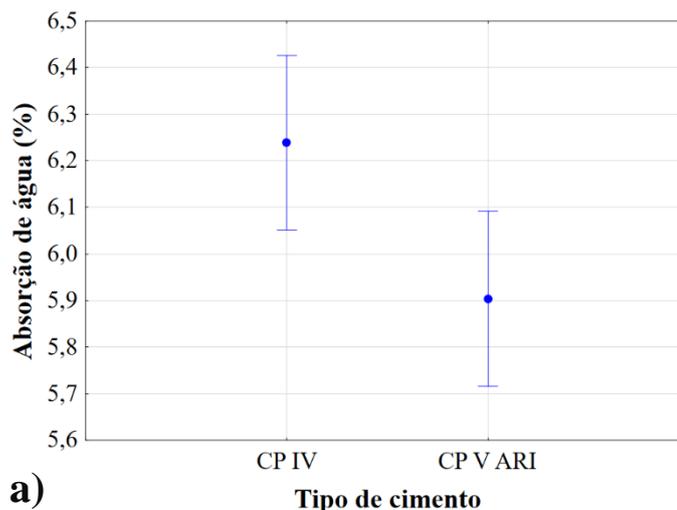
b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à absorção de água, apenas os efeitos isolados do tipo de cimento e da mineralização apresentaram diferença significativa, sendo que o tipo de cimento possui maior influência. Este resultado não era esperado, pois a relação água/cimento é um parâmetro que afeta a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água do material. A Figura 43 apresenta os gráficos com os efeitos isolados das variáveis que apresentaram diferença significativa nesta propriedade.

Figura 43 - Resultados ANOVA para a absorção de água, onde (a) efeito isolado do tipo de cimento, (b) efeito isolado da mineralização



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2.2 Propriedades microestruturais

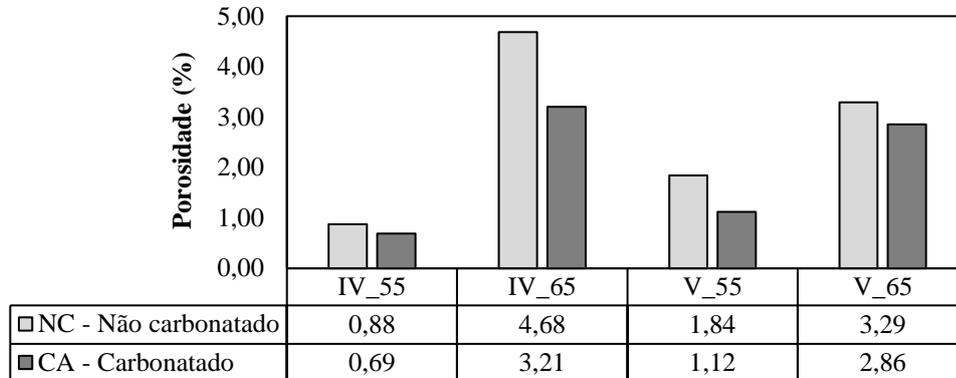
As propriedades microestruturais dos ARC e ARCC foram avaliadas quantitativamente em relação à porosidade e microdureza do material, através dos ensaios de microtomografia de raios-x e microdureza Vickers, respectivamente. A análise qualitativa da microestrutura ocorreu por meio de imagens obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Este item apresenta os resultados obtidos nestes ensaios.

### 4.2.2.1 Microtomografia de raios-x ( $\mu$ CT)

Após a etapa de escaneamento da amostra, foi realizado o cálculo da porosidade do material através do *software* CTAn, a partir da diferença entre as fases do material (pasta, agregados e poros) por escala de cinza. As imagens de reconstrução da amostra e da estrutura dos poros de

cada tipo de ARC e ARCC foram obtidas a partir do uso dos *softwares* *CTVox* e *CTVol*, respectivamente. A Figura 44 e a Tabela 28 apresentam os resultados obtidos.

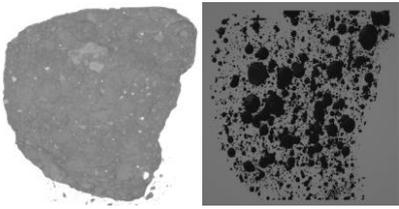
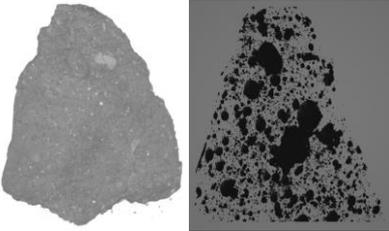
Figura 44 - Porosidade dos ARC e ARCC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 - Imagens dos ARC e ARCC obtidas no ensaio de  $\mu$ CT

ARC	Não carbonatado (NC)	Carbonatado (CA)
IV_55		
IV_65		
V_55		

ARC	Não carbonatado (NC)	Carbonatado (CA)
V_65		

Fonte: Elaborado pelo autor.

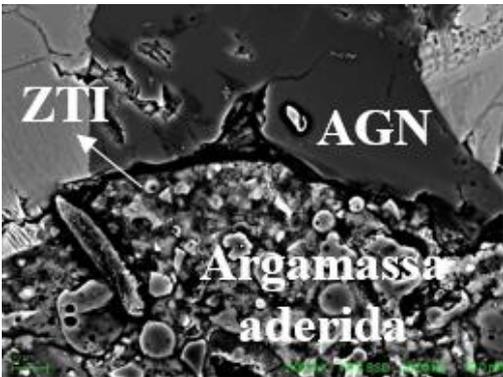
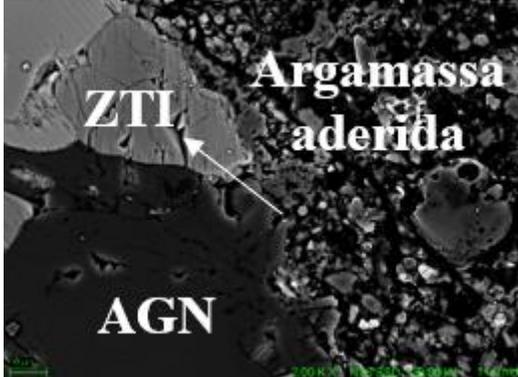
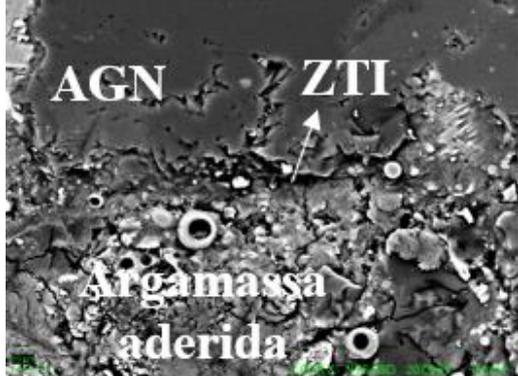
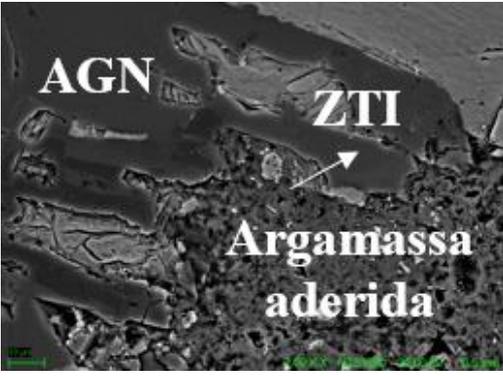
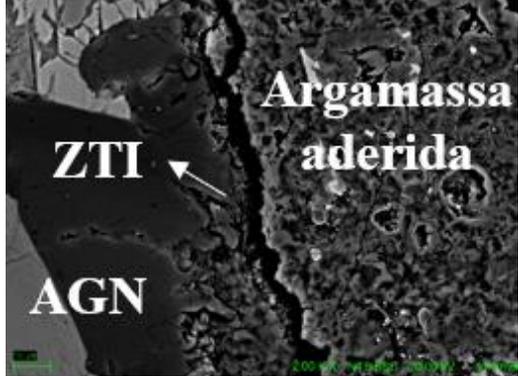
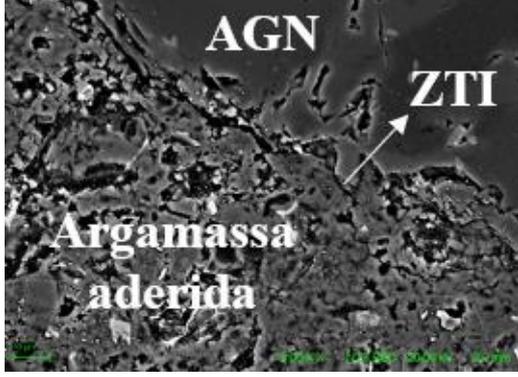
A partir das imagens obtidas no ensaio de microtomografia de raios-x, constatou-se que houve a redução da porosidade dos ARC após o tratamento, a partir do refinamento dos poros provocado pela mineralização do CO<sub>2</sub>. Esta conclusão está de acordo com os resultados obtidos no ensaio da absorção de água dos agregados. Em relação à ordem de grandeza da porosidade de cada traço, é possível relacionar estes valores com a absorção por capilaridade do concreto antigo, indicando a importância do controle das características do material que originou o resíduo pois, de fato, estas características influenciam diretamente nas propriedades do ARC.

Os tipos de ARC produzidos com menor relação água/cimento (0,55) apresentam menor porosidade, justificando a menor quantidade de captura de CO<sub>2</sub> desses materiais e a pequena alteração das propriedades físicas. O ARC IV\_65, que obteve a maior quantidade de captura de CO<sub>2</sub>, apresenta a alteração da porosidade mais evidente a partir da imagem da estrutura dos poros apresentada na Tabela 28. No caso do ARC V\_65, é possível observar que o material com tratamento apresenta poros maiores em relação ao material sem tratamento, porém menos dispersos ao longo da amostra.

#### 4.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado em duas etapas: obtenção de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) com aproximação de 2000x (com escala de 1: 10<sup>-4</sup> cm) e análise do teor de elementos químicos da amostra através da espectrometria de energia dispersiva (EDS). As imagens com aproximação de 150x estão no Apêndice C. Importante ressaltar que as imagens obtidas representam um ponto específico, e não a amostra inteira. A Tabela 29 apresenta as imagens de BSE obtidas para cada amostra de ARC, com foco na análise qualitativa da argamassa aderida e da zona de transição interfacial.

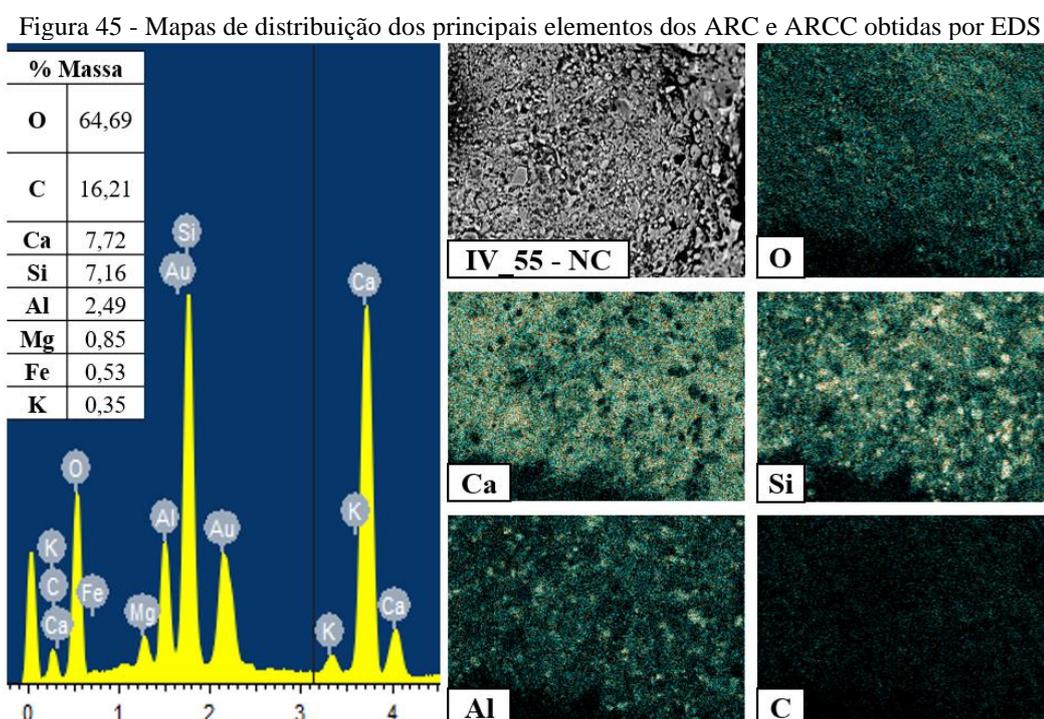
Tabela 29 - Imagens dos ARC e ARCC obtidas no ensaio de MEV

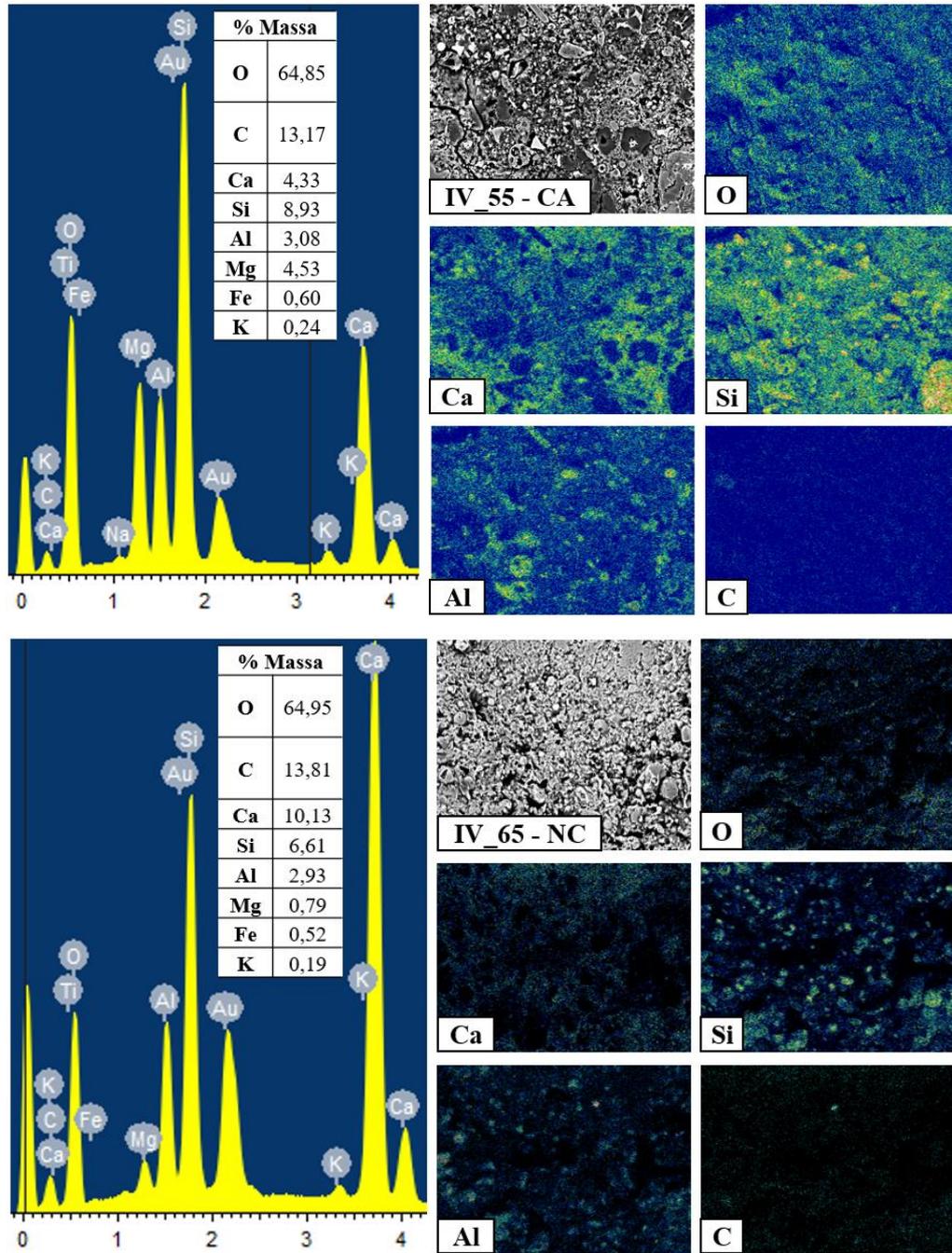
ARC	Não carbonatado (NC)	Carbonatado (CA)
IV_55		
IV_65		
V_55		
V_65		

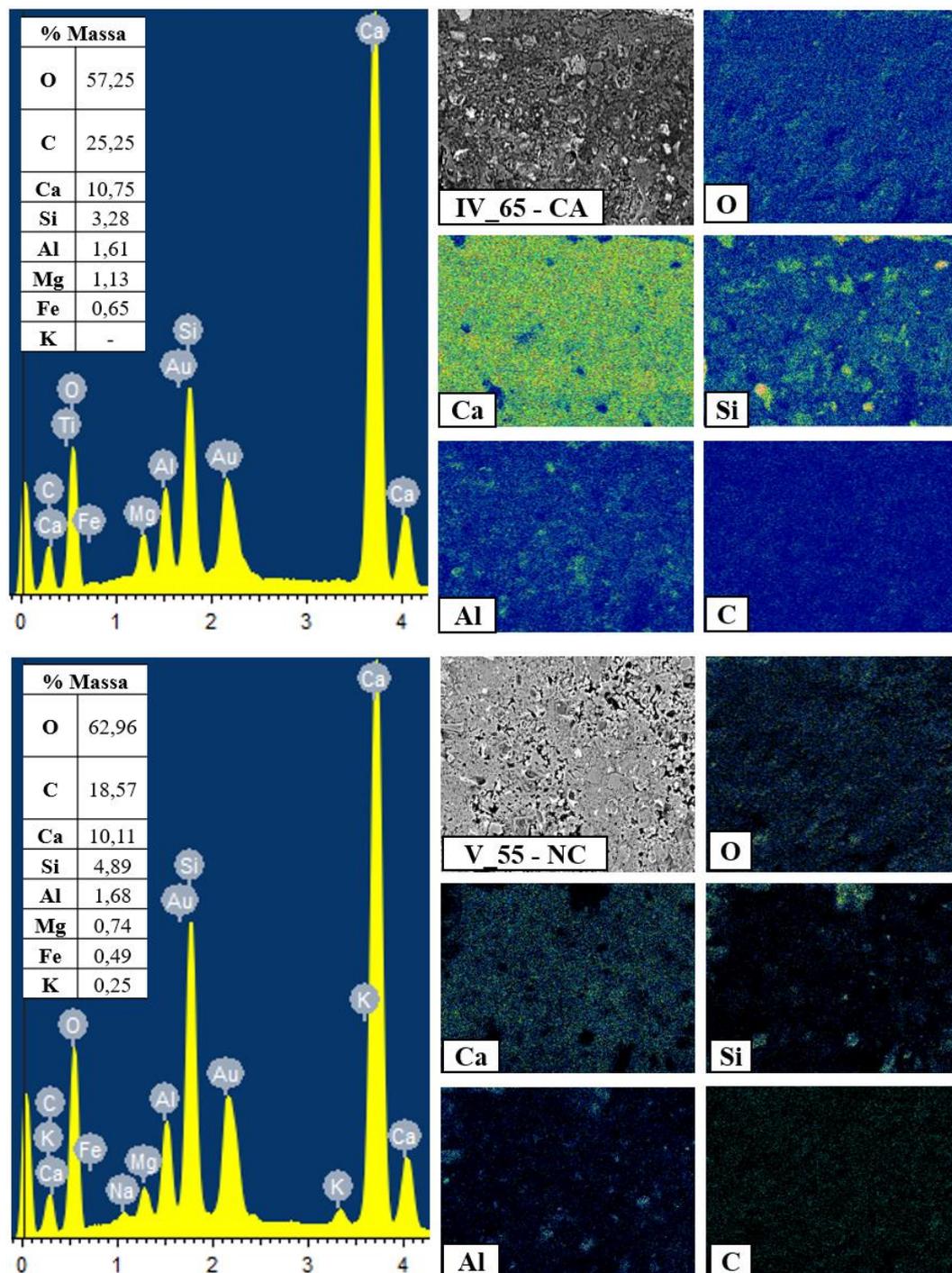
Fonte: Elaborado pelo autor.

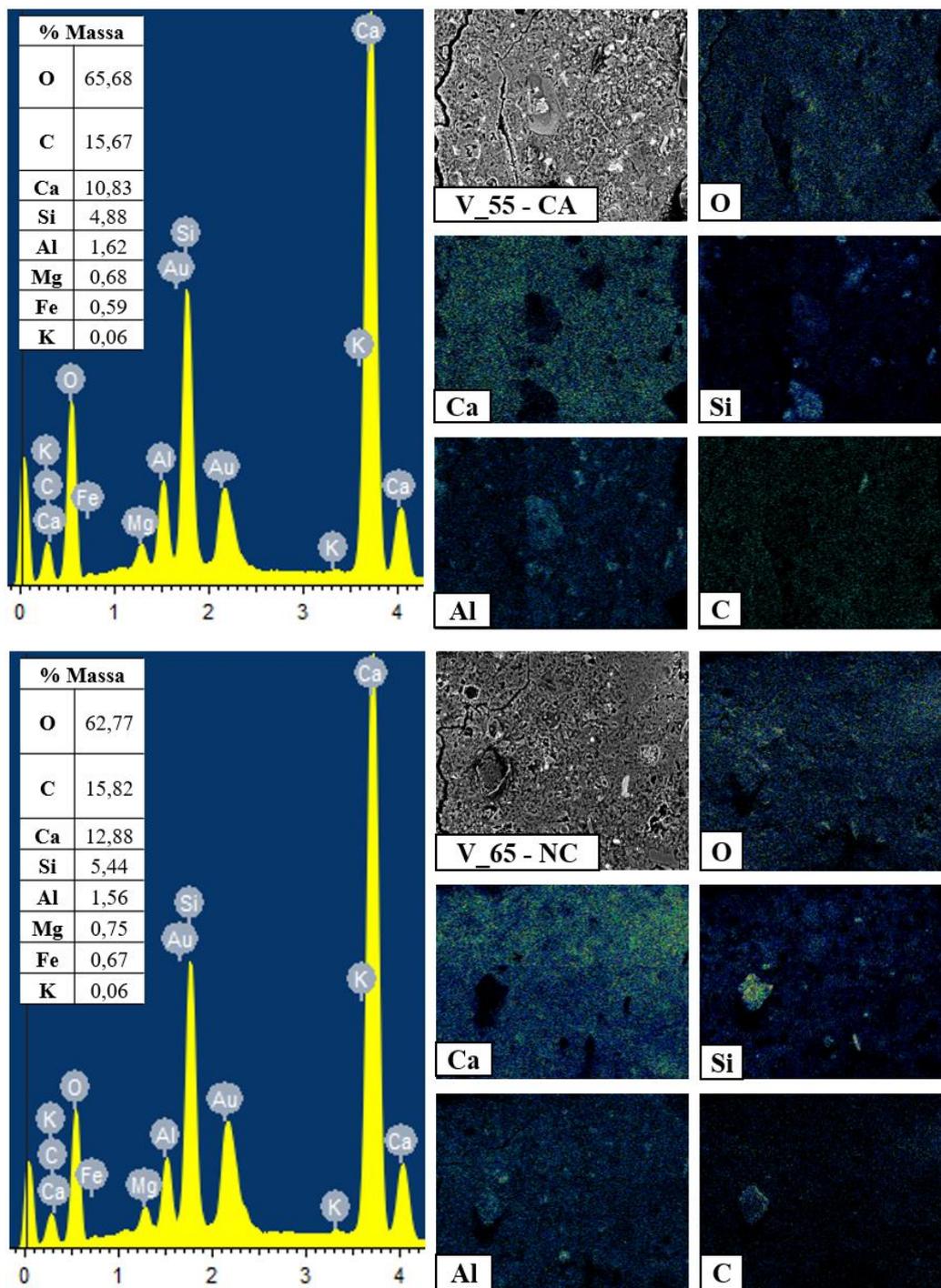
Segundo Liang et al. (2019), a formação do carbonato de cálcio pode preencher as microfissuras e reduzir a porosidade do ARC. Contudo, analisando as imagens da Tabela 29, com aproximação de 2000x, é possível verificar que o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> dos ARC não provocou uma densificação da zona de transição interfacial e uma redução evidente da porosidade do material. Para os traços de ARCC IV\_55 e V\_55, as imagens apresentaram microfissuras na argamassa aderida que não foram preenchidas, devido à carbonatação parcial que foi constatada pela análise termogravimétrica. No estudo de Gholizadeh-Vayaghan et al. (2020), o mesmo foi observado para amostras de ARC que foram submetidas ao tratamento durante 24 horas e não foram totalmente carbonatadas.

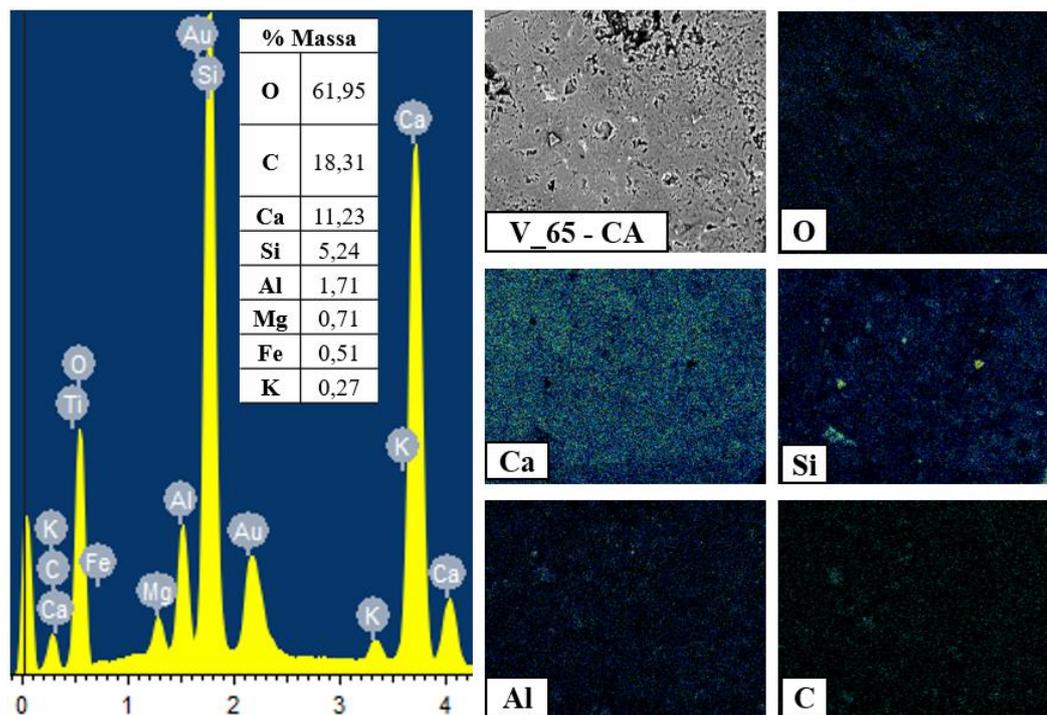
A espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi realizada de modo a verificar o teor de elementos químicos de determinada região das amostras, próxima à zona de transição interfacial. O objetivo principal desta análise foi a verificação do teor de carbono nas amostras carbonatadas, proveniente da formação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), em comparação com as amostras não carbonatadas. Os valores obtidos e os mapas de distribuição dos principais elementos de cada ARC estão apresentados na Figura 45.











Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o quantitativo dos principais elementos das oito amostras analisadas, verifica-se que apenas os ARCC IV\_65 e V\_65 obtiveram um aumento no teor de carbono em comparação com os seus respectivos pares, mesmo que não tenha sido significativo. Dessa maneira, a análise por espectrometria de energia dispersiva constatou que, de fato, a profundidade de carbonatação não alcançou a região da argamassa aderida próxima à zona de transição interfacial, indicando que o protocolo de tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> utilizado no presente trabalho deve ser aprimorado.

#### 4.2.2.3 Microdureza Vickers (MHV)

Conforme representado na Figura 38, o ensaio de microdureza Vickers consistiu na aplicação do indentador em 50 pontos de cada amostra, com afastamento de 20 μm entre os pontos, resultando em uma grade de indentação de 5 x 10. O intuito do ensaio foi a análise da microdureza da argamassa aderida dos ARC IV\_65 – NC e IV\_65 – CA em região próxima à zona de transição interfacial, como forma de avaliar o efeito do tratamento do material a partir da difusão do CO<sub>2</sub>. A Tabela 30 apresenta os resultados obtidos, incluindo os valores mínimos e máximos, média, desvio padrão e coeficiente de variação entre os 50 pontos de cada amostra.

Tabela 30 - Resultados de microdureza Vickers (MHV)

ARC	Mínimo (0,1HV)	Máximo (0,1HV)	Média (0,1HV)	Desvio padrão (0,1HV)	CV (%)
IV_65 – NC	46,12	240,93	106,05	46,75	44,08
IV_65 - CA	38,55	286,15	154,24	64,78	42,00

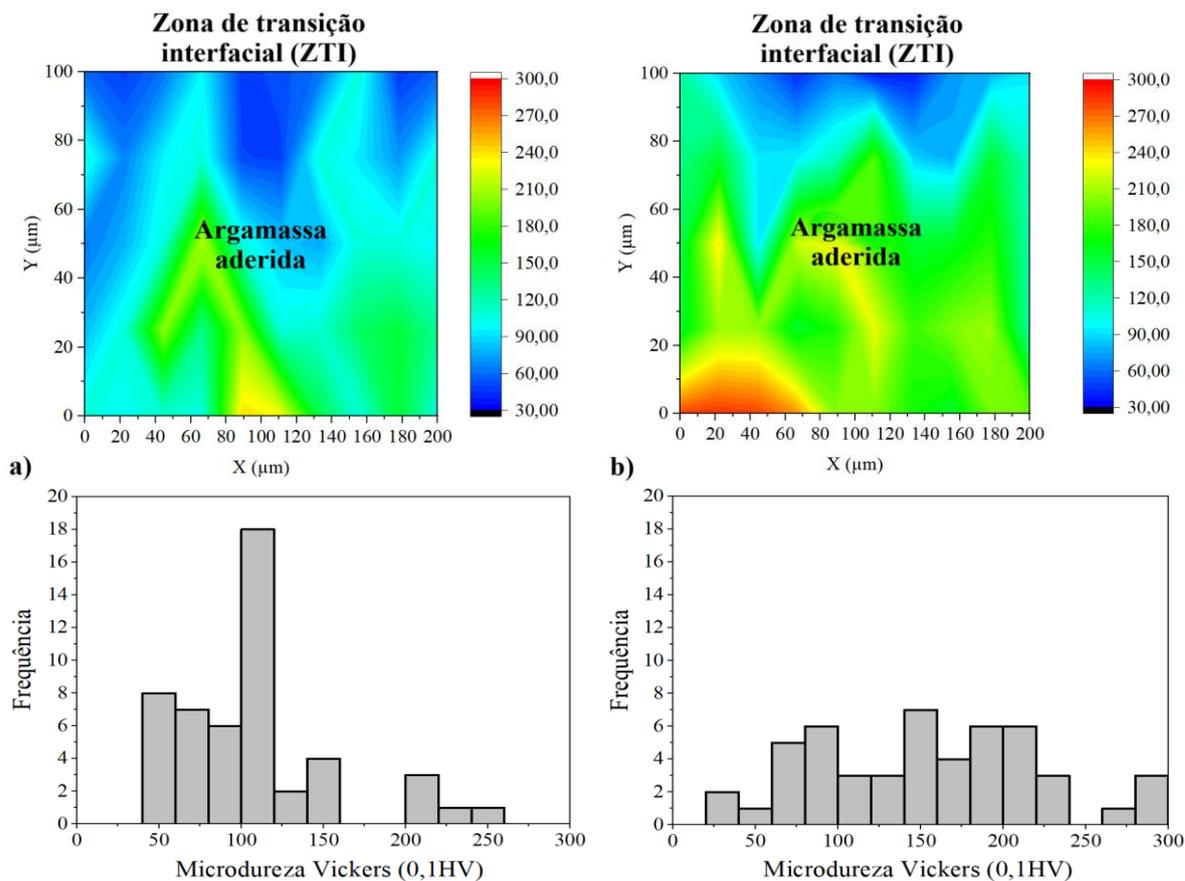
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação entre os resultados das duas amostras, verifica-se que a microdureza média do ARC IV\_65 – CA aumentou 45,44% em relação ao seu par não carbonatado, sendo este valor acima da faixa de variação percentual obtida em estudos anteriores (DING et al., 2023; LI et al., 2019; XUAN; ZHAN; POON, 2016; ZHAN et al., 2020). O protocolo de ensaio e preparação da amostra devem ser padronizados para este tipo de material e para estudos com o objetivo de avaliar o efeito do tratamento de ARC, como forma de viabilizar a comparação dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

O aumento da microdureza da argamassa aderida em uma região próxima à zona de transição interfacial deste tipo de ARC pode ser justificado pelo aumento do teor de carbono verificado na espectrometria de energia dispersiva (EDS), através da formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Isso indica que a mineralização do  $\text{CO}_2$  no ARC IV\_65 foi capaz de provocar uma alteração significativa na microestrutura do material, apesar da carbonatação não ter sido completa.

Para facilitar a visualização dos resultados das amostras de ARC, a Figura 46 apresenta o mapa de contorno da grade de pontos de indentação com os valores obtidos em cada um dos 50 pontos. Também é apresentado o histograma com a frequência dos resultados.

Figura 46 - Mapa de contorno e histograma do ensaio de microdureza Vickers (MHV), onde (a) IV\_65 – NC, e (b) IV\_65 - CA



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de contorno demonstra que a microdureza aumentou em grande parte desta região da argamassa aderida do ARC, com exceção da parte mais acima do mapa, local mais próximo da zona de transição interfacial, em que a cor azul (menores valores) é predominante para as duas amostras. O histograma mostra que os resultados entre 50 e 150 0,1HV foram mais frequentes para o traço IV\_65 – NC, enquanto os resultados do traço IV\_65 – CA foram mais bem distribuídos, sendo um pouco mais frequente entre 150 e 300 0,1HV.

### 4.3 CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETO RECICLADO (CARC)

Este item apresenta os resultados obtidos para os concretos com agregado graúdo reciclado de concreto (CARC). Após a determinação da massa específica na condição saturada de superfície seca do agregado graúdo natural e reciclados, foi possível calcular a quantidade de cada ARC a ser utilizada na produção dos concretos, de forma a manter o volume de concreto constante para todas as misturas, conforme a Equação 15.

Com a obtenção grau de saturação dos ARC (Tabela 20), também foi possível determinar a quantidade de água a ser adicionada na mistura dos concretos para que a relação água/cimento fosse a mesma em todos os traços, no valor de 0,45. A Tabela 31 apresenta o quantitativo dos materiais, além do abatimento do tronco de cone e massa específica obtidas, e do consumo de cimento.

Tabela 31 - Quantitativo de material e propriedades do estado fresco de CARC

Identificação	Quantidade de material (kg)						Slump (mm)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
	Cimento	Areia	AGN	ARC	Água ARC	Água MISTURA			
<b>REFERÊNCIA</b>	8,47	14,39	20,00	-	-	3,81	160	2468,15	452,87
<b>CARC - IV_55 - NC</b>	8,47	14,39	-	17,33	0,77	3,04	180	2321,66	425,99
<b>CARC - IV_55 - CA</b>	8,47	14,39	-	17,39	0,81	3,00	200	2340,76	429,50
<b>CARC - IV_65 - NC</b>	8,47	14,39	-	16,97	0,74	3,07	185	2305,73	423,07
<b>CARC - IV_65 - CA</b>	8,47	14,39	-	17,50	0,78	3,03	185	2343,95	430,08
<b>CARC- V_55 - NC</b>	8,47	14,39	-	17,19	0,70	3,11	185	2318,47	425,41
<b>CARC - V_55 - CA</b>	8,47	14,39	-	17,31	0,74	3,07	170	2328,03	427,16
<b>CARC - V_65 - NC</b>	8,47	14,39	-	17,21	0,75	3,06	200	2315,29	424,82
<b>CARC - V_65 - CA</b>	8,47	14,39	-	17,41	0,76	3,05	190	2331,21	427,74

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 31, verifica-se que o abatimento do tronco de cone se manteve na faixa de  $180 \pm 20$  mm para todas as misturas, e que a massa específica dos concretos produzidos com ARCC teve um pequeno aumento em comparação com os seus pares, devido ao aumento da massa específica dos agregados carbonatados. Além disso, o consumo de cimento entre todos os concretos com ARC e ARCC foram menores do que o concreto referência.

#### 4.3.1 Propriedades no estado endurecido

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 28 dias e 63 dias. Os valores médios para cada traço de concreto foram obtidos a partir da média do resultado de três corpos de prova para os 28 dias e cinco corpos de prova para os 63 dias (incluindo três corpos de prova utilizados para o ensaio do módulo de elasticidade). A resistência média à

compressão das duas idades, o desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e a variação entre os pares de ARC e ARCC estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Resultados de resistência à compressão aos 28 e 63 dias

Identificação	fc (MPa) 28 dias	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Variação (%)	fc (MPa) 63 dias	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Variação (%)
<b>REFERÊNCIA</b>	39,1	0,42	1,05	-	42,8	2,42	5,67	-
<b>CARC - IV_55 - NC</b>	30,9	2,76	8,94	↑ 12,42	40,8	2,78	6,82	↓ 8,12
<b>CARC - IV_55 - CA</b>	35,3	0,40	1,13		37,7	1,93	5,13	
<b>CARC - IV_65 - NC</b>	29,2	0,21	0,74	↑ 11,78	35,3	1,48	4,19	↑ 5,85
<b>CARC - IV_65 - CA</b>	33,1	0,89	2,67		37,5	2,54	6,76	
<b>CARC - V_55 - NC</b>	29,8	1,58	5,31	↑ 16,22	33,5	1,65	4,93	↑ 19,15
<b>CARC - V_55 - CA</b>	35,6	1,74	4,88		41,4	2,46	5,94	
<b>CARC - V_65 - NC</b>	34,3	0,15	0,44	↓ 0,78	36,1	0,95	2,63	↑ 2,83
<b>CARC - V_65 - CA</b>	34,1	0,32	0,95		37,1	1,74	4,68	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 32 indicam que, na maioria dos casos, o concreto produzido com ARCC obteve maior resistência à compressão do que os concretos com ARC. Por outro lado, não há correlação entre a quantidade de captura de CO<sub>2</sub> de cada ARC com a variação na resistência à compressão entre os pares de ARC e ARCC, principalmente pelo fato de o ARC V\_55 apresentar maior variação em relação ao ARC IV\_65, que apresentou maior quantidade de captura de CO<sub>2</sub>.

Também é possível analisar que o aumento da resistência à compressão dos 28 dias para os 63 dias é maior para todos os CARC, em comparação com o concreto referência. Isso pode ser explicado pela cura interna que ocorre na microestrutura do material devido à liberação da água de absorção dos agregados na matriz cimentícia.

Para contribuir na interpretação dos resultados, realizou-se a ANOVA com nível de significância de 95%. Neste caso, primeiro foi analisado o efeito isolado dos nove tipos de agregado graúdo nas duas idades e, após, verificou-se a significância do efeito isolado e combinado das variáveis envolvidas dos ARC e ARCC. A Tabela 33 apresenta os resultados.

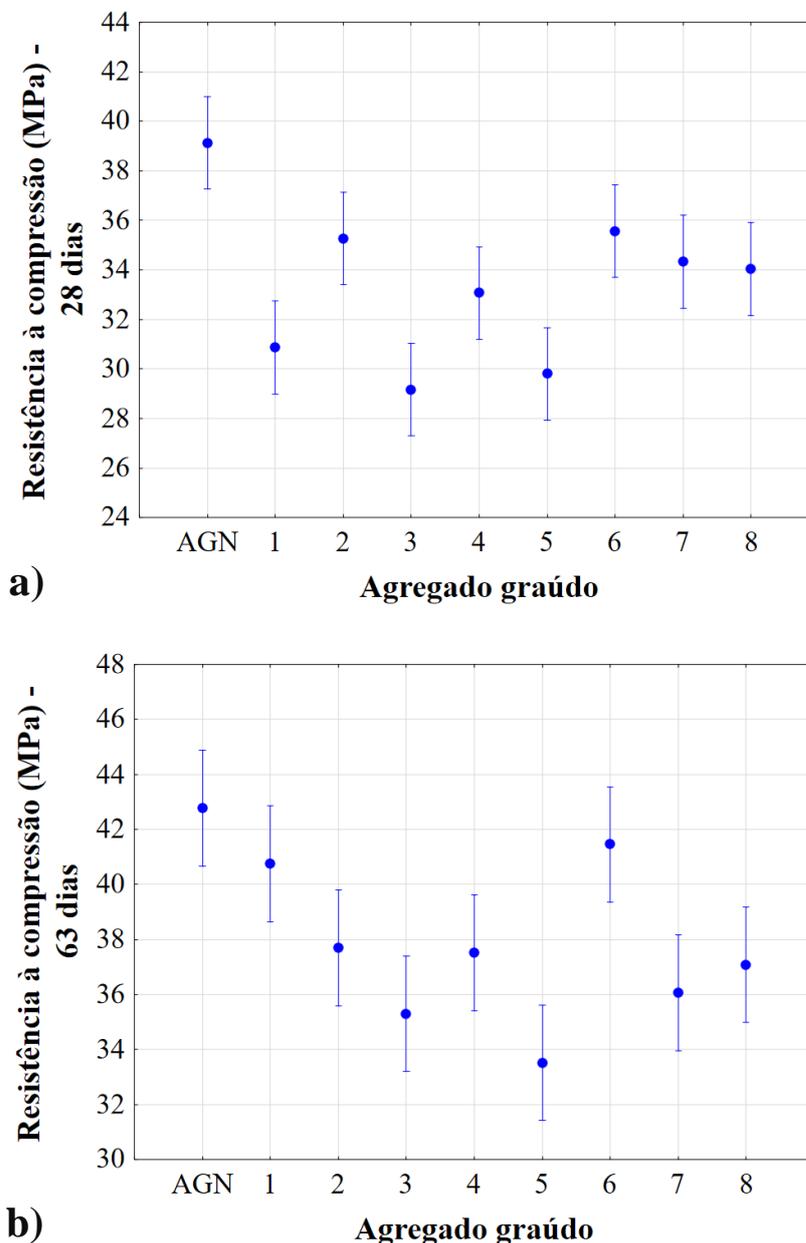
Tabela 33 - ANOVA para variável dependente resistência à compressão

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 28 DIAS</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor – p</b>	<b>Significância</b>
<b>Agregado graúdo</b>	<b>239,11</b>	<b>8</b>	<b>29,89</b>	<b>12,57</b>	<b>0,000006</b>	<b>S</b>
Erro	42,80	18	2,38			
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 63 DIAS</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor – p</b>	<b>Significância</b>
<b>Agregado graúdo</b>	<b>373,23</b>	<b>8</b>	<b>46,65</b>	<b>8,70</b>	<b>0,000002</b>	<b>S</b>
Erro	192,95	36	5,36			
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SS</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor - p</b>	<b>Significância</b>
Relação a/c	16,46	1	16,46	3,84	0,055928	NS
Tipo de cimento	1,14	1	1,14	0,27	0,608313	NS
<b>Mineralização</b>	<b>112,27</b>	<b>1</b>	<b>112,27</b>	<b>26,18</b>	<b>0,000005</b>	<b>S</b>
<b>Idade</b>	<b>326,08</b>	<b>1</b>	<b>326,08</b>	<b>76,04</b>	<b>0,000000</b>	<b>S</b>
<b>Relação a/c * Tipo de cimento</b>	<b>26,83</b>	<b>1</b>	<b>26,83</b>	<b>6,26</b>	<b>0,015833</b>	<b>S</b>
Relação a/c * Mineralização	15,79	1	15,79	3,68	0,061000	NS
Tipo de cimento * Mineralização	11,38	1	11,38	2,65	0,109933	NS
Relação a/c * Idade	10,15	1	10,15	2,37	0,130551	NS
Tipo de cimento * Idade	17,04	1	17,04	3,97	0,051923	NS
Mineralização * Idade	7,47	1	7,47	1,74	0,193073	NS
<b>Relação a/c * Tipo de cimento * Mineralização</b>	<b>73,98</b>	<b>1</b>	<b>73,98</b>	<b>17,25</b>	<b>0,000134</b>	<b>S</b>
Relação a/c * Tipo de cimento * Idade	2,25	1	2,25	0,53	0,472146	NS
Relação a/c * Mineralização * Idade	5,69	1	5,69	1,33	0,255129	NS
<b>Tipo de cimento * Mineralização * Idade</b>	<b>37,41</b>	<b>1</b>	<b>37,41</b>	<b>8,72</b>	<b>0,004855</b>	<b>S</b>
Relação a/c * Tipo de cimento * Mineralização * Idade	10,31	1	10,31	2,40	0,127535	NS
Erro	205,85	48	4,29			

Fonte: Elaborado pelo autor.

As duas primeiras análises estatísticas mostram que o efeito isolado do tipo de agregado graúdo possui efeito significativo na resistência à compressão para os 28 e 63 dias. A Figura 47 apresenta os gráficos destas análises.

Figura 47 - Efeito isolado do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão aos (a) 28 dias, (b) 63 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

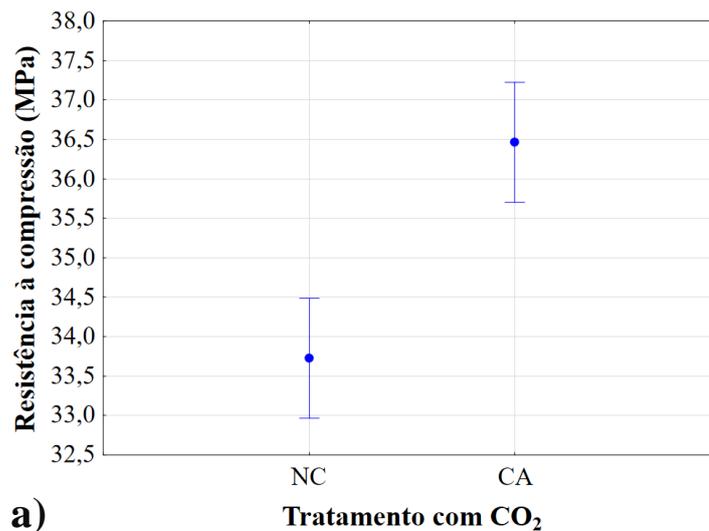
Na terceira análise estatística, é possível observar que apenas o efeito isolado do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> e a idade possuem significância na variável de resposta, ou seja, as características do concreto antigo de cada ARC não influenciaram na resistência à compressão do novo concreto. No caso do tratamento dos ARC, a resistência à compressão foi maior para

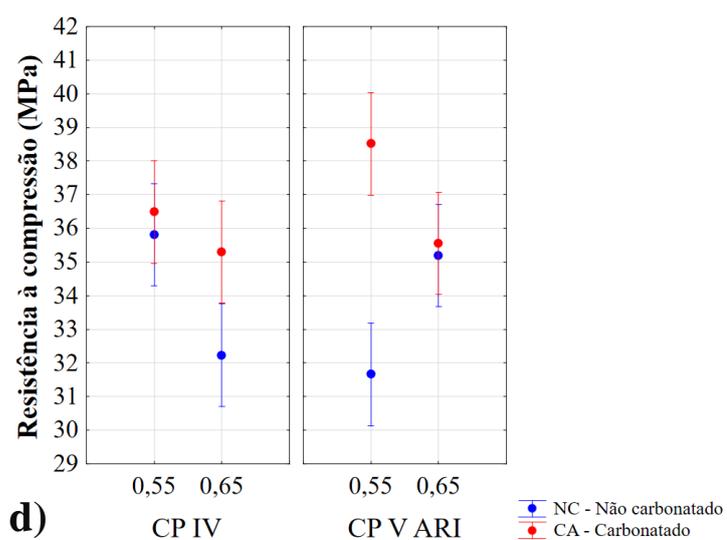
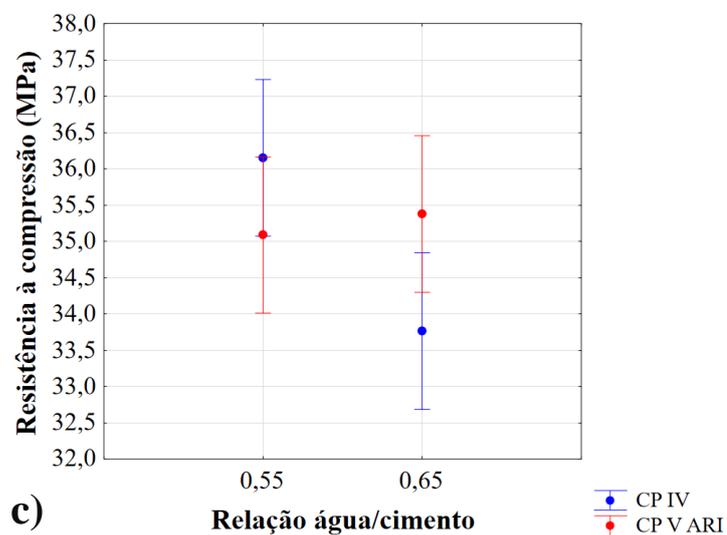
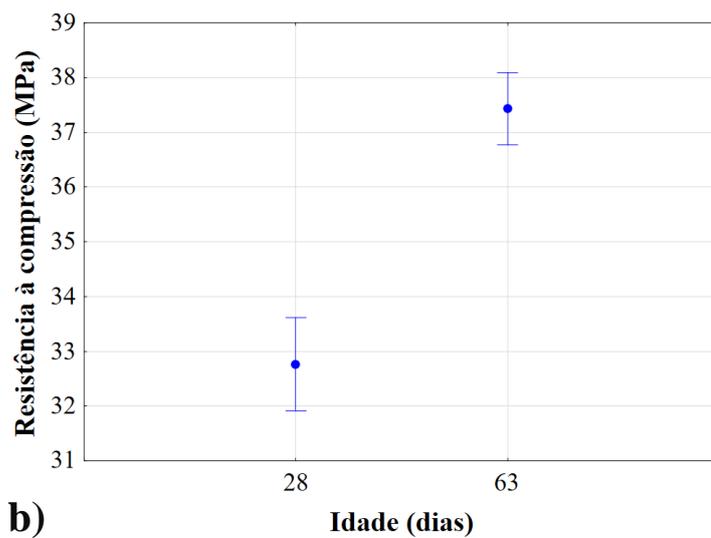
os concretos produzidos com ARCC, indicando que o tratamento pode ser uma alternativa eficaz e sustentável para aprimorar o desempenho de novos materiais produzidos com agregado reciclado.

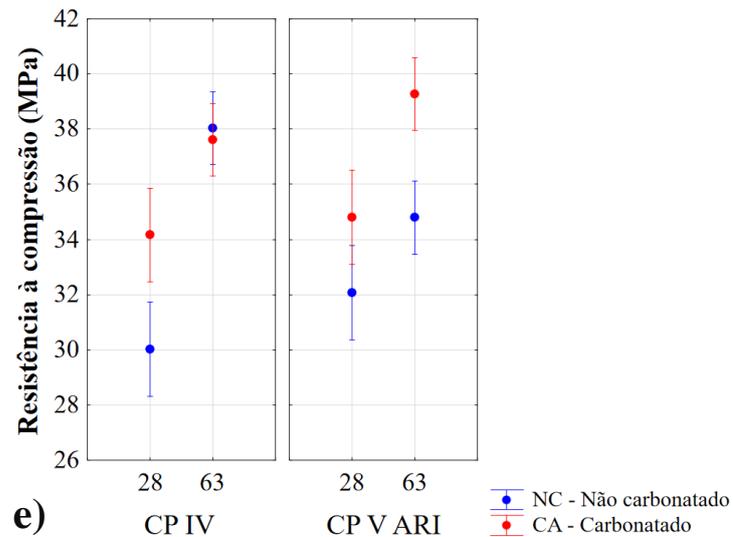
Entre os efeitos combinados, apenas três apresentaram diferença significativa. No caso da interação entre a relação água/cimento e o tipo de cimento do ARC, a resistência à compressão do novo concreto é maior quando produzido com o ARC IV\_55 em comparação com o ARC IV\_65, mas no caso dos ARC com o cimento CP V ARI, o traço com relação água/cimento de 0,65 apresentou maior resistência.

A interação entre a relação água/cimento, tipo de cimento e o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> indica que a média da resistência à compressão do concreto produzidos com cada um dos quatro tipos de ARCC é maior em comparação com os seus pares, incluindo as duas idades analisadas. No caso da interação entre o tipo de cimento, tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> e a idade, apenas a média da resistência à compressão do ARC não carbonatado com o cimento CP IV aos 63 dias foi menor em comparação com o ARCC. A Figura 48 apresenta os gráficos dos efeitos isolados e combinados das variáveis que apresentaram diferença significativa na resistência à compressão.

Figura 48 - Resultados ANOVA da resistência à compressão, onde (a) efeito isolado da mineralização, (b) efeito isolado da idade, (c) efeito combinado da relação água/cimento e tipo de cimento, (d) efeito combinado da relação água/cimento, tipo de cimento e mineralização, (e) efeito combinado do tipo de cimento, mineralização e idade







Fonte: Elaborado pelo autor

Para o ensaio do módulo de elasticidade, foram obtidas as médias de cada concreto produzido a partir de 3 corpos de prova por traço, aos 63 dias de idade. A Tabela 34 apresenta os resultados, incluindo o desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e a variação entre os pares de ARC e ARCC.

Tabela 34 - Resultados de módulo de elasticidade

Identificação	Ec (GPa) 63 dias	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Varição (%)
<b>REFERÊNCIA</b>	38,5	2,41	6,26	-
<b>CARC - IV_55 - NC</b>	30,4	0,92	3,03	↑ 0,87
<b>CARC - IV_55 - CA</b>	30,7	2,68	8,76	
<b>CARC - IV_65 - NC</b>	29,7	3,28	11,04	↑ 12,38
<b>CARC - IV_65 - CA</b>	33,9	1,67	4,92	
<b>CARC - V_55 - NC</b>	31,8	1,18	3,72	↑ 3,05
<b>CARC - V_55 - CA</b>	32,8	2,09	6,36	
<b>CARC - V_65 - NC</b>	31,2	2,11	6,76	↓ 3,20
<b>CARC - V_65 - CA</b>	30,2	1,84	6,09	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 34, verifica-se que o módulo de elasticidade do concreto referência foi maior do que todos os outros concretos produzidos com ARC e ARCC. Na comparação entre os pares de agregado reciclado com e sem tratamento, o ARC IV\_65, que obteve maior quantidade de captura de CO<sub>2</sub>, apresentou maior variação no módulo de elasticidade.

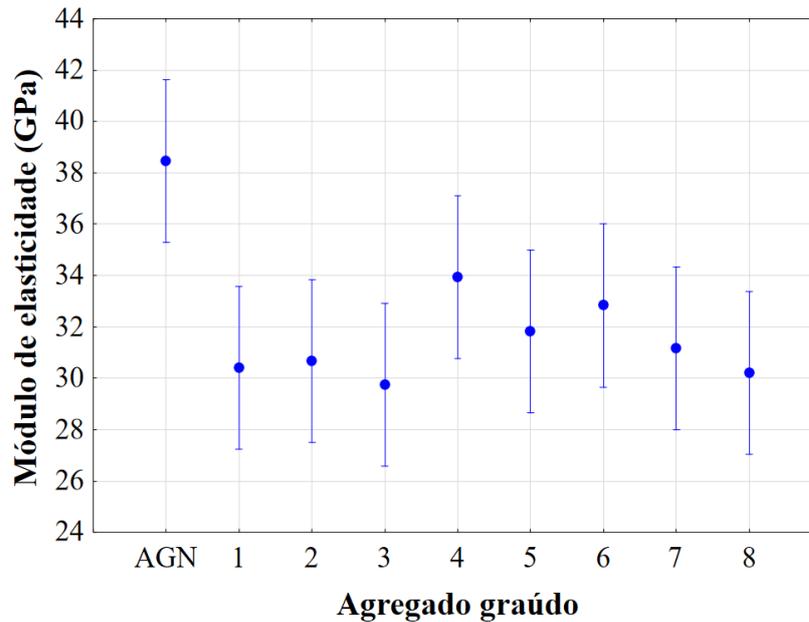
A ANOVA referente ao ensaio do módulo de elasticidade foi realizada para avaliar o efeito isolado de cada tipo de agregado graúdo, e para avaliar o efeito isolado e combinado da relação água/cimento, tipo de cimento e tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> dos ARC. A Tabela 35 apresenta os resultados da ANOVA e a Figura 49 apresenta o gráfico do efeito isolado do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade.

Tabela 35 - ANOVA para variável dependente módulo de elasticidade

<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>						
<b>Variáveis</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor - p</b>	<b>Significância</b>
<b>Agregado graúdo</b>	<b>178,56</b>	<b>8</b>	<b>22,32</b>	<b>3,266</b>	<b>0,017616</b>	<b>S</b>
Erro	123,01	18	6,83			
<b>Variáveis</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor - p</b>	<b>Significância</b>
Relação a/c	0,18	1	0,18	0,028	0,869574	NS
Tipo de cimento	0,63	1	0,63	0,096	0,760655	NS
Mineralização	7,59	1	7,59	1,151	0,299343	NS
Relação a/c * Tipo de cimento	13,05	1	13,05	1,978	0,178743	NS
Relação a/c * Mineralização	1,45	1	1,45	0,220	0,645546	NS
Tipo de cimento * Mineralização	7,37	1	7,37	1,117	0,306319	NS
Relação a/c * Tipo de cimento * Mineralização	13,05	1	13,05	1,978	0,178743	NS
Erro	105,60	16	6,60			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Efeito isolado do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise estatística realizada indica que o tipo de agregado graúdo utilizado na produção do concreto possui efeito significativo no módulo de elasticidade. Por outro lado, o efeito isolado das características dos ARC, incluindo a relação água/cimento e o tipo de cimento, e o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, não apresentaram diferença significativa, assim como o efeito combinado entre cada variável. Isso indica que, para o módulo de elasticidade, o protocolo de tratamento utilizado para os ARC foi insuficiente para que esta propriedade fosse aprimorada ao ponto de ser comparável com o concreto referência.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho consistiu na análise da eficiência do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> de agregados graúdos reciclados de concreto, em relação às suas propriedades físicas e microestruturas, e ao potencial de captura de CO<sub>2</sub>, a partir de um protocolo definido com base na revisão bibliográfica. Também foi avaliada a influência do tipo de cimento e da relação água/cimento do concreto que deu origem ao agregado graúdo reciclado na eficiência do tratamento, a influência do tratamento e da qualidade do concreto antigo nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com este material.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios realizados para cumprir os objetivos do trabalho, verifica-se que:

- **Quanto à captura de CO<sub>2</sub>**: a relação água/cimento apresentou maior influência nesta variável em comparação com o tipo de cimento, sendo que os ARC com relação água/cimento de 0,65 tiveram maior potencial de captura de CO<sub>2</sub>. Além disso, o ARC IV\_65 apresentou maior potencial de captura de CO<sub>2</sub> a partir do protocolo de tratamento utilizado em comparação com o ARC V\_65, embora esta diferença não tenha sido estatisticamente significativa. Vale ressaltar que a carbonatação foi parcial para todos os ARC, indicando que o protocolo de tratamento pode ser aprimorado.
- **Quanto às propriedades físicas**: em relação à massa específica e absorção de água, estas propriedades foram aprimoradas nos quatro tipos de ARC após o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, sendo que a variação foi maior para o ARC IV\_65, que obteve maior quantidade de captura de CO<sub>2</sub>. A variação da massa específica e absorção de água obtida para este ARC foi um aumento de 3,03% e uma redução de 7,32%, respectivamente. Para as duas propriedades, o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub> apresentou diferença significativa, enquanto o tipo de cimento influenciou apenas na absorção de água.
- **Quanto às propriedades microestruturais**: Para o ensaio de microtomografia de raios-x, foi observado que a porosidade de cada tipo de ARC foi reduzida nas amostras carbonatadas. A partir das imagens da estrutura de poros de cada amostra, verifica-se que a redução da porosidade foi mais evidente no ARC IV\_65, que obteve maior

quantidade de captura de CO<sub>2</sub>. As imagens obtidas no MEV e a análise de EDS mostraram que a região da argamassa aderida próxima à zona de transição interfacial não sofreu nenhuma alteração evidente, indicando a importância de se obter a carbonatação completa do material durante o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>. A análise de EDS indicou que apenas o ARC IV\_65 apresentou um aumento no teor de carbono nesta região da argamassa aderida, devido à formação do carbonato de cálcio. Isso pode explicar o fato de a microdureza do material aumentar 45,44% na amostra carbonatada, em comparação com a amostra não carbonatada. Os resultados obtidos nos ensaios microestruturais indicam que a captura de CO<sub>2</sub> foi benéfica para o desempenho do ARC.

- **Quanto às propriedades mecânicas dos concretos com agregado graúdo reciclado de concreto:** Os resultados de resistência à compressão aos 28 e 63 dias mostraram que é possível que esta propriedade seja aprimorada quando o concreto é produzido com ARCC, embora não tenha sido verificada uma correlação entre a quantidade de captura de CO<sub>2</sub> do ARC com a variação na resistência à compressão entre os pares de ARC e ARCC. De acordo com a ANOVA, o tipo de agregado graúdo utilizado apresentou diferença significativa, assim como o efeito isolado do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, sendo que a resistência à compressão foi maior para os concretos produzidos com ARCC. Em relação às características do concreto que deu origem ao ARC, a relação água/cimento e o tipo de cimento utilizados não influenciaram nesta propriedade. O ensaio do módulo de elasticidade também indicou que esta propriedade pode ser aprimorada a partir do tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, sendo que o aumento foi maior para o concreto produzido com ARCC IV\_65, em relação ao seu par. Contudo, a ANOVA mostrou que a relação água/cimento e tipo de cimento dos ARC e o tratamento não apresentaram diferença significativa, enquanto o efeito isolado do tipo de agregado graúdo utilizado apresentou influência no módulo de elasticidade.

A partir das conclusões do trabalho, o tratamento dos ARC por mineralização do CO<sub>2</sub> mostrou-se promissor, ao passo que a quantidade de captura de CO<sub>2</sub> foi determinante para que o ARC IV\_65 apresentasse o maior nível de melhora nas propriedades físicas e microestrutural. Por outro lado, o protocolo de tratamento utilizado foi insuficiente para que

as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com ARCC fossem comparáveis com o concreto referência, indicando a importância de ser aprimorado de modo a se obter carbonatação completa do ARC, para aumentar a captura de CO<sub>2</sub> e avaliar se o desempenho de concretos produzidos com este material é aprimorado. Dessa forma, pode ser viável utilizar esta técnica de tratamento em escala industrial, contribuindo assim com o desenvolvimento sustentável da construção civil.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade na linha de pesquisa do presente trabalho, sugere-se a realização de um projeto experimental para:

- Avaliar a influência de diferentes procedimentos de preparação dos agregados graúdos reciclados de concreto para o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>, de modo a obter o teor de umidade ideal;
- Avaliar a eficiência de diferentes protocolos de tratamento, variando parâmetros como concentração de CO<sub>2</sub> duração do tratamento, quanto às propriedades físicas e microestruturais, e ao potencial de captura de CO<sub>2</sub>;
- Avaliar a durabilidade de concretos produzidos a partir da substituição total do agregado graúdo natural por agregados graúdos reciclados de concreto tratados com CO<sub>2</sub>, frente à ação do dióxido de carbono e íons cloreto, e ao potencial de corrosão de armaduras;
- Compreender as características das diferentes zonas de transição interfacial formadas entre a nova matriz cimentícia do concreto com o agregado graúdo reciclado de concreto;
- Avaliar os indicadores de ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto tratados com CO<sub>2</sub>.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. et al. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 716–728, jul. 2009.
- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 10 jun. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard test method for microindentation hardness of materials. Philadelphia, 2022.
- ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. Á. Updating carbon storage capacity of Spanish cements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 12, 17 dez. 2018.
- ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. ISAIA, GC. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Arte Interativa, 2011.
- ANGULO, S. C.; ULSEN, C. Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem. **EPUSP**. São Paulo, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 08 jul. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregado Graúdo – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto (Procedimento). Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935**: Agregados – Terminologias. Rio de Janeiro. 2011.

AUROY, M. et al. Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO<sub>2</sub>): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 64–80, 1 jul. 2018.

BAI, G. et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117978, abr. 2020.

BEUMELBURG, C. **First global net zero carbon capture and storage facility in the cement industry: Heidelberg Materials partners with the Government of Canada. 2023.** Disponível em: <<https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2023-04-06>>.

- 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, 17 jul. 2023.
- BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1037–1049, out. 2011.
- BUTTNER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CARBONCURE. **CarbonCure Technologies | From Carbon to Simply Better Concrete**. 2024. Disponível em: <<https://www.carboncure.com/>>.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, p. 849-885. São Paulo: Arte interativa. 2011.
- CASTELLOTE, M. et al. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 4, p. 515–525, maio 2009.
- CEMBUREAU. **The European Cement Association - Activity Report**. 2020. Disponível em: <<https://cembureau.eu/media/m2ugw54y/cembureau-2020-activity-report.pdf>>.
- CO<sub>2</sub>.EARTH. **Global Carbon Emissions**. Canada, 2020. Disponível em: <<https://www.co2.earth/65/>>.
- COLLINS, F. 2nd generation concrete construction: carbon footprint accounting. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 20, n. 4, p. 330–344, 28 jun. 2013.
- CONAMA Resolução No 307. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Governo Federal. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2002.
- CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594–600, 1 out. 2016.
- CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

- 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, 1 jun. 2022.
- DE BRITO, J. et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1–16, jun. 2016.
- 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, fev. 2009.
- DE KLEIJNE, K. et al. Limits to Paris compatibility of CO<sub>2</sub> capture and utilization. **One Earth**, v. 5, n. 2, p. 168–185, 18 fev. 2022.
- DESSUY, T. Y. **Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil (RCC)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- DING, Y. et al. Quality Improvement of Recycled Concrete Aggregate by Accelerated Carbonation under Different Pressure. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 38, n. 3, p. 623–631, 1 jun. 2023.
- DOS SANTOS, V. L. G. **Beneficiamento em jigue hidráulico para melhoria da qualidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição (RCD) utilizados em concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- DROUET, E. et al. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 445–459, 1 jan. 2019.
- DUAN, Z. H.; POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials and Design**, v. 58, p. 19–29, 2014.
- DÜNDAR, B. et al. The effects of various operational- and materials-oriented parameters on the carbonation performance of low-quality recycled concrete aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 1 jun. 2023.
- EPA. **Sustainable Management of Construction and Demolition Materials | US EPA**. Available at: <<https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials>>.
- ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, maio 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION / TECHNICAL REPORT. **PD CEN/TR 17310: Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake in concrete**. 2019.

EUROSTAT. **Annual activity report 2020 - Eurostat**. Available at: <[https://commission.europa.eu/publications/annual-activity-report-2020-eurostat\\_en](https://commission.europa.eu/publications/annual-activity-report-2020-eurostat_en)>.

EUROSTAT. **European Statistics (2018) Recovery rate of construction and demolition waste**. Available at: <[https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/cei\\_wm040](https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/cei_wm040)>.

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, jan. 2010.

FANG, X. et al. Fast enhancement of recycled fine aggregates properties by wet carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, 1 set. 2021.

FANG, X.; XUAN, D.; POON, C. S. Empirical modelling of CO<sub>2</sub> uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 4, 1 ago. 2017.

FANG, X.; ZHAN, B.; POON, C. S. Enhancing the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates by using reclaimed wastewater from concrete batching plants. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117810, abr. 2020.

FANG, Y.; CHANG, J. Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 360–365, 1 fev. 2015.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO<sub>2</sub> uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, fev. 2018.

FERNANDEZ BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193–205, 30 ago. 2004.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FERREIRA, R. L. S. et al. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601–612, 30 maio 2019.

GCCA. **Global Cement and Concrete Association. Concrete Future - The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete - Roadmap Full Document**. 2021. Disponível em: <<https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>>.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A. et al. The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 257, 10 out. 2020.

GLINICKI, M. A.; ZIELINSKI, M. Depth-sensing indentation method for evaluation of efficiency of secondary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 721–724, abr. 2004.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **The Global Status of CCS**. Melbourne, Australia: Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd, 2018. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/about/contact/>>.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, ago. 2002.

GUO, R. et al. Global CO<sub>2</sub> uptake by cement from 1930 to 2019. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 4, p. 1791–1805, 30 abr. 2021.

HANIFA, M. et al. A review on CO<sub>2</sub> capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 67, p. 102292, jan. 2023.

HANSEN, T. Recycling of demolished concrete and masonry. Report of technical committee 37-DRC, **Demolition and Reuse of Concrete**, Taylor & Francis. London, 1992.

HARGIS, C. W. et al. Calcium carbonate cement: A carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technique. **Materials**, v. 14, n. 11, 21 maio 2021.

HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 724–732, 30 abr. 2018.

HELENE, Paulo RL; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**, Ed. PINI, S. Paulo, SP, 1992.

HEPBURN, C. et al. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. **Nature**, v. 575, n. 7781, p. 87–97, nov. 2019.

HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of cement and concrete**. 4 ed. London, Arnold, 1998.

IGARASHI, S.; BENTUR, A.; MINDESS, S. Microhardness testing of cementitious materials. **Advanced Cement Based Materials**, v. 4, n. 2, p. 48–57, set. 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Carbon Dioxide Capture and Storage**. Nova Iorque, EUA: Cambridge University Press, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2022: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector**. Paris, França: Global Alliance for Building and Construction, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector**. Paris, França: Global Alliance for Building and Construction, 2023.

KADDAH, F. et al. Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 57, 1 mar. 2022.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T. C. Potential of CO<sub>2</sub> sequestration through construction and demolition (C&D) waste—An overview. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 20, p. 234–242, jul. 2017.

KAZMI, S. M. S. et al. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 264, 20 dez. 2020.

KAZMI, S. M. S. et al. Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 1 nov. 2019.

KJELLEN, K.; GUIMARÃES, M.; NILSSON, A. The CO<sub>2</sub> balance of concrete in a life cycle perspective. **Danish Technological Institute – DTI**. ISBN: 87-7756-758-7. 2005. Disponível em: <www.teknologisk.dk>.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 649-654, set. 2010.

KOU, S. C.; ZHAN, B. J.; POON, C. S. Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 22–28, 2014.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LENG, Y. et al. Development of an environmental Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating carbonated recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 362, 2 jan. 2023.

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, 1 out. 2017.

LI, L. et al. Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 169–180, 1 maio 2018.

- LI, L. et al. Mineralization and utilization of CO<sub>2</sub> in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. **Separation and Purification Technology**, v. 298, 1 out. 2022.
- LI, L.; WU, M. An overview of utilizing CO<sub>2</sub> for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 60, p. 102000, jun. 2022.
- LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1-2, p. 36–44, dez. 2008.
- LI, Y. et al. An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of recycled concrete aggregates cured by CO<sub>2</sub>. **Construction and Building Materials**, v. 236, 10 mar. 2020.
- 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, 20 mar. 2019.
- LIANG, C. et al. Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 506–518, 10 set. 2019.
- LIANG, C. et al. Utilization of CO<sub>2</sub> curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, 1 jan. 2020.
- LIU, B. et al. New perspectives on utilization of CO<sub>2</sub> sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121660, fev. 2021a.
- LIU, S. et al. A comparison of liquid-solid and gas-solid accelerated carbonation for enhancement of recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, 1 abr. 2021b.
- 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, 1 out. 2019.
- LUO, S. et al. Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 956–965, 10 nov. 2018.
- MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1204–1225, 2010.
- MALYSZ, G.N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado reciclado**. Dissertação de Mestrado, 2018. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- MAZURANA, L. **Captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, UTFPR, Medianeira.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2a Edição. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MONTEIRO, J.; ROUSSANALY, S. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO<sub>2</sub> utilization feasible? **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 61, 1 jul. 2022.

NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 965–971, 2004.

NEVES JUNIOR, A. et al. Determination of CO<sub>2</sub> capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 1, p. 97–109, 1 out. 2019.

NEVES JUNIOR, A. et al. Early stages hydration of high initial strength Portland cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 108, n. 2, p. 725-731, 7 mar. 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto [recurso eletrônico]**; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOAA. **Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases**. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>>.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management and Research**, v. 38, n. 4, p. 415–422, 1 abr. 2020.

OLIVEIRA, R. G. G. **Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição**. 2023. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNILA, Foz do Iguaçu.

ORTOLAN, T. L. P. et al. Durability of concrete incorporating recycled coarse aggregates: carbonation and service life prediction under chloride-induced corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 404, 10 nov. 2023.

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTERO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 379–386, 1 nov. 2016.

OUYANG, K. et al. An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121264, ago. 2020.

OUYANG, K. et al. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106717, jan. 2023.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, set. 2007.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p. 363-373, 1991.

PARK, S. S. et al. Crushing characteristics of a recycled aggregate from waste concrete. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 100–105, 30 jan. 2018.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado a arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, p. 7-20, 2007.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31–36, jan. 2004.

POON, C. S. et al. Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 173, 1 nov. 2023.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, jul. 2004.

POSSAN, E. et al. CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147–161, 1 jun. 2017.

POSSAN, E. **Modelagem da Carbonatação e Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano**. 263 f. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Multi-scale characterization of recycled aggregate concrete and prediction of its performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, 1 fev. 2020.

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, 3 mai. 2021.

PU, Y. et al. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO<sub>2</sub> mitigation from a life cycle perspective. **Construction and Building Materials**, v. 388, p. 131695–131695, 1 jul. 2023.

REID, J. M.; AL-KUWARI, M. B. S.; EL-GAMIL HASSAN, K. Improving the management of construction waste in Qatar. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management**, v. 169, n. 1, p. 21–29, 2016.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO<sub>2</sub> de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino Americana, 2019.

ROADMAP. **Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em 20 jul. 2022>.

ROSTAMI, V. et al. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 186–193, jan. 2012.

RUSSO, N.; LOLLINI, F. Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 51, 1 jul. 2022.

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

SAMPAIO, C. et al. Characterization of demolished concretes with three different strengths for recycling as coarse aggregate. **Minerals**, v. 11, n. 8, 1 ago. 2021.

SANCHEZ, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Tese de Doutorado em Construção, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

SANTOS, A. A. M. DOS; LEITE, M. B. Avaliação de concretos reciclados com agregado graúdo de concreto dosados pelo método da ABCP modificado. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 341–359, out. 2018.

SCHABOWICZ, K. et al. Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 182–188, 1 maio 2016.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production - present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, jul. 2011.

SCRIVENER, K; SNELLINGS, R; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. London: CRC Press - Taylor e Francis Group, 2016.

SELLA, D. C. N. **Capacidade de captura de CO<sub>2</sub> em matrizes à base de cimentos LC<sup>3</sup> por meio da carbonatação acelerada**. 2022. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNILA, Foz do Iguaçu.

SERENG, M. **Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO<sub>2</sub>: étude de la faisabilité pré-industrielle**. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Paris-Est, 2020. Français.

SERENG, M. et al. Improvement of recycled aggregates properties by means of CO<sub>2</sub> uptake. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 14, 2 jul. 2021.

- SHI, C. et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466–472, jan. 2016.
- SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117629, nov. 2019.
- SKOCEK, J.; ZAJAC, M.; BEN HABA, M. Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.
- STUMPP, M. J. **Carbonatação de Concretos com Altos Teores de Adições Minerais e de Cal Hidratada**. Dissertação de Mestrado, UFSM/ PPGEC, Santa Maria, RS, Brasil, 2003.
- TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, fev. 2009.
- TAM, V. W. Y. et al. Utilising CO<sub>2</sub> technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118903, jul. 2020.
- TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. Mechanical properties of CO<sub>2</sub> concrete utilising practical carbonation variables. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126307, abr. 2021.
- TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. Microstructure and chemical properties for CO<sub>2</sub> concrete. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120584, nov. 2020.
- TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 30 maio 2018.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London, 1997.
- TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.
- THOMAS, C. et al. Micro- and macro-porosity of dry- and saturated-state recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 932–940, 20 fev. 2019.
- TIEFENTHALER, J. et al. Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector. **Frontiers in Climate**, v. 3, 13 out. 2021.
- 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, 1 dez. 2022.

- VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 8, p. 1182–1192, ago. 2007.
- VINCIGUERRA, M. et al. Waste Management in the Reform and Adequacy of the Maracanã Stadium for the FIFA Football World Cup 2014. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 97–112, dez. 2014.
- WANG, J. et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 234, 20 fev. 2020.
- WASEEM, S. A. An Investigation of Mechanical and Durability Properties of Carbonated Recycled Aggregate Concrete. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 103, n. 2, p. 349–358, 1 jun. 2022.
- WILBERT, D. G. B.; KAZMIERCZAK, C. DE S.; KULAKOWSKI, M. P. Análise da interface entre agregados reciclados de concreto e argamassas de concretos com cinza de casca de arroz e fíler basáltico por nanoindentação. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p. 253–268, jun. 2017.
- XI, F. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 12, p. 880–883, 1 dez. 2016.
- XU, Z. et al. Effects of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration on carbonation of cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 346, p. 128399–128399, 1 set. 2022.
- 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, 1 jan. 2016.
- ZAJAC, M. et al. CO<sub>2</sub> Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry. **Energies**, v. 15, n. 10, p. 3597, 1 jan. 2022.
- ZENG, W. et al. Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116743, dez. 2019.
- ZHAN, B. et al. Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 3–7, 2014.
- ZHAN, B. J. et al. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 136, 1 out. 2020.
- ZHAN, B. J.; XUAN, D. X.; POON, C. S. Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO<sub>2</sub> curing coupled with limewater soaking process. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 230–237, 1 maio 2018.
- ZHAN, M. et al. Effect of presoak-accelerated carbonation factors on enhancing recycled aggregate mortars. **Magazine of Concrete Research**, v. 69, n. 16, p. 838–849, ago. 2017.

ZHANG, J. et al. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 11, nov. 2015.

ZHAO, Z. et al. Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 191–196, 2013.

**APÊNDICE A – Captura de CO<sub>2</sub> – Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey**

- Captura de CO<sub>2</sub> - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	ARC	ID			
		1	2	3	4
1	IV_55	-	S	NS	S
2	IV_65	S	-	S	NS
3	V_55	NS	S	-	S
4	V_65	S	NS	S	-

**APÊNDICE B – Caracterização física dos ARC e ARCC – Comparação  
múltipla de médias – Teste de Tukey**

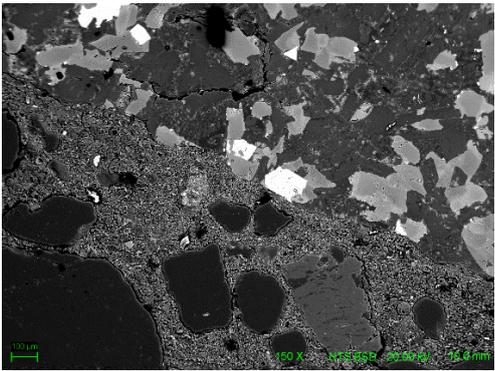
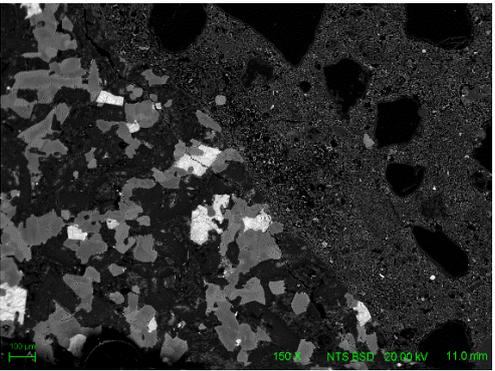
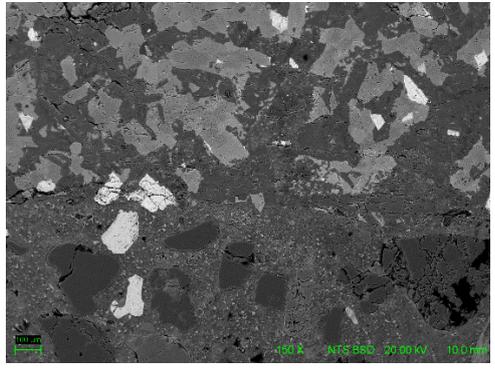
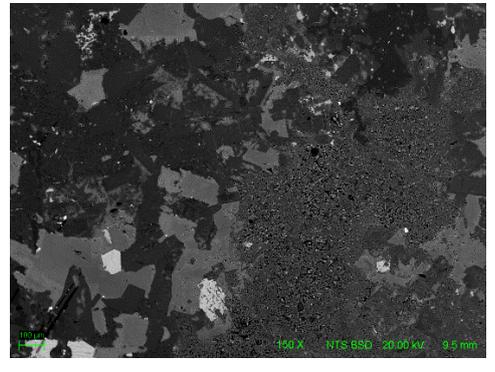
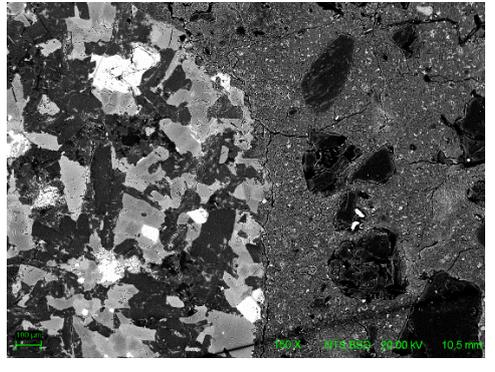
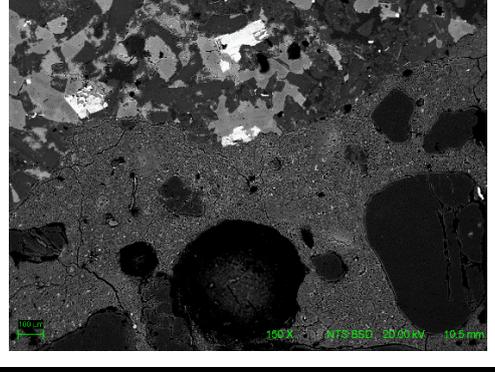
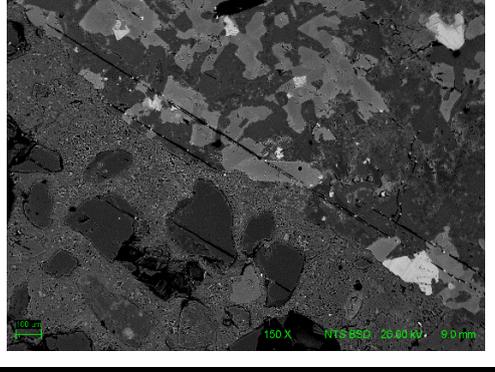
- Massa específica - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	ARC	ID							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	IV_55 – NC	-	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
2	IV_55 – CA	NS	-	S	NS	NS	NS	NS	NS
3	IV_65 – NC	S	S	-	S	NS	S	NS	S
4	IV_65 – CA	NS	NS	S	-	S	NS	S	NS
5	V_55 – NC	NS	NS	NS	S	-	NS	NS	NS
6	V_55 – CA	NS	NS	S	NS	NS	-	NS	NS
7	V_65 – NC	NS	NS	NS	S	NS	NS	-	NS
8	V_65 – CA	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	-

- Absorção de água - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	ARC	ID							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	IV_55 – NC	-	NS						
2	IV_55 – CA	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
3	IV_65 – NC	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS
4	IV_65 – CA	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
5	V_55 – NC	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS
6	V_55 – CA	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS
7	V_65 – NC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS
8	V_65 – CA	NS	-						

**APÊNDICE C – Imagens obtidas com aproximação de 150x no ensaio de  
microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

ARC	Não carbonatado (NC)	Carbonatado (CA)
IV_55		
IV_65		
V_55		
V_65		

**APÊNCIDE D - Resultados individuais do ensaio de Microdureza Vickers  
(MHV)**

- Resultados individuais – IV\_65 - NC:

Nº Ponto	Carga	Tempo (s)	Lente	Comprimento H (µm)	Comprimento V (µm)	Comprimento médio (µm)	Microdureza (HV)
1	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	52,74	60,21	56,48	58,14
2	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
3	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	58,38	50,00	54,19	63,15
4	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	57,47	38,11	47,79	81,20
5	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
6	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	67,68	56,56	62,12	48,06
7	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	46,65	59,45	53,05	65,90
8	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	49,39	47,56	48,48	78,92
9	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
10	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	40,85	44,66	42,76	101,43
11	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	69,06	40,40	54,73	61,92
12	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	49,09	38,87	43,98	95,88
13	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
14	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	19,06	23,78	21,42	202,12
15	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	35,54	46,33	40,93	110,67
16	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	47,01	40,82	43,91	96,17
17	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
18	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	22,10	19,36	20,73	215,71
19	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	46,04	29,57	37,81	129,76
20	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
21	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	63,57	62,20	62,88	46,90
22	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	52,59	68,60	60,59	50,51
23	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
24	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	22,41	20,27	21,34	203,56
25	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	28,66	26,83	27,74	240,93
26	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	58,08	60,67	59,38	52,60
27	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	55,34	68,14	61,74	48,65
28	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	57,32	37,04	47,18	83,31
29	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
30	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	18,73	21,27	20,00	231,89
31	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	57,77	51,98	54,88	61,58
32	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
33	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	51,68	46,95	49,31	76,26
34	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	41,31	40,55	40,93	110,70
35	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	40,85	30,03	35,44	147,63
36	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
37	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	43,45	45,88	44,66	92,96
38	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	41,77	41,01	41,39	108,27
39	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	38,72	33,99	36,36	140,30
40	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
41	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	69,06	57,77	63,42	46,12
42	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	43,29	58,69	50,99	71,32
43	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
44	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	38,72	31,25	34,99	151,52
45	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	33,99	35,37	34,68	154,19
46	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	53,96	59,60	56,78	57,51
47	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56
48	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	48,48	38,57	43,52	97,91
49	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,32	44,06	38,19	127,18
50	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	28,51	29,50	106,56

- Resultados individuais – IV\_65 - CA:

Nº Ponto	Carga	Tempo (s)	Lente	Comprimento H (µm)	Comprimento V (µm)	Comprimento médio (µm)	Microdureza (HV)
1	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	40,55	36,74	38,64	124,19
2	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	26,07	27,13	26,60	131,03
3	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	34,91	35,98	35,44	147,63
4	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
5	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	19,21	17,07	18,14	281,75
6	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	44,66	47,71	46,19	86,93
7	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
8	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	18,14	21,34	19,74	237,91
9	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	28,05	31,86	29,95	206,68
10	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	25,76	25,15	25,46	286,15
11	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	47,41	58,38	52,90	66,28
12	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	42,23	47,56	44,89	92,02
13	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	48,78	40,70	44,74	92,64
14	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	28,05	30,11	204,60
15	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	20,27	16,01	18,14	281,75
16	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	44,82	47,41	46,11	43,60
17	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	45,12	43,29	44,21	94,89
18	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	26,07	29,12	218,76
19	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
20	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	27,59	25,76	26,68	260,59
21	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	50,31	56,71	53,51	64,78
22	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	35,82	44,36	40,09	115,38
23	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	24,09	28,13	234,44
24	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	33,99	31,40	32,70	173,45
25	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	31,71	28,96	30,34	201,52
26	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	68,60	70,12	69,36	38,55
27	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	23,02	21,49	22,26	187,18
28	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	33,69	29,27	31,48	187,15
29	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	18,60	21,80	20,20	227,26
30	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	34,76	25,91	30,34	201,52
31	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	69,51	66,77	68,14	39,94
32	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	44,82	47,71	46,27	86,64
33	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
34	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	36,59	27,29	31,94	181,83
35	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	31,40	34,60	33,00	170,26
36	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	52,13	48,93	50,53	72,62
37	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	46,19	51,68	48,93	77,45
38	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	33,54	34,45	33,99	160,48
39	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	30,49	30,49	30,49	199,51
40	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
41	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	45,43	51,07	48,25	79,67
42	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	32,16	36,89	34,53	155,56
43	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	33,99	30,79	32,39	176,73
44	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	29,88	30,03	29,95	206,68
45	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	28,66	32,77	30,72	196,55
46	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	49,24	40,40	44,82	92,33
47	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	43,29	37,65	40,47	113,21
48	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	35,06	43,60	39,33	119,89
49	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	40,24	37,81	39,02	121,77
50	HV0.1 (980.7mN)	15	40x	35,06	26,68	30,87	194,62

**APÊNCIDE E – Propriedades de CARC no estado endurecido –  
Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey**

- Resistência à compressão (28 dias) - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	CONCRETO	ID								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	REFERÊNCIA	-	S	NS	S	S	S	NS	S	S
2	CARC - IV_55 - NC	S	-	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS
3	CARC - IV_55 - CA	NS	NS	-	S	NS	S	NS	NS	NS
4	CARC - IV_65 - NC	S	NS	S	-	NS	NS	S	S	S
5	CARC - IV_65 - CA	S	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
6	CARC - V_55 - NC	S	NS	S	NS	NS	-	S	S	NS
7	CARC - V_55 - CA	NS	S	NS	S	NS	S	-	NS	NS
8	CARC - V_65 - NC	S	NS	NS	S	NS	S	NS	-	NS
9	CARC - V_65 - CA	S	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	-

- Resistência à compressão (63 dias) - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	CONCRETO	ID								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	REFERÊNCIA	-	NS	S	S	S	S	NS	S	S
2	CARC - IV_55 - NC	NS	-	NS	S	NS	S	NS	NS	NS
3	CARC - IV_55 - CA	S	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4	CARC - IV_65 - NC	S	S	NS	-	NS	NS	S	NS	NS
5	CARC - IV_65 - CA	S	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
6	CARC - V_55 - NC	S	S	NS	NS	NS	-	S	NS	NS
7	CARC - V_55 - CA	NS	NS	NS	S	NS	S	-	S	NS
8	CARC - V_65 - NC	S	NS	NS	NS	NS	NS	S	-	NS
9	CARC - V_65 - CA	S	NS	-						

- Resistência à compressão - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey:

ID	CONCRETO	ID															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	CARC - IV_55 – NC – 28 dias	-	S	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	S
2	CARC - IV_55 – NC – 63 dias	S	-	S	NS	S	S	NS	NS	S	S	S	NS	S	NS	S	NS
3	CARC - IV_55 – CA – 28 dias	NS	S	-	NS	NS	NS	NS	S	NS							
4	CARC - IV_55 – CA – 63 dias	S	NS	NS	-	S	NS	NS	NS	S	NS						
5	CARC - IV_65 – NC – 28 dias	NS	S	NS	S	-	NS	NS	S								
6	CARC - IV_65 – NC – 63 dias	NS	S	NS	NS	NS	-	NS	S	NS							
7	CARC - IV_65 – CA – 28 dias	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	S	S	NS						
8	CARC - IV_65 – CA – 63 dias	S	NS	S	NS	S	S	S	-	S	S	S	NS	S	S	S	NS
9	CARC - V_55 – NC – 28 dias	NS	S	NS	S	NS	NS	S	S	-	S	NS	S	NS	S	NS	S
10	CARC - V_55 – NC – 63 dias	NS	S	NS	NS	S	NS	NS	S	S	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
11	CARC - V_55 – CA – 28 dias	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS
12	CARC - V_55 – CA – 63 dias	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
13	CARC - V_65 – NC – 28 dias	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS
14	CARC - V_65 – NC – 63 dias	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	S	S	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS
15	CARC - V_65 – CA – 28 dias	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS
16	CARC - V_65 – CA – 63 dias	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-

- Módulo de elasticidade - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey (considerando apenas o tipo de agregado graúdo):

ID	CONCRETOS	ID								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	REFERÊNCIA	-	S	S	S	NS	NS	NS	NS	S
2	CARC - IV_55 - NC	S	-	NS						
3	CARC - IV_55 - CA	S	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4	CARC - IV_65 - NC	S	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS
5	CARC - IV_65 - CA	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
6	CARC - V_55 - NC	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS
7	CARC - V_55 - CA	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS
8	CARC - V_65 - NC	NS	-	NS						
9	CARC - V_65 - CA	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	,	-

- Módulo de elasticidade - Comparação múltipla de médias – Teste de Tukey (considerando apenas a relação água/cimento e o tipo de cimento do ARC, e o tratamento por mineralização do CO<sub>2</sub>):

ID	ARC	ID							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	IV_55 – NC	-	NS						
2	IV_55 – CA	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
3	IV_65 – NC	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS	NS
4	IV_65 – CA	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	NS
5	V_55 – NC	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS
6	V_55 – CA	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS
7	V_65 – NC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS
8	V_65 – CA	NS	-						