ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

# ANÁLISE COMPARATIVA DA CARBONATAÇÃO NO CICLO DE VIDA E DA CURA CARBÔNICA DE ARGAMASSAS MISTAS COM USO DE BIOCARVÃO PARA SEQUESTRO DE CARBONO

## Comparative analysis of carbonation in the life cycle and carbonation curing of rendering mortars with the use of biochar for carbon sequestration

**Alex Neves Junior***
Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil | Cuiabá-MT | alexnevesjr@gmail.com

**Elias Franco de Oliveira**
Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil | Cuiabá-MT | eliasfranco530@gmail.com

**Thaís Xavier da Silva**
Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil | Cuiabá-MT | thais99xavier@gmail.com

### Resumo

*A indústria cimenteira é responsável com até 8% das emissões globais de $CO_2$. A substituição por processos mais sustentáveis tem motivado a pesquisa de novos materiais de construção civil, que possam mitigar os efeitos do aquecimento global. O biocarvão (biochar) obtido a partir da pirólise de diferentes biomassas é um desses materiais suplementares alternativos e o uso da carbonatação, para sequestro de carbono, uma tecnologia reconhecida. O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente, a carbonatação no ciclo de vida e na cura carbônica, de argamassas mistas com biocarvão nos teores de 5% e 20% de substituição do cimento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade, indicador químico de pH e avaliação da captura de CO2 no ciclo de vida e através da cura carbônica. As argamassas com biocarvão, carbonatadas naturalmente em ambiente interno e acelerado, apresentaram aumento na captura de carbono e na resistência mecânica.*

**Palavras-chave:** Argamassas Mistas; Biocarvão; Cura Carbônica; Carbonatação natural.

### ABSTRACT

*The cement industry is responsible for up to 8% of global $CO_2$ emissions. The replacement by more sustainable processes has motivated research into new building materials that can mitigate the effects of global warming. Biochar (biochar) obtained from the pyrolysis of different biomasses is one of these alternative supplementary materials and the use of carbonation, for carbon sequestration, is a recognized technology. The objective of this work is to comparatively evaluate the carbonation in the life cycle and in the carbonic curing of mixed mortars with biochar in the contents of 5% and 20% of cement replacement. Compressive strength tests, capillary absorption, pH chemical indicator and assessment of $CO_2$ capture in the life cycle and through carbonic curing were carried out. Mortars with biochar, carbonated naturally in an internal and accelerated environment, showed an increase in carbon capture and recovery in mechanical strength.*

**Keywords:** Rendering Mortars; Biochar; Carbonation Curing; Natural carbonation.

# 1 INTRODUÇÃO

O cimento é principal matéria-prima utilizada na construção de edifícios, obras residenciais e de infraestrutura urbana sendo unicamente a responsável por aproximadamente 8% das emissões mundiais de $CO_2$, além disso, cerca de 90% de todo o cimento produzido no Brasil é empregado na confecção de concretos e argamassas (JOHN *et al*., 2018).

Conforme relatório ROADMAP (2021), a mitigação das emissões da indústria cimenteira, pode se dar, pela eficiência dos fornos, uso de materiais suplementares, redução do fator de clinquer e a adoção de tecnologias para captura e uso ou estocagem de carbono (CCUS). O uso da carbonatação no ciclo de vida e da cura carbônicas, já tem sido estudada à pelo menos uma década conforme Neves Junior (2014) e Possan *et al.,* (2017), em artefatos de cimento não armados, mostrando que o sucesso na neutralidade das emissões depende necessariamente de estar acoplada à esse tipo de tecnologia.

Como mencionado, a diminuição do fator de clínquer por meio de uso de outros materiais ricos em sílica, tem sido amplamente explorado, sendo biocarvão uma alternativa recente, conforme Gupta *et al.* (2017). O biocarvão derivado da casca de arroz tem um grande apelo no Brasil, pois por exemplo, a safra 2022/23 em torno de 10,4 milhões de toneladas de arroz, gerou 20% de resíduos diretos (CONAB, 2022), que são descartados de forma inadequada ou incinerados a céu aberto, liberando $CO_2$ ou metano.

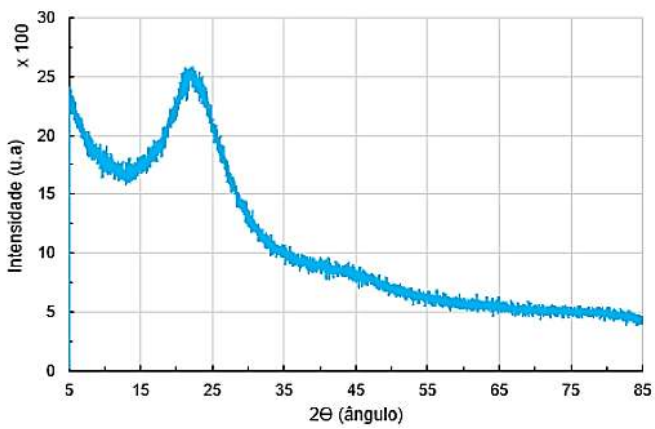
Portando, o objetivo deste trabalho, foi incorporar o biocarvão, oriundo da casca de arroz em argamassas sem reforço metálico, e comparar o seu comportamento na carbonatação natural e na cura carbônica, avaliando a resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e determinação da captura de $CO_2$, pela medição da frente de carbonatação e pelo ganho percentual de massa.

# 2 METODOLOGIA

## 2.1 MATERIAIS

O cimento utilizado nos ensaios foi do tipo CP II 32-F da fabricante Votorantim. A cal hidratada utilizada nos ensaios foi do tipo CH-III, da marca Usical. A água utilizada para todos os ensaios foi proveniente da rede de abastecimento da concessionária Águas Cuiabá. A areia empregada nos ensaios foi a do tipo média. O biocarvão utilizado nos ensaios foi o derivado da casca de arroz pirolisado à 400°C durante 15 min. A figura 1, mostra o biocarvão com as características claramente amorfas. O aditivo super plastificante utilizado nos ensaios foi do tipo Aditivo super plastificante Glenium 51.

**Figura 1:** Difratograma do biocarvão



Baseando-se nos trabalhos de Mazurana (2019) e Néspoli (2020), foi escolhido o traço de 1:2:6 (cimento: cal: areia) em composição mássica. A quantidade de água foi determinada conforme o ensaio de espalhamento, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005), fixado espalhamento em 165 ± 5mm. Foram estabelecidos os teores de 5% e 20% de substituição de cimento por biocarvão.

Para análise da carbonatação no ciclo de vida, após a moldagem e as 24h iniciais de cura úmida, as argamassas foram dispostas em 2 ambientes distintos de exposição durante 60 dias, denominadas de interno e externo protegido.

Para cura carbônica foram moldadas as mesmas argamassas. As referências foram curadas em ambiente úmido por 24h, e posteriormente levados a cura por imersão até a idade de 28 dias (cura convencional). As argamassas carbonatadas foram curadas por 24h nas mesmas condições anteriores e em seguida foram submetidas à 24h de cura nas condições controladas de laboratório. Em seguida, foram levados à câmara de carbonatação acelerada por um período de 2h, nas seguintes condições: 100% de concentração de $CO_2$, umidade relativa em de 60% ∓ 5% e temperatura em 25°C ∓ 2°C, conforme Neves Junior (2014). Por fim, foram levados à cura convencional até a idade de 28 dias. O quadro 1 apresenta as argamassas nas condições de ensaio estabelecidas no trabalho.

**Quadro 1:** Nomenclatura das argamassas

| **Argamassas analisadas pela carbonatação no ciclo de vida** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ambiente externo com proteção** | **Ambiente interno** | **Cimento** | **Cal** | **Areia (g)** | **Biocarvão** | **Água** | **Plastificante** |
| AR-C100-EP | AR-C100-IN | 1 | 2 | 6 | - | 1,6 | - |
| AR-C95-B5 - EP | AR-C95-B5 - IN | 0,95 | 2 | 6 | 0,05 | 1,6 | 0,0066 |
| AR-C80-B20 - EP | AR-C80-B20 - IN | 0,8 | 2 | 6 | 0,2 | 1,6 | 0,009 |
| **Argamassas submetidas à cura carbônica** | | | | | | | |
| **Cura convencional** | **Cura carbônica** | **Cimento** | **Cal** | **Areia** | **Biocarvão** | **Água** | **Plastificante** |
| AR-C100-B0 | AC-C100-B0 | 1 | 2 | 6 | - | 1,6 | - |
| AR-C95-B5 | AC-C95-B5 | 0,95 | 2 | 6 | 0,05 | 1,6 | 0,66 |
| AR-C80-B20 | AC-C80-B20 | 0,80 | 2 | 6 | 0,2 | 1,6 | 0.90 |

## 2.2 MÉTODOS

O método com indicador químico de pH para frente de carbonatação foi realizada de acordo com o a metodologia RILEM CPC-18 (1998), para as argamassas analisadas pela carbonatação no ciclo de vida. A medição das frentes de carbonatação se deu com ferramental digital “grid”.

A resistência mecânica à compressão simples, seguiu as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996). Foi utilizada máquina universal de ensaios de marca EMIC, modelo DL 1000 com velocidade de carregamento de 1,0mm/min. A resistência individual em Megapascal, foi obtida conforme a equação 1.

$$f_{c,i} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

A absorção de água por capilaridade seguiu as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012) sendo calculada a absorção de água por capilaridade conforme equação 2.

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (2)$$

Onde C é absorção de água por capilaridade em g/cm², A é a massa (em gramas) do corpo de prova após o procedimento de imersão em água, B é a massa (em gramas) do corpo de prova após secagem na estufa e S é a área da seção transversal do corpo de prova em cm².

A determinação da captura de $CO_2$ no ciclo de vida, pela carbonatação natural, foi calculada de acordo com a normativa BRE EM 15804 (2014), conforme a equação 3.

$$CapCO_2 = ec \times (CaOcim \times Qcim \times \%Ccim \times \%CaOcim + CaOcal \times Qcal \times \%CaOcal) \times A \times M \quad (3)$$

Sendo que: $ec$ = Profundidade de carbonatação (mm).

$Q_{cim}$ = Teor de cimento em 1 m³ (Kg). Foi utilizado 173kg para argamassa sem biocarvão; 164,35kg para argamassa com 5% de biocarvão; 160,89 kg para 7% de biocarvão; 155,7 kg para 10% de biocarvão; 138,4kg para 20% de biocarvão.
$Q_{cal}$ = Consumo de cal para produzir 1 m³ (Kg). Foi utilizado 346kg, referente à quantidade de cal utilizada na argamassa, para 1 m³ do traço empregado.
$CaO_{cim}$ = Quantidade de óxido de cálcio contido no cimento. Foi utilizado 59%, conforme obtido no resultado de FRX.
$CaO_{cal}$ = Quantidade de óxido de cálcio contido na cal. Foi utilizado 71%, conforme obtido no resultado de FRX.
$\%CaO_{cim}$ = Proporção de CaO constituinte do cimento transformada em $CaCO_3$. Foi utilizado 75% conforme (ANDRADE, et al., 2018).
$\%CaO_{cal}$ = Proporção de CaO constituinte da cal transformada em $CaCO_3$. Foi utilizado 80% conforme Stanmore e Gilot (2005).
$\%C_{cim}$ = Porcentagem de clínquer contido no cimento. Foi utilizado 92% de acordo com a NBR 11578 (1991).
$M$ = Fração molar química $CO_2$/CaO
$A$ = Área da seção transversal exposta ao $CO_2$ (m²).
Cap$CO_2$ = Captura de $CO_2$ em kg por metro cúbico de argamassa (kg$CO_2$/m³).

A fração molar química (M), considerada foi de 0,786. Já a área da seção transversal exposta ao $CO_2$ (A) foi para uma estimativa de área coberta equivalente ao volume de 1 m³ de argamassa, com 20mm de espessura, o que resulta em uma área constante igual a 50m².

A determinação da captura de $CO_2$, por cura carbônica se deu através do ganho de massa dado pela equação 4 (SHAO, 2006).

$$G.massa(\%) = \frac{Mantes,CO2 - Mdepois,CO2 + Mágua}{Mantes,CO2} \quad (4)$$

Onde: $M_{antes,\ CO2}$ = Massa do corpo de prova antes da carbonatação.
$M_{depois,\ CO2}$ = Massa do corpo de prova depois da carbonatação.
$M_{água}$ = Massa água gerada pela reação de carbonatação.

# 3 RESULTADOS E ANÁLISES

## 3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

**Quadro 2:** Resistencia à compressão simples

| **Ambiente externo com proteção** | **Média (MPa)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
|---|---|---|---|
| AR-C100-EP | 3,01 | 0,105 | 3,50 |
| AR-C95-B5 - EP | 2,83 | 0,263 | 9,29 |
| AR-C80-B20 - EP | 1,83 | 0,164 | 8,95 |
| **Ambiente interno** | **Média (MPa)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AR-C100-IN | 3,15 | 0,092 | 2,92 |
| AR-C95-B5 - IN | 2,88 | 0,246 | 8,57 |
| AR-C80-B20 - IN | 2,39 | 0,150 | 6,29 |
| **Cura convencional** | **Média (MPa)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AR-C100-B0 | 5,11 | 0,05 | 1,93 |
| AR-C95-B5 | 4,44 | 0,3 | 9,03 |
| AR-C80-B20 | 4,49 | 0,12 | 6,55 |
| **Cura carbônica** | **Média (MPa)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AC-C100-B0 | 5,59 | 0,256 | 2,35 |
| AC-C95-B5 | 4,58 | 0,36 | 8,92 |
| AC-C80-B20 | 5,79 | 0,2 | 7,03 |

Analisando o quadro 2, para as argamassas submetidas à carbonatação natural, é possível constatar que as referenciais apresentaram as maiores resistências em relação as com biocarvão, função das últimas diminuírem o consumo de cimento. As argamassas em ambiente interno apresentaram maiores resistências que as submetidas em ambiente externo protegido. Na cura carbônica, as argamassas com e sem biocarvão apresentaram valores superiores de resistência em relação às submetidas à cura convencional, mostrando que o tratamento com $CO_2$, promoveu uma recuperação nas resistências. Desta forma, percebe-se que o controle nas condições de cura, para os corpos de prova submetidos à cura carbônica, fora determinante

para recuperação das resistências, em relação às argamassas expostas a ambientes, seja interno ou externo, mais propensas a maior variabilidade das condições de temperatura e umidade.

## 3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Conforme Quadro 3, as argamassas com biocarvão, nos dois ambientes de exposição, apresentaram os menores índices de absorção de água. As argamassas submetidas à cura carbônica absorveram menos água que as argamassas curadas convencionalmente. Percebe-se, portanto, que o uso do biocarvão como substituto do cimento reduziu o índice de absorção de água nos cenários avaliados. Importante ressaltar, que o biocarvão auxiliou na consolidação das argamassas pela atividade pozolânica, nos ambientes controlados e que a atuação da cura carbônica foi benéfica, pela formação de carbonato de cálcio, conforme verifica-se nos resultados do Quadro 2. Sugere-se em trabalhos futuros avaliar a microestrutura destas argamassas para melhor compreensão destes resultados.

**Quadro 3:** Absorção de água por capilaridade

| Ambiente externo com proteção | Média (g/cm³) | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação (%) |
|---|---|---|---|
| AR-C100-EP | 2,52 | 0,094 | 3,73 |
| AR-C95-B5 - EP | 2,02 | 0,072 | 3,56 |
| AR-C80-B20 - EP | 1,13 | 0,040 | 3,54 |
| **Ambiente interno** | **Média (g/cm³)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AR-C100-IN | 2,15 | 0,05 | 2,33 |
| AR-C95-B5 - IN | 2,04 | 0,048 | 2,35 |
| AR-C80-B20 - IN | 0,55 | 0,012 | 2,18 |
| **Cura convencional** | **Média (g/cm³)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AR-C100-B0 | 1,35 | 0,04 | 1,33 |
| AR-C95-B5 | 1,34 | 0,035 | 2,98 |
| AR-C80-B20 | 1,18 | 0,016 | 1,69 |
| **Cura carbônica** | **Média (g/cm³)** | **Desvio Padrão** | **Coeficiente de Variação (%)** |
| AC-C100-B0 | 0,89 | 0,09 | 3,50 |
| AC-C95-B5 | 0,22 | 0,092 | 4,58 |
| AC-C80-B20 | 0,17 | 0,035 | 2,60 |

## 3.3 CAPTURA DE $CO_2$

Conforme Quadro 4, as argamassas curadas em ambiente interno, apresentaram frentes de carbonatação maiores que as argamassas expostas externamente. Como a quantidade de água foi fixada, a presença do biocarvão, para um menor consumo de cimento com a presença da areia, prejudicou a efetividade da hidratação das argamassas. Conforme discutido por (MAZURANA, 2019) e (NÉSPOLI, 2020), a variação das condições ambientais, no caso maiores para as argamassas expostas, afetou as condições de umidade interna do corpo de prova, que se acentuaram com a presença do biocarvão, em relação àquelas em ambiente de maior controle (internas), cujas condições de equilíbrio e manutenção de temperatura e umidade favoreceram a penetração da frente de carbonatação.

**Quadro 4:** Profundidade de carbonatação

| Argamassas | Ec médio (mm) | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação (%) |
|---|---|---|---|
| AR-C100-IN | 20,16 | 0,02 | 1,32 |
| AR-C95-B5-IN | 14,10 | 0,03 | 2,01 |
| AR-C80-B20-IN | 8,03 | 0,02 | 2,78 |
| AR-C100-EP | 10,93 | 0,090 | 3,11 |
| AR-C95-B5-EP | 10,87 | 0,081 | 4,46 |
| AR-C80-B20-EP | 7,80 | 0,055 | 4,54 |

Considerando as Figuras 2 e 3 é notória a maior quantidade de $CO_2$ capturada pelas argamassas internas em relação às externas, conforme verificado em outros trabalhos (MAZURANA, 2019) e (NÉSPOLI, 2020). Porém as argamassas com maiores teores de substituição, apresentaram uma diminuição na capacidade de absorção de $CO_2$. Como verificado nos resultados do Quadro 4, houve um comprometimento do processo de hidratação, na presença do biocarvão, com a manutenção da quantidade de água de todos os traços, que se agravou nas argamassas expostas a um ambiente de maior variabilidade (externo) de condições de temperatura e umidade, afetando a cinética das reações.

**Figura 2:** Captura de $CO_2$ no ciclo de vida das argamassas curadas em ambiente interno.

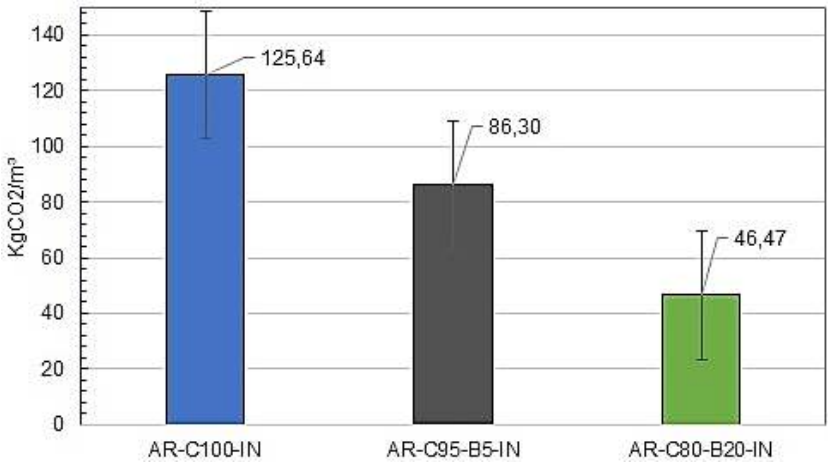
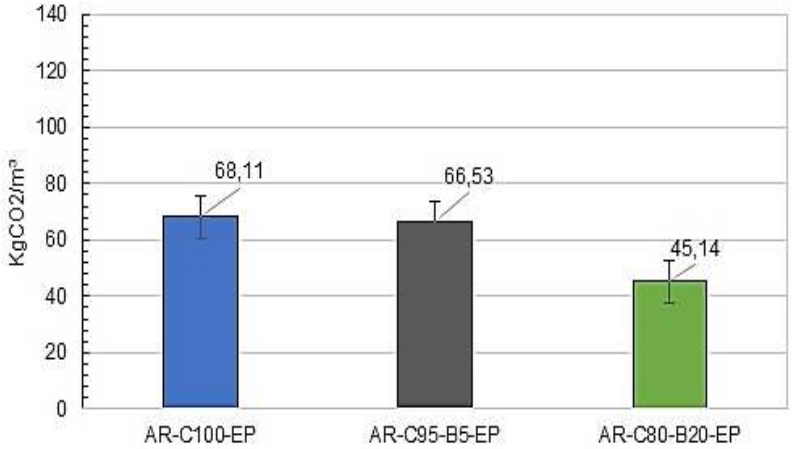
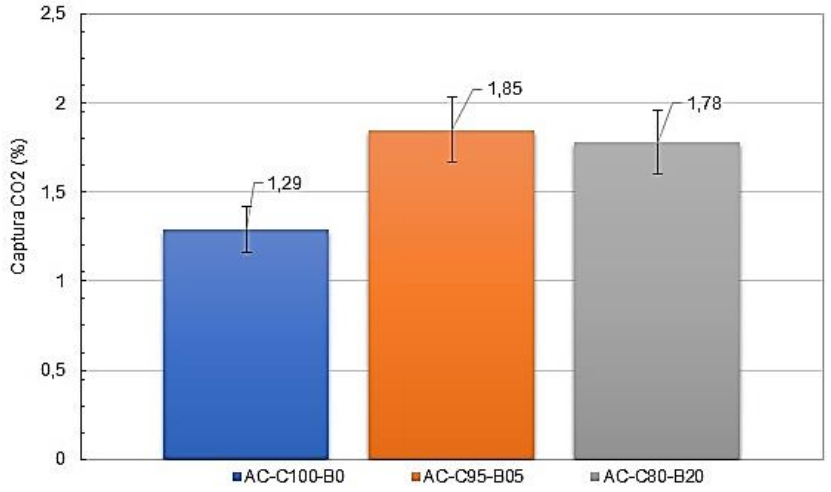



**Figura 3:** Captura de $CO_2$ no ciclo de vida das argamassas curadas em ambiente externo.




Considerando a Figura 4, a captura de $CO_2$ foi maior para as argamassas com biocarvão. Diferente do que ocorreu nas argamassas submetidas à carbonatação natural, verificou-se que a cura convencional úmida e a cura carbônica, potencializaram a absorção de $CO_2$ com a incorporação do biocarvão, conforme demonstrado em outros trabalhos (CHEN *et al.,* 2022), favorecendo também a resistência mecânica e a durabilidade conforme Quadros 2 e 3. A aplicação da cura carbônica em ambiente controlado, que induz a uma carbonatação nas primeiras idades, onde a quantidade de água calculada para hidratação ainda está disponível, juntamente com a presença do biocarvão, que tende a reter água na sua estrutura, acaba por beneficiar o avanço da frente e por consequência tornar efetiva a captura de $CO_2$, mesmo com a redução da quantidade de cimento, que se compensa com a estrutura morfológica do biocarvão, que potencializa a difusão.

**Figura 4:** Captura de $CO_2$ na cura carbônica.



## 4 CONCLUSÕES

Analisando as argamassas pela carbonatação no ciclo de vida, verificou-se que as expostas em ambiente interno, foram as que apresentaram maiores frentes de carbonatação e as maiores resistências mecânicas, comparadas às expostas em ambiente externo. As argamassas com biocarvão tiverem perda de resistência, em função da diminuição do consumo de cimento e as condições ambientais que comprometeram a umidade prevista e necessária para a consolidação destas argamassas. Na cura carbônica, a incorporação do biocarvão recuperou a resistência mecânica das argamassas, demonstrando que a difusão do $CO_2$, por sua estrutura morfológica facilitou a formação de carbonato de cálcio, além das próprias condições de controle laboratoriais.

Nas argamassas pela carbonatação natural no ciclo de vida, àquelas com biocarvão tiveram seus menores índices de absorção de água. Todavia, não houve uma correlação clara entre a resistência mecânica e os índices de absorção de água nestas argamassas, o que demanda uma análise por microscopia para avaliação da microestrutura. Este comportamento foi observado também nas argamassas submetidas à cura convencional e cura carbônica, porém verifica-se uma efetividade do efeito pozolânico, devido ao ambiente controlado de cura.

As argamassas referenciais apresentaram maiores frentes de carbonatação que as argamassas com biocarvão, no caso dos dois ambientes estudados. As variação das condições ambientais e o menor consumo de cimento, para uma menor quantidade de $Ca(OH)_2$, podem ter afetado o avanço da frente. Em relação à captura de $CO_2$ no ciclo de vida, as maiores frentes de carbonatação nas argamassas referenciais, refletiram nos maiores percentuais de captura. O trabalho indica a necessidade de ajustes no traço, principalmente da quantidade de água utilizada para hidratação das matérias primas, como no uso do biocarvão, a fim de maximizar a captura de carbono. Com a cura carbônica, a incorporação do biocarvão favoreceu a captura de $CO_2$, resultado também das condições laboratoriais favoráveis de controle de temperatura e umidade.

O trabalho abordou as consequências do uso das argamassas com biocarvão em cura carbônica e natural. Os resultados objetivaram aplicações que não utilizem reforço metálico, como em artefatos de cimento, tais como blocos e pavers. As comparações entre trabalhos com biocarvão, devem ser feitos com precaução pois, as biomassas variam em sua composição e natureza orgânica, bem como as condições do programa de pirólise aplicados que não serão iguais em sua maioria, acarretando diferentes propriedades físico-químicas e morfológicas entre os biocarvões, e por consequência nos resultados alcançados.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico no desenvolvimento deste trabalho (Processo CNPq: 310389/2021-6) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso pelo auxílio financeiro no desenvolvimento deste trabalho (Processo: FAPEMAT.0001459/2022)

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. J. O., POSSAN E., SQUIAVON J. Z., ORTOLAN T. L. P**. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste.** Construction and Building Materials, v. 161, p. 70-83, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11578: **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRE **Global Product Category Rule (PCR) For Type III EPD of Construction Products** to EN 15804.

CONAB. **Boletim da Safra de Grãos** – 12º Levantamento, safra 2019-2020. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos> Acesso em: 20 janeiro 2023.

GUPTA, S. et al. **Factors Determining the Potential of Biochar as a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review**. Journal of Materials in Civil Enginnering, 2017.

JOHN, V. M. et al. **Potencial de mitigação de CO2 de materiais cimentícios na fase de uso**. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE.2018

MAZURANA, L. **Captura de $CO_2$ em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

NÉSPOLI, A. A. **Carbonatação natural de argamassas mistas para revestimento com uso de terra diatomácea recuperada. 2020**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2020.

NEVES JUNIOR, A**. Captura de $CO_2$ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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

RILEM TC 56-MHM CPC-18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Mater Struct. 1988;21:453–5. https ://doi.org/10.1007/BF02472327.

Roadmap Low - **Carbon Transition in the Cement Industry**. 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry. Acesso em: 19 out. 2022.

SHAO Y., MIRZA MS., WU X. —**$CO_2$ sequestration using calcium–silicate concrete**, Canadian Journal of Civil Engineering, n.33, v.6, pp 776-784, 2006.

STANMORE R, GILOT P. **Review—calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for $CO_2$ sequestration**. Fuel Processing Technology, v.86, n.16, pp1707-1743,2005.

CHEN T, ZHAO L, GAO X. **Modification of carbonation-cured cement mortar using biochar and its environmental evaluation**. Cement and Concrete Composites. V.86, 2022.