INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO_2 AO LONGO DO TEMPO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO

ESTUDO EXPLORATÓRIO

ANA PAULA ALMEIDA DA ROCHA

Foz do Iguaçu-Pr
2022

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO_2 AO LONGO DO TEMPO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO

ESTUDO EXPLORATÓRIO

ANA PAULA ALMEIDA DA ROCHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientadora: Profa. Dra. Edna Possan

Foz do Iguaçu-Pr
2022

RESUMO

O mundo enfrenta hoje grandes consequências causadas pelo impacto do CO_2 na atmosfera. Dentre os maiores contribuintes pela emissão do gás está a indústria cimenteira, responsável por aproximadamente 7% das emissões antropogênicas globais de CO_2 Visando a sustentabilidade, o setor tem se preocupado em melhorar a eficiência enérgica, reduzir o teor de clínquer contido no cimento e implementar técnicas de estocagem e captura de carbono. Atualmente existem diversos estudos sobre o fenômeno da carbonatação dos materiais cimentícios como forma de capturar e estocar o CO_2 atmosférico para minimizar os problemas ambientais causados por este gás, de modo a mitigar as emissões ocasionadas pela indústria cimenteira. Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar o comportamento da profundidade de carbonatação em argamassas de revestimento e assentamento produzidas com e sem substituição do agregado natural por agregado reciclado de RCD (Resíduo de Construção e Demolição), com e sem uso de aditivo incorporador de ar e sem proteção superficial. Para tal, foram compilados resultados de seis estudos experimentais relacionados à carbonatação natural e acelerada em diferentes argamassas de revestimento e assentamento conduzidos por pesquisadores relacionados ao grupo de pesquisa "*Carbon Use and Capture in the Construction Industry | CO_2-Construction"* da Universidade Federal da Integração Latino Americana (Unila). Os resultados experimentais indicam que a adição de areia de RCD é benéfica à captura de carbono, constatando-se que à medida que o teor de substituição aumenta a profundidade de carbonatação e a fixação de carbono são elevadas. Os resultados indicam que a reação química da carbonatação natural de argamassas de revestimento pode ser considerada uma medida compensatória para o ciclo de vida das construções, contribuindo para a mitigação das emissões de CO_2 antropogênico, sendo um processo importante para uma indústria da construção civil mais sustentável, visto que as argamassas possuem capacidade de reabsorver parcialmente o CO_2 emitido em sua produção.

Palavras-chave: argamassas; carbonatação; sequestro de CO_2; agregado reciclado.

RESUMEM

El mundo actual se enfrenta a importantes consecuencias provocadas por el impacto del CO2 en la atmósfera. Entre los mayores contribuyentes a la emisión de gas se encuentra la industria del cemento, responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones antropogénicas mundiales de CO2. Como forma de responsabilidad ambiental, el sector ha buscado mejorar la eficiencia energética, reducir el contenido de clínker contenido en el cemento e implementar técnicas de almacenamiento y captura de carbono. Actualmente existen varios estudios sobre el fenómeno de la carbonatación de los materiales cementicios como una forma de capturar y almacenar el CO2 atmosférico para minimizar los problemas ambientales ocasionados por este gas, con el fin de mitigar las emisiones provocadas por la industria cementera. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo evaluar la tendencia del comportamiento de la profundidad de carbonatación en morteros de revestimiento y colocación elaborados con y sin sustitución del árido natural por árido reciclado procedente de RCD (Residuos de la Construcción y Demolición), con y sin utilización de un aditivo que incorpora agua, aire y sin protección superficial. Para ello, se presentan los resultados de seis estudios experimentales relacionados con la carbonatación natural y acelerada en diferentes morteros de revestimiento y colocación realizados por investigadores vinculados al grupo de investigación “Uso y Captura de Carbono en la Industria de la Construcción | CO2-Construcción” de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana (Unila). Los resultados experimentales indican que la adición de arena CDW es beneficiosa para la captura de carbono, observando que a medida que aumenta el contenido de sustitución, la profundidad de carbonatación y la fijación de carbono son altas. El uso de aditivo también demostró ser favorable para la captura de CO2, donde en matrices con aditivo la difusión de CO2 puede ser más rápida Los resultados indican que la reacción química de la carbonatación natural de los morteros de revestimiento puede considerarse una medida compensatoria del ciclo de vida de los edificios, contribuyendo a la mitigación de las emisiones antropogénicas de CO2, siendo un proceso importante para una industria de la construcción civil más sostenible, ya que los morteros tienen la capacidad de reabsorber parcialmente el CO2 emitido en su producción.

Palabras llave: morteros; carbonatación; secuestro de CO_2; agregado reciclado.

ABSTRACT

The world today faces major consequences caused by the impact of CO2 on the atmosphere. Among the largest contributors to the emission of gas is the cement industry, responsible for approximately 7% of global anthropogenic CO2 emissions. As a form of environmental responsibility, the sector has sought to improve energy efficiency, reduce the clinker content contained in cement and implement storage and carbon capture techniques. Currently, there are several studies on the phenomenon of carbonation of cement materials as a way of capturing and storing atmospheric CO2 to minimize the environmental problems caused by this gas, in order to mitigate the emissions caused by the cement industry. In this sense, this work aims to evaluate the tendency of the behavior of the carbonation depth in coating and laying mortars produced with and without replacement of the natural aggregate by recycled aggregate from RCD (Construction and Demolition Waste), with and without the use of an additive incorporating water. air and without surface protection. To this end, results of six experimental studies related to natural and accelerated carbonation in different coating and laying mortars conducted by researchers related to the research group “Carbon Use and Capture in the Construction Industry | CO2-Construction” from the Federal University of Latin American Integration (Unila). The experimental results indicate that the addition of CDW sand is beneficial to carbon capture, noting that as the substitution content increases, the depth of carbonation and carbon fixation are high. The use of additive also proved to be favorable for the capture of CO2, where in matrices with additive CO2 diffusion can be faster The results indicate that the chemical reaction of the natural carbonation of coating mortars can be considered a compensatory measure for the cycle of life of buildings, contributing to the mitigation of anthropogenic CO2 emissions, being an important process for a more sustainable civil construction industry, since mortars have the capacity to partially reabsorb the CO2 emitted in their production.

Key words: mortars; carbonation; CO_2 sequestration; recycled aggregate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados aplicados em uma edificação.....14
Figura 2 – Faixa de viragem da fenolftalina.....17
Figura 3 – Esquema da aplicação da solução de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação.....17
Figura 4 – Instrumento de coleta de dados.....21
Figura 5 – Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente interno.....26
Figura 6 – Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo protegido.....27
Figura 7 – Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo desprotegido.....27
Figura 8 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo protegido.....28
Figura 9 – Captura de máx de CO2 ao longo do tempo no ambiente externo protegido.....29
Figura 10 – Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo protegido.....31
Figura 11 – Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo desprotegido.....31
Figura 12 – Profundidade ao longo do tempo.....31
Figura 13 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente interno.....33
Figura 14 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo protegido.....33
Figura 15 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo desprotegido.....34
Figura 16 - Captura de CO2 aos 42 dias.....34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos estudos utilizados para a compilação de dados.....20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

$Ca(CO)_3$: Carbonato de Cálcio.

$Ca(OH)_2$: Hidróxido de Cálcio.

CCA: Cinza de Casca de arroz.

CO_2: Dióxido de Carbono.

C-S-H: Silicato de Cálcio Hidratado.

RCC: Resistência Característica do Concreto

RCD: Resíduo de Construção e Demolição.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....09
2 OBJETIVOS.....12
2.1 OBJETIVO GERAL.....12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....13
3.1 CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO_2.....13
3.2 CAPTURA DE CO_2 EM MATRIZES COM RCD.....15
3.3 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO.....16
3.3.1 Medição da profundidade carbonatada.....16
3.3.2 Análise Termogravimétrica.....17
4 METODOLOGIA.....19
4.1 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS.....19
4.1.1 Seleção Dos Trabalhos.....19
4.1.2 Tabulação dos dados.....21
4.1.3 Análise dos dados.....21
4.2 PESQUISA DE ANTONIO (2018).....22
4.3 PESQUISA DE RUFATTO (2019).....22
4.4 PESQUISA DE MAZURANA (2018).....23
4.5 PESQUISA DE SILVA (2019).....23
4. 6 PESQUISA DE PEDRY (2020).....24
4.7 PESQUISA DE FORTOLAN (2020).....25
4.8 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CARBONATAÇÃO.....25
5 RESULTADOS.....26
5.1 ANÁLISE GERAL.....26
5.1.1 Captura de CO_2.....29
5.2 MAZURANA (2019) E RUFFATO (2019).....30
5.3 RUFFATO (2019) E SILVA (2019).....32
5.3.1 Captura de CO_2.....34
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....35
6.1 PARA TRABALHOS FUTUROS.....36
REFERÊNCIAS.....37

1 INTRODUÇÃO

Da Idade Industrial até os tempos atuais, a concentração de CO_2 presente na atmosfera aumentou cerca de 30%, a qual passou de 280 para 370 ppm (IPCC & ONU, 2001). 50% do aumento nos últimos 40 anos é motivado por ações humanas (YEGULALP et al., 2000). Os impactos ambientais do aumento da concentração de CO_2 são, entre outros, o efeito estufa, a acidificação da superfície do oceano e a fertilização dos ecossistemas (HUIJGEN, COMANS, 2003). Neste sentido, o Painel Internacional de Controle Climático (IPCC, 2001) estabeleceu um limite máximo de 550 ppm de CO_2 atmosférico para que não haja grandes interferências na temperatura média do planeta Terra. Para tentar “frear” as crescentes emissões de CO_2 em 2016, foi estabelecido o Acordo de Paris, em que cada nação participante do acordo, considerando sua viabilidade social e econômica, apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa a partir das chamadas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (INDC, na sigla em inglês para Intended Nationally Determined Contribution) (JI, 2016). O Brasil faz parte deste acordo, em que se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025.

Como a maioria dos processos de fabricação industrial, a produção de argamassas a base de cimento e cal, emite CO_2 para a atmosfera, já que é produzida pela mistura de cimento, agregado miúdo, água e podendo apresentar cal, aditivos e adições. A maior parte da emissão de CO_2 derivada da elaboração desse material está relacionada à produção do cimento e cal (MAZURANA, 2019).

A indústria cimenteira sozinha é responsável por cerca de 5 a 8% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono do planeta (MEHTA, 2001; ALI, SAIDUR, HOSSAIN, 2011; SNIC, 2010). A produção de cimento Portland implica a calcinação do calcário e outros compostos (argila, fundentes, etc.) a temperaturas próximas de 1450 °C. Nesses processos, o CO_2 é liberado tanto, pela descarbonatação do calcário ($CaCO_3$), quanto pela queima de combustíveis fósseis empregados para geração de energia (HUIJGEN; COMANS, 2003). Habert e Roussel (2009) citam que 95% das emissões da produção do cimento ocorrem em sua fabricação. Dessa porcentagem mais de 60% é oriundo da descarbonatação da rocha calcária e o restante provém da produção do clínquer, que é consequência da queima de combustíveis fósseis (VAN OSS; PADOVANI, 2003; POSSAN, 2019).

Além das elevadas emissões, o cimento Portland é empregado em larga escala. Segundo informações divulgadas pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (SNIC, 2017), no período janeiro-novembro de 2016, a produção de cimento no Brasil alcançou 52,9 milhões de toneladas, o que representou a emissão de aproximadamente 44,8 milhões de toneladas de CO_2. Na comparação com idêntico período de 2015 a produção de cimento foi de 60,5 milhões de toneladas, enquanto a de emissões foi de 54,4 milhões de toneladas. Com base nestes dados tem-se que as emissões por tonelada de cimento produzidas em 2015 e 2016 foram de 899 e 847 kg.CO_2/m³, respectivamente, constatando-se uma redução de 5,8 % de CO_2 por tonelada de cimento em 2016. Essa redução de emissões é decorrente de ações que vem sendo implementadas ao longo das décadas pela indústria cimenteira nacional.

Huijgen e Comans (2003) propõem três estratégias principais para a redução da emissão de CO_2 na atmosfera: melhoria da eficiência energética; uso de fontes de energia renováveis; e sequestro de carbono. Os Roadmaps tecnológicos do cimento, mundial (2018) e nacional (2019) inserem a redução do teor de clínquer contido no cimento como principal estratégia para redução das emissões da indústria cimenteira.

Gajda e Miller (2000), Pade e Guimarães (2007), Naik e Kumar (2010), Galan et al. (2010), Possan et al, (2017), entre outros autores, têm discutido que materiais com bases cimentantes tem a potencialidade de capturar CO_2 da atmosfera, através da carbonatação. Xi et al (2016), em seus estudos constataram que a carbonatação de produtos à base de cimento representa um coletor de carbono substancial que atualmente não é considerado nos estoques de emissões. Segundo Pade e Guimarães (2007), a carbonatação e consequente captura de CO_2, ocorrem em toda a vida útil dos materiais a base de cimento, sendo que após a sua demolição é mais intensa, uma vez que a área superficial em contato com o CO_2 é mais elevada.

A carbonatação é um processo que se inicia quando o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera se difunde através da porosidade de materiais à base de cimento (concretos, argamassas, pastas). Posteriormente acontecem reações entre esse CO_2 e os produtos alcalinos da matriz cimentícia, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água. Sendo o principal composto carbonatado pelo dióxido de carbono o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), além dele são carbonatáveis o

hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos (POSSAN et al., 2017).

A carbonatação tem início a partir da superfície e avança para o interior da estrutura de concreto, formando uma camada carbonatada. A rapidez com que essa camada avança está diretamente relacionada com a facilidade com que o CO_2 encontra para se difundir no interior do concreto. As características responsáveis por essa difusão estão associadas à umidade interna do concreto, à estrutura e tamanho dos poros do material e à composição química do cimento (POSSAN; FRIGO, 2013).

Atualmente, há propostas e ações voltadas às possibilidades de substituições do clínquer no cimento, por pozolana, escória e filer, assim como o uso de aditivos (ROADMAP, 2019). A sílica ativa é uma pozolana que também pode ser empregada, a qual a partir de reações de hidratação confere uma série de benefícios, como redução e refinamento dos poros, aumento da resistência mecânica, possibilidade de redução do uso de cimento e melhora nas propriedades de durabilidade dos materiais a base de cimento (REAL, 2015). Na produção de argamassas, também se emprega aditivo incorporador de ar, uma vez que seu uso pode melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água de mistura desses materiais. Essa melhora contribuí para o aumento da área de contato entre argamassa e substrato (POLITO et al., 2008), o que é desejável do ponto de vista técnico.

Neste sentido busca-se através da análise do banco de dados experimentais do grupo de pesquisa “*Carbon Use and Capture in the Construction Industry | CO_2-Construction*” realizar a análise de cenários para a carbonatação em argamassas de revestimento, com e sem proteção superficial, considerando o tempo de exposição ao CO_2.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL:

Este trabalho tem por objetivo geral compilar e analisar os dados experimentais de estudo da profundidade de carbonatação de argamassas de revestimento e assentamento, com e sem substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado reciclado de RCD, a fim de discorrer sobre a influência dos ambientes de exposição, uso de aditivos e materiais constituintes no processo de captura de CO_2 ao longo do tempo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

a) Avaliar a influência do teor de RCD na carbonatação de argamassas de revestimento a partir da comparação dos resultados do grupo de pesquisa "*Carbon Use and Capture in the Construction Industry | CO_2-Construction*";

b) Avaliar a influência do ambiente de exposição na carbonatação de argamassas de revestimento e assentamento;

c) Avaliar a influência dos materiais constituintes das argamassas de revestimento e assentamento na carbonatação natural.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO_2

Segundo Possan (2010), o início da carbonatação de concretos e argamassas ocorre quando o CO_2 se difunde pela matriz cimentícia do material. Onde ocorre a dissolução do dióxido de carbono na solução dos poros formando carbonato de cálcio e água, conforme a reação apresentada na **Equação 1**. O hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) é o principal composto carbonatado pelo dióxido de carbono, mas também são carbonatáveis o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos (**Equações 2 e 3**).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad \textbf{Equação 1}$$

$$3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 2SiO_2 + 3H_2O \quad \textbf{Equação 2}$$

$$4CaO.2Al_2O_3.13H_2O + 4CO_2 \rightarrow 4CaCO_3 + 2Al(OH)_3 + 10H_2O \quad \textbf{Equação 3}$$

Possan (2010, apud Papadakis, Vayenas e Fardis, 1991), descreve as etapas envolvidas nos processos físico-químicos associados à ação da carbonatação do concreto, essas consistem em:

(i) Reações químicas que são produzidas a partir de materiais carbonatáveis;

(ii) Difusão do CO_2 na fase gasosa dos poros do concreto e posteriormente dissolução;

(iii) Dissolução de cristais do Ca $(OH)_2$ na solução dos poros e difusão do Ca (OH)2 na fase aquosa dos poros;

(iv) Dissolução do CO_2 na água dos poros e reação com Ca $(OH)_2$ dissolvido;

(v) Reação do CO_2 com os outros cristais carbonatáveis da pasta endurecida;

(vi) Redução do volume dos poros devido aos produtos sólidos da hidratação e carbonatação;

(vii) Condensação do vapor de água nas paredes dos poros do concreto, de forma equilibrada com a temperatura ambiente e umidade.

Um dos resultados dessas reações é a redução de pH do concreto a um valor inferior a 9 (BAKKER, 1998), o que pode ser prejudicial à armadura imersa no concreto, por outro lado, também envolvido nesse processo existe a absorção de

CO_2 da atmosfera, devido à formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (POSSAN, et al. 2017). Assim, em estruturas não armadas como artefatos de concreto e revestimentos argamassados, onde não há peças de aço para serem corroídas, a carbonatação passa a ser uma consequência benéfica, já que, segundo Van Gerven et al. (2007), reduz a porosidade do material e aprisiona o CO_2 através da reação química acima, em um processo reverso ao da produção do cimento (LAGERBLAD, 2005, PADE E GUIMARÃES, 2007; XI et al 2018).

Em contrapartida na produção do cimento ocorre a calcinação, representada pela Equação 4, que além de liberar CO_2, compreende a decomposição do calcário ($CaCO_3$) em óxido de cálcio (CaO). Essa reação é responsável por cerca de 50% do CO_2 liberado na atmosfera durante a produção do clínquer (Bosoaga et al, 2009).

$$CaCO_3 + \text{calor} \rightarrow CaO + CO_2 \qquad \textbf{Equação 4}$$

O que pode ser analisado é que há nesses processos um indicador compensador das emissões de materiais cimentícios durante o ciclo de vida das construções revestidas com argamassas, como representado na figura 1.

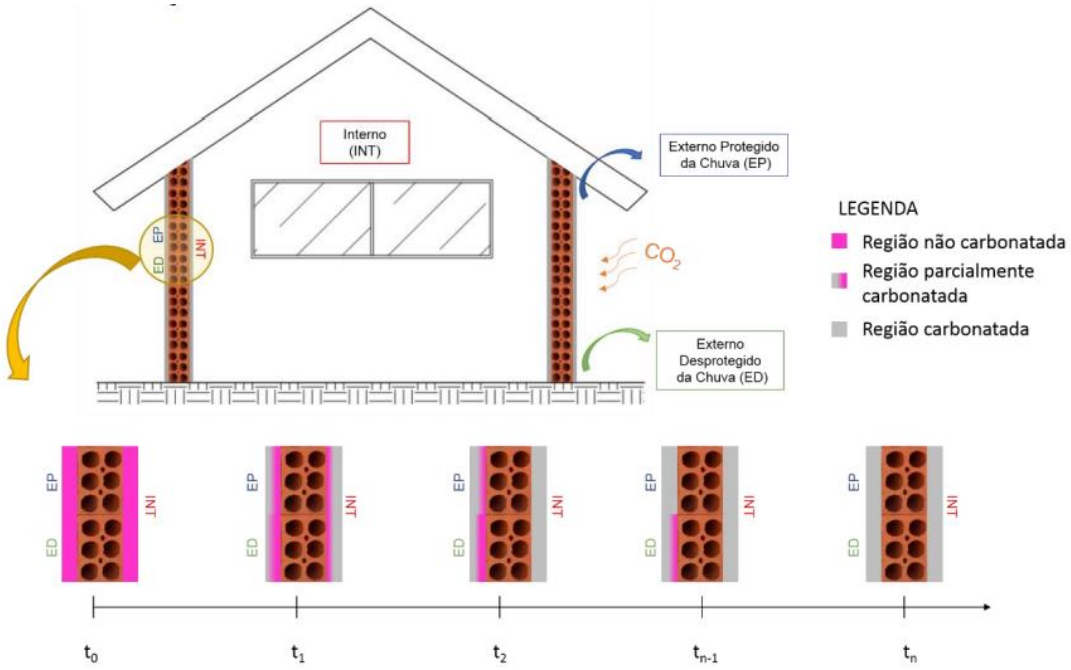

Figura 1 - Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados aplicados em uma edificação. Fonte: ANTONIO (2018).

A capacidade e a potencialidade de captura de CO_2 dependem principalmente do quanto a difusão varia com a temperatura, da umidade relativa e

concentração de CO_2, do potencial de reatividade do CO_2 com o material, assim como da área superficial exposta ao CO_2 (POSSAN et al., 2017).

O período de ocorrência da captura do CO_2 pode ser estimado com a mesma duração da vida útil da estrutura e continua após a demolição, sendo que nesta etapa o processo é intensificado pelo fato de a área superficial exposta à ação do dióxido de carbono aumentar (FELIX, POSSAN, 2018).

3.2 CAPTURA DE CO_2 EM MATRIZES COM RCD

O ramo da construção civil é destaque no consumo de recursos naturais e geração de resíduos sólidos (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001). Apesar da grande preocupação com sustentabilidade, foi só após o ano de 2002 que a gestão de RCD (Resíduos de construção e demolição) despertou estudos de técnicas para seu reaproveitamento tendo em vista a criação da Resolução do CONAMA nº 307 (Conselho Nacional do Meio Ambiente) a qual atribui ao construtor à destinação final dos resíduos por ele gerada de maneira responsável e adequada. Segundo CONTRERAS, et al (2016) esses resíduos correspondem a 50% de todos os resíduos sólidos urbanos, e geralmente são descartados em lugares impróprios ou dispostos em aterros e, às vezes, reciclados.

Como reciclagem, uma alternativa amplamente utilizada é o reaproveitamento desse resíduo na produção de areia reciclada ou brita, para aplicação em argamassas, que pode ser usada como: revestimento, assentamento e até mesmo para concreto que não necessite de função estrutural.

Atualmente existem estudos (ZHAO et al., 2015, KALIYAVARADHAN, LING, 2017; ANDRADE et al, 2018) que comprovam que os agregados reciclados de RCD e os materiais que os utilizam em sua fabricação, possuem maior potencial para a captura de CO_2, devido ao processo de carbonatação em relação aos agregados naturais.

Além disso, é importante destacar que a maioria das estruturas de concreto antes de demolidas não são totalmente carbonatadas. Os resíduos pós-demolição estão suceptíveis a um novo ciclo de absorção de dióxido de carbono. (LAGERBLAD, 2005).

3.3 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO

Em vista da importância das relações do CO_2 e da possibilidade de captura do mesmo por parte dos materiais cimentícios, apresentam-se dois tipos de sequestro de carbono, o direto e o indireto (POSSAN, FRIGO, 2013). O primeiro consiste em um processo de separação e captura do CO_2 proveniente de processos industriais e processos relacionados ao uso de energia, com estocagem do gás de modo que ocorra seu isolamento em relação à atmosfera. No sequestro de carbono indireto, o CO_2 atmosférico é removido por um processo natural, o gás é absorvido pela fotossíntese, sendo esse mecanismo eficaz na colaboração do reflorestamento em áreas onde a vegetação foi alterada (COSTA, 2009). Nesta linha de métodos naturais, entra o sequestro do CO_2 pela carbonatação de materiais cimentícios, ocorrente nas construções ao longo dos anos (POSSAN, 2010).

Para estimar a captura de CO_2 devido à carbonatação, Possan et al., (2016) propõem uma metodologia resumida em seis etapas: Determinação das características do objeto de estudo; Estimativa das Emissões de CO_2; Estimativa da profundidade de Carbonatação no tempo; Estimativa da Quantidade de CO_2 capturada na vida útil (VU); Estimativa da Quantidade de CO_2 capturada pelo concreto no Período Pós-Demolição; e Balanço das emissões.

3.3.1 Medição da profundidade carbonatada

Segundo ELENI et al. (2014) para a determinação da profundidade de carbonatação pode-se citar alguns métodos como, a petrografia, a diferença de massa, a difração de raio-X, a análise térmica diferencial, a termogravimétrica, a determinação de pH por meio de titulação, a espectrofotometria no infravermelho e indicadores químicos de pH.

Apesar da diversidade de métodos o mais utilizado ainda é o que utiliza indicadores químicos de pH, este procedimento é indicado pela RILEM (1998). Ainda que a facilidade no uso do indicador sejam atraentes os métodos como análise termogravimétrica dão resultados superiores e mais precisos em comparação aos indicados pela fenolftaleína (indicador químico) (PARROTT,1987).

O indicador de pH utilizado é a fenolftaleína, a qual possui faixa de viragem de pH entre 8,3 a 10,0 (Figura 1) onde é possível observar coloração

vermelho carmim para a região não carbonatada, enquanto que a região carbonatada permanece sem alteração de cor, como é ilustrado na Figura 2 (NEVES, 2005). Com a aplicação realizada, a medição da profundidade de carbonatação pode ser feita por meio de leituras com paquímetro ou por análise de imagem (KULAKOWSKI, 2002).

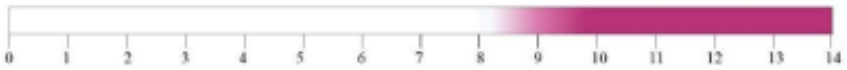

Figura 2 - Faixa de viragem da fenolftalina (RUFATTO, 2019).

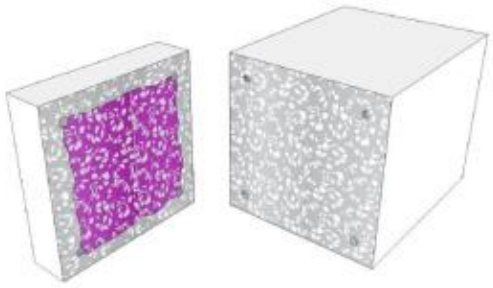

Figura 3 - Esquema da aplicação da solução de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação (PIRES, 2016).

3.3.2 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) é “utilizada para determinar a estabilidade térmica de um material e sua fração de componentes voláteis, monitorando a variação de peso que ocorre quando uma amostra é aquecida a uma taxa constante” (RAJISHA et al., 2011, p.262).

A análise termogravimétrica (TG) permite quantificar, na idade normatizada pela NBR 5751 (2012), o teor de hidratos formados, a portlandita consumida por atividade pozolânica e a carbonatação da amostra.

A aplicação da análise na carbonatação e captura de CO_2, permite através da visualização da proporção existente dos hidróxidos presentes no material não carbonatado e os carbonatos nas amostras carbonatadas. Dessa forma, é possível visualizar, com o auxílio da sua curva derivada (DTG), o potencial de captura de CO_2 do material em análise por meio do balanço da massa perdida entre a amostra carbonatada e não carbonatada (NEVES JUNIOR et al., 2019; MAZURANA et al.,

2019).

4 METODOLOGIA

O presente estudo é de caráter analítico, partindo do estudo e avaliação das informações dos experimentos realizados pelo grupo de pesquisa “Carbon Use and Capture in the Construction Industry | CO_2-Construction”.

Primeiramente, fez-se a seleção dos trabalhos que seriam aplicados na análise da profundidade de carbonatação e captura de CO_2, seguido da construção de um banco de dados com os resultados experimentais de profundidade de carbonatação em argamassas para diferentes aplicações do material, com RCD, com ar incorporado, sem ar, sem RCD, com cal, assim como os dados coletados e subgrupados de suas respectivas características físicas e mecânicas.

Esses dados foram separados em grupos que possuem traço semelhante, para que fosse possível realizar a comparação dos resultados de carbonatação. Os que apresentaram possibilidade de análise em conjunto, foram avaliados com relação ao comportamento ao longo do tempo e as variáveis aplicadas por cada autor.

4.1 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

4.1.1 Seleção dos trabalhos

Para a construção do banco de dados desse estudo foram selecionados os trabalhos experimentais conduzidos por Antonio (2018), Mazurana (2019), Ruffato (2019), Silva (2019), Pedry (2020) e Fontolan (2021), conforme síntese apresentada na tabela 1, de modo a analisar o comportamento da profundidade de carbonatação em argamassas com traço semelhante.

Quadro 1 - Resumo dos estudos utilizados para a compilação de dados

REFERÊNCIA	OBJETIVO	MATERIAIS		TRAÇOS AVALIADOS	AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO	IDADE DA MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE (dias)
		Geral	Detalhado			
Antônio (2018)	Avaliar a captura de CO_2 devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com resíduo de construção e demolição (RCD) com e sem cal, em substituição a areia natural.	Argamassa de revestimento	Cal, cimento e RCD (0, 25, 50, 75, 100%)	1:6; 1:1:6	interno, externo protegido e desprotegido da chuva	28, 56, 84/95, 167, 195/202
Mazurana (2019)	Quantificar a captura de CO2 de argamassas de revestimento, sem proteção superficial, com substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado reciclado de RCD, pela reação de carbonatação, a fim de realizar o balanço de emissões e captações de carbono durante o ciclo de vida da edificação.	Argamassa de revestimento	Cal, cimento e RCD	1:6 ; 1:1:6 ; 1:2:6	interno, externo protegido e desprotegido da chuva	28, 63, 96, 148, 266
Ruffato (2019)	Avaliar a potencialidade de captura de CO2 de argamassas de revestimento através do processo químico da carbonatação natural, a fim de realizar o balanço das emissões e capturas de carbono durante o ciclo de vida das argamassas.	Argamassa de revestimento	Argamassa de Cal e cimento e aditivo	1:0,5:6 ; 1:1:6 ; 1:2:6	interno, externo protegido e desprotegido da chuva	14, 28, 42
Silva (2019)	Avaliar a potencialidade de captura de CO2, através do processo químico da carbonatação natural, de argamassas de assentamento com substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado de resíduo de construção e demolição e adição de aditivo incorporador de ar.	Argamassa de assentamento	Argamassa de Cal, cimento, areia natural e areia reciclada e e aditivo	1:1:6;	interno, externo protegido e desprotegido da chuva	14, 28, 42
Pedry (2020)	Avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO2 devido à carbonatação de argamassas de revestimento.	Argamassa de revestimento com pintura	Argamassa de Cal e cimento (tintas látex PVA, acrílica fosca, acrílica acetinada e acrílica semibrilho)	1:1:06;	Interno, externo protegido e desprotegido da chuva	28, 64, 100, 190
					Natural e Acelerado (5% CO2)	LI*, 10
Fontolan (2021)	Estimar, por análise termogravimétrica, a captura de CO2 de argamassas mistas produzidas com diferentes teores de cal com substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado de resíduo de construção, devido à carbonatação natural.	Argamassa de revestimento	Argamassa de Cal e cimento	1:1:6; 1:0,5:6; 1:2:6	interno, externo protegido e desprotegido da chuva	14, 28, 42, 63, 91, 119, 147, 175

A utilização de um banco de dados é o que antecede o uso de modelos de previsão de profundidade de carbonatação, que podem ser utilizados para estimar a ocorrência de frentes de carbonatação em qualquer período de tempo, bem como a sua profundidade, em argamassas inseridas em determinadas condições ambientais, sendo uma das ferramentas essenciais para prever a durabilidade e

promover a extensão da vida útil de estruturas com revestimento de argamassa ou para assentamento (Possan, 2010).

4.1.2 Tabulação dos dados

Os estudos da tabela 1 foram agrupados pelo instrumento de coleta de dados em formato de tabela estruturada da (Figura 4) e ao final da coleta foi conduzida a tabulação e agrupamento de dados no software Excel.

Parte A – Dados gerais do projeto experimental e traço das argamassas

Banco de dados	Nomenclatura do Autor	Consumo materiais 1 m³ (Kg)					
		Cimento	Cal	Areia	RCD	água	Aditivo

Parte B – Propriedade dos materiais e argamassas

Tipo de cimento	Tipo de cal	Propriedade Mecânicas				
		Fc - 28 d (MPa)	Ed(GPa)	Dias	fc (MPa)	Ft (MPa)

Parte C – Condição de exposição natural e medição da profundidade ao longo do tempo

Ambiente exposição	Profundidade de carbonatação (mm)																			
	0	14	28	42	56	63	64	84	91	95	100	119	147	148	167	175	190	195	202	266
Interno																				
Externo Prot.																				
Externo Desp.																				

Parte D – Valores referentes a Captura de CO_2 ao longo do tempo

CAPTURA DE CO2																		
14 DIAS			28 DIAS			42 DIAS			56 DIAS			64 DIAS			84 DIAS		
Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx

CAPTURA DE CO2												
167 DIAS			190 DIAS			195 DIAS			266 DIAS			
Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	

Figura 4 - Instrumento de coleta de dados

4.1.3 Análise dos dados

A partir dos dados tabulados foram plotados os gráficos referentes à profundidade de carbonatação. O primeiro resultado analisado foi a partir dos resultados de todos os autores. Para que os resultados de profundidade de

carbonatação de todos os autores descritos no Quadro 1 pudessem ser comparados, foi necessário utilizar os resultados que apresentassem traço semelhante, nesse caso, 1:1:6. Dessa forma os traços correspondentes foram B-0, B-50 e B-100 (ANTONIO, 2018), B-50, B-75 e B-100 (MAZURANA, 2019), B-AS e B-CA (RUFFATO, 2019), 50 RCD com aditivo (SILVA, 2019), sem proteção superficial (PEDRY, 2020), a fim de verificar se existe semelhança entre os resultados experimentais.

Os resultados de profundidade de carbonatação de Mazurana (2019) e Ruffato (2019) foi outro agrupamento de dados que foi escolhido, pois possuíam dois traços em comum, 1:1:6 e 1:6, porém tipo de cimento diferente. Além das autoras, Ruffato (2019) e Silva (2019) apresentam, além de traços semelhantes, o uso de aditivo como variável em suas argamassas o que confere uma análise proveitosa quando se trata de profundidade de carbonatação.

4.2 PESQUISA DE ANTONIO (2018)

Em sua pesquisa Antonio (2018) avaliou a captura de CO_2 devido à carbonatação de argamassas de revestimento, produzidas com diferentes teores de resíduo de construção e demolição (RCD). Sendo esses teores com substituição em massa de 0%, 50% e 100% do agregado natural (NA), pelo agregado miúdo reciclado de RCD. As leituras de profundidade de carbonatação foram realizadas para 28, 56, 84, 95, 167, 195, 202 dias, para três ambientes de exposição da edificação (interno em laboratório, externo protegido e externo desprotegido da chuva). A estimativa da quantidade de CO_2 capturada pelos revestimentos argamassados nos diferentes ambientes de exposição foi calculada pela equação adaptada da normativa BRE EM 15804 (2014).

Seus resultados experimentais mostraram que quanto maior o teor de RCD empregado na produção das argamassas maior é a captura de CO_2, sendo até 2,3 vezes maior para a argamassas com 100% de RCD e teor mínimo de clínquer, além disso, suas argamassas carbonataram 20 mm em menos de 200 dias, capturando durante este período até 94 $kgCO_2/m^3$. O que prova que uma construção que utilize argamassas com essas características é capaz de contribuir para a mitigação das emissões associadas ao CO_2.

4.3 PESQUISA DE RUFATTO (2019)

Em sua avaliação de captura de CO_2 devido á carbonatação natural de argamassas de revestimento Rufatto (2019) analisou a influência das variações das proporções de cal e o uso de aditivo incorporador de ar. Suas argamassas foram expostas em três ambientes: interno, externo protegido da chuva e externo desprotegido.

A medição da profundidade de carbonatação foi feita nas idades de 14, 28 e 42 dias. A estimativa da quantidade de CO_2 capturada pelos revestimentos argamassados nos diferentes ambientes de exposição foi calculada pela equação adaptada da normativa BRE EM 15804 (2014).

Seus resultados experimentais constataram que quanto maior o teor de cal utilizado maior é o potencial de captura de CO_2, sendo 73% maior para as argamassas de traço 1:2:6 e teor mínimo de clínquer. A partir de suas análises ainda é possível concluir que as argamassas possuem capacidade de reabsorver em até 44% do CO_2 emitido em sua produção, comprovando novamente ser uma medida compensatória.

4.4 PESQUISA DE MAZURANA (2018)

Seu trabalho avaliou o potencial de captura de CO_2 devido à carbonatação natural em argamassas de revestimento produzidas com agregado reciclado de RCD (Resíduo de Construção e Demolição), sem proteção superficial.

Em sua pesquisa foram produzidas argamassas com e sem cal hidratada, com substituição de areia natural por reciclada de RCD nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100%. A exposição das argamassas ocorreu em ambiente interno, externo protegido e externo desprotegido da chuva, onde permaneceram expostas até a idade de 266 dias. Em suas análises de carbonatação foi medido a profundidade e também foi avaliada a captura por análises térmica (TGA/DTG).

Seus resultados indicaram que o uso de RCD em argamassas de revestimento eleva o potencial de captura de CO_2. Suas argamassas de cimento com 75 e 100% de RCD atingiram a profundidade máxima de carbonatação aos 266 dias e a captura foi de 165,34 KgCO2/m3. A partir de suas análises ainda foi possível concluir que as argamassas possuem capacidade de reabsorver em até 53,8% do CO_2 emitido

em sua produção, comprovando novamente ser uma medida compensatória.

4.5 PESQUISA DE SILVA (2019)

Em suas pesquisas Silva (2019) realizou a mensuração da profundidade de carbonatação natural, do balanço das emissões e captura de CO_2, nos ambientes interno, externo protegido e externo desprotegido, em uma argamassa mista de cimento e cal, de traço 1:1:6, produzida com diferentes teores de substituição da areia natural por areia de RCD (0%, 25% e 50%) e aditivo incorporador de ar nos teores de 0 e 0,3%, exposta.

A estimativa da quantidade de CO_2 capturada pelos revestimentos argamassados nos diferentes ambientes de exposição foi calculada pela equação adaptada da normativa BRE EM 15804 (2014).

Seus resultados concluíram que nessa argamassa o ambiente com maior profundidade de carbonatação foi o externo protegido, seguido de externo desprotegido e interno. Além disso constatou-se que para os teores de substituição, de 0% para 50%, tanto as propriedades mecânicas das argamassas quanto profundidade de carbonatação são melhoradas.

A argamassa foi do tipo assentamento, e indicou nos cálculos de emissão de CO_2 a captura de até 35,4% das emissões e que o uso de aditivo foi favorável para a captura do gás.

4.6 PESQUISA DE PEDRY (2020)

Seu trabalho avaliou a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO_2 devido à carbonatação em argamassas de revestimento. Suas argamassas foram produzidas com traço 1:1:6, alternando os corpos de prova com quatro diferentes tintas imobiliárias tipo premium (látex PVA, acrílica fosca, acrílica acetinada e acrílica semibrilho), todas em tons neutros. Suas amostras foram submetidas a três diferentes ambientes de exposição natural (ambiente interno, externo protegido e externo desprotegido) e, também, submetidas à carbonatação acelerada a uma temperatura de 23°C, umidade de 60% e uma concentração de 5% de CO_2.

Em suas análises de carbonatação como metodologia foi adotada a

medição de profundidade por RILEM e também foi avaliada a captura por análises térmica (TGA/DTG).

Os resultados encontrados mostraram que a proteção superficial do tipo pintura imobiliária reduziu a velocidade de difusão de CO_2 e, consequentemente, a taxa de captura de CO_2 pela reação de carbonatação e que a profundidade de carbonatação foi maior em amostras sem proteção superficial, seguida das amostras com pintura tipo látex PVA e acrílica. Observou-se também que as amostras que receberam proteção superficial do tipo acrílica apresentaram frente de carbonatação muito próximas entre os diferentes tipos de acabamento (fosca, acetinada e semibrilho), demonstrando a alta potencialidade protetiva das tintas acrílicas.

4.7 PESQUISA DE FONTOLAN (2020)

Para avaliar a captura de CO_2 Fontolan (2021) estudou o comportamento da profundidade de carbonatação natural de argamassas mistas com substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado de resíduo de construção (0%, 25% e 50%) e produzidas com diferentes teores de cal hidratada (1:0,5:6; 1:1:6; 1:2:6). Para seu estudo utilizou análise termogravimétrica de alíquotas coletadas de regiões carbonatadas e não carbonatadas das argamassas estudadas.

Pela análise termogravimétrica, a quantidade de CO_2 máxima capturada ocorreu em argamassa sem agregado de RCD com a traço, 1:2:6, sendo 25,41 $KgCO_2/m^3$. Constatando um abatimento em torno de 7% das suas emissões em 28 dias de exposição.

Foi possível constatar que entre os dois métodos de determinação de captura, as tendências para os resultados obtidos por análise térmica convergem com as encontradas no estudo da captura de CO_2 por meio da avaliação da profundidade carbonatada.

4.8 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CARBONATAÇÃO

Nessa etapa foram realizadas comparações entre a profundidade de carbonatação encontrada pelos autores em suas pesquisas. A fim de analisar a tendência do comportamento da carbonatação e captura de CO_2 ao longo tempo nas argamassas para diferentes aplicações do material, ambiente de exposição e

condições ambientais, devido à forte influência desses fatores na velocidade de propagação da frente de carbonatação.

5 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado a discussão dos resultados obtidos, a partir da análise do banco de dados dos resultados experimentais, da profundidade de carbonatação das argamassas e captura de CO_2 estudadas pelos autores.

5.1 ANÁLISE GERAL

Ao comparar os resultados de profundidade de carbonatação com traço 1:1:6 dos autores Antonio (2018), Mazurana (2019), Ruffato (2019), Silva (2019) e Pedry (2020) aos 28 dias, o ambiente interno na maioria dos casos não apresentou valores superiores aos outros ambientes, porém na literatura afirmasse que ambientes internos e protegidos da chuva apresentam maior tendência de captura de CO_2 (Leemann et al.,2015) uma vez que ambientes fechados e com circulações de pessoas apresentam taxas elevadas do gás, fazendo com que se difunda facilmente e o material carbonate mais rapidamente.

Com base nos resultados aqui observados, é possível notar que essa afirmação com relação a profundidade de carbonatação em ambientes internos não pode ser usada como regra.

Um dos motivos dos outros ambientes terem apresentado resultados melhores que o interno (Figura 5,6 e 7) nesses estudos foi que em todos os casos a localização de exposição possuía um grande fluxo veicular, durante a execução da pesquisa, e regime baixo de chuva na época de exposição, evitando saturação dos corpos, condição que facilitou a difusão do CO_2.

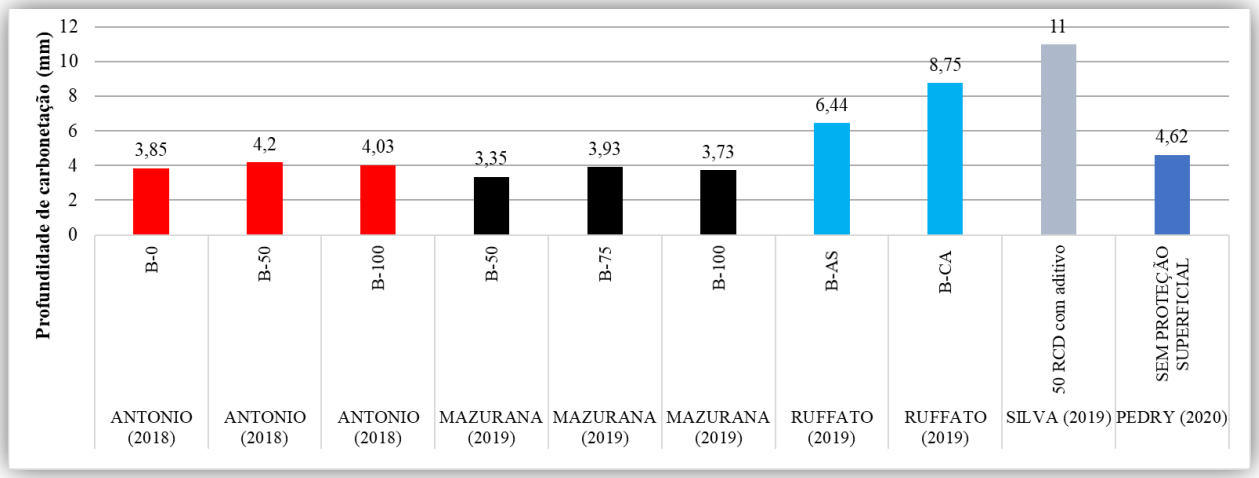

Figura 5 - Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente interno

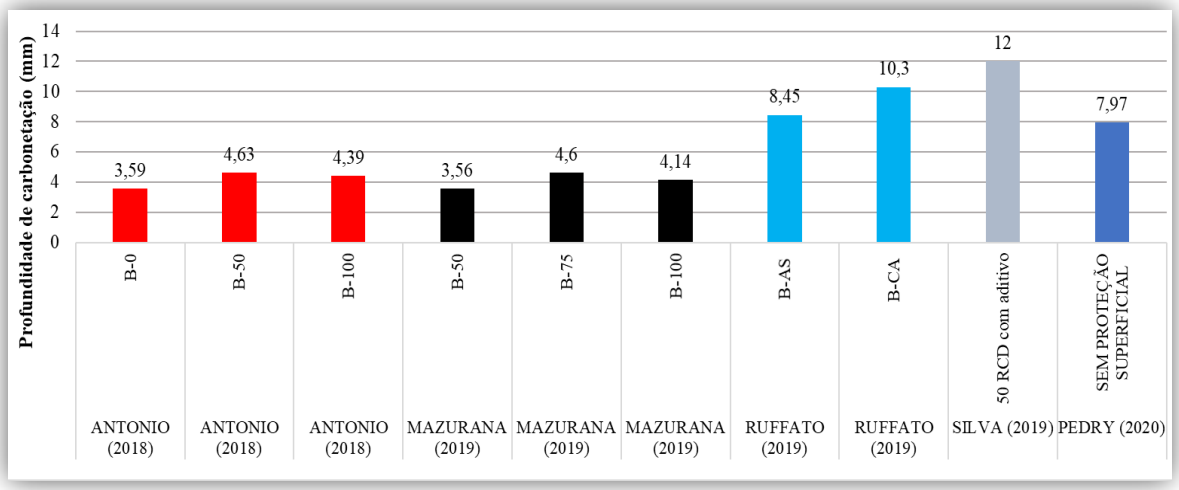

Figura 6 - Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo protegido

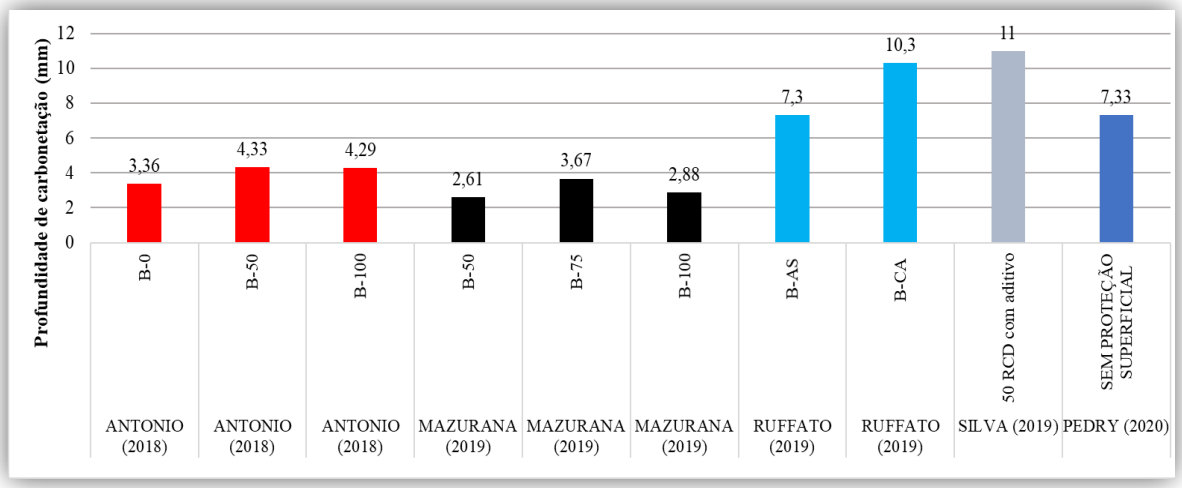

Figura 7 - Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo desprotegido

Além disso também é possível notar que os resultados de profundidade de carbonatação ao longo do tempo aumentaram para todos os autores (Figura 8), exceto Antonio (2018), o que está de acordo com o consenso literário de que a profundidade de carbonatação é proporcional ao tempo de exposição havendo diversos modelos matemáticos, como Tuutti, (1982), Possan, (2010), Lagerblad, (2005), entre outros, que demonstram esta relação.

Nos resultados de Antonio (2018) (Figura 8) houve aumento apenas no ambiente interno. Antonio (2018) explica que esse resultado foi causado pelo contato direto dos corpos de prova com o piso no local de exposição, o que fez com que a base permanecesse úmida por mais tempo e, consequentemente retardou o ingresso do CO_2 nesta região da amostra.

Essa interferência na variação da umidade do corpo de prova, pode ser minimizada com o uso de estrados como suporte dos corpos de prova, a fim de evitar contato direto das amostras com o piso, permitindo circulação de ar na base das mesmas. A recomendação feita por Antonio (2018) é válida já que nos estudos de Rufatto (2019), ela aderiu a recomendação e teve os resultados condizentes com a literatura (Figura 8).

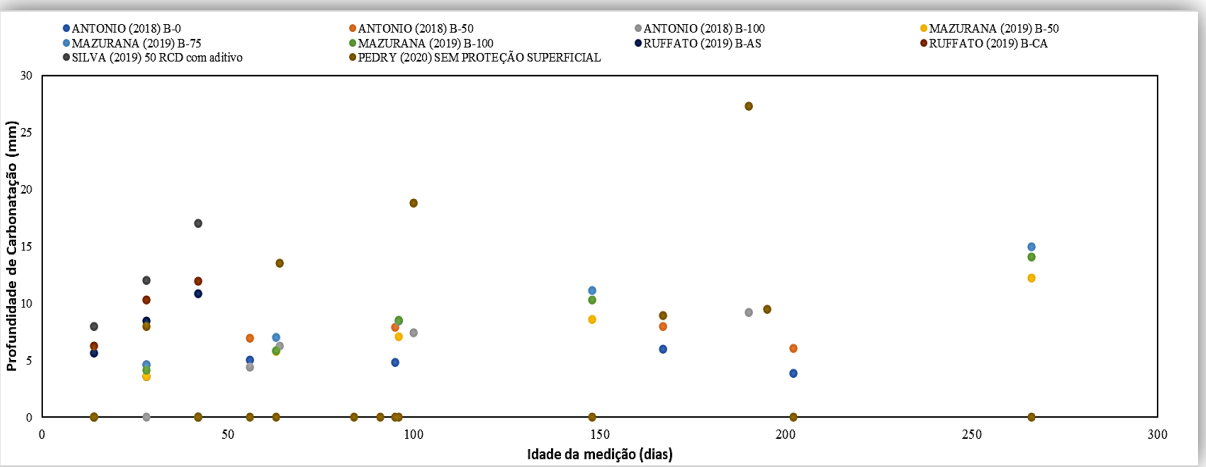

Figura 8 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo protegido

Cabe destacar que entre todos os autores nessa análise com traços semelhantes, o 50 RCD com aditivo de Silva (2019), apresentou majoritariamente a maior profundidade, independente do ambiente de exposição. No caso de Silva (2019) é explicado pela substituição de RCD e principalmente o uso de aditivo incorporador

de ar, visto que entre os autores que utilizaram aditivo, ela foi a que utilizou em maior quantidade. A conclusão de que a captura de CO_2 aumenta com o teor de agregado reciclado e com uso de uso de aditivo foi confirmada pela autora em sua pesquisa ao comparar traços semelhantes sem o uso dos mesmos.

Com relação a influência do RCD nas argamassas, sua utilização facilita a entrada de CO_2 na matriz cimentícia devido sua porosidade que no caso das argamassas com aditivo é ampliada pelo teor de ar incorporado, intensificando o sequestro de gás (ANDRADE et al, 2018).

5.1.1 Captura de CO_2

Ao verificar a captura nos trabalhos nesse respectivo traço selecionado, os autores que utilizaram substituição de agregado por RCD (ANTONIO, 2018; MAZURANA, 2019 e SILVA, 2019) apresentaram maiores quantidades de CO_2 capturado, em comparação às argamassas fabricadas apenas com agregado natural. Esse aumento na quantidade de CO_2 capturado em argamassas com RCD pode ser atribuído à pré-carbonatação dos agregados reciclados, que acontece devido ao ingresso do gás através da matriz cimentícia durante a vida útil da estrutura/edificação que deu origem ao resíduo.

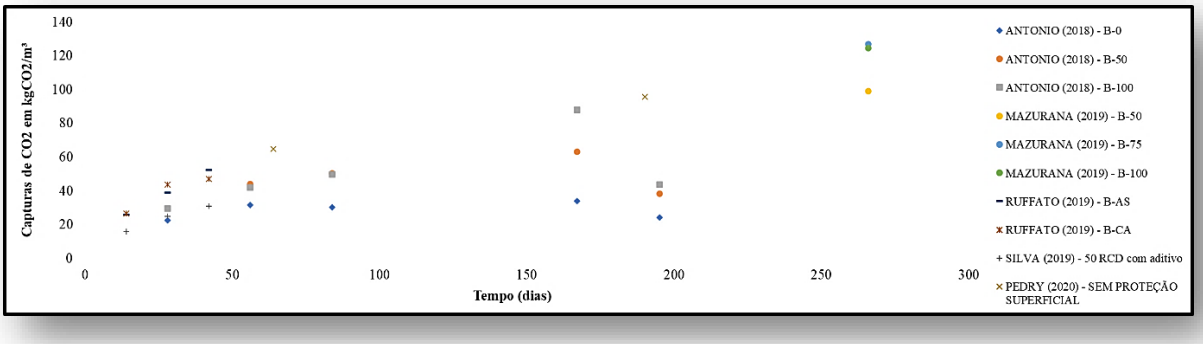

Figura 9 - Captura máx de CO_2 ao longo do tempo no ambiente externo protegido

Outro fator de influência é o aumento da área superficial dos materiais após o processo de demolição e britagem. Com isso os materiais à base de cimento podem absorver elevadas quantidades de CO_2 devido à carbonatação.

A elevação do potencial de carbonatação, e consequente captura de CO_2, dos materiais no período pós-demolição é discutido por Pade e Guimares (2007)

e Felix e Possan (2018). Além disso, as argamassas produzidas com RCD tendem a apresentar maior porosidade, devido a porosidade inerente ao resíduo, o que facilita a difusão do CO_2 aumentando a taxa de carbonatação e, consequentemente, a captura de CO_2 (ANDRADE et al, 2018). Segundo pesquisas realizadas por Thomas et al, (2014) quanto maior a porcentagem de substituição de agregado natural por RCD, maior a relação a/c e mais elevada a porosidade, consequentemente, maior a quantidade de CO_2 absorvido.

É possível verificar, pela Figura 9, que a captura cresce ao longo do tempo em todas as argamassas, assim como a profundidade de carbonatação pois nesse caso as variáveis foram diretamente proporcionais.

Por meio da análise dos dados verificou-se que não há uma proporcionalidade entre a profundidade de carbonatação e a captura de CO_2, já que nos estudos de Mazurana (2019) as argamassas de cimento possuem maior profundidade de carbonatação em comparação as mistas, porém ao verificar a captura, as argamassas que mais capturam são as mistas.

Estudos mostram que o dióxido de carbono também reage com o hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) presente na cal hidratada (MO e PANESAR, 2013), desta maneira para que o CO_2 avance para o interior das argamassas é necessário que esse reaja com dois compostos ($Ca(OH)_2$ e $Mg(OH)_2$), retardando assim o seu avanço.

Assim, a quantidade de CO_2 no interior das argamassas a base de cal, pode ser maior do que nas argamassas à base de cimento para uma mesma profundidade de carbonatação (MAZURANA, 2019).

Um exemplo é, que quando o CO_2 ingressa na estrutura sua velocidade de propagação é maior (profundidade de carbonatação maior), no entanto a captura de CO_2 é reduzida devido à quantidade de hidróxido de cálcio e de magnésio disponível para a reação química ser menor.

Logo, o que deve ser levado em consideração é o tempo em que a argamassa fica exposta sem revestimento durante a execução da obra. Esse tempo deve corroborar para a captura, buscando atingir o potencial de carbonatação o mais rápido possível.

5.2 ANTONIO (2018) E MAZURANA (2019)

A comparação desses dois pode ser realizada a partir de dois traços em comum das autoras, as argamassas de cimento (A0, A50 e A100) e de cal (B0, B50, B100) e com substituição de agregado natural por agregado reciclado.

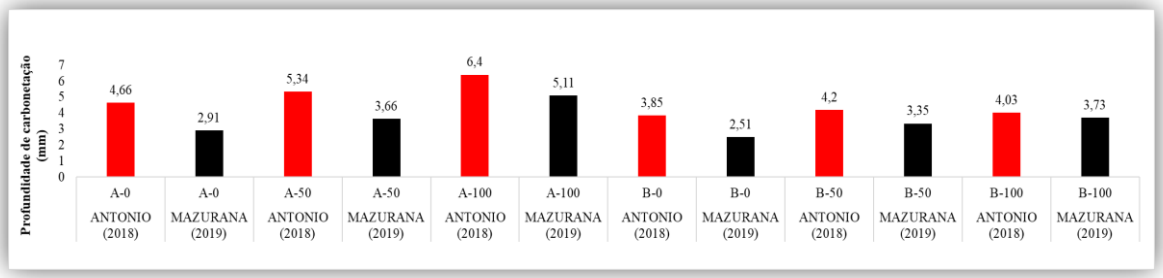

Figura 10 - Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente interno – Antonio (2018) e Mazurana (2019).

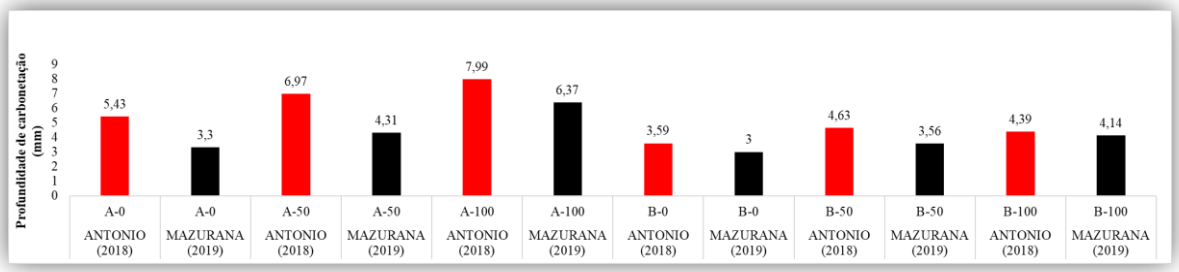

Figura 11 - Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo protegido – Antonio (2018) e Mazurana (2019).

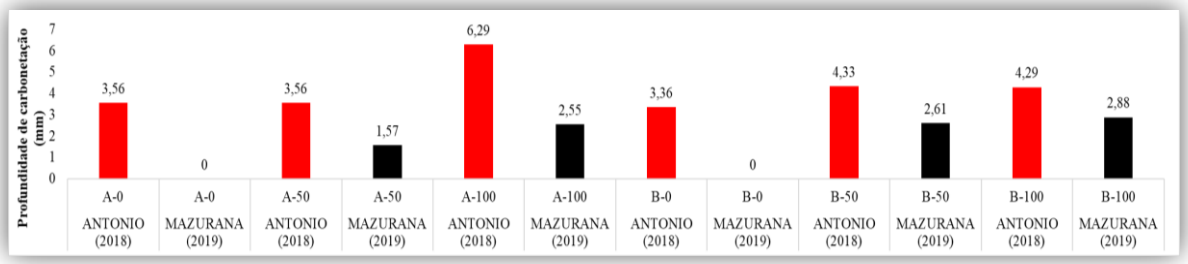

Figura 12 Profundidade de carbonatação aos 28 dias no ambiente externo desprotegido – Antonio (2018) e Mazurana (2019).

Comparando os dois estudos com traços semelhantes é possível notar que nas argamassas de ANTONIO (2018) a profundidade é maior, independente do ambiente de exposição.

Essa sobreposição pode ser explicada pelo uso do cimento CP IV RS

32 que comparado ao CP II F – 32, usado por Mazurana (2019), apresenta menor alcalinidade, isto é, a velocidade e profundidade da frente de carbonatação dos cimentos com aditivos são maiores, pois eles têm uma reserva alcalina disponível menor, facilitando a penetração da frente de carbonatação. Dado que, o CO_2 reage diretamente com os compostos alcalinos do cimento, tais como o $Ca(OH)_2$, NaOH, KOH e o C-S-H, segundo Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997).

Outra análise que pode ser observada dos gráficos acima foi que para as argamassas a base de cimento, traço 1:6 das autoras (A0, A50 e A100), a profundidade de carbonatação aumenta juntamente com a porcentagem de substituição do RCD, o que corrobora com os resultados de Andrade et al., (2018). No entanto, para as argamassas mistas com cal, traço 1:1:6 (B0, B50 e B100), a variação da substituição de 50% para 100% praticamente não alterou a profundidade de carbonatação encontrada, contudo foi mais elevada que a de referência (sem RCD).

Segundo Antonio (2018) e Mazurana (2019) constataram, esses valores podem estar relacionados à maior porosidade do agregado reciclado assim como à sua carbonatação prévia o que permitiu uma frente de carbonatação mais rápida.

Nos resultados de Mazurana (2019) as argamassas mistas, produzidas com cimento e cal hidratada, tem maior potencial de captura de CO_2 que as de cimento. Este aumento está relacionado com a quantidade de compostos carbonatáveis da cal hidratada utilizada, ou seja, de materiais que contribuem com a reação química de carbonatação e, consequentemente na captura de CO_2. Em contrapartida, nos resultados de Antonio (2018) a propagação nas argamassas mistas com cal foi mais lenta, provavelmente devido à presença do MgO, uma vez que para o CO_2 avançar para o interior das argamassas ele precisa reagir com o CaO e também com o MgO.

5.3 RUFFATO (2019) E SILVA (2019)

Analisando o traço das autoras sem substituição de agregado natural por RCD, B-AS e B-CA (RUFFATO, 2019) com o 0 RCD sem aditivo e 0 RCD com aditivo (SILVA, 2019), todas as argamassas com aditivo apresentaram profundidade de carbonatação superiores as suas respectivas argamassas sem aditivo com o passar dos dias, independentemente do ambiente, resultado comprovado pelas

Figuras 13,14 e 15. Esse fato pode ser explicado possivelmente pelo aumento da porosidade da argamassa devido à incorporação de ar.

Tal resultado indica que o aditivo incorporador de ar não formou uma estrutura de vazios dispersa na matriz, com baixa conectividade entre os poros, mas sim uma ampla rede interconectada, que aumentou a velocidade da frente de carbonatação (LACERDA, 2016).

Além desses estudos, Calhau (2000) foi outro autor que também constatou que os revestimentos de argamassas com ar incorporado, em condições normais de temperatura e pressão, são mais permeáveis que os revestimentos somente de cimento e areia, o que facilita a frente de carbonatação.

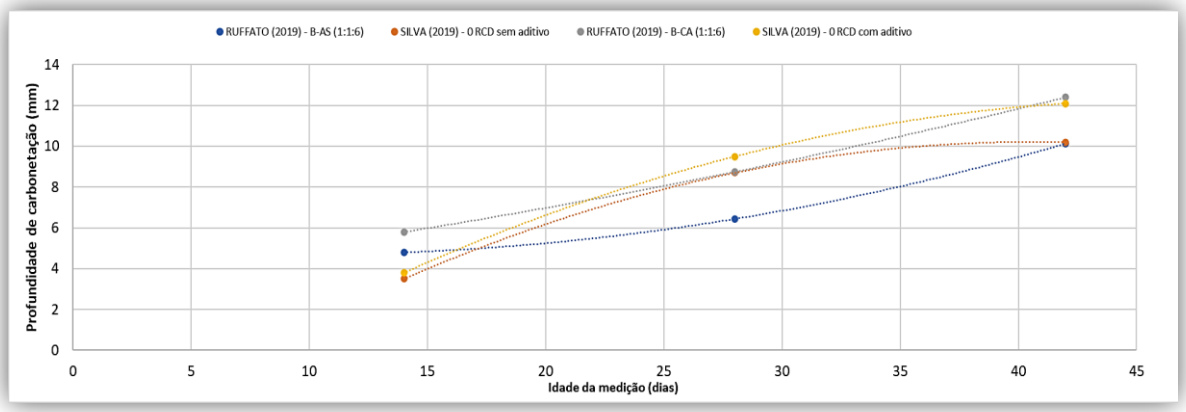

Figura 13 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente interno – Rufatto (2019) e Silva (2019).

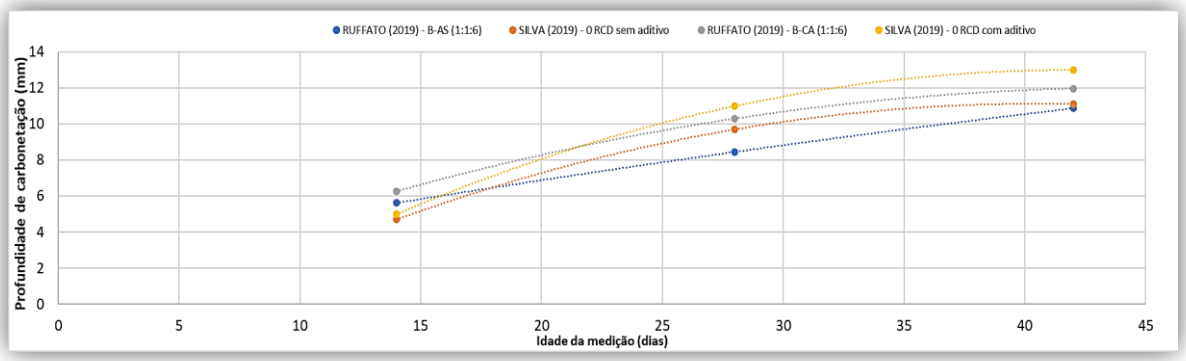

Figura 14 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo desprotegido – Rufatto (2019) e Silva (2019).

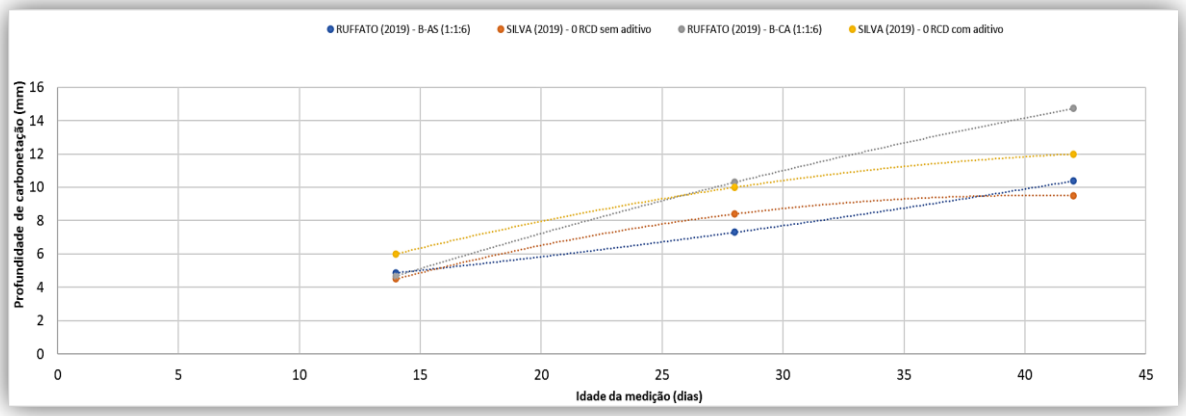

Figura 15 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo no ambiente externo protegido – Rufatto (2019) e Silva (2019).

5.3.1 Captura de CO_2

A partir da Figura 16, pode-se observar que o captura de CO_2 é maior nos ambientes externos, o que corrobora com as afirmações no tópico de profundidade de carbonatação.

Com relação ao uso do aditivo, a Figura 16 indica que a captura aumenta com o teor de agregado reciclado nas argamassas com aditivo em comparação com as sem aditivo.

Além disso, o agregado de RCD facilita a entrada de CO_2 na matriz cimentícia devido sua porosidade (ANDRADE et al, 2018) que no caso das argamassas com aditivo é ampliada pelo teor de ar incorporado, intensificando o sequestro de CO_2.

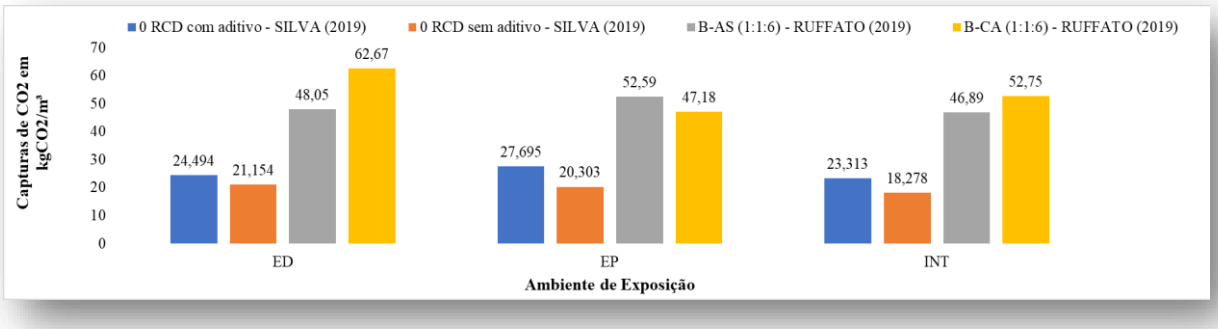

Figura 16 - Captura de CO_2 aos 42 dias - Rufatto (2019) e Silva (2019)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados nesse estudo mostraram que o tempo de exposição das argamassas afeta positivamente a profundidade de carbonatação, ou seja, quanto maior o tempo maior a profundidade de carbonatação e, consequentemente, maior a captura de CO_2. Também foi possível concluir que o ambiente em que as argamassas de revestimento permanecem expostas ao longo de sua vida útil possuem influência significativa na profundidade de carbonatação, a captura de CO_2 varia com relação a umidade e circulação de pessoas no ambiente exposto.

Argamassas contendo aditivo apresentaram maior profundidade de carbonatação, fato que pode ser explicado possivelmente pelo aumento da porosidade da argamassa devido à incorporação de ar. Tal resultado indica que o aditivo incorporador de ar não formou uma estrutura de vazios dispersa na matriz, com baixa conectividade entre os poros, mas sim uma ampla rede interconectada, que aumentou a velocidade da frente de carbonatação (LACERDA, 2016). O agregado úmido reciclado de RCD tem influência significativa na profundidade de carbonatação e, consequentemente na captura de CO_2 das argamassas produzidas. Quanto maior o teor de RCD empregado, maior a profundidade de carbonatação e a captura de CO_2, em comparação aos traços de referência.

O tipo de argamassas (cimentícia ou mista) tem influência significativa nas propriedades das argamassas e, consequentemente na captura de CO_2. As argamassas mistas, produzidas com cimento e cal hidratada, tem maior potencial de captura de CO_2 que as de cimento. As argamassas com cal, devido a maior disponibilidade de produtos carbonizáveis, como $Ca(OH)_2$ e $Mg(OH)_2$, possuem maior potencial de captura de CO_2 ao longo da vida útil da edificação, podendo absorver 34 a 79% mais CO_2 do que as argamassas de cimento.

A captura de CO_2 decorrente da carbonatação da argamassa de revestimento pode ser considerada uma medida compensatória no balanço das emissões. Pelo método da profundidade de carbonatação, as argamassas em estudo possuem capacidade de reabsorver até 53,8% do CO_2 emitido em sua produção, dependendo teor de cal.

O ambiente construído nacional é predominantemente à base de materiais cimentícios, sendo de importância compreender que estes produtos estão constantemente absorvendo CO_2 desde a fase da construção, durante a vida útil e no

período pós-demolição da edificação, o que é desejável do ponto de vista ambiental.

Ao avaliar a estimativa do potencial de captura de CO_2 obtida através do método proposto na normativa BRE EM 15804 (BRE, 2014) e da análise termogravimétrica (TG/DTG) dos estudos em questão conclui-se que os valores são muito próximos.

6.1 PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver modelos preditivos da profundidade de carbonatação utilizando técnicas de regressão linear/não linear, , para que assim possa ser realizado projeções de resultados para diferentes datas de ensaios nas variadas pesquisas.

Realizar estudos de casos considerando modelos ajustados aos dados, para simular diferentes situações de exposição ao CO_2 ao longo do tempo, incluindo os dias que já estão estudos, como 200 dias, ou até mais, visto a importância do tema para as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

ALI, M.B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M.S. **A review on emission analysis in cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, J.J.D.O. et al. **Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste**. Construction and Building Materials. Pag 70-83. 2018.

ÂNGULO, S. C., Zordan, S. E., & John, V. M. (2001). **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo: SP. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?q=sergio+angulo+residuos+solidos&btnG=&hl=en&as_sdt=0%2C5

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____.**NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas —Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 5751**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

BAHIA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa**. 4a Ed. São Paulo: Nome da Rosa, 2008. 89 p.

BAKKER, R. F. M. **Initiation period: Corrosion of steel in concrete**. London: Champman and Hall, p 22-55, 1998.

BERTOS, F. M.; SIMONS. S.J.; HILLS, C.D.; CAREY, P.J. **A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2**. Centre for CO_2 Technology. University College London, Torrington Place, London. 2004.

BOSOAGA, A., MASEK, O., OAKEY, J. E. **CO_2 Capture Technologies for CementIndustry**. Energy Procedia, Elsevier, v. 1, p. 133-140, 2009.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: Capítulo 26 do Livro: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo 2010.

CONTRERAS, M. et al. **Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)**. Construction and Building Materials, vol. 123, pp. 594-600, 2016.

COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. **Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta**. Revista Matéria, 2017. ISSN 1517-7076.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. **A simple model to explain compressive strength of high-performance concrete**. In: HIGHPERFORMANCE CONCRETE INTERNATIONAL CONFERENCE, 3., Recife, 2002. Proceedings... Performance and Quality of Concrete Structures. SP 207. Recife, PE, Brasil, 2002, SP 207-9. p. 139-150.

DHEILLY, R. M., TUDO, J., BI, Y. S., QUÉNEUDEC, M., **Influence of storage conditions on the carbonation of powdered $Ca(OH)_2$**. Construction and building materials, v. 16, pp. 155-161, jan. 2002.

ELENI, D. et al. **Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars**. 9 th International Masonry Conference 2014 in Guimarães. Portugal, 2014.

ENGENHARIA E AGRONOMIA – **CONTECC**, 2015, Fortaleza-CE. Anais eletrônicos. Fortaleza, 2015. Disponível em: http://www.confea.org.br/media/Trabalhos_Premiados_2015_influencia_do_aditivo_incorporador_de_ar_nas_propriedades_das.pdf

FELIX, E.F.; POSSAN, E. **Balanço das emissões e da captura de CO2 em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento**. Revista Ibracon de Estruturas e Materias. v. 11, p. 135 - 162, 2018.

GAJDA, J., MILLER, F.M. **Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: a Literature review and estimation of CO_2 absorption by Portland Cement Concrete**. PCA, Chicago, R&D Serial no. 2255, 2000.

GAVA, G.P.; MANCINI. P. S; SAKAI.H.H. **Influência do aditivo incorporador de ar nas propriedades das argamassas de assentamento**. In: CONCRESSO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 72., 2015, Fortaleza. Artigo. Fortaleza: 2015.

GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. **Proposta de Método de Dosagem Racional de Argamassas Contendo Argilominerais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2002.

HABERT, G.; ROUSSEL, N. **Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives**. Cement & Concrete Composites. 2009.
HEWLETT, P. Lea's chemistry of cement and concrete. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2003.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. **Carbonation of concrete and its prediction**. Cementand Concrete Reserarch, v. 17, n. 3, p. 489-504, 1987

HUIJGEN, W.J.J. & COMANS, R.N.J. **Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation**. Energy. ECN- C--03-. 2003.

IPCC; ONU(2001). **Third Assessment Report. Climate Change 2001**: The Scientific Basis. Intergovernmental Panelon Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas Regional. ONU – Organização das nações Unidas. 2001.

Jl, Zou. **Enhancing Climate Mitigation Ambition Successively**: The Drivers. In: STAVINS, Robert N.; STOWE, Robert C. (Ed.). The Paris Agreement and Beyond: International Climate Change Policy Post- 2020. Cambridge: Harvard Project On Climate Agreements, 2016. p. 29-32.

KALIYAVARADHAN. S.K.; LING. T. **Potential of CO2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste—An overview**. Journal of CO_2 Utilization.
Pag 234–242.2017.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KOKUBU, M.; NAGATAKI, S. **Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcements in 20 years tests**. MALHOTRA, V.M. (Ed) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag na Natural Pozzolan ins Concrete, 3rd. Anais..., (SP 114-14). v. 1, p.315-329. Trondheim: American Concrete Institute, 1989.

LAGERBLAD, B. **Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art. Swedish Cement and Concrete Research Institute**. Estocomo. 2005. (ISBN 91-976070-0-2 / ISSN 0346-8240).

LUBELLI, B.; NIJLAND, T.G.; VAN HEES, R. P. J. **Simulation of Self-Healing of Dolomitic Mortar**. In: EUROSEMINAR ON MICROSCOPY APPLIED TO BUILDING MATERIALS, 13., Ljubljana, 2011.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para execução de revestimentos de argamassas para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em Argamassas de Revestimento Através da Carbonatação Natural**. Dissertação de mestrado - Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Medianeira, Paraná, abril de 2019.

MAZURANA, L.; BITTENCOURT, P.R.S.; SCREMIN, F.R.; MILANI, K.C.; NEVES JUNIOR, A.; POSSAN, E. **Determination of CO2 capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry**. In: IX SIMPÓSIO DE ANÁLISE TÉRMICA, 9., 2019, Goiânia. Anais... Goiânia: SIAT, 2019. p. 1-6.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedade e materiais. São Paulo: Ibracon, 2014.

MEHTA, P.K. Reducing then vironmenta limpactof concrete. **Concrete can be durable**

and environmentally friendly. Concrete international, p.61-66, 2001.

NAIK, T.R., KUMAR, R. **Global warming and cement-based materials**. UWM Center for By-Products Utilization. This first edition is being published at the Second International Conference on Sustainable Constructions Materials andTechnologies, Ancona, Italy, June 2010. p.3181–3186.

NEVES, I. B. F. **Avaliação da Carbonatação em Argamassas de Cimento com Adições de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e Cristalina**. Dissertação de Mestrado - UnB. Brasília. 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: bookman, 2016. pagina 521.
ORTOLAN, T. L. P.; SCHIAVON, J. Z.; ANDRADE, J. J. O. **Estudo da carbonatação natural em argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados de construção e demolição**. 57º Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito-MS, outubro 2015.

PADE, C., GUIMARAES, M. **The CO_2 uptake of concrete in a 100 year perspective**. Cementeand Concrete Research, p.1384–1356, 2007.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation**. AIChE Journal, 1989.

PAULETTI, C.; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada**: estado da arte das pesquisas no Brasil. Ambiente Construído (Online), v. 7, p. 7-20, 2007.

POLITO, G., et al. **Análise microestrutural da interface entre argamassas de revestimento sobre blocos cerâmicos**. 50º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo-SP, IBRACON, 2008.

POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete Petrography** - A handbook of investigative techniques. 2ª. ed. Londres: Taylor&Francis, 2016.

POSSAN, E. **Captura de CO_2 em materiais cimentícios**. Concreto e Construções. Ed. 95. Jun-Set., 2019.

POSSAN, E. et al. **CO_2 uptake potencial due to concrete carbonation**: A case study. February, 2017.

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

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre. 2010.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. **CO2 uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 1, n. 1, p. 7, 2016.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. **Metodologia para estimativa da captura de CO devido à carbonatação do concreto**. In: Estudos Ambientais. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 4, 2017. p. 17-29.

POSSAN, E.; FRIGO, E.P.; **Mudanças climáticas**: sequestro de CO_2 devido à carbonatação do concreto. 2013.

Possan, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente urbano**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 2010.

RAJISHA, K.R.; POTHAN, L.A.; THOMAS, S. **Thermomechanical and spectroscopic characterization of natural fibre composites**. Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance, p.241-274, 2011.

REAL, L. V. **Efeito de Adições Pozolânicas na Estimativa de Vida Útil do Concreto Exposto a Cloretos Através da Resistividade Elétrica Superficial**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2015

RILEM. CPC; **Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth**. TC56 - MHM Hydrocarbon Materials, 1998. ISSN 0025-5432/88.
RIXON, R.; MAILVAGANAM, N. P. Chemical Admixtures for concrete. Londres: E and FN Spon, 1999

ROADMAP. **Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p.

RUFATTO, M. E. **Estimativa da captura de CO2 devido à carbonatação natural de argamassas de revestimento**. 2019. 89 fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

SANJUÁN, M. A. et al. **Effect of Curing Time on Granulated Blast-furnace Slag Cement Mortars Carbonation**. Cementand Concrete Composite, abril 2018. ISSN doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006.

SCARTEZINI, L. M. B. **Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa**: Estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca. 262 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de pós graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2002.

SILVA, J. O. **Estudos para elaboração do plano duodenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral** – Perfil do Cimento. Brasil: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P42_RT68_Perfil_do_Cimento.pdf

Snellings, R., Mertens, G., & Elsen J. (2012). **Supplementary Cementitious Materials**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 74, 211-278.
SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual, 2010. Rio de Janeiro, SNIC; 2011.

SWADDIWUDHIPONG, S., Lu, H.R. and WEE, t.h. **Direct Tension Teste and Tensile Strain Capacity of Concrete at Early Age**. Cem. Concr. Res. 2003.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, p. 30. 1982

VAN GERVEN, T. et al. **Effects of carbonation and leaching on porosity in cement-bound waste**. Waste Management, v. 27, p. 977-985, 2007. ISSN 10.1016/j.wasman.2006.05.00.

VAN OSS H. G.; PADOVANI, A. C. **Cement manufacture and the environment**. Part II. Enviromental challenges and opportunities. Journal of industrial Ecology, n 7, 2003, p. 93-127.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. **Packing density of cementious materials**: part 1-measurement using a wet packing methos. MaterialsandStructures, v.41, n. 4, p. 689-701, 1 maio 2008.

XI, F. et al. **Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation**. Nature Geoscience, Novembro 2016. ISSN 10.1038/NGEO2840.

YANG, Qi. **Stability of air bubbles in fresh concrete**. Suécia, 2012. 59f. Dissertação (mestrado em ciência da engenharia estrutural e design do desempenho da construção) – Chalmer University of Technology, Suécia, 2012.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. 4.ed. São Paulo: Editora Pini/Sinduscon-SP, 2002. 669p.

Yegulalp T.M., K.S. Lackner and H.J. Ziock, **A Review of Emerging Technologies for Sustainable Use of Coal for Power Generation**. Presented at Sixth International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Calgary, Alberta, Canada, May 30-June (2000).

ZHAO, Z. et al. **Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars.** Construction and Building Materials. Pag 179-186.2015.