

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADO RECICLADO TRATADO COM
ÁLCOOL POLIVINÍLICO (PVA) NA MITIGAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO

PONTA GROSSA

2025

EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADO RECICLADO TRATADO COM
ÁLCOOL POLIVINÍLICO (PVA) NA MITIGAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO

Dissertação apresentada para obtenção do título de
mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa,
Área de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Kruger.

PONTA GROSSA

2025

D634 Dobrovolski, Emilin Regina Gomes
Avaliação do ciclo de vida de agregado reciclado tratado com álcool polivinílico (PVA) na mitigação da pegada de carbono / Emilin Regina Gomes Dobrovolski. Ponta Grossa, 2025.
79 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Kruger.

1. Resíduo - construção - demolição. 2. Carbonatação. 3. Pva. 4. Sequestro - carbono. 5. Ciclo de vida - Análise. I. Kruger, Patrícia. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

**CERTIFICADO - 2556760/2025 - PPGESA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**
Certificado nº 2556760/2025 PPGESA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: "AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADO RECICLADO TRATADO COM ÁLCOOL POLIVINÍLICO (PVA) NA MITIGAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO"

Nome: **EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI**

Orientadora: **Prof^a. Dr^a. Patrícia Kruger**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Patrícia Kruger

Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Prof^a. Dr^a. Giovanna Patricia Gava Oyamada

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager

Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Ponta Grossa, 28 de março de 2025

Documento assinado digitalmente



GIOVANNA PATRICIA GAVA OYAMADA

Data: 29/04/2025 15:53:39-0300

verifique em <https://validar.itl.gov.br>



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager, Professor(a)**, em 28/04/2025, às 17:15, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Kruger, Professor(a)**, em 28/04/2025, às 17:15, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **2556760** e o código CRC **92B7905C**.

Aos meus pais, Selma e Edilson.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas contidas nesse texto. Sem Ele, esse projeto sequer teria sido concebido.

Agradeço a minha orientadora, Professora Patrícia, que hoje além de mentora, hoje posso chamar de amiga. Agradeço por todas as palavras ditas, por todos os momentos de companhia e principalmente pela confiança depositada em mim. Sua trajetória com certeza me inspira a ser quem eu sou hoje.

Agradeço aos meus pais, Selma e Edilson, por todo o apoio, mesmo quando não pude estar ao seu lado. Foi o seu incentivo que me fez chegar aonde estou, e essa conquista também é sua.

Agradeço ao meu marido, Marcio, por toda a ajuda e pelos dias trabalhando ao meu lado. Se existe alguém que posso dizer que faz parte desse projeto é você. Esse mestrado faz parte da nossa história.

Agradeço aos meus amigos, principalmente às amizades encontradas nesse período do mestrado. Foram dias e histórias compartilhadas na nossa sala que nos fizeram crescer como profissionais, mas também como pessoas. E além disso, com certeza nossas tardes de conversas e cafés tornaram essa caminhada muito mais prazerosa. Gostaria de incluir no agradecimento às amizades, minha colega de pesquisa Bruna Sartori, sua ajuda foi essencial para a realização desse projeto.

Por fim, agradeço à instituição Universidade Estadual de Ponta Grossa, principalmente aos colaboradores do Programada de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental e ao Departamento de Engenharia Civil, ao Complexo de Laboratórios Multiusuários, aos colaboradores do Departamento de Engenharia de Materiais, e aos colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos por todo o apoio técnico e financeiro para a realização desse projeto. Viva a universidade pública, gratuita e de qualidade.

“Ele tem uso incomensurável para cada coisa criada, que o amor e o esplendor dEle possam florescer [...] Bendito seja Ele!”

C. S. Lewis

Perelandra

RESUMO

A construção civil vem causando impactos ambientais significativos e a mitigação desses impactos pode envolver a reutilização do resíduo da construção como agregado reciclado, permitindo também a redução na pegada de carbono, devido a possibilidade de sequestro de CO₂ em compósitos cimentícios. Para melhorar a absorção e a densidade do agregado reciclado, existem algumas técnicas de tratamentos físicos ou químicos, dentre elas a carbonatação acelerada e o uso de álcool polivinílico (PVA), que além dessa melhora nas suas características técnicas, contribuem para o sequestro de carbono, por meio da formação de carbonato de cálcio. Uma forma de avaliar essa contribuição ambiental do uso de ARCO beneficiado é por meio da avaliação de ciclo de vida (ACV), que determina impactos ambientais dos processos e insumos utilizados em sua produção. O objetivo desse estudo foi identificar essa capacidade de contribuição sustentável do agregado reciclado de concreto tratado por carbonatação acelerada com película de PVA por meio da ACV para determinação da pegada de carbono. Para isso, foi realizada a produção do agregado reciclado em questão, variando a resistência do concreto de origem entre 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa, e em seguida, foi realizada a aplicação da película de PVA à 3%. Para determinação de mudanças ocorridas nas características do material e na sua composição, foram utilizados ensaios de caracterização físico-química e mineralógica. Por meio desses dados, foi realizado o cálculo de emissão de CO₂ equivalente do resíduo antes e depois da carbonatação acelerada com a película, em conjunto com a determinação do sequestro de carbono promovido pelo beneficiamento, para determinação da redução de pegada de carbono por meio da aplicação da película de PVA. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar a formação de compostos carbonatados na argamassa aderida ao grão dos agregados reciclados, destacando-se o agregado de 25MPa, com um aumento da presença de carbonato de cálcio após o uso de PVA de 60,36%, devido a maior disponibilidade de poros para formação de cristais, e compostos passíveis de carbonatação, como Ca(OH)₂, C-S-H, C₂S, C₃S e Mg(OH)₂, os quais estavam presentes em menor taxa nas demais faixas de resistência. Os demais agregados apresentaram mudanças em sua absorção e massa específica, mas foi constatada menor formação de compostos carbonatados. Assim, em comparação à processos convencionais de carbonatação, foi constatado que o uso de PVA como beneficiamento de ARCO possui potencial para gerar sequestro de carbono, em uma média de 21,23kg de CO₂ a cada m³ de ARCO, tornando a metodologia mais competitiva no mercado.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição. Carbonatação. Pva. Sequestro de Carbono. Análise de ciclo de vida.

ABSTRACT

The construction industry has been causing significant environmental impacts, and mitigating these impacts can involve the reuse of construction waste as a recycled aggregate, which also allows for a reduction in the carbon footprint due to the potential for CO₂ sequestration in cementitious composites. To improve the absorption and density of recycled aggregates, several physical and chemical treatment techniques are available, including accelerated carbonation and polyvinyl alcohol (PVA). In addition to enhancing the technical properties of these aggregates, these treatments contribute to carbon sequestration via the formation of calcium carbonate. One way to assess the environmental contribution of treated recycled concrete aggregate (RCA) is through Life Cycle Assessment (LCA), which evaluates the environmental impacts of the processes and materials involved in its production. The objective of this study was to identify the sustainable contribution potential of recycled concrete aggregates treated with accelerated carbonation and PVA film through LCA to determine their carbon footprint. To this end, the production of the recycled aggregate in question was carried out, varying the compressive strength of the original concrete between 25MPa, 30MPa, 35MPa, and 40MPa, followed by the application of a 3% PVA film. To assess changes in the material's characteristics and composition, physical-chemical and mineralogical characterization tests were performed. Based on these data, the calculation of CO₂ equivalent emissions from the waste before and after accelerated carbonation with the PVA film was carried out, in conjunction with the determination of the carbon sequestration promoted by the treatment, to establish the reduction in the carbon footprint due to the application of the PVA film. The results showed that the carbonated compounds in the mortar adhered to the grains of the recycled aggregates, with the 25MPa aggregate standing out. After PVA treatment, there was a 60.36% increase in the presence of calcium carbonate due to the greater availability of pores for crystal formation and carbonatable compounds such as Ca(OH)₂, C-S-H, C₂S, C₃S, and Mg(OH)₂, which were present in smaller quantities in the other strength ranges. The other aggregates showed changes in absorption and specific gravity but exhibited less formation of carbonated compounds. Thus, compared to conventional carbonation processes, the use of PVA as a treatment for RCA was found to have potential for carbon sequestration, averaging 21.23kg of CO₂ per m³ of RCA, making this methodology more competitive in the market.

Keywords: Construction and demolition waste. Carbonation. Pva. Carbon sequestration. Life cycle analysis.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da composição do agregado reciclado de concreto em comparação ao agregado natural, no quesito agregado natural e argamassa aderida	19
Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura de elétrons retroespalhados em concreto com resistência de 35MPa com magnificação de 568 vezes	20
Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de formações calcita e vaterita em cristais de CaCO_3	23
Figura 4 – Relação de dependência e aplicações das fases da ACV	26
Figura 5 – Exemplo de diagrama de inventário de ACV para agregado reciclado da construção civil	28
Figura 6 – Fluxograma metodológico do estudo do ARCO na mitigação da pegada de carbono	31
Figura 7 – Especificação das variáveis de estudo e respectivos tratamentos	32
Figura 8 – Fluxograma do processo de produção do agregado reciclado de concreto	33
Figura 9 – Britador móvel elétrico de mandíbula CSM TE 2 no Laboratório de Materiais de Construção da UEPG	33
Figura 10 – Fluxograma do processo de beneficiamento por carbonatação acelerada com película de PVA do agregado reciclado de concreto	34
Figura 11 – Indicação de pH por aspersão de solução de fenolftaleína em agregado reciclado <i>in natura</i> e tratado por película de PVA	35
Figura 12 – Fluxograma do processo de caracterização do agregado reciclado de concreto em estudo, antes e depois do tratamento de carbonatação com película de PVA	38
Figura 13 – Fluxograma do processo de determinação da pegada de carbono a partir da ACV do agregado reciclado de concreto sem e com a película de PVA	40
Figura 14 – Ciclo de vida do agregado reciclado de concreto em estudo, antes e depois do tratamento de carbonatação com película de PVA	42
Figura 15 – Análise dos processos de volatilização e dissociação que ocorrem no agregado reciclado de concreto durante a termogravimetria	45
Figura 16 – Composição granulométrica do agregado reciclado de concreto em estudo	47
Figura 17 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA	51
Figura 18 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado reciclado de concreto com a carbonatação com película de PVA com detalhes da formação de cristais de carbonato de cálcio calcita e vaterita	52
Figura 19 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 25MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%	54
Figura 20 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 30MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%	55
Figura 21 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 35MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%	56

Figura 22 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 40MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%	57
Figura 23 – Picos característicos de Alita e Belita obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA à 3%.....	59
Figura 24 – Detalhe de microscopia eletrônica de varredura da presença de película de PVA amorfa no agregado reciclado de concreto após a carbonatação com magnificação de 3000 vezes	67

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios utilizados para revisão sistemática da bibliografia	17
Quadro 2 – Ficha catalográfica de produto para ACV do ARCO em estudo.....	41

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de potencial de aquecimento global em 100 anos de gases do efeito estufa.....	29
Tabela 2 – Quantidade de materiais utilizados para a produção da película de PVA no ARCO conforme resistência do concreto de origem	37
Tabela 3 – Parâmetros de emissão de GEE's dos materiais constituintes do concreto em função da resistência do concreto demolido	43
Tabela 4 – Caracterização física do agregado reciclado de concreto sem e com a carbonatação com película de PVA	48
Tabela 5 – Fluorescência de raios X do agregado reciclado de concreto em estudo sem a carbonatação com película de PVA.....	50
Tabela 6 – Síntese da presença de Portlandita, calcita e dióxido de carbono do agregado reciclado de concreto em estudo sem a carbonatação com película de PVA	58
Tabela 7 – Teor de argamassa aderida do agregado reciclado de concreto em função da granulometria sem a carbonatação com película de PVA à 3%.....	61
Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o cálculo da pegada de carbono pelo método numérico de ACV de Dobrovolski (2022) e emissão de CO ₂ equivalente do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA à 3%.....	63
Tabela 9 – Proporção de emissão equivalente de CO ₂ do ARCO por etapa de produção do agregado sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%, com relação à produção do concreto	64
Tabela 10 – Proporção de emissão equivalente de CO ₂ do ARCO por etapa de produção do agregado sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%, com relação ao transporte, britagem e película de PVA	64
Tabela 11 – Pegada de carbono do ARCO sem e com a carbonatação com película de PVA à 3% em kg de CO ₂ equivalente	65
Tabela 12 – Presença de CO ₂ no ARCO determinada por análise termogravimétrica sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de ciclo de vida
C ₂ S	Silicato dicálcico – Belita
C ₃ S	Silicato tricálcico – Alita
ARCO	Agregado reciclado de concreto
CaCO ₃	Carbonato de cálcio - Calcita
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio - Portlandita
CO ₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raios X
DTG	Derivada da termogravimetria
FRX	Fluorescência de raios X
GEEs	Gases do efeito estufa
HCl	Ácido clorídrico
ICV	Inventário de ciclo de vida
ITZ	Zona de transição interfacial
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PAG	Potencial de aquecimento global
PVA	Álcool polivinílico
RCD	Resíduo de construção e demolição
TAA	Teor de argamassa aderida
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CAPTURA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	20
2.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	25
3	METODOLOGIA	31
3.1	VARIÁVEIS DE ESTUDO	31
3.2	MATERIAIS	32
3.3	BENEFICIAMENTO POR CARBONATAÇÃO ACELERADA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	34
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	38
3.4.1	Caracterização física do agregado reciclado de concreto	38
3.4.2	Caracterização química do agregado reciclado de concreto	39
3.5	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	47
4.1.1	Caracterização física do agregado reciclado de concreto	47
4.1.2	Caracterização química do agregado reciclado de concreto	49
4.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	62
5	CONCLUSÕES	68
5.1	CAPTURA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	68
5.2	PEGADA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	70
5.3	RECOMENDAÇÕES DE ANÁLISES FUTURAS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DA ADAPTAÇÃO DO CÁLCULO DE PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	78

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é notada pelo grande impacto ambiental que vem causando, principalmente pela extração de matéria-prima, emissão de gases do efeito estufa (GEEs) e geração de resíduos de construção e demolição (RCD) (Mazurana, 2019; Santos *et al.*, 2021). Conforme Possan (2019), a emissão de GEEs, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), é um dos principais passivos ambientais do setor da construção, por conta do alto consumo de cimento, responsável por cerca de 7% da emissão antrópica global. Para a produção do cimento são utilizados grandes volumes de combustíveis fósseis (fontes emissoras de CO₂) para a queima da matéria-prima, como a rocha calcária, a qual também emite parte do dióxido de carbono constituinte com o aquecimento a altas temperaturas, em um processo chamado descarbonatação (Possan, 2019). Esse é um fator de destaque, visto que a produção de cimento no Brasil tende a aumentar pelo menos 56% até 2045, em comparação ao uso atual, devido ao crescimento populacional e à demanda por infraestrutura (Guimarães; Visedo, 2019).

Além disso, conforme o Relatório Anual de 2022 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2022), o consumo de cimento no Brasil no referido ano foi de 63,55 milhões de toneladas. Essa extensiva produção do material nas últimas décadas tem ameaçado recursos naturais de esgotamento em uma escala global, pois o setor chega a consumir 50% de toda matéria-prima extraída do ambiente (Santos *et al.*, 2021). O processo produtivo da indústria da construção também é responsável por uma expressiva geração de RCD, em que no ano de 2022, estima-se que foram gerados 45,07 milhões de tonelada do material no Brasil (ABREMA, 2023). Conforme Zadeh *et al.* (2023), cerca de 70% do resíduo é composto por material cimentício, o que pode ser um facilitador da gestão do produto, visando o atendimento de políticas de 3R's (reduzir, reciclar e reutilizar) pela construção civil, no quesito de reciclagem.

Com o intuito de mitigar esses impactos, torna-se cada vez mais popular no mercado da construção a utilização de agregado reciclado produzido a partir de RCD (Mazurana, 2019). Isso se confirma pelo fato de que a reinserção desse material no processo produtivo baseia-se no modelo de Economia Circular, que possibilita a diminuição da necessidade de locais específicos para disposição de resíduos e de extração de materiais da natureza, bem como a compensação da pegada de carbono advinda de processos da construção civil (Rahigude *et al.*, 2022; Visintin; Xie; Bennet,

2020). Diante do cenário e da importância do tema, formulou-se o questionamento sobre como aliar a mitigação da emissão de gases do efeito estufa (GEEs) do setor da construção civil com a redução da sua geração de resíduos sólidos por meio do tratamento de agregado reciclado de concreto visando sua reinserção no mercado da construção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a capacidade de mitigação da pegada de carbono por meio da avaliação de ciclo de vida do potencial do agregado reciclado de concreto tratado por carbonatação acelerada com película de álcool polivinílico (PVA).

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Determinar as características físicas, químicas e microestruturais do agregado reciclado de concreto, antes e depois do tratamento por carbonatação acelerada com película de PVA, para verificação técnica da eficiência do processo e apoio nas decisões da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV);
- b) Identificar o inventário de entradas e saídas de insumos pertinentes ao sistema do agregado reciclado de concreto (ARCO), bem como a emissão de GEEs durante a sua produção, para cumprir a ACV;
- c) Quantificar por método empírico a pegada de carbono do ARCO, com apoio da ACV, para identificação da emissão de GEEs original do agregado;
- d) Quantificar por meio de ensaios experimentais o sequestro de carbono real do agregado reciclado tratado por carbonatação acelerada, para identificação de mudanças na pegada de carbono e verificação ambiental da eficiência do processo;
- e) Avaliar as mudanças nas características físicas, químicas e microestruturais do ARCO tratado, analisando o impacto ambiental das diversas composições do material.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Zhang *et al.* (2019), a diminuição do impacto dos GEEs emitidos pela construção civil por meio de compósitos cimentícios se dá devido ao sequestro de carbono que ocorre naturalmente no material, conhecido como carbonatação. A carbonatação consiste na precipitação dos produtos da reação entre o CO₂ atmosférico com os compostos de hidratação do cimento na superfície dos poros da matriz cimentícia. Isso pode se mostrar como ponto positivo na escolha de materiais quando se leva em conta os impactos ambientais da sua produção, principalmente no contexto atual de consumo e produção responsáveis e combate às alterações climáticas, que integra o conjunto de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável proposto pela Organização das Nações Unidas (Rahigude *et al.*, 2022).

Conforme Al-Bayati *et al.* (2016) e Saravanakumar, Abhiram e Manoj (2016), há diversas formas de realizar o beneficiamento do agregado reciclado para sua reutilização, classificados em tratamentos químicos, térmicos e remoção da argamassa aderida. Porém, dentro da necessidade de produção limpa e combate às mudanças climáticas, é essencial levar em conta o impacto ambiental que esses processamentos geram. Assim, a carbonatação acelerada como tratamento químico de agregado reciclado de concreto (ARCO) vem mostrando potenciais de melhoria de características do agregado reciclado simultaneamente à diminuição de impactos ambientais, devido à formação de cristais de carbonato de cálcio dentro dos poros do material, o que pode diminuir o volume de poros permeáveis do agregado, ou seja, dos poros internos conectados à superfície externa do grão, e promover o sequestro de carbono, pela composição do produto formado (Zadeh *et al.*, 2023; Zhan; Xuan; Poon, 2018).

Assim, uma forma de avaliar ambientalmente o uso de materiais, bem como quantificar os impactos da construção civil, é por meio da avaliação de ciclo de vida (ACV), que é um método que leva em conta todos os processos de produção de um produto e a quantificação de diversos impactos ambientais relacionados a cada um desses processos, regida pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Conforme Paz (2020), essa metodologia já vem ganhando destaque na construção civil, principalmente no contexto do tratamento, uso e destinação de agregado reciclado de concreto, ganhando mais destaque quando utilizada em conjunto ao cálculo de pegada de carbono.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração da presente revisão bibliográfica, utilizou-se dos critérios de revisão sistemática elencados no Quadro 1. Essa revisão se refere a contextualização sobre o uso de agregado reciclado de concreto nos cenários brasileiro e internacional, bem como a necessidade de beneficiamento do mesmo para correta utilização. Além disso, a revisão também trata da carbonatação acelerada de compósitos cimentícios como uma alternativa de beneficiamento do agregado de resíduo de concreto e a possibilidade da utilização de película de PVA para esse fim. Ao final da revisão bibliográfica, é apresentada a metodologia de avaliação de ciclo de vida como uma opção para determinação de pegada de carbono de um produto, e sua utilização na determinação dos impactos ambientais de agregados reciclados.

Quadro 1 - Critérios utilizados para revisão sistemática da bibliografia

Bases de dados	<i>Web of Science</i> <i>ScienceDirect</i> Biblioteca Digital de Teses e Dissertações
Tipos de documentos	Artigos de pesquisa Artigos de revisão Dissertações e teses
Linguagem	Inglês ou Português
Palavras-chave	“Agregado reciclado de concreto” OU “concrete recycled aggregate” E “Carbonatação” OU “Carbonation”. “Agregado reciclado de concreto” OU “concrete recycled aggregate” E “PVA”. “Agregado reciclado de concreto” OU “concrete recycled aggregate” E “Caracterização” OU “characterization”. “ACV” OU “LCA” E “agregado reciclado de concreto” OU “concrete recycled aggregate”. “ACV” OU “LCA” E “argamassa” OU “mortar” OU “concreto” OU “concrete”.
Período de publicação	De 2000 à 2025, com foco nas análises dos últimos cinco anos.
Questões da coleta de dados	Qual o atual uso de agregado reciclado de concreto no contexto internacional e brasileiro? Por que existe a necessidade do processo de beneficiamento do agregado e quais os seus tipos?

	Do que se trata o processo de carbonatação acelerada em agregados reciclados? Qual o atual uso de PVA em compósitos cimentícios e agregados reciclados? Do que se trata a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida e a possibilidade da determinação da pegada de carbono? Qual o atual uso da ACV em compósitos cimentícios e agregados reciclados?
--	---

Fonte: A autora (2025).

A partir da revisão sistemática, foi possível observar que o uso de agregados reciclados é impactado diretamente pela sua composição (Al-Bayati *et al.*, 2016; Angulo, 2000; Bravo *et al.*, 2020; Makul, 2021). Conforme Angulo (2000) destaca, o processo de reciclagem de resíduos da construção civil no Brasil ainda é focado exclusivamente na fração inorgânica não-metálica (concreto e cerâmico). Isso pode ser efeito do que foi imposto pela Resolução nº 307 do CONAMA (2002), que impede que resíduos classe A sejam destinados a aterros e sugere sua reutilização e reciclagem, compostos por resíduos de construção e demolição de obras de terra, de pavimentação, de estruturas de alvenaria convencional e de fabricação de peças pré-moldadas de concreto.

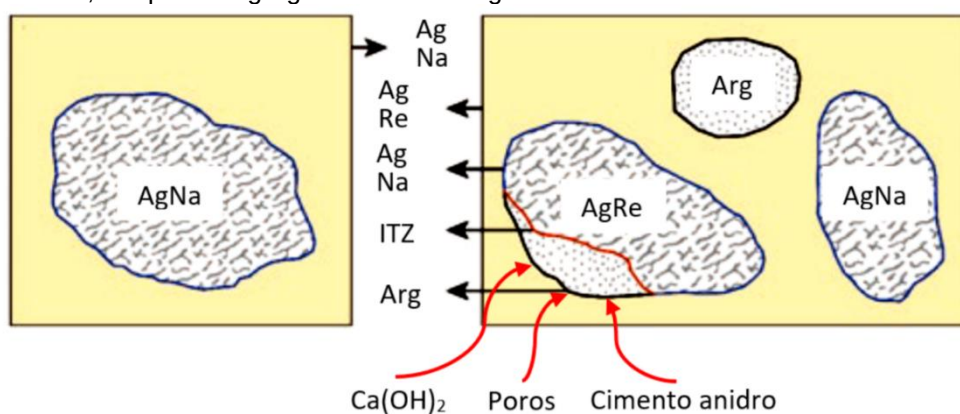
No contexto brasileiro, um uso muito comum desse produto é na pavimentação (Barreto; Amorin, 2020). Os autores relatam que isso pode ocorrer devido à similaridade de características físicas que o agregado reciclado pode apresentar em comparação com solo natural. Além disso, a própria norma que rege esse tipo de aplicação no país, a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004), sugere flexibilidade na aplicação de agregados de resíduo da construção civil com características diversas, focando principalmente em granulometria e forma do material, o que facilita sua aplicação. Conforme Reis *et al.* (2021), o uso do produto em pavimentação também já está difundido no cenário internacional, justamente por conta do grande impacto ambiental que esse tipo de intervenção causa, o que pode ser reduzido com a utilização de materiais reciclados.

Outro uso do agregado reciclado é em compósitos cimentícios, e um exemplo disso é na produção de blocos de vedação (Guo *et al.*, 2018; Mesquita *et al.*, 2015). Conforme as pesquisas, uma das suas vantagens em comparação ao uso do agregado de RCD em concretos convencionais é que no processo de fabricação dos

blocos, feito por moldagem mecanizada, a trabalhabilidade da mistura em estado fresco não é uma característica tão significativa, o que permite o emprego de uma relação água-aglomerante mais reduzida, aumentando a resistência mecânica final. Já sobre a utilização do agregado de resíduo da construção em concretos e argamassas, existem muitas bibliografias sobre esse tema (Ning; Lv, 2023; Reis *et al.*, 2018), porém, no contexto brasileiro, a normatização sobre esse uso ainda é muito recente, e possui muitas limitações, como taxa de substituição do agregado natural pelo reciclado e resistência de projeto máxima para a estrutura de 20MPa (ABNT, 2021).

Conforme Guo *et al.* (2018), o uso de agregado reciclado da construção civil necessita de atenção durante a execução de situações onde há necessidade do controle tecnológico rigoroso, já que possui maior porosidade superficial, em comparação aos agregados naturais, o que leva a menor resistência mecânica e maior absorção. Essas características, advindas da presença de hidróxido de cálcio, poros e cimento anidro na zona de transição interfacial (ITZ) da argamassa aderida ao agregado reciclado, conforme representada na Figura 1 em conjunto com as principais diferenças entre o agregado natural e o ARCO, podem prejudicar a aplicação do material em concretos estruturais ou em argamassas (Makul, 2021). Conforme o Makul (2021), uma forma de evitar os problemas advindos da caracterização do agregado reciclado é por meio do beneficiamento do material, o que será detalhado no item a seguir.

Figura 1 – Representação da composição do agregado reciclado de concreto em comparação ao agregado natural, no quesito agregado natural e argamassa aderida



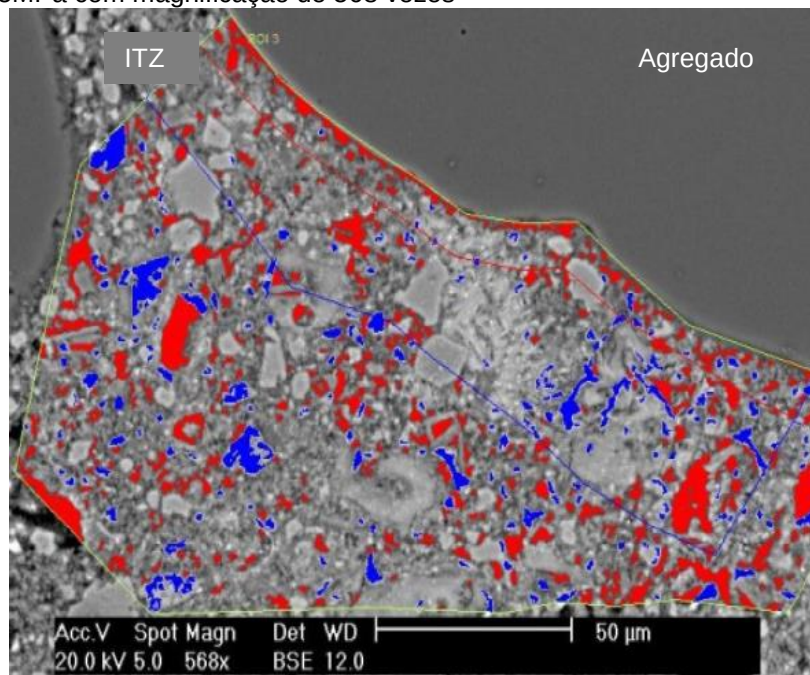
Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2023)

Nota: AgNa = Agregado Natural, AgRe = Agregado Reciclado, ITZ = Zona de Transição Interfacial, Arg = Argamassa. Zona de transição entre agregado natural e nova matriz cimentícia demarcada em azul; zona de transição entre agregado natural e argamassa velha demarcada em vermelho; zona de transição entre argamassa velha e nova matriz cimentícia demarcada em preto.

2.1 CAPTURA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Conforme discutido no item anterior, a zona de transição interfacial aderida à superfície do agregado reciclado de concreto é a maior responsável pelas mudanças nas características do material em comparação com o agregado natural (Makul, 2021). Conforme relata Djerbi (2018) e Sidorova *et al.* (2014), há uma grande presença de cristais de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), poros e cimento anidro na região de transição entre o agregado e a pasta de cimento, conforme exemplificado na Figura 2, por conta do efeito da proporção entre o tamanho da partícula do agregado e da partícula de cimento, reduzindo a concentração de cimento na região e gerando um ponto de atração de água livre. A formação dos poros e desse tipo de cristal na camada de argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto leva ao aumento da porosidade na superfície de agregado, promovendo o aumento da absorção e a diminuição da resistência mecânica deste agregado.

Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura de elétrons retroespalhados em concreto com resistência de 35MPa com magnificação de 568 vezes



Fonte: Adaptado de Djerbi (2018).

Nota: Os itens destacados em vermelho na imagem representam os poros da ITZ, e os itens destacados em azul representam o cimento anidro.

A presença da zona de transição em agregados reciclados é um fator de destaque, e está intimamente relacionado com algumas características do material. Uma delas é a granulometria, já que no caso de agregados utilizados na construção

civil, quanto menor for a dimensão característica da fração granulométrica predominante no material, maior é sua área superficial. Esse fato, conforme Djerbi (2018), é ainda mais relevante no caso do agregado reciclado, já que por conta da maior presença de poros permeáveis em comparação ao agregado natural, quanto maior é essa porosidade, maior será a área superficial. Assim, quanto menor a fração granulométrica do ARCO, maior é a quantidade de argamassa aderida a superfície do grão, menor é a sua massa específica e maior é a sua absorção, em comparação ao agregado reciclado de maior granulometria (Hubert *et al.*, 2023).

Além da correlação entre zona de transição e granulometria do agregado reciclado, a resistência do concreto de origem do ARCO também influencia nas propriedades da argamassa aderida (Djerbi, 2018; Makul, 2021). Os autores relatam que misturas com maior resistência mecânica geram agregados com menor porosidade na ITZ, apesar da possibilidade de maior presença de cimento anidro na região. Assim, para correta aplicação desse tipo de produto em situações de solicitação estrutural, existem diversas técnicas para correção dessas propriedades, evitando o sequestro de água da mistura por parte do agregado, para que não haja aumento da porosidade na ITZ do compósito cimentício, e consequente redução de resistência mecânica; e também evitando o aumento do consumo de aglomerante, para compensar essa diminuição na resistência (Bravo *et al.*, 2020; Tam *et al.*, 2020).

Para isso, existem diversas formas de beneficiamento do agregado reciclado, baseadas em dois princípios: a remoção da camada de argamassa aderida ao grão do agregado reciclado ou a melhora da qualidade dessa argamassa. Segundo Tam *et al.* (2020), a remoção da argamassa aderida pode gerar um novo problema ambiental, que é a geração de um novo resíduo advindo do tratamento, o qual também necessita de um gerenciamento adequado, além do alto consumo de energia. Dessa forma, conforme destacam os autores, a melhora da qualidade da argamassa ao redor do agregado reciclado pode ser uma alternativa que gere menores implicações ambientais que a utilização de remoção da argamassa por métodos térmicos, mecânicos ou por solução química.

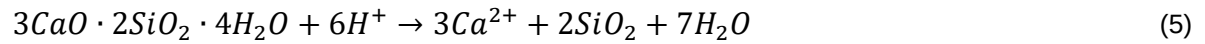
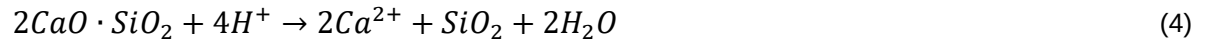
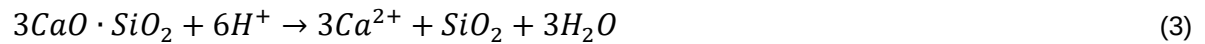
Conforme destaca Makul (2021), os processos de beneficiamento do agregado reciclado de concreto que promovem a melhora da qualidade da argamassa aderida podem ser classificados em duas formas: os tratamentos por métodos físicos e os tratamentos por métodos químicos. Dentre os tratamentos físicos, o autor relata que há a possibilidade do uso de película de polímeros, levando ao isolamento

superficial dos poros de forma física, ou a biodeposição de carbonato de cálcio nos poros por meio de microrganismos. Já sobre os tratamentos químicos, existe a possibilidade do uso de pozolanas para consumo da portlandita e aumento da resistência da argamassa aderida, e do processo de carbonatação acelerada para produção de carbonato de cálcio nos poros permeáveis (Makul, 2021).

Sobre a metodologia de carbonatação acelerada, as reações que ocorrem durante a técnica já são conhecidas no cenário dos compósitos cimentícios como um processo de degradação do concreto, que ocorre naturalmente em estruturas expostas ao ar atmosférico, levando à diminuição do pH (Ding *et al.*, 2023) e consequente despassivação¹ da armadura, no caso de concreto armado, ou seja, (Kaliyavaradhan; Ling, 2017). Porém, conforme os autores, em casos em que a alcalinidade da matriz cimentícia não é um fator preponderante para determinar sua vida útil; a carbonatação leva à transformação de compostos menos estáveis, principalmente Portlandita (Ca(OH)_2), em carbonato de cálcio (CaCO_3), um composto termodinamicamente mais estável. Assim, para que ocorra a carbonatação, é necessário que o dióxido de carbono (CO_2) tenha contato com umidade dentro dos poros, formando ácido carbônico (H_2CO_3) e em seguida dissociando em íons CO_3^{2-} e H^+ (Li *et al.*, 2024). Segundo os autores, na presença dos íons de hidrogênio, ocorre a dissociação de íons Ca^{2+} de compostos como hidróxido de cálcio, alita (C_3S), belita (C_2S) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e por fim, a formação de CaCO_3 , processo exemplificado nas equações a seguir (Yuan *et al.*, 2024). Em alguns casos, os compostos cálcicos podem ser substituídos por compostos magnesianos sem alterações nas reações de carbonatação (Li *et al.*, 2024). Especificando o processo da reação em cada uma das etapas apresentadas a seguir, temos:

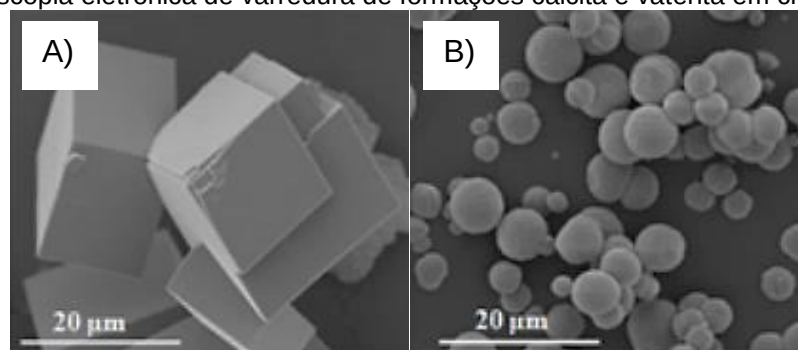
- a) Equação (1): formação do íon carbonato pela dissolução do CO_2 ;
- b) Equação (2): formação do íon cálcio a partir da dissociação da Portlandita;
- c) Equação (3): formação do íon cálcio a partir da dissociação da alita (C_3S);
- d) Equação (4): formação do íon cálcio a partir da dissociação da belita (C_2S);
- e) Equação (5): formação do íon cálcio a partir da dissociação do C-S-H;
- f) Equação (6) síntese de calcita a partir dos íons carbonato e cálcio;

¹ Redução da proteção da armadura contra processos de ferrugem, proteção essa obtida por meio do pH alcalino da pasta cimentícia de cobertura.



No caso do uso do processo de carbonatação como beneficiamento de agregado reciclado, ele é realizado de forma a forçar a formação dos cristais de carbonato de cálcio, exemplificados na Figura 3, dentro dos poros permeáveis da argamassa aderida do ARCO. Conforme Zadeh *et al.* (2023), que estudo o potencial de redução da pegada de carbono por meio de agregado reciclado de concreto beneficiado a partir de câmara de carbonatação, a colmatção dos poros da superfície do agregado reciclado com cristais de carbonato de cálcio levou à diminuição de porosidade do agregado em 21%, à diminuição de sua absorção em até 32%, e ao aumento de sua massa específica em torno de 0,56%; em relação ao produto não tratado. Além disso, os autores relatam que o processo de carbonatação acelerada também causa o sequestro de CO₂ dentro da amostra por todo o período de sua vida útil como material de construção, o que pode ser aproveitado como uma maneira de mitigar o impacto ambiental causado pelas emissões de gases do efeito estufa da indústria da construção civil.

Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de formações calcita e vaterita em cristais de CaCO₃



Fonte: Adaptado de Costa, Olyveira e Salomão (2017).

Nota: A) Cristais de calcita (β-CaCO₃), cúbicos com estrutura cristalina romboédrica; B) Cristais de vaterita (μ-CaCO₃), esféricos com estrutura cristalina hexagonal.

Com relação aos métodos para a execução da carbonatação acelerada no agregado reciclado de concreto, existem duas principais formas de realizar a técnica,

onde a primeira delas é por meio da biodeposição de carbonato de cálcio nos poros, onde são utilizadas microorganismos em que o próprio metabolismo utiliza o CO_2 atmosférico e produz cristais de CaCO_3 (Zhan; Xuan; Poon, 2018). Conforme relatam os autores, o método é efetivo, porém, a sensibilidade das bactérias às condições ambiente pode ser um impeditivo em alguns casos. Além disso, há também o próprio tratamento químico de exposição dos agregados a uma fonte de CO_2 artificial, dentre elas estão o uso de câmaras de carbonatação industriais ou experimentais, que promove a saturação da atmosfera interna do equipamento com dióxido de carbono; ou também o uso de imersão em soluções de bicarbonato de sódio (NaHCO_2) (Tam *et al.*, 2020). Segundo os autores, ambos os métodos necessitam de um ambiente com controle de umidade, temperatura e concentração de CO_2 , além fechamento hermético, para evitar o escape do CO_2 gasoso.

Um método relativamente recente de produção de carbonato de cálcio em compósitos cimentícios é por meio do uso de películas do polímero álcool polivinílico (PVA). O PVA é um polímero solúvel em água à temperatura ambiente, advindo do processo de polimerização por adição do monômero de acetato de vinila, que em seguida passa por hidrólise alcalina, transformando o radical acetato em álcool, conforme relatam Thong, Teo e Ng (2016). Segundo os autores, devido as propriedades de alto módulo de elasticidade e resistência a tensões normais, as últimas pesquisas sobre o uso de PVA no beneficiamento do agregado reciclado focam na melhora das características físicas do ARCO, principalmente absorção. Até o momento, os estudos não exploram a capacidade de sequestro de carbono do polímero em agregado reciclado de concreto.

Cao *et al.* (2023) publicaram um estudo sobre o efeito da adição de PVA a 2% do peso de cimento, no sequestro de carbono em pastas de cimento submetidas à carbonatação em câmara industrial, onde o uso do polímero aumentou a quantidade de carbonato de cálcio na amostra. Segundo os autores, isso ocorre devido ao PVA alterar a estrutura dos cristais de hidróxido de cálcio, tornando-os menores e mais suscetíveis à ligação com o CO_3^{2-} , além de aumentar as ligações entre os cristais de calcita já formados. Song, Deng e Ling (2023) também relataram um aumento no teor de carbonato de cálcio em agregado peletizado de resíduo de concreto, tanto na adição de PVA durante o processo de mistura do agregado artificial, quanto na cobertura do mesmo com uma película do polímero, a uma taxa entre 0,5% e 2% sobre o peso do pó de resíduo de concreto. Song, Deng e Ling (2023) também

observaram a formação de ligações entre os cristais de calcita, devido à presença do PVA.

Outro exemplo da utilização de PVA no tratamento de agregado reciclado de concreto é o relatado por Dobrovolski e Kruger (2020), cujo um dos objetivos era identificar a capacidade de sequestro de carbono de agregado reciclado envelopado com uma solução de PVA. Para isso, as autoras utilizaram uma metodologia de envelopamento de agregado reciclado baseado na cobertura de sua área superficial com uma película com espessura pré-determinada, também relatada por Zhao *et al.* (2013). Esse tipo de método também é utilizado no caso do envelopamento com pasta de cimento, ou outras pozolanas, e mostrou bons resultados quando associado ao PVA, com fortes indícios de carbonatação observados em ensaios de termogravimetria (Dobrovolski; Kruger, 2020).

Assim, conforme Makul (2021) e Thong, Teo e Ng (2016), a produção do PVA é feita em processo cíclico, o que permite a redução de geração de resíduos, podendo ser uma vantagem na questão do impacto ambiental do uso do polímero. Por outro lado, os autores relatam que o custo da utilização do material no beneficiamento do ARCO pode ser alto. Desse modo, é necessário analisar os resultados do tratamento do agregado reciclado com PVA, principalmente sobre o viés da possibilidade de sequestro de carbono, e uma forma de realizar isso é por meio da sua avaliação ambiental. A próxima seção vai destacar o uso da metodologia da avaliação de ciclo de vida na análise de impactos ambientais do agregado reciclado de concreto, principalmente no quesito de pegada de carbono.

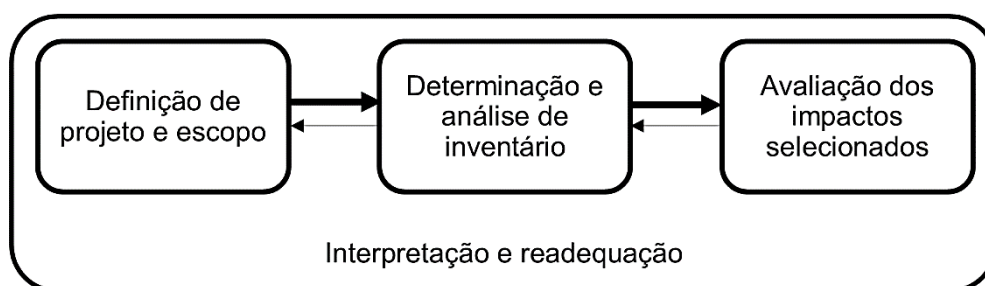
2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

A metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma técnica reconhecida internacionalmente para quantificar impactos ambientais na vida de um produto ou atividade; da extração das matérias-primas, manufatura, transporte, uso, reuso, reciclagem, até a disposição final do resíduo (Wang *et al.*, 2019). Assim, além de classificação das diversas categorias de impactos, a ferramenta permite quantificar indicadores dos impactos ambientais selecionados no estudo em cada etapa do processo, como aquecimento global, acidificação, ecotoxicidade ou esgotamento de recursos. O conjunto das etapas elencadas para os processos de produção do

material em estudo é denominado inventário de ciclo de vida (ICV), conforme relata a NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009a). Conforme a norma, a perspectiva da aplicação desse método é identificar a transferência dos impactos ambientais entre os estágios do ICV e possibilitar a prevenção dos mesmos durante o processo.

Segundo a NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009a), o método da ACV é estruturado em torno dos processos especificados no inventário do produto em análise, em função do que aquele produto pode oferecer como desempenho, tendo uma abordagem iterativa, onde a determinação do escopo da ACV, do ICV, dos indicadores das categorias de impacto e o resultado final possuem uma dependência forte entre si, exemplificado na Figura 4. É necessário destacar que a abordagem da avaliação de ciclo de vida é feita de forma a analisar os potenciais impactos ambientais, ou seja, essa quantificação não é feita de forma absoluta, devido às próprias incertezas embutidas nas informações disponibilizadas e às diferenças entre unidades funcionais e os processos e fronteira elencados nos inventários das diversas fontes (ABNT, 2009a). Além disso, as especificações de objetivo e escopo do estudo, e coleta de dados, devem ser bem claras, a fim de que possa ser feita uma comparação prática com outras pesquisas.

Figura 4 – Relação de dependência e aplicações das fases da ACV



Fonte: Adaptado de ABNT (2009a).

Assim, visto os grandes impactos ambientais que o setor da construção civil e de infraestrutura gera, como consumo de recursos não-renováveis e energia, e geração de gases do efeito estufa e de resíduos, a metodologia de ACV pode se tornar uma ferramenta útil na gestão de projetos, visando a redução de impactos ambientais de produtos e serviços (Hasan; Whyte; Jassmi, 2020). Hasan, Whyte e Jassmi (2020) relatam que na construção de rodovias, o uso de agregado reciclado da construção, de resíduos de asfalto fresado e escória de alto forno pode ser uma alternativa para

diminuição de impactos como as emissões de CO₂, o consumo de matérias-primas e energia que o processo gera, com redução em 10% do consumo de energia em ton joule e redução de potencial de aquecimento global em 11% de kg de CO₂ equivalente.

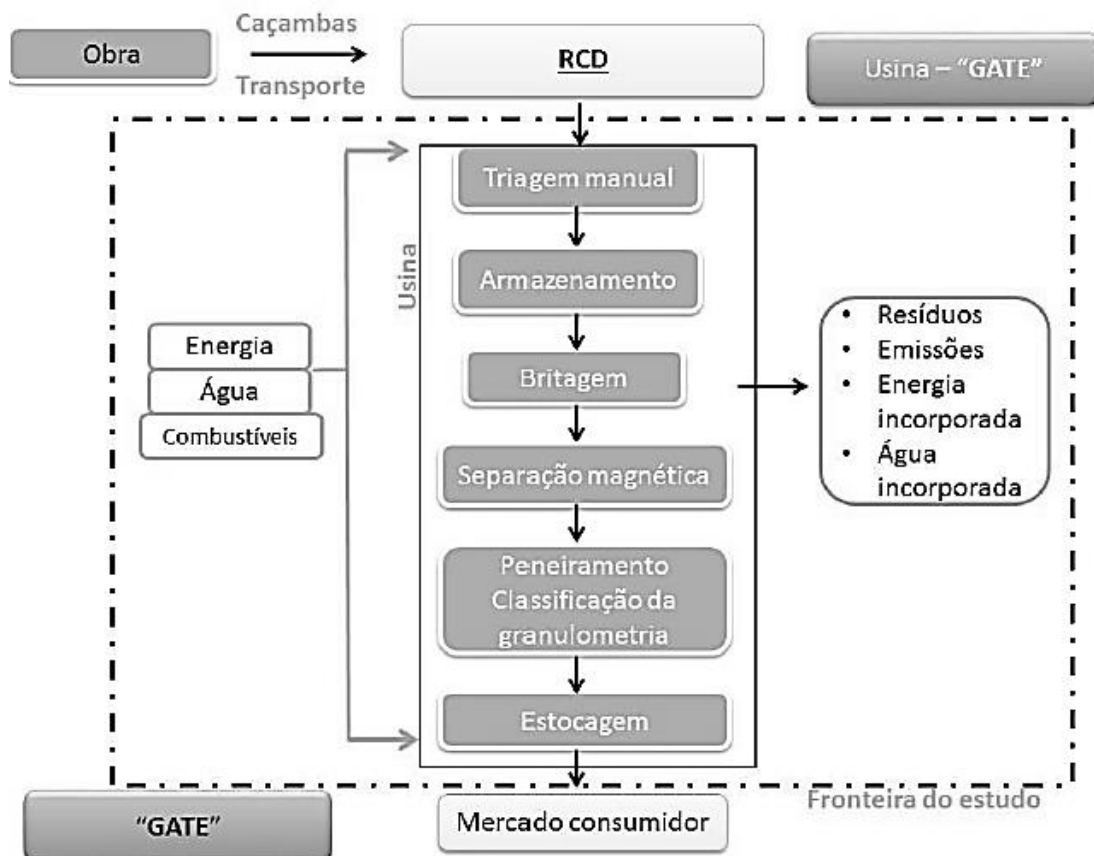
Outros exemplos do uso da ACV na construção civil e na infraestrutura é o uso do método para determinação dos impactos ambientais na construção de grandes obras de infraestrutura, como barragens de concreto (Mostafei *et al.*, 2023). Wang *et al.* (2019) realizaram um estudo empírico com suporte da metodologia de avaliação de impactos de ciclo de vida para determinar uma taxa de administração de resíduos da construção na China. Zulcão *et al.* (2020) determinaram o potencial de aquecimento global e a energia incorporada pela ACV do uso do resíduo da produção de rochas ornamentais em compósitos cimentícios, considerando toda a aquisição das matérias-primas e a manufatura do cimento e do resíduo de rocha. Um exemplo do uso da ACV em compósitos com agregado reciclado de concreto foi relatado por Imtiaz *et al.* (2021), que fizeram uma análise comparativa do uso de ARCO e de geopolímeros no impacto ambiental de concreto, separadamente e em conjunto.

Nesse ponto, é importante destacar que a utilização de agregados reciclados não garante soluções para o impacto ambiental do setor da construção civil (Angulo, 2000). Conforme Angulo (2000) destaca, o uso do material em compósitos cimentícios pode causar poucas diferenças diretas na avaliação dos impactos do ciclo de vida, quando comparado com o uso de agregado natural, quando analisado somente em quesitos do processo de produção do agregado. Conforme Dias *et al.* (2022), o método da ACV é uma boa alternativa para avaliar as possíveis vantagens e desvantagens do uso de agregados reciclados no mercado da construção civil, no contexto da geração de impactos ambientais, como consumo de materiais, água e energia; geração de emissões sólidas, líquidas e gasosas; mudanças no uso do solo e outras mais que não são relatadas em inventários de agregados naturais. Dias *et al.* (2022) destacam no artigo a escassez de dados sobre produção de agregado reciclado em comparação com agregado natural, o que pode influenciar negativamente nas análises.

Assim, é importante desenvolver estudos que abordem diversos aspectos da produção, beneficiamento e uso de agregado reciclado de concreto na construção civil, pois, conforme relata Paz (2020), o impacto do uso de ARCO como material de construção pode se mostrar menor do que o impacto da gestão tradicional do resíduo em aterros. A autora propôs um inventário de ciclo de vida da produção de agregados

reciclados, conforme Figura 5. Na análise desse material, existem alguns aspectos que merecem atenção, como a delimitação da fronteira do sistema que considera apenas o processo de beneficiamento do agregado reciclado, indo de portão à portão; os fatores culturais de cada região, que influenciam na quantidade de cada componente do agregado e nas características do transporte (Paz, 2020). As categorias de impactos ambientais que foram analisadas no estudo de Paz (2020) englobam potencial de aquecimento global e consumo de energia, considerando consumo de água, energia e combustíveis na produção do agregado reciclado, analisando como resultados dos impactos a geração de resíduo, as emissões gasosas, e a água e energia incorporadas.

Figura 5 – Exemplo de diagrama de inventário de ACV para agregado reciclado da construção civil



Fonte: Paz (2020).

Sobre a determinação dos impactos do ciclo de vida do uso de ARCO, um dado importante é a emissão de gases do efeito estufa (GEEs), que aumenta o potencial de aquecimento global (PAG) do produto, principalmente pelo fato do setor da construção ter um impacto significativo nesse quesito (Paz, 2020). Conforme

Mostafei *et al.* (2023), uma ferramenta que serve de auxílio na determinação da emissão de gases do efeito estufa (GEEs) é a técnica de pegada de carbono, que vem sendo amplamente utilizada em conjunto com ACV. Esse método se refere a quantificação de toda a geração de efluentes gasosos na produção de um material que contribuem com a destruição da camada de ozônio e consequente aumento do impacto ambiental; onde essas informações são traduzidas em um único valor de CO₂ equivalente, conforme o fator de impacto ao meio ambiente de cada gás, relacionado na Tabela 1 (FGVCES, 2016).

Tabela 1 – Fatores de potencial de aquecimento global em 100 anos de gases do efeito estufa

Gás	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SF ₆	R-410 ^a
PAG 100	1	25	298	22800	16

Fonte: Adaptado de FGVCES (2016).

Com relação à determinação de pegada de carbono, o setor da construção civil é uma das indústrias com maiores impactos na emissão de GEE's, principalmente por conta do uso do cimento Portland, pois pode emitir até uma tonelada de CO₂ para a atmosfera na produção de uma tonelada do aglomerante (Imtiaz *et al.*, 2021). Segundo Li *et al.* (2024), isso acontece devido ao próprio processo de descarbonatação da rocha calcária durante a calcinação do material, que faz com que o dióxido de carbono presente nos cristais de calcita da rocha base da produção de cimento se dissocie. Além disso, Li *et al.* (2024) também relatam a extensa utilização de energia no processo produtivo, vinda principalmente da queima de carvão e outros combustíveis fósseis nos fornos rotativos da indústria cimenteira.

Nesse contexto, algumas pesquisas utilizam métodos simplificados de ACV para determinação de pegada de carbono de materiais cimentícios, como o caso de Imtiaz *et al.* (2021), que utilizaram valores específicos de emissão de GEEs em kg/m³ de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e agregado reciclado usado em concretos com agregado reciclado e geopoliméricos. Outro exemplo é o de Dobrovolski (2022), que desenvolveu um método empírico para cálculo de pegada de carbono de ARCO por meio da ACV, a partir da modelagem do uso de materiais e equipamentos em cada etapa do ciclo de vida do ARCO, em conjunto com as emissões de cada processo levantado. Mais informações sobre esse método estão descritas no Apêndice A. É importante destacar nesse ponto que a metodologia de

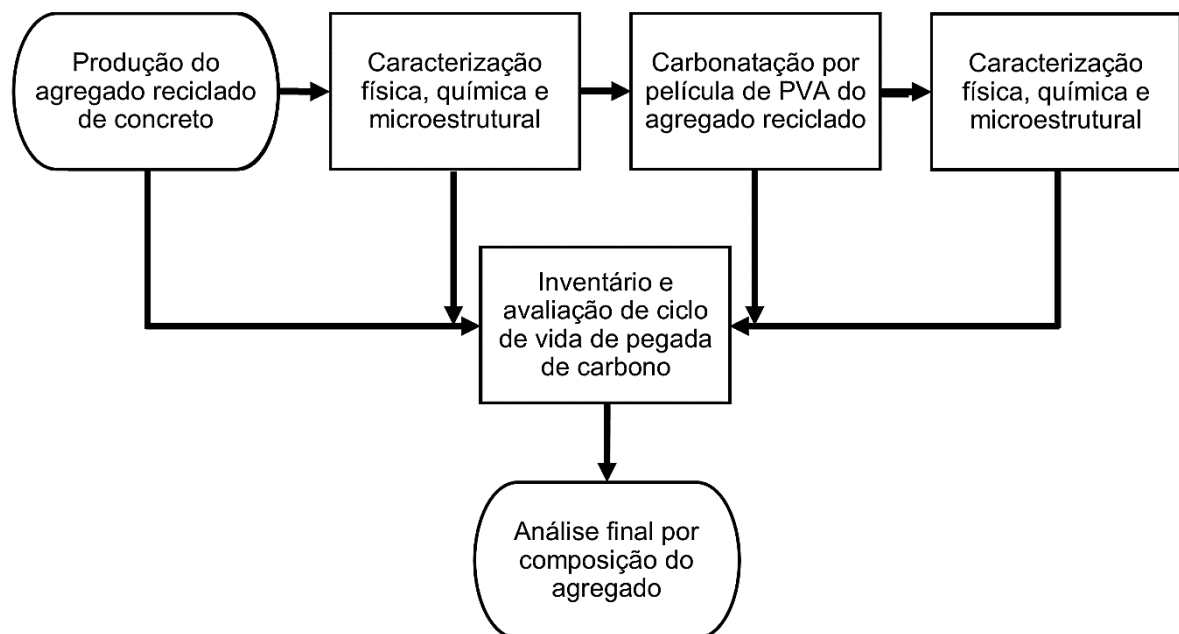
determinação de pegada de carbono está intimamente ligada a uma das utilizações da ACV, no que diz respeito a determinação do potencial de aquecimento global.

Assim, as análises de pegada de carbono de agregado reciclado vêm se mostrando cada vez mais importantes, principalmente no cenário da utilização de beneficiamentos que relatam a possibilidade de sequestro de carbono, como carbonatação acelerada com uso de película de PVA. Essa análise pode ser útil para determinar a real eficiência ambiental do beneficiamento do ARCO, evidenciando mais uma vantagem do uso desse material na construção civil, além do fato do próprio beneficiamento promover melhorias técnicas no agregado. No próximo capítulo, será identificada a metodologia para o estudo da capacidade de mitigação da pegada de carbono por meio da ACV do potencial de aquecimento global do agregado reciclado de concreto tratado com película de PVA

3 METODOLOGIA

O objetivo dessa pesquisa é quantificar a capacidade de mitigação da pegada de carbono de agregado reciclado de concreto tratado por carbonatação acelerada por meio da película de PVA. Para isso, foi utilizada a metodologia de avaliação de ciclo de vida com enfoque no potencial de aquecimento global do material antes e depois do tratamento. Também foram necessários ensaios de caracterização física, química e microestrutural, a serem descritos a seguir, para auxílio nas análises de pegada de carbono. O fluxograma da Figura 6 apresenta o desenvolvimento desses experimentos e das análises numéricas, identificando o prosseguimento das etapas utilizado na construção desta pesquisa.

Figura 6 – Fluxograma metodológico do estudo do ARCO na mitigação da pegada de carbono



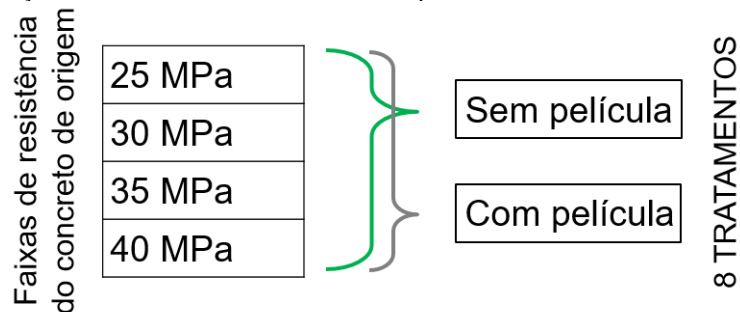
Fonte: A autora (2025).

3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO

A análise desse estudo foi feita a partir da relação entre características do agregado reciclado de concreto com a sua capacidade de sequestro de carbono, conforme as especificações de variáveis da Figura 7. Assim, uma das variáveis independentes de estudo é a resistência do concreto de origem desse agregado, informação que foi utilizada nesse estudo para determinar características do agregado relacionadas com o consumo de cimento, agregados e relação água/aglomerante.

Para essa variável, foram utilizados valores que caracterizam edificações de pequeno a médio porte, ou até mesmo estruturas que demandem resistências maiores, como no caso de estações de tratamento de água e esgoto; por meio de faixas representativas de resistência condizentes com as recomendações da NBR 6118:2023 (ABNT,2023), variando entre 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa.

Figura 7 – Especificação das variáveis de estudo e respectivos tratamentos.



Fonte: A autora (2025).

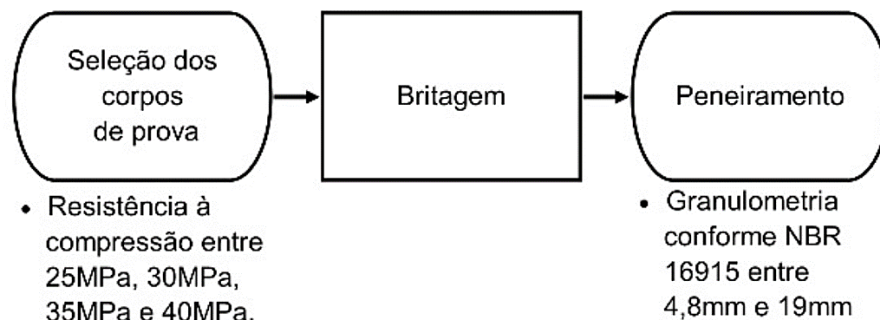
A outra variável independente do estudo é o tratamento do agregado reciclado com o PVA para promoção do sequestro de carbono, a partir do qual foram analisadas as características do agregado e suas emissões de GEEs antes e depois da aplicação da película de PVA. Essas características e emissões do agregado foram analisadas como variáveis dependentes, dentre elas a presença e o preenchimento dos poros, identificado por meio de absorção e massa específica do material, e a composição físico-química dos materiais antes e depois do tratamento, identificada pela composição de óxidos, cristais, pela presença de argamassa aderida ao grão e de carbonato de cálcio na amostra. Assim, o sequestro de carbono pela película de PVA é identificado pelo aumento na quantidade de carbonato de cálcio da amostra e consequente compensação na emissão de CO₂, onde será avaliada a influência dos materiais que compõem o concreto de origem e da argamassa aderida ao grão nesse processo. Ao final, foram adotados oito tratamentos, especificados na.

3.2 MATERIAIS

O agregado reciclado analisado foi produzido nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Ponta Grossa, conforme fluxograma apresentado na Figura 8. Para isso, como fonte de concreto para o ARCO, foram utilizados corpos de prova de 10x20cm, advindos do serviço de

controle tecnológico de concreto prestado pelo laboratório à comunidade externa, separados em faixas de resistência variando de 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa, conforme resultados obtidos de ensaios de resistência à compressão. Para realização da britagem, foi utilizado o triturador de entulho CSM TE 2 Trifásico 220V, apresentado na Figura 9. Além disso, foi realizado o peneiramento manual para seleção da granulometria, de modo que o ARCO tivesse uma granulometria na faixa entre 4,8mm e 19mm. A seleção da granulometria visou a produção de um agregado graúdo que tivesse maior área superficial, para aumentar a área passível de carbonatação. Para todas as amostragens do material, foram seguidas as recomendações do processo de quarteamento da NBR 16915:2021 (ABNT, 2021a). Para o tratamento do agregado reciclado, foi empregado o PVA da marca Rea-Tech, com 86-89% de hidrólise, conforme metodologia que será descrita no subitem à seguir.

Figura 8 – Fluxograma do processo de produção do agregado reciclado de concreto



Fonte: A autora (2025).

Figura 9 – Britador móvel elétrico de mandíbula CSM TE 2 no Laboratório de Materiais de Construção da UEPG

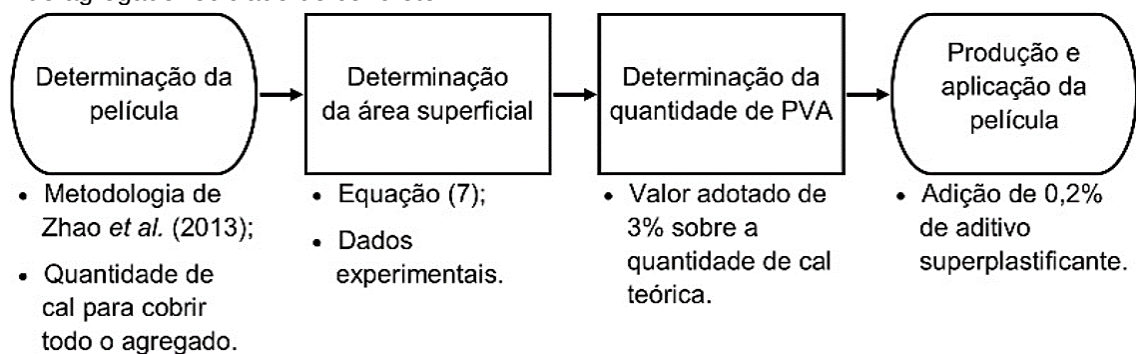


Fonte: A autora (2025).

3.3 BENEFICIAMENTO POR CARBONATAÇÃO ACELERADA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Para promoção do sequestro de carbono, foi realizado um tratamento de carbonatação acelerada por meio de uma película de PVA, conforme fluxograma apresentado na Figura 10. Para isso, foi utilizada uma metodologia semelhante ao abordado por Zhao *et al.* (2013) e Dobrovolski e Kruger (2021), em que a quantidade de PVA para a execução dessa película foi determinado em função da quantidade de aglomerante necessário para cobrir toda a área superficial do agregado analisado, garantindo que houvesse indícios de presença de carbonatação, ou seja, redução do pH superficial. A Figura 11 apresenta o teste de indicador de pH superficial com aspersão de solução de fenolftaleína, conforme recomendações de Ding *et al.* (2023), com ponto de viragem na região de pH de 8,2 a 10, tanto do agregado *in natura* (Figura 4a), quanto do agregado com película de PVA (Figura 4b). Na Figura 11 é possível notar que o agregado tratado com a película indicou um pH superficial menor do que o agregado de referência (já que em materiais com pH maior que 10, a fenolftaleína se torna rosada) o que pode sugerir a presença de carbonatação (Kaliyavaradhan; Ling, 2017).

Figura 10 – Fluxograma do processo de beneficiamento por carbonatação acelerada com película de PVA do agregado reciclado de concreto



Fonte: A autora (2025).

Figura 11 – Indicação de pH por aspersão de solução de fenolftaleína em agregado reciclado *in natura* e tratado por película de PVA



Fonte: A autora (2025).

Nota: A) Agregado *in natura*, indicando $\text{pH} > 10$ e B) Agregado tratado com película de PVA, indicando $\text{pH} < 10$.

A determinação da quantidade de PVA utilizado, calculado em função da massa teórica de aglomerante utilizada para cobrir toda a área superficial do agregado, no caso a cal, foi realizada conforme expresso nas Equações (7), (8), (9) e (10). O processo de cálculo foi adaptado do método apresentado por Zhao *et al.* (2013), que determina a quantidade de cimento para que fosse realizado o envelopamento completo do agregado de RCD. Na Equação (7), a área superficial de todo agregado da faixa de resistência em análise é calculada com base na área superficial de um agregado de referência sem a película, tomando como base valores de massa específica seca e saturada de 1852,4g e 188,8g, respectivamente, e área superficial de 675cm², conforme estudo realizado anteriormente a este, especificado em Dobrovolski e Kruger (2021). Para o cálculo da quantidade de PVA a ser utilizada no tratamento, valores entre 2% e 4% em massa do aglomerante são comumente encontrados na literatura, lembrando que o processo de carbonatação com essa película não depende do tempo de exposição do agregado ao PVA, e sim das condições de produção da película (Mansur; Mansur, 2011; Thong; Teo; Ng, 2016; Wang *et al.*, 2023). A partir de análises preliminares de alteração de pH e trabalhabilidade na aplicação, foi adotado um valor de 3% de PVA em relação à massa de cal calculada pelo método de Zhao *et al.* (2013). As variáveis utilizadas no cálculo estão descritas a seguir:

- a) S_{FR} é a área superficial calculada de todo agregado da faixa de resistência, em cm^2 ;
- b) m_{FR} é a massa seca total de agregado da faixa de resistência, em g;
- c) a_{FR} é a absorção do agregado da faixa de resistência, em %, determinada conforme NBR 16917:2021 (ABNT, 2021b);
- d) S_0 é a área superficial do agregado reciclado de concreto de referência, em cm^2 ;
- e) m_{sec_0} é a massa seca total de agregado de concreto de referência, em g;
- f) m_{sat_0} é a massa saturada total de agregado de concreto de referência, em g.

$$S_{FR} = \frac{m_{FR}(a_{FR} - 1) \cdot S_0}{m_{sat_0} - m_{sec_0}} \quad (7)$$

Para esse cálculo, os valores adotados de absorção dos agregados reciclados foram 3,748% para 25 MPa, 5,480% para 30MPa, 4,388% para 35 MPa e 4,592% para 40 MPa; obtidos a partir do ensaio de absorção conforme NBR 16917:2021 (ABNT, 2021b). Assim, para o prosseguimento do cálculo teórico da quantidade de materiais da solução de aglomerante para cobrir a área superficial do agregado, foram utilizadas as Equações (8), (9) e (10). É importante salientar que a cal foi utilizada somente para finalidades de cálculo, para a determinação da quantidade de PVA, principalmente por ter um peso específico menor do que outros aglomerantes, o que diminuiria a quantidade de materiais na mistura. A quantidade de cal obtida pela metodologia não foi adicionada na mistura, ou seja, as análises foram realizadas somente com solução de PVA e superplastificante. As variáveis utilizadas no cálculo estão detalhadas a seguir:

- a) C é a massa de cal, em g;
- b) x é a relação água/cal;
- c) ρ_c é a massa específica da cal, em g/cm^3 ;
- d) ρ_{H_2O} é a massa específica da água, em g/cm^3 ;
- e) ρ_s é massa específica calculada da solução de água com cal, em g/cm^3 ;
- f) t é a espessura da película que irá cobrir o ARCO, em mm;

- g) m_c é a massa calculada da cal que seria necessária para que a solução cobrisse todo o agregado, em g;
- h) S_{FR} é a área superficial do agregado da faixa de resistência analisada, calculada anteriormente.

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{x \cdot C}{\rho_{H_2O}} = 1 \quad (8)$$

$$\rho_s = (C + x \cdot C) / 1 \quad (9)$$

$$t = \frac{m_c}{S_{FR}} \rho_s \quad (10)$$

Para esses cálculos, foram adotadas para a película uma espessura t de 0,035mm e uma relação água/aglomerante de 0,8, conforme Zhao *et al.* (2013). Assim, na execução do tratamento com a película de PVA, foram utilizados os quantitativos de materiais apresentados na Tabela 2. É importante destacar novamente que os valores da quantidade de PVA a ser utilizada na solução estão intimamente relacionados à absorção do ARCO. As características do PVA empregado foram relatadas no item “3.2. Materiais”, e para melhorar a trabalhabilidade da solução foi utilizado um superplastificante a base de carboxilato, adicionado a uma taxa de 0,2% sobre a massa da cal calculada m_c . Assim, foi realizada a mistura de todo o PVA com a quantidade de água determinada, e realizado o aquecimento gradual até 100°C em estufa, até completa dissolução do PVA. Em seguida, foi realizada a correção da quantidade de água da solução que evaporou durante o processo de aquecimento, e nesse momento, foi adicionado o aditivo. Por fim, a solução foi aplicada no agregado reciclado, e este foi seco ao ar até secagem ao toque da superfície dos grãos.

Tabela 2 – Quantidade de materiais utilizados para a produção da película de PVA no ARCO conforme resistência do concreto de origem

Faixa de resistência	Massa da amostra seca (kg)	Quantidade de PVA (g)	Quantidade de água (g)	Quantidade de aditivo (g)
25 MPa	15,000	48,043	1281,135	3,203
30 MPa		70,206	1872,165	4,680
35 MPa		56,242	1499,782	3,749
40 MPa		58,804	1568,109	3,920

Fonte: A autora (2025).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Para a caracterização do agregado reciclado, foi tomado como base o fluxograma apresentado na Figura 12. É importante destacar aqui que alguns dos ensaios foram repetidos antes e depois do processo de aplicação da película de PVA, para determinar a eficácia do processo na melhoria de características do ARCO, bem como a influência dessas características determinadas a partir dos ensaios no processo de formação de carbonato de cálcio.

Figura 12 – Fluxograma do processo de caracterização do agregado reciclado de concreto em estudo, antes e depois do tratamento de carbonatação com película de PVA



Fonte: A autora (2025).

3.4.1 Caracterização física do agregado reciclado de concreto

Para caracterização física geral do material antes e depois do tratamento com PVA, foram realizados os ensaios de determinação da composição granulométrica conforme NBR 17054:2022 (ABNT, 2022a), determinação da absorção de água conforme NBR 16917:2021 (ABNT, 2021b) e da massa unitária e índice de vazios, conforme NBR 16972:2021 (ABNT, 2021c), nas Laboratório de Materiais de Construção da UEPG. Também foi realizado o ensaio de determinação da massa específica por picnômetro de gás Hélio por meio do Quantachrome Ultrapycnometer 1000, no Laboratório de Engenharia de Materiais da UEPG. Esses ensaios visam identificar se há colmatação dos poros, pela presença de carbonato de cálcio na amostra após o tratamento com PVA. Todas as análises foram realizadas em quintuplicata, com exceção da determinação da área específica, que foi realizada em triplicata, e os resultados foram analisados estatisticamente, para identificação de diferenças significativas nas características físicas do material antes e depois da aplicação da película de PVA. Para os dados com distribuição normal, foi realizado o

teste T bilateral para dados pareados, com significância de 5%, e nos dados sem distribuição normal, foi realizado do teste de Wilcoxon, também com significância de 5%.

3.4.2 Caracterização química do agregado reciclado de concreto

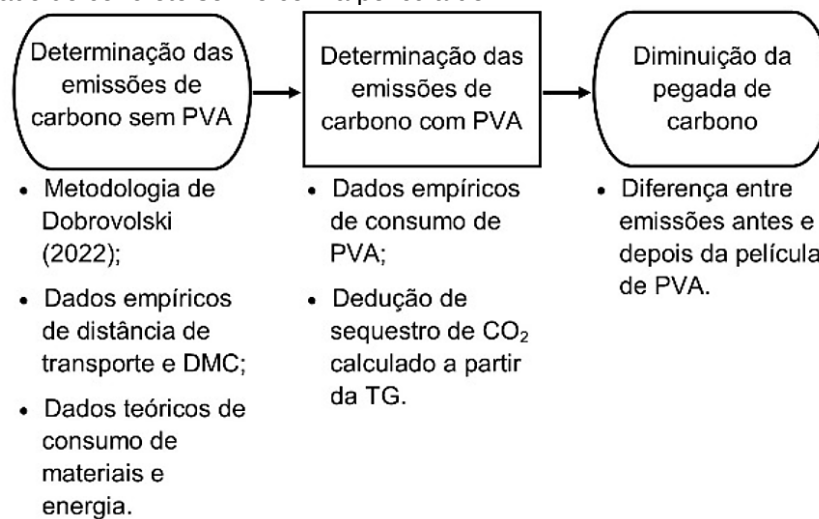
Para caracterização das espécies químicas e mineralógicas presentes no ARCO *in natura* e após o processo de carbonatação, foram realizados os ensaios de fluorescência de raios X (FRX), com o espectrômetro EDX-700 da Shimadzu no Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa; e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), operando com radiação de 15kV, nas dependências do Complexo de Laboratórios Multiusuários da UEPG. Também foram realizados os ensaios de difração de raios X (DRX), com o difratômetro Ultima IV da Rigaku em análise contínua, do intervalo de varredura de 5° a 75°, com passo de 0,02°, à 30°/min, onde a radiação adotada foi de 30 kV/10 mA; e de análise termogravimétrica de perda de massa (TG/DTG), com o equipamento de análise térmica TGA-50 da Shimadzu no Laboratório de Engenharia de Alimentos, com atmosfera de nitrogênio em um fluxo de 50 ml/min, com aquecimento até 1000°C a uma taxa de 10°C/min, no Laboratório de Engenharia de Alimentos da UEPG. Os ensaios citados contribuem para a determinação da quantidade de carbonato de cálcio na amostra.

Por fim, também foi realizado o ensaio de teor de argamassa aderida (TAA), conforme metodologia relatada por Kruger (2021). Assim, em cada faixa de resistência foram selecionadas amostras do agregado reciclado não tratado com a película de PVA de 50 g por granulometria, variando entre 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm. Elas foram secas em estufa, e para a determinação da argamassa aderida, as amostras foram submersas em 50 ml de uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 1,0 mol, por 7 dias. Após esse período, foi realizada a lavagem das amostras sobre um par de peneiras de 4,75 mm para retenção das partículas de agregado natural gráudo, respectivamente. Por fim, esse material retido nas peneiras durante a lavagem, foi seco em estufa, e novamente foi determinada sua massa, para verificação do percentual de agregado gráudo, agregado miúdo e pasta de cimento na composição do agregado reciclado analisado.

3.5 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Para a análise do impacto ambiental do sequestro de carbono do agregado reciclado com a película de PVA, foi utilizada a metodologia da avaliação de ciclo de vida conforme as especificações da NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b), a partir do fluxograma apresentado na Figura 13. Para o correto direcionamento da análise, foi elaborado o Quadro 2, que identifica as principais informações da ACV em questão. Em resumo, por meio dessa ACV foi analisado a quantidade de carbono sequestrado durante o tratamento com a película de PVA, em comparação com valores de emissão de GEEs para a produção do agregado reciclado. O referente fluxograma de ciclo de vida está apresentado na Figura 14, onde são apresentadas duas fronteiras do sistema, referente as análises de pegada de carbono antes e depois do tratamento do agregado reciclado.

Figura 13 – Fluxograma do processo de determinação da pegada de carbono a partir da ACV do agregado reciclado de concreto sem e com a película de PVA



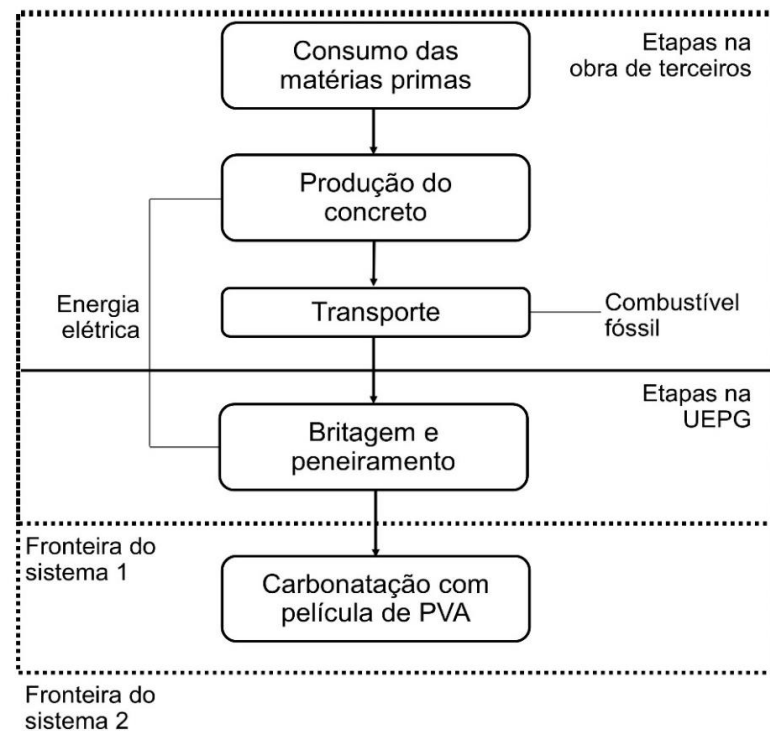
Fonte: A autora (2025).

Quadro 2 – Ficha catalográfica de produto para ACV do ARCO em estudo

Etapa	Sub-Etapa	Consideração	Conteúdo
Definição do objetivo e escopo	Objetivo do estudo	Aplicação	Dissertação de mestrado para obtenção da captura de CO ₂ de ARCO tratado com PVA
		Público-alvo	Comunidade acadêmica
	Escopo do estudo	Sistema de produto	Produção do concreto e do ARCO
		Funções do sistema	Material reciclado para uso na construção
		Unidade funcional	Metro cúbico de agregado seco
		Fronteira do sistema	Berço à portão
		Alocação	Não se aplica
		Categoria, metodologia e interpretação de impacto	Inventário de ciclo de vida, focado em emissão de GEEs e pegada de carbono
		Requisitos de dados	Obtenção de dados por meio do método elaborado por Dobrovolski (2022).
		Pressupostos	Padronização da emissão direta de GEEs e de emissões indiretas de consumo de energia
		Limitações	Carência de dados locais
		Tipo e formato de relatório	Capítulo de dissertação de mestrado, abordando valores quantitativos
Análise de inventário de ciclo de vida	Coleta de dados	Entradas de energia e matéria-prima	Obtenção de dados do método de Dobrovolski (2022), dentro da fronteira do sistema de uso dos equipamentos
		Produtos	Agregado reciclado de concreto
		Emissões atmosféricas, para água e solo	Emissão de gases do efeito estufa e consequente pegada de carbono

Fonte: A autora (2025).

Figura 14 – Ciclo de vida do agregado reciclado de concreto em estudo, antes e depois do tratamento de carbonatação com película de PVA



Fonte: A autora (2025).

Para a determinação da quantidade de carbono emitido durante a produção do agregado reciclado, foi utilizado uma adaptação do método elaborado por Dobrovolski (2022), utilizando-se da Equação (11) para determinar o valor de emissões equivalentes de CO_2 da produção de 1m^3 de agregado reciclado, chamada de $E_{\text{CO}_2\text{eq}}$. Essa emissão equivalente de carbono é um valor que traduz todas as emissões de gases do efeito estufa, em uma informação única, que se refere a pegada de carbono de determinado material. Na referida adaptação, foram considerados valores alternativos de emissão equivalente de CO_2 durante o transporte do material e durante o processamento do resíduo, que se adequassem as especificações desse estudo, conforme o processo descrito no Apêndice A. Os dados utilizados no cálculo de pegada de carbono do ARCO para as emissões de GEEs devido ao consumo médio de materiais para produção do concreto por faixa de resistência estão apresentados na Tabela 3, considerando valores de bibliografia de concretos produzidos com agregado natural e cimento tipo CP II-F-32 em laboratório. Além disso, para a determinação da pegada de carbono após a aplicação da película de PVA, foi adicionado ao valor final de emissão de CO_2 equivalente uma taxa referente ao consumo do PVA, com valor de $8,681 \cdot 10^{-5}$ kg de CO_2 equivalente a cada grama de

PVA utilizado (Fu *et al.*, 2019). Os fatores utilizados neste cálculo estão especificados a seguir:

- E_{CO_2eq} é a emissão equivalente de CO₂ calculada para a produção do agregado reciclado de concreto, em kg de CO₂ equivalente/m³ de ARCO
- E_{CO_2c} é a emissão equivalente de CO₂ devido ao consumo de materiais para a produção do concreto da faixa de resistência, em kg de CO₂ equivalente/m³ de concreto, conforme Tabela 3;
- S_T distância máxima de transporte dos corpos de prova de concreto até a UEPG, em km, usada para o cálculo das emissões equivalentes de CO₂ do transporte do material;
- d_m diâmetro máximo característico final do ARCO produzido, em mm, usado para o cálculo das emissões equivalentes de CO₂ da britagem do concreto;
- A última parcela fixa se refere as emissões equivalentes de CO₂ do uso dos equipamentos da central de usinagem para a produção do concreto.

$$E_{CO_2eq(KgCO_2eq/m^3)} = E_{CO_2c} + 0,22603 \cdot S_T + 1,5714 \cdot e^{-0,026d_m} + 0,31512 \quad (11)$$

Tabela 3 – Parâmetros de emissão de GEE's dos materiais constituintes do concreto em função da resistência do concreto demolido

Resistência do concreto - f_{ck} (MPa)	Traço (Cimento:Areia: Brita)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Relação água/cimento	Emissão GEE's - E_{CO_2c} (kgCO ₂ eq/m ³)
$25 \leq f_{ck} < 30$	1:3,28:3,68	298,366±38,083	0,618±0,047	3285,156
$30 \leq f_{ck} < 35$	1:2,23:2,94	368,577±61,410	0,547±0,079	3927,226
$35 \leq f_{ck} < 40$	1:2,18:2,34	422,593±76,319	0,473±0,038	4447,194
$40 \leq f_{ck}$	1:1,60:2,23	448,010±48,354	0,441±0,046	4653,883

Fonte: Adaptado de Barboza e Bastos (2008); Bastos (2002); Buest Neto (2006); Dobrovolski (2022); Figueiredo *et al.* (2014); Leite (2001); Levy (2001); Moura (2000); Pereira, Medeiros e Levy (2012); Ricci, Pereira e Akasaki (2017); Silveira *et al.* (2016).

Para a determinação da quantidade de Portlandita e de carbonato de cálcio presentes nas amostras antes e após a aplicação da película de PVA, o modelo a ser empregado é o que utiliza análise termogravimétrica, apresentado nas Equações (12) e (13), respectivamente. Primeiramente, para o cálculo da quantidade de Portlandita

presente na amostra, conforme a Equação (12), utiliza-se a razão entre o valor de perda de massa por dissociação de água de composição do Ca(OH)_2 que ocorre entre 300°C e 480°C, e o valor da massa da amostra seca do ensaio, determinada aos 105°C. Para a determinação total de Portlandita, é necessária a multiplicação desta razão entre massas pela razão entre o peso molecular do Ca(OH)_2 (74,09g/mol) e o peso molecular da água (18,01g/mol). Já para o cálculo da quantidade de calcita, conforme Equação (13)(14, é utilizada a razão entre a perda de massa por dissociação do CO_2 do CaCO_3 que ocorre entre 550°C e 850°C, e a massa seca da amostra. Esse valor é multiplicado pela razão entre o peso molecular da calcita (100,09g/mol) e o peso molecular do CO_2 (44,01g/mol). A representação gráfica desses processos de volatilização e dissociação de compostos que ocorrem em compósitos cimentícios por meio do ensaio de termogravimetria está apresentada na Figura 15 (Ding *et al.*, 2023).

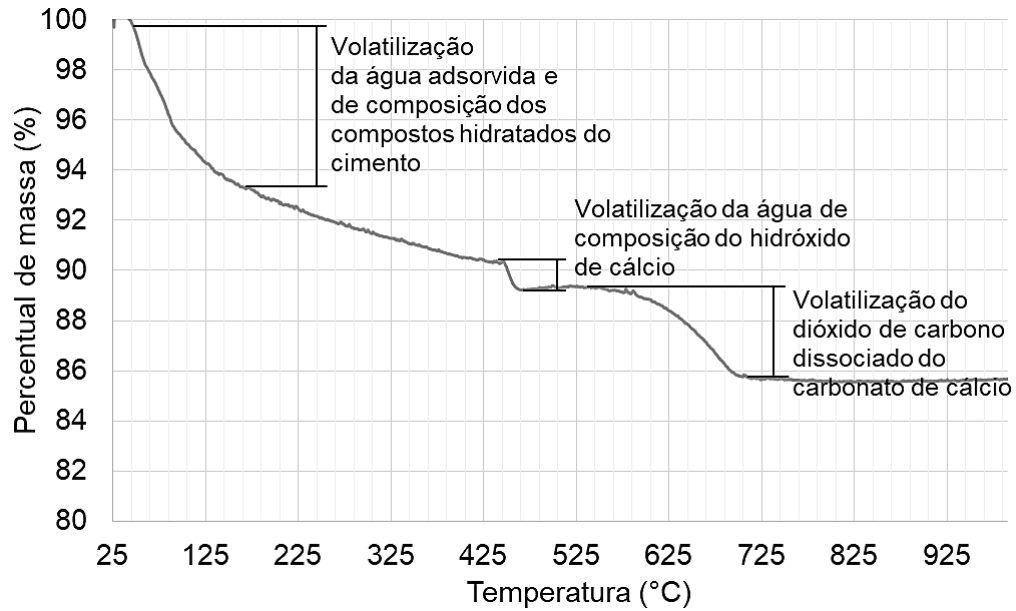
As variáveis utilizadas nos dois processos de cálculo estão detalhadas a seguir:

- a) Ca(OH)_2 é a quantidade de Portlandita que compõe a amostra, em %;
- b) ΔM_{CH_2O} é a perda de massa da amostra entre 300°C e 480°C, em g;
- c) M_s é a massa seca da amostra, determinada aos 105°C, em g;
- d) CaCO_3 é a quantidade de carbonato de cálcio que compõe a amostra, em %;
- e) ΔM_{CO_2} é a perda de massa da amostra entre 550°C e 850°C, em g.

$$\text{Ca(OH)}_2(\%) = \left(\frac{\Delta M_{CH_2O} \cdot 74,09 / 18,01}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

$$\text{CaCO}_3(\%) = \left(\frac{\Delta M_{CO_2} \cdot 100,09 / 44,01}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

Figura 15 – Análise dos processos de volatilização e dissociação que ocorrem no agregado reciclado de concreto durante a termogravimetria



Fonte: Adaptado de Li e Unluer (2025) e Zajac *et al.* (2025).

Assim, para a determinação do carbono sequestrado pelo agregado reciclado com o tratamento com película de PVA, foi utilizado o modelo também a partir dos resultados de análise termogravimétrica da Figura 15, conforme a Equação (14), a quantidade total de CO_2 capturado vem da diferença em grama de CO_2/m^3 da amostra antes e depois da aplicação da película de PVA. Para determinar esta quantidade de dióxido de carbono capturado, primeiramente deve ser realizado o cálculo da taxa de CO_2 que compõe a amostra antes e depois do processo de aplicação do tratamento com a película de PVA, calculada pela razão entre a perda de massa por dissociação do CO_2 ΔM_{CO_2} , e a massa da amostra seca M_s , informações também utilizadas na determinação da presença de calcita relatada anteriormente. Ao final, essa taxa de CO_2 presente na amostra em g/g será determinado em termos de g/m^3 de agregado reciclado, para que esse dado possa ser incluído na pegada de carbono do ARCO tratado. Para isso, a taxa de CO_2 em g/g precisa ser multiplicada pela massa específica em kg/m^3 do agregado reciclado antes e após o processo de carbonatação com película de PVA, determinadas conforme as especificações do item “3.4.1 Caracterização física do agregado reciclado de concreto”. Os fatores utilizados no cálculo de sequestro de carbono estão especificados a seguir:

- g) $\text{CO}_{2\text{cap}}$ é o sequestro de carbono calculado, promovido pelo tratamento com película de PVA à 3%, em kgCO_2/m^3 de ARCO carbonatado;

- h) $\Delta M_{CO_2 0}$ é a perda de massa da amostra entre 550°C e 850°C antes da carbonatação com película de PVA à 3%, em g;
- i) M_{S_0} é a massa seca da amostra antes da carbonatação com película de PVA à 3%, determinada aos 105°C, em g;
- j) ρ_0 é a massa específica do ARCO antes da carbonatação com película de PVA à 3%, em kg/m³;
- k) $\Delta M_{CO_2 P}$ é a perda de massa da amostra entre 550°C e 850°C depois da carbonatação com película de PVA à 3%, em g;
- l) M_{S_P} é a massa seca da amostra antes da carbonatação com película de PVA à 3%, determinada aos 105°C, em g;
- m) ρ_P é a massa específica do ARCO depois da carbonatação com película de PVA à 3%, em kg/m³.

$$CO_{2Cap}(KgCO_2/m^3) = \left[\left(\frac{\Delta M_{CO_2 0}}{M_{S_0}} \right) \cdot \rho_0 \right] - \left[\left(\frac{\Delta M_{CO_2 P}}{M_{S_P}} \right) \cdot \rho_P \right] \quad (14)$$

Ao final do estudo, para a determinação do valor final de emissão de GEEs após a aplicação da película de PVA, ou seja, o valor final de pegada de carbono, o resultado de captura de CO₂ obtido anteriormente será deduzido do valor determinado na aplicação do método adaptado de Dobrovolski (2022), com a adição da emissão equivalente do uso de PVA, identificando se houveram alterações com a proposição de carbonatação utilizando película de PVA em agregado reciclado de concreto. Tanto o cálculo de pegada de carbono, quanto o cálculo de captura de CO₂, serão realizados separadamente para cada faixa de resistência analisada, verificando se existem diferenças nas características físico-químicas e de composição em termos de materiais do concreto de origem, e se há influência dessas propriedades iniciais do agregado reciclado no percentual de carbono capturado pelo ARCO tratado com PVA à 3%, e se o desempenho do tratamento está de acordo com resultados de outras modalidades de carbonatação de compósitos cimentícios.

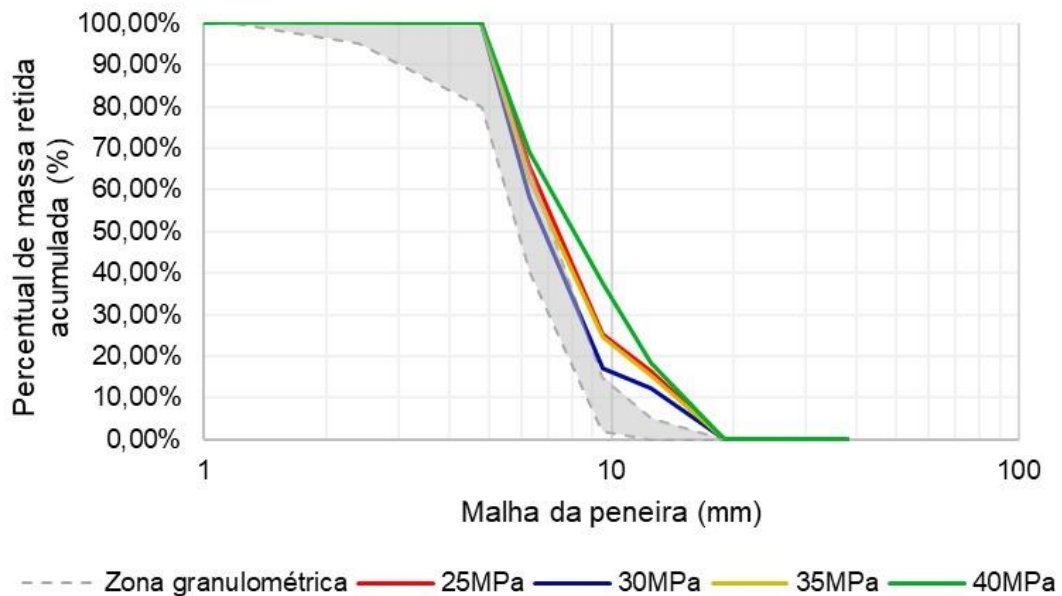
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

4.1.1 Caracterização física do agregado reciclado de concreto

Em um primeiro momento, foi realizada a caracterização física do agregado reciclado de concreto. A Figura 16 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados em estudo, onde é possível observar a influência da seleção da granulometria no processo de produção do agregado, gerando materiais com uma granulometria ligeiramente superior a zona granulométrica determinada pela NBR 7211:2022 para agregados enquadrados na faixa entre 4,75mm e 12,5mm (ABNT, 2022b), ou seja, uma quantidade maior de materiais com uma granulometria próxima de 9,5mm, assim como uma quantidade menor de materiais finos. É importante lembrar nesse ponto que foi realizado o peneiramento do agregado produzido, de modo que o material tivesse uma granulometria na faixa entre 4,8mm e 19mm

Figura 16 – Composição granulométrica do agregado reciclado de concreto em estudo



Fonte: A autora (2025).

Nota: A área sombreada se refere a zona granulométrica para agregado graúdo enquadrado na faixa entre 4,75mm e 12,5mm, conforme NBR 7211:2022 (ABNT, 2022b).

Outro ponto a ser destacado é que todos as diferentes faixas de resistência apresentaram granulometrias semelhantes, onde a diferença entre as composições granulométricas ficou em torno de 0,57%. Isso pode levar a variações mais discretas

de características físicas do ARCO, além de menores diferenciações entre as diferentes composições do agregado reciclado. Hubert *et al.* (2023) analisou um comportamento semelhante, onde não foram observadas diferenças significativas na composição granulométrica entre agregados reciclados oriundos de concretos com diferentes composições, apesar dos autores enfatizarem a grande produção de materiais pulverulentos, o que não acontece nesse estudo, devido ao processo de seleção granulométrica.

Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades físicas do agregado antes do processo de carbonatação acelerada com a película de PVA a 3%. Após o processamento do material, essas determinações foram repetidas, cujos dados também estão apresentados na mesma tabela. Sobre as características em si, é possível notar uma diminuição da absorção dos agregados, o que era esperado devido ao processo do tratamento com a película de PVA levar a impermeabilização da superfície. Esse processo também foi observado por Chadha *et al.* (2024), em que tanto agregados de menor diâmetro quanto de maior diâmetro apresentaram menor absorção após a aplicação de uma película de PVA de 0,3% e 0,5%, respectivamente.

Tabela 4 – Caracterização física do agregado reciclado de concreto sem e com a carbonatação com película de PVA

Faixa de resistência	Carbonatação com película de PVA	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)
25MPa	Sem	4,808±1,715 ^a	79,626±1,119 ^a	2,696±0,005 ^a
	Com	4,172±0,142 ^a	65,274±1,338 ^b	2,776±0,003 ^a
30MPa	Sem	4,889±0,974 ^b	78,620±1,490 ^c	2,563±0,002 ^b
	Com	5,210±1,249 ^b	69,658±2,436 ^d	2,615±0,002 ^b
35MPa	Sem	4,513±1,975 ^c	79,266±1,233 ^e	2,588±0,002 ^c
	Com	3,694±0,735 ^c	64,068±3,242 ^e	2,556±0,005 ^c
40MPa	Sem	4,161±0,279 ^d	78,148±1,511 ^f	2,561±0,001 ^d
	Com	3,588±0,074 ^e	67,066±0,073 ^g	2,638±0,003 ^e

Fonte: A autora (2025).

Nota: Os índices que acompanham os dados numéricos se referem as análises estatísticas entre os valores antes e depois da aplicação da película de PVA. Índices iguais se referem a valores que não diferem estatisticamente, já índices diferentes se referem a valores com diferenças estatisticamente significativas.

Chadha *et al.* (2024) também observaram um aumento na massa específica do agregado, conforme também visto nesse estudo, devido ao preenchimento dos vazios com a solução de PVA. Em processos que visam a carbonatação, como em Ding *et al.* (2023), onde foi realizada a carbonatação do ARCO com câmara, foram observados resultados semelhantes ao dessa pesquisa. Com relação à análise estatísticas das propriedades foram realizados testes T em sua maioria, e foi utilizado o teste de Wilcoxon nos dados onde não foi observada uma distribuição normal das amostras, conforme os índices apresentados em conjunto com os dados da Tabela 4. Logo, é possível notar que a faixa de resistência com mais mudanças significativas na sua caracterização física foram os agregados oriundos de concreto com resistência de 40MPa. As demais faixas de resistência obtiveram mudanças significativas somente na análise de índice de vazios obtido a partir da massa unitária, o que pode ser explicado pelo fato da película de PVA ter formado alguns aglomerados de grãos visíveis a olho nu, diminuindo a quantidade de vazios entre partículas.

Assim, é possível observar que as mudanças nas propriedades do ARCO após o processo de carbonatação foram sutis, tendo pouco impacto na sua massa específica e absorção. Essas mudanças sutis também foram notadas no estudo de Chadha *et al.* (2024) e Li e Unluer (2025), onde este se refere a um estudo do potencial de carbonatação de agregados reciclados de concreto submersos em água do mar, por meio de fluxo de CO₂ gasoso. Além disso, alguns valores não apresentaram um comportamento semelhante aos demais dados relacionados as mesmas propriedades, como a absorção do ARCO de 30MPa e a massa específica do ARCO de 35MPa. Isso pode ocorrer pelo fato de que os concretos de resistências intermediárias possuem composições mais variadas, conforme foi possível notar nos desvios padrões de consumo de cimento e relação água/cimento apresentados na Tabela 3, o que sugere que as propriedades desse tipo de ARCO possam ter maior variabilidade do que em comparação aos agregados com composições menos variantes.

4.1.2 Caracterização química do agregado reciclado de concreto

A caracterização dos compostos químicos dos agregados reciclados de concreto foi realizada em uma primeira etapa sem a aplicação da película de PVA a 3%. Nesse momento, foram realizados os ensaios de fluorescência e raios X,

apresentados na Tabela 5. Por meio do apresentado, é possível notar uma forte presença de óxidos de cálcio, o que sugere a possibilidade de sequestro de carbono por parte dos agregados reciclado de concreto de todas as faixas de resistência, já que esse é um composto que faz parte do processo de formação de carbonato de cálcio, além também da presença de silicatos e aluminatos de cálcio, que também colaboram com esse processo. Além disso, apenas no agregado oriundo de concreto de 25MPa foram identificados óxidos de magnésio (1,768%). É importante lembrar que essas análises não foram repetidas para o ARCO após a aplicação da solução de PVA, já que não se espera a mudança de óxidos perceptíveis na análise de FRX.

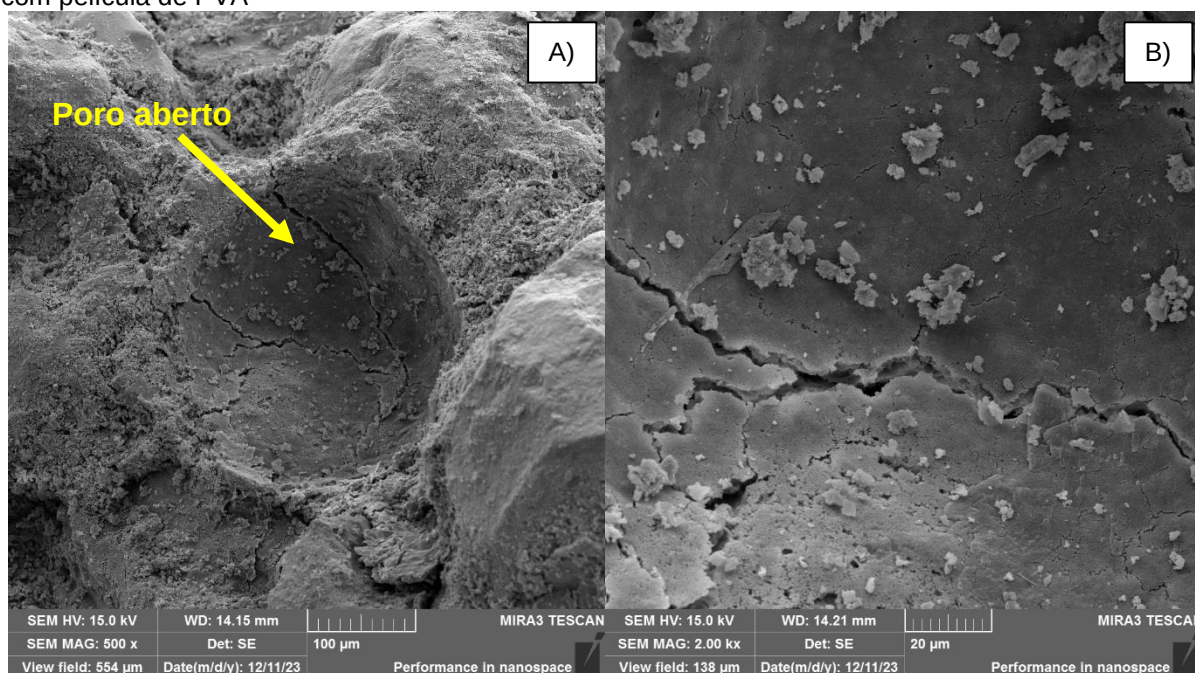
Tabela 5 – Fluorescência de raios X do agregado reciclado de concreto em estudo sem a carbonatação com película de PVA

Faixa de resistência	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
25MPa	36,873	36,851	11,311	7,965	2,847
30MPa	35,611	45,601	9,126	4,525	3,429
35MPa	35,315	44,449	9,981	5,020	3,118
40MPa	31,937	46,072	9,594	7,788	2,115

Fonte: A autora (2025).

Além dessa caracterização por FRX, também foi realizada a determinação da composição mineralógica do agregado reciclado de concreto antes e após a carbonatação acelerada com película de PVA a 3%, por meio da microscopia eletrônica de varredura. Na Figura 17 estão apresentadas imagens de MEV do agregado reciclado *in natura*. A partir delas, é possível notar a presença de poros e fissuras superficiais, com poucas formações cristalinas no seu interior. Boa parte da superfície das amostras é formada por pasta de cimento com característica amorfa e formações cristalinas de C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) e Portlandita, advindas do próprio processo de hidratação do cimento. Formações semelhantes foram vistas por Li e Unluer (2025).

Figura 17 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA

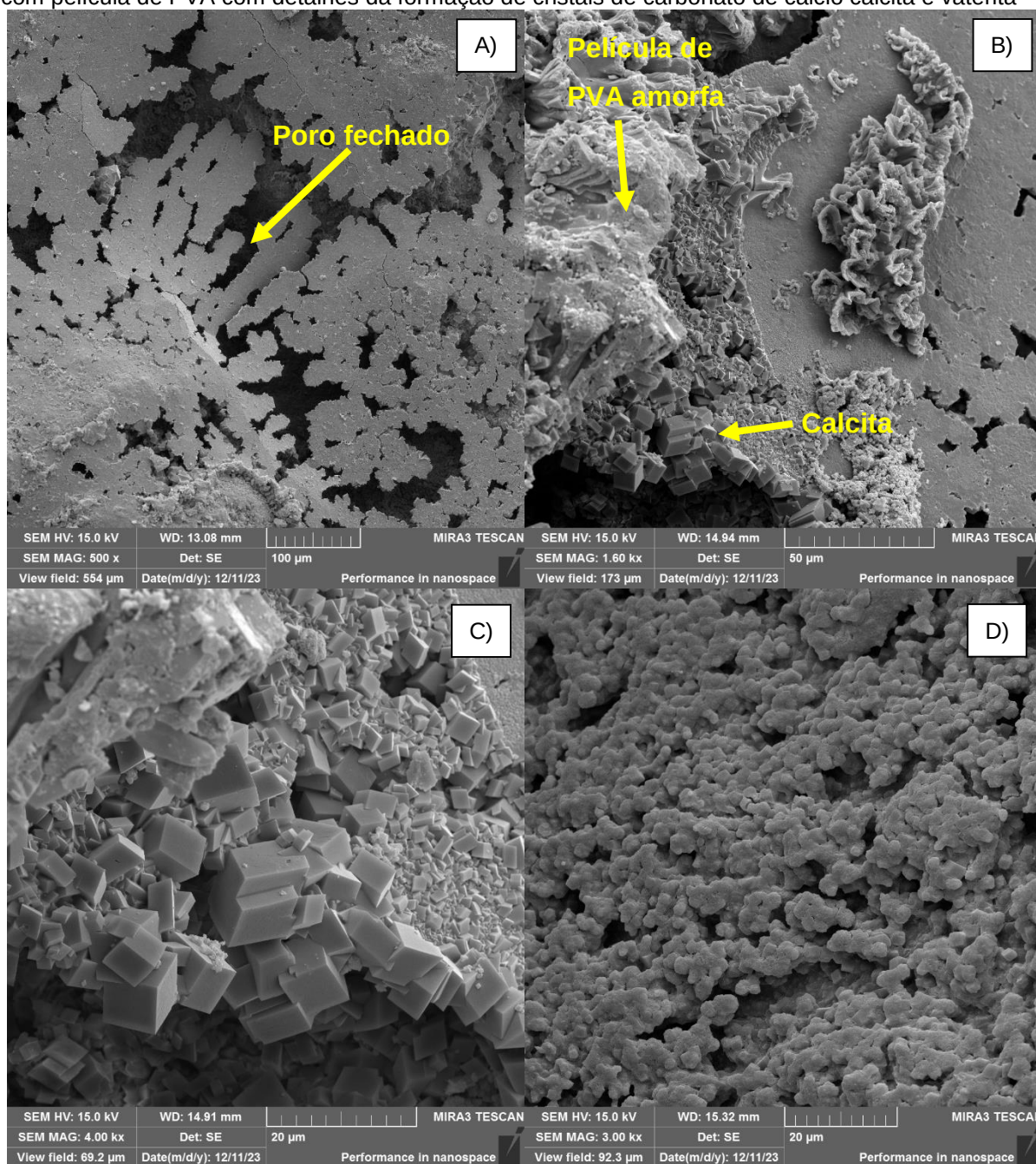


Fonte: A autora (2024).

Nota: A) Magnificação de 500 vezes; B) Magnificação de 2000 vezes.

Já na Figura 18 estão apresentadas imagens de microscopia eletrônica de varredura do produto com a película de PVA, onde é possível notar uma extensa formação de cristais na sua superfície em comparação ao agregado antes do tratamento, na sua maioria carbonato de cálcio, apresentando também áreas de tamponamento de poros. Na própria Figura 18 estão detalhadas formações de carbonato de cálcio tipo calcita e vaterita presentes no agregado após a aplicação da película de PVA. Essas formações sugerem o aumento da presença de CO_2 sequestrado na amostra em comparação aos agregados *in natura*. Ding *et al.* (2023) e Li e Unluer (2025) relatam formações semelhantes de cristais de calcita em agregado reciclado de concreto submetidos a carbonatação por fluxo de CO_2 gasoso. No caso do presente estudo, foram notadas formações cristalinas com tamanhos em torno de $10\mu\text{m}$ (Figura 18c), maiores do que as vistas por Ding *et al.* (2023) e Li e Unluer (2025), o que indica boa cristalinidade.

Figura 18 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado reciclado de concreto com a carbonatação com película de PVA com detalhes da formação de cristais de carbonato de cálcio calcita e vaterita



Fonte: A autora (2025).

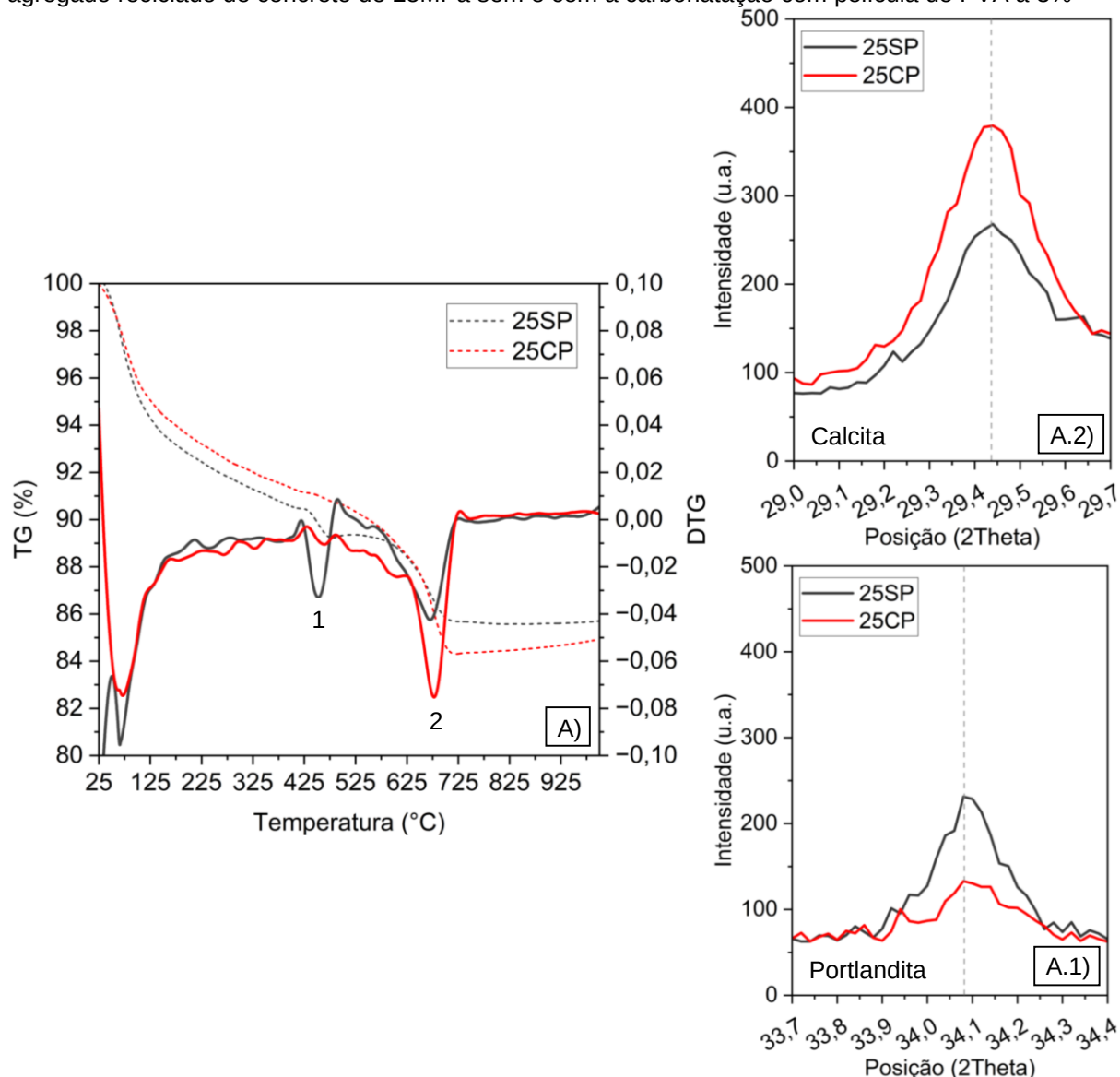
Nota: A) Magnificação de 500 vezes; B) Magnificação de 1600 vezes; C) Formação de calcita com magnificação de 4000 vezes; D) Formação de vaterita com magnificação de 3000 vezes.

Além da análise de MEV, também foram realizados os ensaios de difração de raios X e de termogravimetria para identificação de presença de cristais de carbonato de cálcio e Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na amostra de ARCO antes e depois da aplicação da película de PVA. Nessa pesquisa, foram destacadas a alteração na presença de Portlandita, pelo pico de volatilização da água de hidratação do composto, entre 300°C

e 480°C (caracterizado como pico “1”), bem como presença de calcita, pelo pico de dissociação de CO₂ do composto, entre 550°C e 850°C (caracterizado como pico “2”). A partir desses valores, com auxílio da derivada dos resultados, chamada de DTG, é possível identificar variação na presença dos compostos, pelo aumento ou diminuição do pico da DTG. Além disso, na análise de DRX, foram utilizados somente os picos característicos de calcita (29,44°) e Portlandita (34,07°), para redução de interferências devido à presença de outros compostos cristalinos na amostra de agregado reciclado de concreto (Li; Unluer, 2025). A análise foi realizada de forma semelhante à DTG, onde o aumento ou diminuição do pico indica maior ou menor presença do cristal, respectivamente.

Na Figura 19, referente à amostra de agregado de 25MPa antes e após a aplicação do PVA, é possível notar um aumento da presença de cristais de calcita, devido ao aumento do tamanho do pico característico do cristal no DRX, à 29,4°, bem como aumento da perda de massa no ponto 2 da DTG. Além disso, também é possível notar a diminuição do pico de Portlandita do DRX à 34,1° e diminuição da perda de massa no ponto 1 da DTG. Isso sugere que após a aplicação da solução de PVA, parte do hidróxido de cálcio foi consumido para a formação de carbonato de cálcio, conforme as reações de carbonatação já relatadas na metodologia. Conforme os resultados da TG, a composição da amostra com relação à calcita foi de 9,17% para 14,70% após a aplicação da película de PVA, e com relação à Portlandita, foi de 10,14% para 6,26%, valores esses calculados a partir das Equações (13) e (12), respectivamente. É importante destacar nesse ponto que como foram utilizados apenas alguns dos picos característicos para a análise de DRX, pode ser que haja uma certa discrepância com relação aos resultados da TG.

Figura 19 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 25MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%



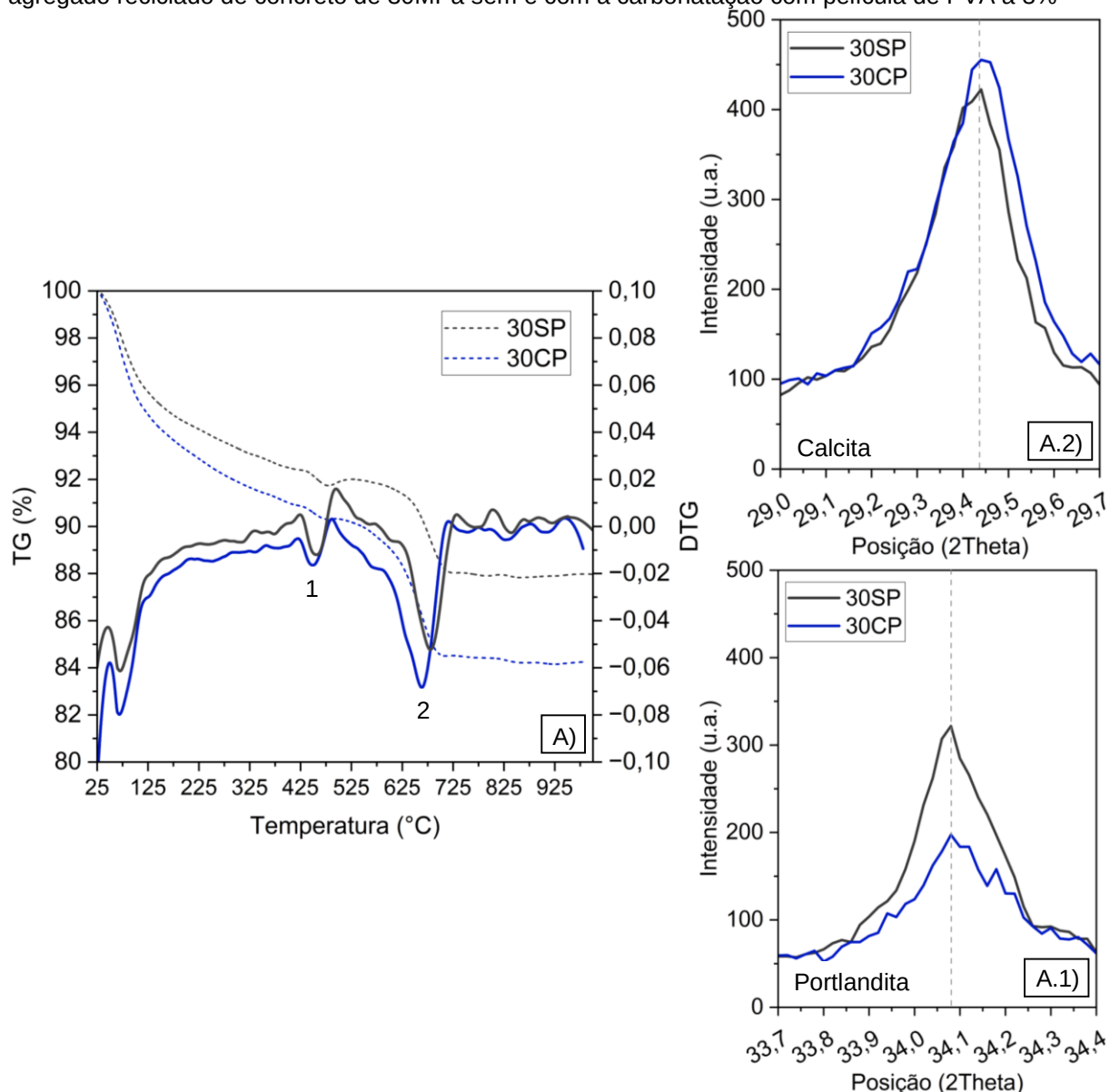
Fonte: A autora (2025).

Nota: 25 SP – agregado reciclado de concreto de 25MPa sem película de PVA à 3%; 25 CP – agregado reciclado de concreto de 25MPa com película de PVA à 3%. A) Análise de perda de massa por TG (linha pontilhada) e DTG (linha cheia), onde 1 representa a volatilização de água de hidratação do Ca(OH)_2 , e 2 representa a dissociação de CO_2 do CaCO_3 ; A.2) Pico característico de DRX da Calcita (CaCO_3) à 29,44°; A.1) Pico característico de DRX da Portlandita (Ca(OH)_2) à 34,07°.

Na amostra de 30MPa, representada pela análise termogravimétrica e pelos picos característicos de DRX da Figura 20, também é possível observar o aumento da presença dos cristais de calcita tanto no DRX quanto na TG, apesar de ser observado na TG um aumento discreto na presença de cristais de Portlandita, indo de 6,66% para 6,82% da composição cristalina da amostra. Um resultado semelhante de aumento de Portlandita com o processo de carbonatação foi observado por Li e Unluer (2025). No resultado de DRX, foi possível identificar a diminuição da presença de

Ca(OH)_2 . Em comparação aos resultados do agregado oriundo de concretos de 25MPa, essa mudança na composição da amostra foi menor, onde a calcita aumentou de 9,58% para 14,60% das formações cristalinas do agregado após a aplicação da película de PVA.

Figura 20 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 30MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%



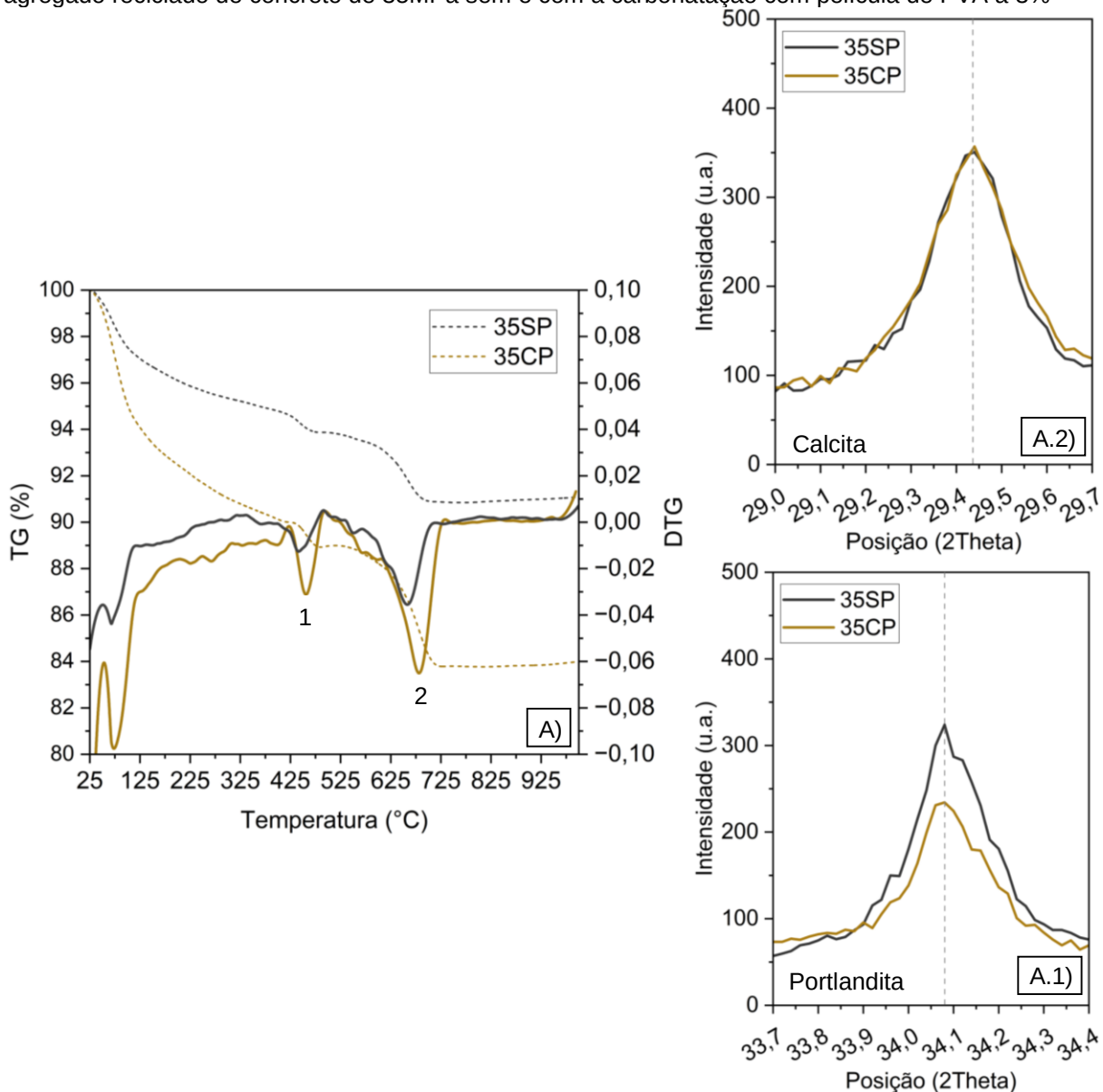
Fonte: A autora (2025).

Nota: 30SP – agregado reciclado de concreto de 30MPa sem película de PVA à 3%; 30CP – agregado reciclado de concreto de 30MPa com película de PVA à 3%. A) Análise de perda de massa por TG (linha pontilhada) e DTG (linha cheia), onde 1 representa a volatilização de água de hidratação do Ca(OH)_2 , e 2 representa a dissociação de CO_2 do CaCO_3 ; A.2) Pico característico de DRX da Calcita (CaCO_3) à $29,44^\circ$; A.1) Pico característico de DRX da Portlandita (Ca(OH)_2) à $34,07^\circ$.

Já na amostra de 35MPa, conforme a Figura 21, é possível identificar um comportamento semelhante ao da amostra de 30MPa, na qual, a partir dos resultados

da análise termogravimétrica, nota-se um aumento da presença de calcita, acompanhado também de um aumento na presença de Portlandita. Já nos resultados de DRX, essa Portlandita teve uma diminuição, apesar de não haver mudança significativa na presença de calcita. Conforme a análise da DTG, a presença de cristais de Calcita foi de 6,92% para 12,30% da composição cristalina da amostra, e de Portlandita foi de 6,08% para 10,00%, após a aplicação da solução de PVA.

Figura 21 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto de 35MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%

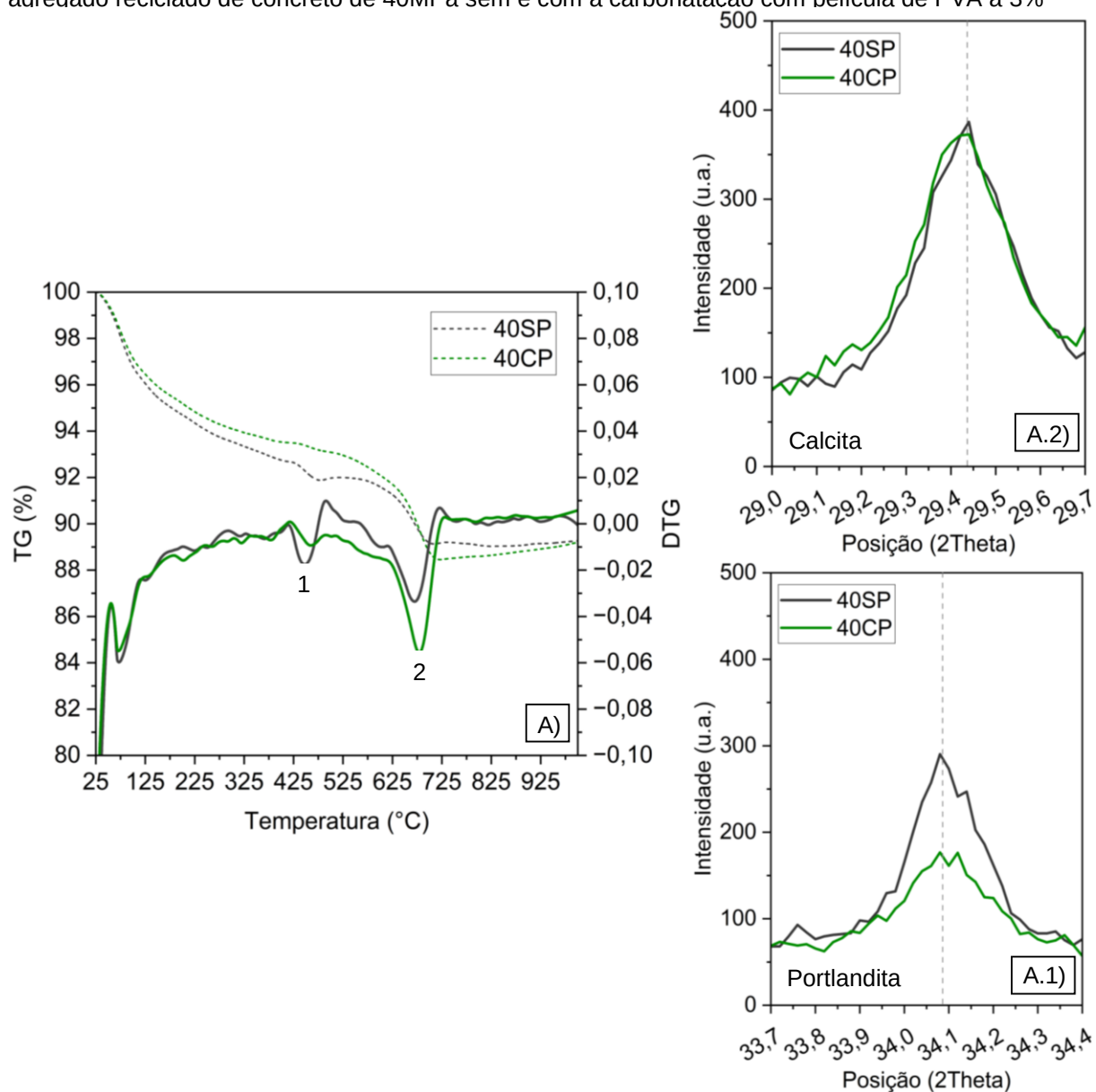


Fonte: A autora (2025).

Nota: 35SP – agregado reciclado de concreto de 35MPa sem película de PVA à 3%; 35CP – agregado reciclado de concreto de 35MPa com película de PVA à 3%. A) Análise de perda de massa por TG (linha pontilhada) e DTG (linha cheia), onde 1 representa a volatilização de água de hidratação do Ca(OH)_2 , e 2 representa a dissociação de CO_2 do CaCO_3 ; A.2) Pico característico de DRX da Calcita (CaCO_3) à $29,44^\circ$; A.1) Pico característico de DRX da Portlandita (Ca(OH)_2) à $34,07^\circ$.

Por fim, na Figura 22 estão apresentados os resultados de TG e picos característicos de DRX das amostras de ARCO de 40MPa antes e após a aplicação da película de PVA. Nesse caso, o comportamento da curva de termogravimetria é semelhante ao da amostra de 25MPa, onde a composição da amostra com relação à Calcita foi de 6,91% para 10,29%, e a composição de Portlandita foi de 7,00% para 4,28%. O resultado de DRX evidencia a diminuição da presença de Ca(OH)_2 , apesar de não haverem mudanças significativas na presença de CaCO_3 .

Figura 22 – Análise de TG e DTG e picos característicos de CaCO_3 e de Ca(OH)_2 obtidos por DRX do adreagado reciclado de concreto de 40MPa sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%



Fonte: A autora (2025).

Nota: 40SP – agregado reciclado de concreto de 40MPa sem película de PVA à 3%; 40CP – agregado reciclado de concreto de 40MPa com película de PVA à 3%. A) Análise de perda de massa por TG (linha pontilhada) e DTG (linha cheia), onde 1 representa a volatilização de água de hidratação do

Ca(OH)_2 , e 2 representa a dissociação de CO_2 do CaCO_3 ; A.2) Pico característico de DRX da Calcita (CaCO_3) à 29,44°; A.1) Pico característico de DRX da Portlandita (Ca(OH)_2) à 34,07°.

Conforme foi possível notar, onde os dados obtidos a partir das análises estão sintetizados na Tabela 6, a diferenciação entre a presença de calcita e Portlandita antes e após a aplicação da PVA foi mais evidente no agregado oriundo de concretos com 25MPa, com um aumento de 60,36% da quantidade de CaCO_3 e redução de 38,28% da quantidade de Ca(OH)_2 nos ensaios de TG. Analisando em questão de características físicas, isso pode ter ocorrido devido ao fato de que nessas amostras foi possível notar uma maior porosidade (4,81%), conforme apresentado nos dados de absorção da Tabela 4, possibilitando mais espaço para formação do carbonato de cálcio dentro do agregado. Esse resultado de porosidade já era esperado, já que em concretos de menores resistências, devido à maior relação entre água e aglomerante, conforme apresentado na Tabela 3, há a formação de poros por conta da evaporação dessa água de mistura.

Tabela 6 – Síntese da presença de Portlandita, calcita e dióxido de carbono do agregado reciclado de concreto em estudo sem a carbonatação com película de PVA

Faixa de resistência	Carbonatação com película de PVA	Percentual composto por Portlandita do volume da amostra (%) ¹	Percentual composto por Calcita do volume da amostra (%) ²	Percentual composto por CO_2 do volume da amostra (%) ³
25MPa	Sem	10,14	9,17	4,030
	Com	6,26	14,70	6,462
30MPa	Sem	6,66	9,58	4,212
	Com	6,82	14,60	6,419
35MPa	Sem	6,08	6,92	3,041
	Com	10,00	12,30	5,407
40MPa	Sem	7,00	6,91	3,038
	Com	4,28	10,29	4,562

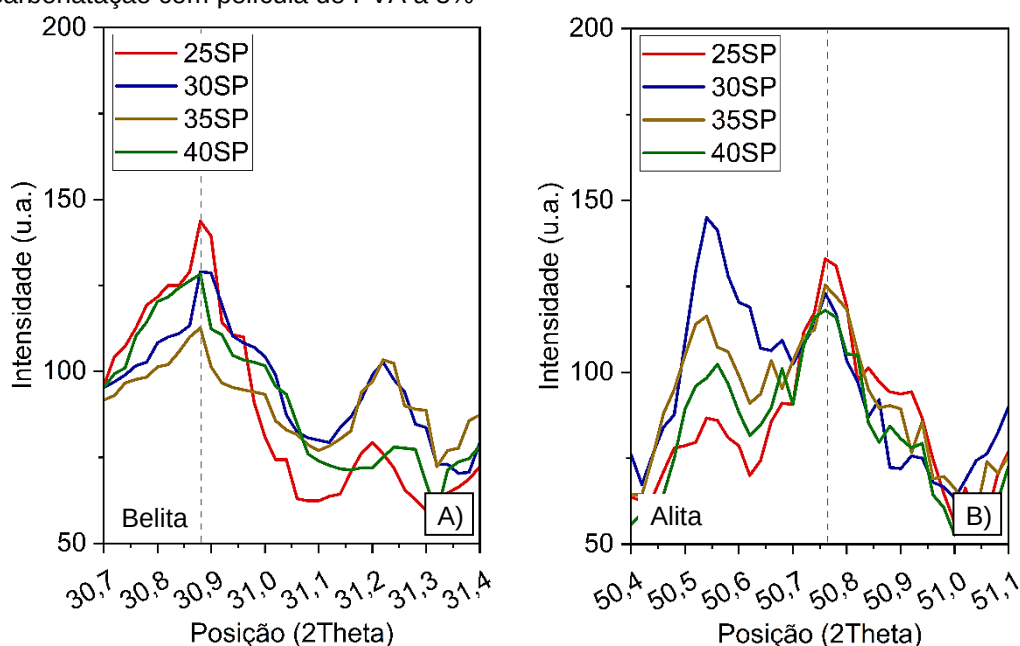
Fonte: A autora (2025).

Nota: “1” = Dados obtidos por meio da Equação (12); “2” = Dados obtidos por meio da Equação (13); “3” = Dados obtidos por meio da Equação (14).

Além disso, em uma análise da composição química, a baixa relação entre óxido de cálcio e silicatos ($\text{Ca/Si} < 1,5$), indicada pelos resultados de FRX da Tabela 5,

sugere que o processo de hidratação do cimento do concreto de origem desse agregado não foi completo (Zajac *et al.*, 2025), podendo indicar a presença de C_3S e C_2S na amostra, também observados em análise de picos de DRX (conforme valores de referência de Mariani *et al.*; 2019), conforme Figura 23. A Alita e a Belita também participam do processo de carbonatação, além dos compostos convencionais como Portlandita e C-S-H. O processo de carbonatação de C_3S e C_2S ocorre mais facilmente que para o C-S-H, devido a sua instabilidade química, principalmente quando o ambiente fornece água para a reação de carbonatação (Zajac *et al.*, 2025). Outro ponto também foi a presença de óxidos de magnésio nesse agregado identificadas na análise de FRX, apesar de ser em pequena proporção em comparação aos óxidos de cálcio, que não foi vista nos agregados de outras resistências, que também são responsáveis pela formação de compostos carbonatados (Li *et al.*, 2024).

Figura 23 – Picos característicos de Alita e Belita obtidos por DRX do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA à 3%



Fonte: A autora (2025).

Nota: 25SP – agregado reciclado de concreto de 25MPa sem película de PVA à 3%; 30SP – agregado reciclado de concreto de 30MPa sem película de PVA à 3%; 35SP – agregado reciclado de concreto de 35MPa sem película de PVA à 3%; 40SP – agregado reciclado de concreto de 40MPa sem película de PVA à 3%. A) Pico característico de DRX da Belita (C_2S) à 30,88°; B) Pico característico de DRX da Alita (C_3S) à 50,76°.

Já para o agregado oriundo de concretos com resistência de 40MPa, a redução da presença de Portlandita indicada pela análise termogravimétrica foi

semelhante ao dos agregados de 25MPa, em torno de 38,79%, conforme apresentado na Tabela 6. Porém, com uma relação entre Ca/Si maior pelo FRX, indicando maior formação de C-S-H, o composto prioritário para carbonatação foi a Portlandita, e não compostos anidros. Além disso, a porosidade do agregado de 40MPa se mostrou 13,44% menor do que a do agregado de 25MPa, conforme os dados da Tabela 4, indicando menos espaço para a formação de compostos carbonatado. Já para os agregados de resistência intermediária, a formação de calcita também foi intermediária, devido principalmente a menor presença de C_3S e C_2S na amostra, apesar de ainda serem observados compostos anidros na relação Ca/Si do FRX. Além disso, também houve menor presença de Portlandita observada no TG, indicando menos compostos passíveis de carbonatação, apesar de porosidade ser próxima à do agregado de 25MPa, em torno de 4,889% para 30MPa e 4,513% para 35MPa.

Por fim, na Tabela 7 estão apresentados os dados de teor de argamassa aderida do ARCO, em função de cada granulometria, que servirão como dados de apoio para determinação da pegada de carbono do ARCO antes e depois da carbonatação acelerada. Na tabela também está identificado o teor de argamassa aderida total do agregado reciclado, calculado em função da proporção de material de cada granulometria na quantidade total de agregado para cada uma das faixas de resistência, obtida a partir dos dados de curvas granulométricas apresentados no início dos resultados, na Figura 16. Nesse ponto, é importante lembrar que a resistência do concreto de origem do ARCO está intimamente relacionada à proporção entre aglomerante e agregados e a quantidade de água. Conforme a Tabela 3, apresentada ao final do item “3. metodologia”, os traços médios dos concretos podem ser resumidos (em termos de cimento: agregados - relação água/cimento) em: 1:6,96 - 0,62 para 25MPa; 1:5,17 – 0,55 para 30MPa; 1:4,52 – 0,47 para 35MPa; e 1:3,83 – 0,44 para 40MPa, onde é possível notar uma redução do uso de água e um aumento no consumo de cimento, conforme aumenta a resistência de origem do ARCO.

Tabela 7 – Teor de argamassa aderida do agregado reciclado de concreto em função da granulometria sem a carbonatação com película de PVA à 3%

Faixa de resistência	Granulometria (mm)	TAA por granulometria (%)	Quantidade de agregado por granulometria (%)	TAA total (%)
25MPa	6,3	52,91	15,60	33,91
	9,5	33,39	9,76	
	12,7	30,52	40,24	
	19	29,42	34,40	
30MPa	6,3	61,54	12,26	36,47
	9,5	46,66	4,72	
	12,7	31,73	41,42	
	19	32,65	41,60	
35MPa	6,3	59,78	15,45	37,09
	9,5	43,27	9,24	
	12,7	34,55	38,09	
	19	28,73	37,22	
40MPa	6,3	58,21	18,36	32,40
	9,5	28,21	19,05	
	12,7	26,73	31,76	
	19	25,85	30,83	

Fonte: A autora (2025).

A partir disso, foi possível observar durante a realização do ensaio e conforme os resultados da Tabela 7 que em agregados reciclados de concreto com menor resistência, ou seja, menor uso de cimento e maior utilização de agregados, há menor teor de argamassa aderida justamente por haver mais agregado graúdo em sua composição em comparação aos demais componentes. Já em resistências intermediárias, há um aumento na argamassa aderida ao grão. Isso pode ocorrer devido ao fato de que, o aumento do consumo de cimento e a diminuição do consumo de agregado leva ao aumento da formação de material pulverulento durante o processo de britagem do concreto. Já no caso das maiores resistências, com aumento expressivo do consumo de cimento, foi possível notar que a argamassa aderida era mais suscetível ao impacto do britador, ou seja, mais frágil, o que fazia com que porções maiores do material se desprendessem do agregado natural durante o

processo de britagem, em comparação ao material pulverulento que se desprendia do ARCO de menor resistência. Esse material composto apenas por argamassa que se desprendeu durante a britagem, foi selecionado no processo de peneiramento. Assim, o agregado submetido ao ensaio de teor de argamassa aderida também apresentou um menor resultado.

4.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Para o cálculo da pegada de carbono do agregado antes e depois do processo de carbonatação acelerada por película de PVA, para determinação da sua eficiência, foi utilizado o método adaptado de ACV proposto por Dobrovolski (2022), conforme relatado anteriormente. Para a utilização das equações, foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela 8, levando em conta a granulometria selecionada para o agregado, o teor de argamassa aderida, e a distância máxima de transporte dentro do município de Ponta Grossa/PR (Google, 2009) (local de origem dos corpos de prova utilizados para produção do ARCO). Os valores obtidos para os teores de cimento, areia e brita partiram das análises de traço padrão e TAA, apresentados na Tabela 3 e Tabela 7, respectivamente. A partir do valor de argamassa aderida ao grão do ARCO foi possível determinar a quantidade de cimento e a quantidade de areia presentes no agregado com base nas proporções desses materiais nos traços padrões de cada resistência presentes nas bibliografias, em percentual de volume. Conforme esses dados, a partir da Equação (11), foi possível determinar a pegada de carbono do agregado reciclado de concreto sem carbonatação com película de PVA, também apresentado na Tabela 8. Para o posterior cálculo das emissões advindas do consumo de PVA para o processo de carbonatação, foi adicionado o valor especificado na metodologia de $8,681 \cdot 10^{-5}$ kgCO₂eq/g de PVA, conforme a quantidade de PVA determinada para cada faixa de resistência apresentada na Tabela 2.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o cálculo da pegada de carbono pelo método numérico de ACV de Dobrovolski (2022) e emissão de CO₂ equivalente do agregado reciclado de concreto sem a carbonatação com película de PVA à 3%

Faixa de resistência	DMC (mm)	Percentual do volume de ARCO composto de cimento (%)	Percentual do volume do ARCO composto de areia (%)	Percentual do volume de ARCO composto de brita (%)	S _T (km)	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) sem aplicação da película de PVA
25MPa	19,0	7,92	25,99	66,09	18,9	7,637
30MPa		11,29	25,18	63,53		8,404
35MPa		11,66	25,43	62,91		8,516
40MPa		12,46	19,94	67,59		8,723

Fonte: A autora (2025).

Com relação aos resultados de pegada de carbono antes do tratamento do agregado reciclado por etapas da produção do ARCO, a maior taxa de emissão equivalente de CO₂ veio do transporte do concreto até o laboratório, com uma emissão de 4,272kgCO₂/m³ de agregado reciclado, correspondendo a praticamente metade das emissões, conforme é possível observar na Tabela 9 e na Tabela 10. Um resultado semelhante a esse foi observado por Dias *et al.* (2022), que comparam a pegada de carbono entre agregados naturais e agregados reciclado, e Yuan *et al.* (2024), que comparam a pegada de carbono antes e depois do processo de carbonatação de ARCO. Apesar de ser presente a análise de transporte dentro da ACV de agregado reciclado, é importante destacar que essa variável é muito sensível a localização, o que pode resultar em diferenças entre valores de pesquisas. Os demais componentes, em ordem da maior para a menor contribuição na pegada de carbono do ARCO, foram: consumo de cimento (média de 30,37%), britagem (média de 11,55%), equipamentos para produção do concreto (média de 3,80%), consumo de brita (média de 2,07%) e consumo de areia (média de 0,74%). Quando foi adicionado o consumo de PVA na contabilização de pegada de carbono, o seu valor de emissão equivalente de CO₂ correspondeu a 0,06% das emissões do agregado, sem considerar o sequestro de carbono gerado por essa utilização.

Tabela 9 – Proporção de emissão equivalente de CO₂ do ARCO por etapa de produção do agregado sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%, com relação à produção do concreto

Faixa de resistência	Carbonatação com película de PVA	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao consumo de cimento	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao consumo de areia	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao consumo de brita	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) do uso da central de dosagem
25MPa	Sem	1,858	0,0660	0,174	0,315
	Com				
30MPa	Sem	2,648	0,0640	0,168	
	Com				
35MPa	Sem	2,735	0,0646	0,166	
	Com				
40MPa	Sem	2,923	0,0507	0,178	
	Com				

Fonte: A autora (2025).

Nota: Os dados obtidos para emissão equivalente de CO₂ devido ao processo de produção do concreto de origem do ARCO não apresentaram diferenças após a contabilização do processo de carbonatação com película de PVA.

Tabela 10 – Proporção de emissão equivalente de CO₂ do ARCO por etapa de produção do agregado sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%, com relação ao transporte, britagem e película de PVA

Faixa de resistência	Carbonatação com película de PVA	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao transporte dos corpos de prova	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao uso do britador móvel elétrico	E_{CO_2eq} (KgCO _{2eq} /m ³) devido ao consumo de PVA
25MPa	Sem	4,272	0,959	-
	Com			0,00417
30MPa	Sem			-
	Com			0,00609
35MPa	Sem			-
	Com			0,00488
40MPa	Sem			-
	Com			0,00510

Fonte: A autora (2025).

Nota: Os dados obtidos para emissão equivalente de CO₂ devido ao transporte dos corpos de prova e ao uso do britador móvel elétrico não apresentaram diferenças após a contabilização do processo de carbonatação com película de PVA. “-” = Valor considerado como nulo.

Por fim, na Tabela 11 estão apresentados os dados de emissão de carbono do ARCO após o processo da carbonatação acelerada, considerando a composição do mesmo, o transporte do material, o processo de britagem e o consumo de PVA, em kgCO_2eq , a partir da equação proposta por Dobrovolski (2022). Ao final, estão apresentados os dados de emissão de CO_2 considerando a dedução dos valores de sequestro de carbono após a carbonatação com PVA, apresentados na última coluna da Tabela 12. A partir dos dados da Tabela 11, é possível notar uma diminuição média da pegada de carbono de agregado reciclado de concreto com aplicação de película de PVA de 0,65%. Pode ser identificado também que os concretos com menores resistências apresentaram as maiores reduções na pegada de carbono, sendo que o agregado de 25MPa obteve uma redução de 0,88% na pegada de carbono.

Tabela 11 – Pegada de carbono do ARCO sem e com a carbonatação com película de PVA à 3% em kg de CO_2 equivalente

Faixa de resistência	$E_{\text{CO}_2\text{eq}}$ ($\text{KgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$) com aplicação da película de PVA	$E_{\text{CO}_2\text{eq}}$ ($\text{KgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$) com sequestro de CO_2 por meio da película de PVA	Diminuição da pegada de carbono (kgCO_2/m^3) ¹
25MPa	7.641	7,487	0,0666
30MPa	8.410	8,279	0.0538
35MPa	8.521	8,383	0.0546
40MPa	8.728	8,639	0.0365

Fonte: A autora (2025).

Nota: “1” = A diminuição da pegada de carbono se refere a diferença entre pegada de carbono sem película de PVA e pegada de carbono após a contabilização do sequestro de carbono do tratamento com a película em conjunto com a emissão advinda do uso do PVA.

Tabela 12 – Presença de CO_2 no ARCO determinada por análise termogravimétrica sem e com a carbonatação com película de PVA à 3%

Faixa de resistência	Perda de massa por dissociação do CO_2 presente no CaCO_3 entre 500°C e 850°C (%)		Aumento do CO_2 na TG do ARCO após a carbonatação (g/g ARCO) ¹	Sequestro de CO_2 no ARCO (kgCO_2/m^3) ²
	Antes da carbonatação	Depois da carbonatação		
25MPa	4,030	6,462	0,0243	0,0707
30MPa	4,212	6,419	0,0221	0,0599
35MPa	3,041	5,407	0,0236	0,0595
40MPa	3,038	4,562	0,0149	0,0416

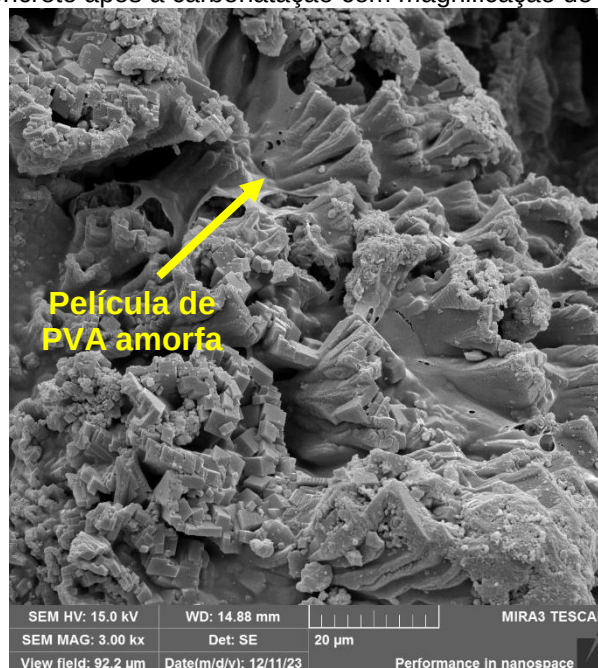
Fonte: A autora (2025)

Nota: “1” = Dados obtidos por meio da Equação (13); “2” = Dados obtidos por meio da Equação (14).

Conforme especificado anteriormente, na Tabela 12 estão apresentados os dados de captura de CO₂ do ARCO com a utilização da película de PVA observados na TG, por meio do aumento da dissociação do dióxido de carbono presente nos cristais de CaCO₃. Além disso, também estão apresentados os valores de aumento da quantidade de CO₂ por m³ de agregado reciclado, calculado com base nos valores de massa específica do agregado antes e depois da aplicação da película de PVA, apresentados na Tabela 4. Este resultado foi utilizado para o cálculo final da emissão equivalente de carbono do ARCO após a aplicação da película de PVA considerando o sequestro de CO₂, apresentado na Tabela 11. É possível notar que os valores obtidos nessa pesquisa para dissociação de CO₂ na TG são menores do que os observados na bibliografia (Ding *et al.*, 2023), o que indica que o PVA pode gerar sequestro de carbono, porém em quantidades menores do que metodologias convencionais, como os processos realizados por meio de câmara de carbonatação.

A diminuição da pegada de carbono mais evidente no ARCO de 25MPa, de 0,0666kgCO₂/m³ pode ser explicado pela maior presença de porosidade, além também da maior disponibilidade de Portlandita, silicatos e aluminatos de cálcio no agregado de menor resistência, conforme comprovado nas análises termogravimétricas e de FRX, o que aumenta o espaço e a quantidade de compostos passíveis de carbonatação. Logo, é importante destacar que os fatores que mais influenciaram no sequestro de carbono do agregado reciclado de concreto foram a sua porosidade e a composição química da argamassa aderida ao grão, não a quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo antigo. Um fato a ser destacado é que, conforme os resultados obtidos na análise termogravimétrica, o tratamento de agregado reciclado de concreto com película de PVA possui uma capacidade de captura de carbono maior do que o identificado nessa pesquisa, já que ainda existe a presença de Ca(OH)₂ nas amostras, bem como zonas onde o polímero não reagiu com a matriz cimentícia, conforme observado na Figura 24.

Figura 24 – Detalhe de microscopia eletrônica de varredura da presença de película de PVA amorfa no agregado reciclado de concreto após a carbonatação com magnificação de 3000 vezes



Fonte: A autora (2025).

Conforme Yuan *et al.* (2024), em uma análise de ciclo de vida de carbonatação industrial de agregado reciclado, o potencial de sequestro de carbono chega a 5kg de CO₂ a cada tonelada de ARCO. Wang *et al.* (2023) relataram uma redução na pegada de carbono de compósitos cimentícios submetidos tanto a carbonatação com câmara, quanto em carbonatação natural, de até 70,53%. Os resultados de sequestro de carbono observados nesse estudo, conforme os dados de diminuição de pegada de carbono da Tabela 12, convertidos de volume para massa do ARCO a partir da massa específica após a aplicação da película de PVA apresentada na Tabela 4, variaram entre 24,32kg de CO₂/ton de ARCO, 22,07kg de CO₂/ton de ARCO, 23,66kg de CO₂/ton de ARCO e 14,87kg de CO₂/ton de ARCO, para os agregados de 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa, respectivamente. Assim, o tratamento proposto nesse estudo, utilizando película de PVA para carbonatação de compósitos cimentícios, apresentou resultados promissores para sequestro de CO₂, e melhora nas características físicas do ARCO, possibilitando um cenário maior de utilização do agregado reciclado na construção civil, apesar da diminuição de pegada de carbono ainda estar abaixo do potencial observado nas análises.

5 CONCLUSÕES

Portanto, a partir da metodologia proposta e dos resultados apresentados, tomando como base as características físicas do agregado reciclado de concreto, sua capacidade de sequestro de carbono e a análise desse potencial por meio de estudos de avaliação de ciclo de vida, foi possível identificar que há capacidade de mitigar a pegada de carbono da construção civil por meio do uso de película de PVA em ARCO. Esse tratamento promoveu a formação de cristais de carbonato de cálcio por meio de compostos anidros e hidratados do cimento presentes na argamassa aderida ao grão do agregado reciclado, o que caracteriza o processo de captura de carbono em compósitos cimentícios.

Com relação à redução do impacto ambiental, os resultados de carbonatação de ARCO utilizando o PVA foram promissores, principalmente em questão de sequestro de carbono por quantidade de agregado reciclado, em comparação aos resultados de carbonatação utilizando câmaras encontrados na bibliografia, como os exemplos de Yuan *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2023). Também foi possível identificar melhorias técnicas do agregado reciclado, principalmente redução de absorção e aumento de massa específica, o que possibilita manter uma boa consistência do concreto utilizando ARCO em comparação aos concretos com agregado natural; assim, como a diminuição da pegada de carbono ter demonstrado maior potencial do que o observado nesse estudo. Essa melhoria técnica, aliada ao expressivo potencial de sequestro de CO₂ que o tratamento promove, justificam o uso da carbonatação com película de PVA como uma alternativa que viabiliza o uso do ARCO na construção civil, além de contribuir para a conservação do meio ambiente. Ao final, foi possível concluir que os agregados oriundos de concreto com 25MPa apresentaram o melhor desempenho com o uso da película de PVA, e os agregados de concreto com 40MPa apresentaram os piores resultados.

5.1 CAPTURA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

No que diz respeito a análise técnica do processo de carbonatação com película de PVA de agregado reciclado de concreto, foi possível observar uma redução na absorção e no índice de vazios, bem como um aumento na massa específica de todas as composições de agregados selecionadas para o estudo, ou

seja, 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa, após o tratamento com o PVA. Estatisticamente, os resultados mais expressivos foram os obtidos pelo ARCO de 40MPa, apesar dessa faixa de resistência apresentar a menor absorção e a maior massa específica antes do processo de carbonatação em comparação às demais, o que já era esperado devido ao menor uso de água na mistura desse concreto, o que gera menos formação de poros. Isso ocorre tanto pela formação de compostos carbonatados dentro dos poros quanto pela colmatação desses poros com a solução de PVA, e consequente impermeabilização do agregado.

Quanto a caracterização química e microestrutural, foi possível notar uma maior formação de compostos carbonatados no agregado oriundo de concreto de 25MPa, tanto nos resultados de difração de raios x quanto nos resultados de análise termogravimétrica, após a aplicação da película de PVA. Isso pode ter ocorrido pela maior quantidade de poros disponíveis para formação de cristais, conforme visto nos resultados de absorção, quanto pela maior disponibilidade de compostos para carbonatação, como Ca(OH)_2 , C-S-H, C_2S , C_3S , CaO e MgO. Nos demais agregados, foi possível notar menos presença de compostos a serem carbonatados e menos espaço para a formação desses compostos, devido principalmente a um processo de hidratação do cimento do concreto mais eficiente, conforme aumentava-se a disponibilidade de cimento e a resistência final dessa mistura.

Por fim, com relação à argamassa aderida ao grão do agregado reciclado, observou-se um comportamento de menor resultado para o ARCO de 25MPa, seguido de aumento para os agregados de 30MPa e 35MPa, seguido novamente por valores menores de TAA para o agregado de 40MPa. Assim como os resultados de formação de cristais de calcita, esse resultado também é influenciado pelo traço do concreto de origem, onde maior presença de agregados resultou em menos argamassa aderida, bem como maior presença de cimento gerava uma argamassa mais suscetível a britagem, formando grãos inteiros compostos apenas de argamassa. Ao final, pode-se concluir que a composição em proporção de materiais do concreto de origem do agregado reciclado foi o fator mais influente nas características físicas e no teor de argamassa aderida, bem como a composição química desse material a característica de maior influência na captura de carbono pelo ARCO tratado com película de PVA.

5.2 PEGADA DE CARBONO EM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Sobre a análise do impacto ambiental do agregado reciclado de concreto antes do processo de carbonatação com película de PVA, foi utilizada uma adaptação da metodologia de ACV e pegada de carbono proposta por Dobrovolski (2022), onde a maior pegada de carbono ficou para o ARCO de 40MPa, e o agregado de 25MPa obteve a menor pegada de carbono, conforme aumentavam os valores de argamassa aderida ao agregado reciclado e de consumo de cimento do concreto de origem. Nesses resultados, o maior impacto produzido pelo agregado veio do consumo de combustíveis durante o transporte do material, como já esperado para agregados reciclados. Já o processo de carbonatação com o PVA gerou um sequestro de carbono, como visto na análise térmica e contabilizado no cálculo de pegada de carbono, onde o maior sequestro de CO₂ ficou para o agregado oriundo de concreto de 25MPa, e o menor sequestro para o agregado de 40MPa. Ao final das análises, os resultados obtidos foram comparáveis ao sequestro de carbono advindos de processos de carbonatação com câmara, o que pode sugerir que na o processo utilizando o PVA é competitivo com outros já conhecidos no meio científico.

5.3 RECOMENDAÇÕES DE ANÁLISES FUTURAS

A partir do que foi possível concluir nesse estudo, recomendam-se como possíveis análises futuras o estudo mais detalhado da composição dos agregados reciclados de concreto, em questão de presença de cimento anidro, cristais hidratados e a correlação com o traço do concreto de origem. Além disso, também recomenda-se a análise da cinética da reação de carbonatação entre o PVA como fonte de carbono, e os componentes passíveis de reação no agregado reciclado, analisando as possíveis diferenças desse processo com a carbonatação em câmara. Outras possibilidades são o estudo de outros teores de PVA no tratamento de ARCO, analisando o seu potencial de sequestro de carbono, bem como outras condições ambientais para formação dos compostos carbonatados, como umidade, pH, e temperatura do ambiente, além também da análise de outras variáveis de partida, como outras características do agregado reciclado. Também é recomendada a análise técnica de concretos utilizando o ARCO tratado por carbonatação com película de PVA, principalmente o comportamento físico e mecânico.

REFERÊNCIAS

AL-BAYATI, H. K. A.; DAS, P. K.; TIGHE, S. L.; BAAJ, H.. Evaluation of Various Treatment Methods for Enhancing the Physical and Morphological Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregate. **Construction And Building Materials**, v. 112, p. 284-298, jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>. Acesso em: 09 set. 2020.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Análise de ciclo de vida - Princípios e estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Análise de ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 52 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 14 p.

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: ABNT, 2021a. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE – ABREMA. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABREMA, 2023.

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v. 36, p. 32-36, 2008

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. Desempenho Técnico de Misturas de Solo com RCD para Uso em Obras de Pavimentação. **Holos**, v. 7, 14 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9696>. Acesso em: 06 jun. 2022.

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2002.

BRAVO, M.; DUARTE, A. P.; BRITO, J. De; EVANGELISTA, L.; PEDRO, D. On the Development of a Technical Specification for the Use of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Concrete Production. **Materials**, v. 13, p. 4228, 23 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13194228>. Acesso em: 23 mar. 2022.

BUEST NETO, G. T. **Substituição de Agregados Miúdos Naturais por Britados em Concretos**. 2006. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Curitiba, 2006.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGVCS. **Nota Técnica**: Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 1.0. São Paulo: FGV, 2016. 5 p.

CHADHA, V.; RASHID, S.; SINGH, M.; ROY, A. B. D. Enhancing Sustainable Concrete: A Study on Mechanical Properties and Durability of Concrete with Treated Recycled Aggregates and Marble Dust. **Iranian Journal of Science and Technology**, Transactions of Civil Engineering, 27 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01368-y>. Acesso em: 18 nov. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº307**. DOU, 5 de julho de 2002, nº136, seção 1, p 95-96.

COSTA, L. M. M.; OLYVEIRA, G. M. de; SALOMÃO, R. Precipitated Calcium Carbonate Nano-Microparticles: Applications in drug delivery. **Advances in Tissue Engineering and Regenerative Medicine**, v.3, n. 3, p. 336-340, 8 nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/atboa.2017.03.00059>. Acesso em: 12 dez. 2024.

DIAS, A.; NEZAMI, S.; SILVESTRE, J.; KURDA, R.; SLVA, R.; MARTNS, I.; BRITO, J. de. Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA. **Recycling**, v. 7, n. 4, p. 43, 30 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling7040043>. Acesso em: 04 jun. 2024.

DING, Y.; WU, J.; ZHANG, X.; XU, P.; NING, W.; I, Y. Quality Improvement of Recycled Concrete Aggregate by Accelerated Carbonation under Different Pressure. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition**, v. 38, n. 3, p. 623-631, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11595-023-2738-9>. Acesso em: 15 mar. 2024.

DJERBI, A. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 1023-1033, 3 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.180>. Acesso em: 24 jun. 2024.

DOBROVOLSKI, E. R. G.; KRUGER, P. Construção Versus Sustentabilidade: Análise do potencial de sequestro de carbono em agregado reciclado beneficiado por meio de carbonatação acelerada. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 30., 2021, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: UEPG, 2021.

FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685-708, ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952014000400008>. Acesso em: 06 ago. 2024.

FU, P.; FANG, Y.; JIANG, X.; LV, W.; HUANG, Y.; LIU, Y.; LI, J.; CHANG, Y.; MA, L.; WNAG, H. Gas flow acceleration classification of polyvinyl alcohol (PVA) to promote energy saving in pulverizing system. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 10 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118782>. Acesso em: 15 ago. 2024.

GOOGLE. **Google Earth website**. <http://earth.google.com/>. 2009.

GUIMARÃES, F.; VISEDO, G. Projeções para o consumo de cimento no Brasil e de emissões absolutas de CO₂ para o período de 2020 a 2050. **Concreto e Construções**, v. 95, p. 95-97, jul.-set. 2019.

GUO, Z.; TU, A.; CHEN, C.; LEHMAN, D. E. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 136-140, 11 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.069>. Acesso em: 04 jun. 2024.

HASAN, U.; WHYTE, A.; JASSMI, H. A. Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120531, 12 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531>. Acesso em: 04 jun. 2024.

HUBERT, J.; ZHAO, Z.; MICHEL, F.; COURARD, L. Effect of Crushing Method on the Properties of Produced Recycled Concrete Aggregates. **Buildings**, v. 13, p. 2217, 31 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13092217>. Acesso em: 08 dez. 2023.

IMTIAZ, L.; KASHIF-UR-REHMAN, S.; ALALOUL, W. S.; NAZIR, K.; JAVED, M. F.; ASLAM, F.; MUSARAT, M. A. Life Cycle Impact Assessment of Recycled Aggregate Concrete, Geopolymer Concrete, and Recycled Aggregate-Based Geopolymer Concrete. **Sustainability**, v. 13, p. 13515, 07 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132413515>. Acesso em: 06 jun. 2024.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T.-C. Potential of CO₂ Sequestration Through Construction and Demolition (C&D) Waste: An overview. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 20, p. 234-242, jul. 2017. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>. Acesso em: 09 set. 2020.

KRUGER, P. **Efeito de diferentes teores de resíduo de gesso sobre o ataque interno por sulfato em argamassas incorporando agregados reciclados de concreto (ARC) ou misto (ARM)**. 2021. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Ponta Grossa, 2021.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, S.; CHEN, X.; HU, M.; GENG, Y.; SUI, S.; MENG, S.; JIN, L.; CUI, W. Carbon sequestration effects in cementitious composite binder materials under accelerated carbonation: A review. **Materials Today Sustainability**, v. 24, p. 100663, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100663>. Acesso em: 26 jun. 2024.

LI, N.; UNLUER, C. Evaluating the recyclability and efficacy of seawater during the wet carbonation of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 459, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139774>. Acesso em: 08 jan. 2025.

MAKUL, N. A review on methods to improve the quality of recycled concrete aggregates. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 10, n. 5, p. 65-91, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2020.1748742>. Acesso em: 11 out. 2023.

MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. Surface Interactions of Chemically Active Ceramic Tiles with Polymer-Modified Mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 742-748, ago. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.003>. Acesso em: 30 out. 2023.

MARIANI, B. B.; ANDRADE NETO, J. da S.; AMORIM JÚNIOR, N. S. de; RIBEIRO, D. V. Efeito da incorporação de resíduo de TiO₂ (MNR) na formação das fases mineralógicas de clínquer Portland. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000100293>. Acesso em: 08 jan. 2025.

MAZURANA, L. **Captura de CO₂ em Argamassa de Revestimento Através da Carbonatação Natural**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2019.

MESQUITA, L. C.; AZEVEDO, I. C. d'A. D. de; CÂNDIDO, E. S.; CATHOUD, G. A. Análise da Viabilidade Técnica de Utilização de Resíduos de Construção e Demolição na Fabricação de Blocos de Vedação. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 3, p. 30-40, 9 nov. 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.5216/reec.V10i3.32651>. Acesso em: 28 mar. 2022.

MOSTAFEI, H.; KESHAVARZ, Z.; ROSTAMPOUR, M. A.; MOSTOFINEJAD, D.; WU, C. Sustainability Evaluation of a Concrete Gravity Dam: Life Cycle Assessment, Carbon Footprint Analysis, and Life Cycle Costing. **Structures**, v. 53, p. 279-295, 27 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.058>. Acesso em: 20 fev. 2024.

MOURA, W. A. **Utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2000.

NING, W.; LV, X. Effect of Recycled Fine Aggregate on Properties of Mortar. **Ceramics-Silikáty**, v. 67, n. 4, p. 468-476, 6 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.13168/cs.2023.0046>. Acesso em: 15 mar. 2024.

PAZ, C. F. **Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de resíduos de construção e demolição**. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2020.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. de; LEVY, S. M. Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 125-134, jul./set. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212012000300009>. Acesso em: 06 ago. 2024.

POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. **Concreto e Construções**, v. 95, p. 60-66, jul./set. 2019.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – PCRJ. **SCO – Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia**. Rio de Janeiro: FGV, 2023.

RAHIGUDE, R.; KHWAIRAKPAM, D. D.; RADE, S.; KADAM, K. Construction Waste Management in the Context of De-tools, Industry 4.0 & Circular Economy, a Critical Review of Pune Metropolitan Area, India. **International Journal Of Sustainable Building Technology And Urban Development**, v. 13, n. 4, p. 514-548, 30 dez. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22712/SUSB.20220037>. Acesso em: 17 jul. 2023.

REIS, G. S. dos; QUATTRONE, M.; AMBRÓS, W. M.; CAZACLIU, B. G.; SAMPAIO, C. H. Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. **Materials**, v. 14, p. 1700, 30 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14071700>. Acesso em: 28 mar. 2022.

RICCI, B. de O. L.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/1980082713120171499>. Acesso em: 06 ago. 2024.

SANTOS, T.; ALMEIDA, J.; SILVESTRE, J. D.; FARIA P. Life Cycle Assessment of Mortars: A review on technical potential and drawbacks. **Construction and Building Materials**, v. 288, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123069>. Acesso em: 08 dez. 2021.

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of Treated Recycled Aggregates and its Influence on Concrete Strength Characteristics. **Construction And Building Materials**, v. 111, p. 611-617, maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>. Acesso em: 28 set. 2020.

SIDOROVA, A.; VAZQUEZ-RAMONICH, E.; BARRA-BIZINOTTO, M.; ROA-ROVIRA, J. J.; JIMENEZ-PIQUE, E. Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate–cement paste interface and ITZ. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 677-684, 26 jul. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.076>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SILVEIRA, P. M.; ALBUQUERQUE, M. da C. F.; CASSOLA, S.; BORTOLUCCI, A. A.; PAULLI, L. D.; VILLA, F. M. D. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 2, p. 416-428, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0039>. Acesso em: 06 ago. 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2022**. Rio de Janeiro: SNIC, 2022.

TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N.; LI, W. Utilising CO₂ technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**. V. 250, p. 118903, 3 abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118903>. Acesso em: 24 jun. 2024.

THONG, C. C.; TEO, D. C.; NG, C. K. Application of Polyvinyl Alcohol (PVA) in Cement-Based Composites Materials: A review of its Engineering Properties and Microstructure Behavior. **Construction and Building Materials**, v. 105, n. 15, p.172-180, mar. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188>. Acesso em: 31 out. 2023.

VISINTIN, P.; XIE, T.; BENNETT, B. A Large-scale Life-Cycle Assessment of Recycled Aggregate Concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243>. Acesso em: 12 nov. 2020.

WANG, L.; GU, Y.; JIANG, L.; JIN, W.; GUO, M.; XIA, K.; YANG, G. Hydrated Lime-Enriched CO₂ Sequestration Binders Reinforces by Polyvinyl Alcohol. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 7, p. 04023184, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14455>. Acesso em: 11 out. 2023.

WANG, J.; WU, H.; TAM, V. W. Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 104-1014, 01 jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.170>. Acesso em: 04 jun. 2024.

YUAN, Q.; ZHANG, J.; ZHANG, S.; ZHENG, K.; CHEN, L. An eco-friendly solution for construction and demolition waste: Recycled coarse aggregate with CO₂ utilization. **Science of the Total Environment**, v. 950, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175163>. Acesso em: 08 jan. 2025.

ZADEH, A. H.; HAWKINS, C.; BALL, J.; HARPER, N.; HU, J.; KIM, S. Potential on

Carbon Dioxide Utilization to Improve Recycled Concrete Aggregates and Reduce Carbon Footprint. In: GEO-CONGRESS, 2023, Los Angeles. **Proceedings [...]** . Reston: ASCE Press, 2023. v. 339, p. 64-74.

ZAJAC, M.; BREMEIER, R.; DEJA, J.; KRÓL, M.; BEN HABA, M. Carbonation hardening of Portland cement with recycled supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 157, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105904>. Acesso em: 08 jan. 2025.

ZHAN, B. J.; XUAN, D. X.; POON, C. S. Enhancement of Recycled Aggregate Properties by Accelerated CO₂ Curing Coupled with Limewater Soaking Process. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 230–237, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.011>. Acesso em:

ZHANG, Y.; LUO, W.; WANG, J.; WANG, Y.; XU, Y.; XIAO, J. A Review of Life Cycle Assessment of Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115-125, jun. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>. Acesso em: 09 set. 2020.

ZHAO, Z.; WANG, S.; LU, L.; GONG, C. Evaluation of Pre-Coated Recycled Aggregate for Concrete and Mortar. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 191-196, jun. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032>. Acesso em: 18 ago. 2020.

ZULCÃO, R.; CALMON, J. L.; REBELLO, T. A.; VIEIRA, D. R. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119523, 25 mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119523>. Acesso em: 04 jun. 2024

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DA ADAPTAÇÃO DO CÁLCULO DE PEGADA DE CARBONO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

O método apresentado por Dobrovolski (2022) para a determinação da pegada de carbono de agregado reciclado de concreto de forma empírica, tomada como base para o desenvolvimento desse estudo, leva em consideração algumas premissas, as quais serão detalhadas a seguir. É importante destacar que o processo de determinação da equação e todas as etapas envolvidas no cálculo foram detalhadas por Dobrovolski (2022), e não serão retomadas nesse apêndice. Primeiramente, foi levada em conta a produção de concreto suficiente para que ao final fosse produzido 1m³ de ARCO. Sendo que essa produção se inicia no consumo de matéria-prima para mistura do concreto, passa pelo processo de transporte, concretagem e demolição da estrutura, e ao final, o resíduo gerado é transportado novamente e britado para geração do agregado reciclado em si. A equação utilizada para calcular a pegada de carbono por Dobrovolski (2022) está apresentada a seguir.

$$E_{CO_2eq(KgCO_2eq/m^3)} = E_{CO_2c} + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_m + 8,20531$$

Essa equação traduz a emissão equivalente de CO₂ de 1m³ de ARCO em uma somatória da emissão do consumo de matéria-prima, considerando um valor reduzido de (E_{CO_2c}); da emissão do consumo de combustíveis fósseis para transporte de concreto no caminhão até a obra e transporte do resíduo até a central de beneficiamento, valor esse que varia conforme a distância de transporte ($0,39990 \cdot S_T$). Além dessas parcelas, também é adicionado o consumo devido ao uso de energia elétrica de equipamentos para o processo de concretagem e demolição da estrutura de concreto, dentre eles a central de usinagem, a bomba lança, o vibrador de imersão e o martelete de demolição (8,20531); e, devido ao consumo de britador ser inversamente proporcional ao diâmetro do agregado, a emissão devido ao uso de energia elétrica pelo equipamento de britagem é deduzido da equação final ($0,00378 \cdot d_m$). Nessa metodologia, também foi considerado que o resíduo gerado possui uma taxa de empolamento de cerca de 30%, o que fez com que as análises relacionadas a produção de concreto considerassem um volume de apenas 70% do volume final de agregado reciclado.

Porém, alguns pressupostos desse método não se mostraram serem convenientes para essa pesquisa. Assim, foram feitas algumas adaptações para que a equação representasse de forma mais fidedigna as situações que foram levantadas no ciclo de vida do ARCO em estudo. Primeiramente, foram atualizadas as emissões devido ao consumo de matéria-prima, para que abrangesse todas as faixas de resistência analisadas. Outro ponto é que foram desconsideradas emissões devido ao uso de bomba lança, vibrador e marteleto, já que no estudo foram utilizados corpos de prova de tamanho reduzido em comparação a estruturas de concreto, não justificando a utilização desse tipo de equipamento para a concretagem dos moldes. Além disso, como a análise de proporção de materiais utilizados, e a consequente emissão que esses materiais geram, foi realizada a partir do volume de ARCO em si, foi desconsiderada a taxa de empolamento de 30%.

A partir dessas adaptações conceituais do método de Dobrovolski (2022), foram realizadas algumas correções numéricas. Dentre elas estão as correções de emissões devido ao consumo de matéria-prima, apresentadas na Tabela 3. Além disso, como foi desconsiderada a emissão devido ao transporte de resíduo até a central de beneficiamento, e levada em conta somente as emissões de transporte dos corpos de prova até o laboratório, o valor numérico que acompanha a distância de transporte foi reduzido para 0,22603KgCO₂ a cada Km de distância. Além disso, também foi considerado um comportamento exponencial para o consumo do britador ($1,5714 \cdot e^{-0,026d_m}$), e não linear, que representava de forma mais adequada os dados analisados, estatisticamente falando, apesar da análise ser mais complexa. Por fim, foi considerado um valor de consumo de central de usinagem para produção do concreto dos corpos de prova de 0,31512KgCO₂/m³. Além disso, também foi considerada a adição de $8,681 \cdot 10^{-5}$ Kg de CO₂ equivalente a cada grama de PVA utilizado, após a realização da carbonatação com película, o qual não consta na equação apresentada para as análises desse estudo. Por fim, a equação construída para uso nessa pesquisa está apresentada abaixo.

$$E_{CO_2eq(KgCO_2eq/m^3)} = E_{CO_2c} + 0,22603 \cdot S_T + 1,5714 \cdot e^{-0,026d_m} + 0,31512$$