USO DO BIOCARVÃO DA CASCA DE ARROZ EM PASTAS DE BAIXA RELAÇÃO ÁGUA X CIMENTO PARA CAPTURA DE CO_2

LOPES, Marcos Antonio Pereira[1](marcos.lopes77@outlook.com); NEVES JUNIOR, Alex[2] (alexnevesjr@gmail.com); BIANCHINI, Glauco Fabrício[3](glaucofb@yahoo.com.br)

[1]Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Brasil

[2] Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Brasil

[3] Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Brasil

Palavras-chave: biocarvão, cura carbônica, carbonatação

Resumo

A construção civil é um dos setores mais prejudiciais ao meio ambiente, destacando entre elas a produção de cimento Portland que sozinha contribui globalmente com cerca de 8% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera. Neste contexto, tem sido comum o uso de matrizes de baixa relação a/c, com elevado consumo de aditivos e adições, que acabam por elevar a pegada de carbono destes materiais. O uso de materiais suplementares como o biocarvão e o uso da cura carbônica, compões estratégias do ROADMAP da indústria cimenteira. O biocarvão, produzido através da pirólise de biomassas, tem sido estudado como material suplementar para matrizes cimentícias. Além disso, trabalhos anteriores já mostraram que a captura de carbono por meio da cura carbônica é uma tecnologia comprovadamente eficaz. Neste contexto, este estudo teve por objetivo avaliar a captura de CO_2 e as propriedades mecânicas e de porosidade de pastas cimentícias de baixa relação água-cimento com biocarvão através da cura carbônica, quando realizada a substituição parcial do cimento Portland pelo biocarvão nas proporções de 5% e 20%. Para o desenvolvimento do estudo, foi implementado um cronograma experimental, caracterizando-se as matérias primas utilizadas por meio de ensaios de DR-X e FR-X e analisando a resistência a compressão mecânica simples, absorção de água por capilaridade e absorção total dos corpos de provas moldados. A cura carbônica realizada aumentou em até 2,85% a captura de CO_2. As propriedades de porosidade das pastas aumentaram para as pastas que foram submetidas a carbonatação acelerada. Nas pastas curadas convencionalmente, houve um aumento na resistência à compressão mediante a adição de biocarvão e para as pastas submetidas à cura carbônica houve uma diminuição na resistência conforme a adição de biocarvão aumentava.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor de grande impacto ambiental, segundo Nascimento, Morais e Lopes (2022) a área da construção ocasiona vários prejuízos ambientais em todas suas fases, como o consumo de matéria prima não renovável e uso de grande quantidade de energia tanto na extração quanto no transporte e processamento de insumos. Neville (2016) define a produção do cimento Portland em si como ecologicamente prejudicial, já que, para a produção de uma tonelada de cimento, uma grande quantidade de dióxido de carbono é liberada na atmosfera. Nacionalmente, por exemplo, cerca de 2,3% do CO_2 gerado vem apenas da indústria cimenteira (BRASIL, 2021). Entre as aplicações do cimento Portland, como material, está o uso cada vez maior em matrizes de baixa relação a/c, como em concretos de alto desempenho, que geralmente apresentam elevados consumos de cimento e o uso de aditivos e adições minerais diversas. Dentre essas adições, pode-se destacar o biocarvão, uma biomassa oriunda da casca do arroz, rica em carbono, produzida pela chamada decomposição térmica de material orgânico sob suprimento limitado de oxigênio e em

temperaturas relativamente baixas (entre 500 e 700 °C). O biocarvão é amplamente considerado como uma forma eficaz de sequestrar dióxido de carbono do ambiente, com a maior parte dos estudos relacionado à área agrícola como forma de armazenar e fixar carbono no solo. Choi, Yun e Lee (2012) realizaram uma análise das propriedades mecânicas de argamassas contendo o biocarvão como substituto parcial do cimento e posteriormente Gupta e Kua (2017) ressaltam o potencial uso do biocarvão como material de construção civil para capturar e bloquear o carbono atmosférico. Dentro desse contexto, esse estudo teve por objetivo, avaliar a captura de CO_2 e as propriedades mecânicas e de porosidade de pastas cimentícias de baixa relação água-cimento com biocarvão através da cura carbônica, quando realizada a substituição parcial do cimento Portland pelo biocarvão nas proporções de 5% e 20%. Tais proporções foram determinadas para uma análise do comportamento em situações extremas, visto que a literatura indica porcentagens de substituições de até 20% do cimento pelo biocarvão (GUPTA e KUA, 2017).

2 MATERIAIS

O biocarvão utilizado na pesquisa foi adquirido em parceria com a empresa SP - Pesquisa e Tecnologia, localizada em Mogi Mirim, São Paulo. Trata-se de um biocarvão micronizado, obtido por pirólise da casca de arroz à 400 °C, durante 15 minutos. O cimento utilizado foi o cimento Portland CP II-F32, caracterizado pela adição de filler calcário, com teor entre 6 e 10%. A composição química do cimento e do biocarvão, foram determinadas por meio da Espectroscopia de Fluorescência de Raio-X por Dispersão em Energia (EDX). A tabela 1 apresenta a composição química dos óxidos presentes no cimento e no biocarvão.

Tabela 1 – Composição química dos óxidos do cimento e do biocarvão

Composto	Cimento (%)	Biocarvão (%)
CaO	54,26	0,79
SiO_2	20,12	55,67
Al_2O_3	6,09	-
SO_3	3,36	1,11
Fe_2O_3	3,33	0,41
MgO	3,01	-
K_2O	1,21	2,28
SrO	0,21	-
MnO	-	0,36
ZrO_2	0,02	-
ZnO	0,04	-
PF*	8,36	39,39

** PF= Perda ao fogo*

Da tabela 1, pode-se identificar a composição padrão do cimento Portland, com predominância do CaO, SiO_2 e Al_2O_3 como compostos principais. Para o biocarvão, destaca-se a predominância de SiO_2, em função da natureza da sua biomassa – casca de arroz e por meio da difração de raio-X (DRX) torna-se possível a identificação de fases cristalinas na amostra de cimento e amorficidade do biocarvão. Os perfis foram adquiridos entre 5° e 90°, com passos de 0,2 graus, tempo de

aquisição por passo de um segundo. As identificações das fases cristalinas presentes nas amostras foram realizadas por meio de comparações com as fichas catalográficas da base de dados do Mincryst – Open Crystallographic Database for Minerals e a figura 1, apresenta os difratogramas para o cimento e o biocarvão. Destaca-se que para produção da Figura 1, foram identificadas somente as principais fases cristalográficas do cimento Portland CP-II F32 anidro, que são os picos cristalinos de alita (A), belita (B), celita (C), ferrita (D), gesso (G) e calcita (F).

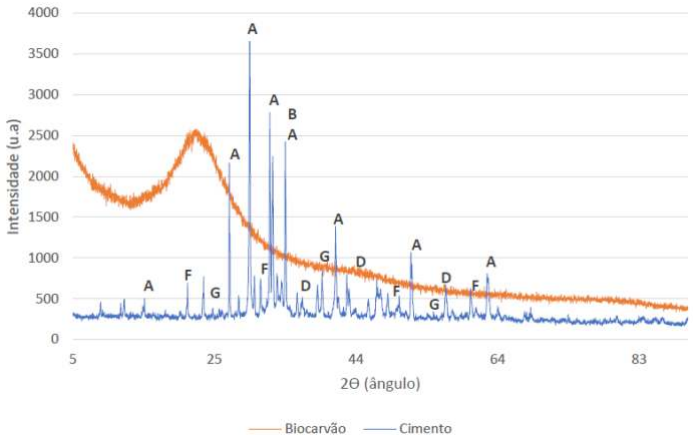

Figura 1 – Difratogramas do cimento e do biocarvão.

3 MÉTODO

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi elaborado um roteiro experimental, produzindo-se corpos de prova com substituições parciais do cimento pelo biocarvão, nas proporções de 5% e 20%, tratados e não tratados com CO_2 e para efeito de comparação dos resultados, foram produzidos corpos de prova sem a substituição do cimento, tratados e não tratados com CO_2. A tabela 2, apresenta os traços utilizados na produção das pastas. Para fins de validação de dados, foram utilizados 6 corpos de prova, com dimensões de 2,5x5cm, para cada porcentagem de biocarvão.

Tabela 2 - Traço das pastas e nomenclaturas.

Amostras das pastas				**Cura convencional**	**Cura convencional + carbonatação acelerada de 2 horas**
Cimento (g)	**Água (g)**	**Plastificante (g)**	**Biocarvão (g)**		
100	31	0	0	PREF-SC	PREF-CC
95	31	0,24	5	PB05-SC	PB05-CC
80	31	0,8	20	PB20-SC	PB20-CC

A relação água-cimento (a/c) foi determinada pelo procedimento da NBR 16606 (ABNT, 2018) - Determinação da pasta de consistência normal. No ensaio de consistência da pasta, encontrou-se a quantidade de água que corresponde à consistência normal. A verificação se deu com auxílio do aparelho de Vicat, no qual a sonda de Tetmajer deve penetrar e estacionar a uma certa distância do fundo do aparelho. Essa distância é denominada índice de consistência normal e medir (6 ± 1) mm da placa base. Após a determinação da consistência normal da pasta de referência e estabelecida uma baixa relação a/c, foram obtidas as novas consistências normais para cada teor de substituição parcial do cimento por biocarvão, utilizando um aditivo superplastificante do tipo éter policarboxílico - Glenium 51 da marca *Master Builders Solutions*, com teor de sólidos entre 28,5% e 31,5%, pH variando de 5 a 7 e uma densidade aproximada de 1,067 a 1,107 g/cm³, para que a quantidade de água não fosse alterada.

Os corpos de prova, foram moldados imediatamente após a preparação da pasta e foram colocados em um ambiente fechado com 100% de umidade e temperatura de (25 ± 2) ºC, permanecendo por 24 horas para o processo de cura convencional. No caso dos corpos de prova não carbonatados, após 24 horas de cura convencional, eles foram imersos em água contendo cal hidratada e mantidos nessa condição por 28 dias. Já os corpos de prova carbonatados, após a moldagem, foram mantidos em uma câmara fechada com 100% de umidade por 24 horas. Após esse período, foram expostos às condições ambientais do laboratório, 24 horas, para diminuição da umidade relativa interna e facilitar o ingresso do CO_2 na etapa de cura carbônica. Em seguida, foram submetidos a 2 horas de cura carbônica. Após esse processo, os corpos de prova foram imersos até atingirem a idade de 28 dias, seguindo o mesmo procedimento dos corpos de prova não carbonatados. É relevante mencionar que a duração da carbonatação de 2 horas e as condições de tratamento com CO_2 foram adotadas com base no estudo conduzido por Neves Junior (2018).

3.1 Cura carbônica

Os ensaios foram realizados em câmara de carbonatação acelerada, sob condições de umidade relativa de (65 ± 5) %, temperatura ambiente de (25 ± 2) ºC e concentração de CO_2 igual a 100%. Foi adicionado à câmara sílica gel com o objetivo de absorção da água gerada pela reação de carbonatação, para efeito de cálculo da captura bem como controle da umidade interna para potencializar a carbonatação. Foi realizado o monitoramento de massa para estimar a quantidade de CO_2 absorvida, pois a reação de carbonatação, ao envolver a formação de novos produtos na matriz, além de influenciar os existentes, modifica a porosidade e altera também a densidade do material obtido (NEVES JÚNIOR, 2014). O ganho de massa por carbonatação (G.massa) foi analisada de acordo com a Equação 1.

$$G.massa(\%) = \frac{M_{inicial},CO_2 - M_{depois},CO_2 + M_{p.água}}{M_{inicial}} \quad (1)$$

Onde:

- $M_{inicial},CO_2$: Massa da amostra antes da carbonatação
- M_{depois},CO_2: Massa da amostra depois da carbonatação
- $M_{p.água}$: Massa de água absorvida pela sílica gel

3.2 Resistência Mecânica à compressão simples

Os ensaios foram realizados seguindo o procedimento da NBR 7215 (ABNT, 2019), nas pastas com e sem carbonatação e os resultados foram submetidos a tratamento estatístico. O equipamento utilizado foi a Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC, modelo 100T. A carga foi aplicada com crescimento constante da tensão de compressão, a uma velocidade de 1mm/min, até a ruptura do corpo-de-prova. A resistência à compressão (F_{ci}) é definida pela equação 2.

$$F_{ci} = \frac{F}{A} \tag{2}$$

Onde:

- F: carga aplicada pela máquina (N)
- A: área da seção transversal do corpo de prova (mm²)

3.3 Absorção por capilaridade

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), nas pastas com e sem carbonatação e os resultados foram submetidos a tratamento estatístico. Após o corpo de prova atingir a idade de 28 dias, foi determinada sua massa ao ar livre e seco em estufa à temperatura de (105 ± 5) ºC, até constância de massa. Em seguida o corpo de prova foi envolto com fita metálica em toda sua extensão para garantir que apenas a base inferior tenha contato constante com a lâmina de água. Os corpos de prova tiveram sua massa determinada em balança de precisão nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas e a absorção de água por capilaridade (C) foi expressa em g/cm2, conforme a Equação 3:

$$C = \frac{A - B}{S} \tag{3}$$

Onde:

- A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água, em g
- B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23±2) ºC, em g
- S = área da seção transversal, em $cm^{2.}$

3.4 Absorção total

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) para determinação da absorção de água e índice de vazios, nas pastas com e sem carbonatação. Os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa com temperatura de (105 ± 5) ºC, por um período de 72h ou até a massa não variar 0,5% entre duas pesagens consecutivas. Após secagem em estufa e determinada a massa, foi feita a imersão da amostra em água à temperatura de (23 ± 2) ºC durante 72h. Completada a saturação em água, foi colocada a amostra em um recipiente cheio de água, o qual foi levado à ebulição por aproximadamente 5 horas. Ao voltar para a temperatura ambiente de forma natural, foi registrada a massa com auxílio de balança hidrostática. Através desse procedimento pode-se obter os seguintes resultados:

I. Absorção de água por imersão (A) (Equação 4): Processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso.

$$A = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s}\right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- m_{sat}: massa da amostra saturada após imersão e fervura
- m_s: massa da amostra seca em estufa.

II. Índice de vazios (Iv) (Equação 5): Relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

$$Iv = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_i}\right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- m_i: massa da amostra saturada imersa em água após a fervura

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterizadas as matérias primas a serem utilizadas e definido o procedimento experimental e a forma de tratamento dos dados, passa-se para a apresentação dos resultados.

4.1 Captura de CO_2 por meio do ganho de massa

Através do estudo da carbonatação acelerada durante um período de 2 horas, constatou-se que a presença de biocarvão resultou em um aumento percentual de massa, o que consequentemente comprovou o aumento da captura de CO_2 com o aumento do teor de biocarvão (Figura 2). Constatou-se que, à medida que a quantidade de biocarvão adicionado aumenta, a captura de carbono por ganho de massa também aumenta. Shao et al (2006) e Neves Junior (2014) avaliaram o comportamento do CO_2 em pastas confeccionadas com cimento e biocarvão respectivamente, a partir da equação 1 e determinaram níveis de captura. Gupta, Kua e Low (2017) associam a captura de CO_2 a capacidade adsortiva do biocarvão.

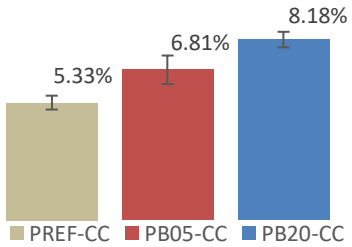

Figura 2 – Ganho de massa (%) por meio da carbonatação de 2 horas

4.2 Resistência mecânica à compressão simples

A tabela 3, apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, submetidos ao tratamento estatístico. Verifica-se que mantendo condições adequadas de cura convencional, adicionando biocarvão há um ganho de resistência, pela alta pozolanicidade, mesmo diminuindo o consumo de cimento para baixa relação a/c com os percentuais de 5% e 20% sendo estatisticamente iguais.

Tabela 3 - Tratamento estático da ruptura à compressão simples.

Nomenclatura		Média (MPa)	Nº de Amostras	Teste t	Grau de liberdade	Nível de Significância
Comparação 1	PREF-SC	3,94	6	2,77	4	0,317
	PREF-CC	3,65	6			
Comparação 2	PB05-SC	4,46	6	2,44	4	0,06
	PB05-CC	3,43	6			
Comparação 3	PB20-SC	4,29	6	1,94	4	0,03
	PB20-CC	1,80	6			

Em termos comparativos, observa-se que os corpos de prova carbonatados apresentam resistência menor que os não carbonatados. Os resultados fornecidos pelo teste t de student mostram que a confiabilidade entre as referências e as pastas de 5% são aceitáveis pois estão acima de 0,05, que foi a significância adotada. Já as pastas de 20% apresentam significância de 0,03, o que indica que não há um grau de semelhança entre as amostras com e sem carbonatação. No caso dos corpos de prova não carbonatados, observa-se que os valores indicam uma relativa uniformidade nas resistências à compressão. Por outro lado, os corpos de prova carbonatados apresentaram resistências à compressão significativamente mais baixas. Uma das possíveis explicações para a baixa resistência dos corpos de prova carbonatados é a matriz de baixa relação a/c. Essa relação é um parâmetro importante no concreto, pois afeta diretamente a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento. Uma matriz de baixa relação a/c pode resultar em uma hidratação incompleta e, consequentemente, em uma menor resistência do material. Além disso a secagem prematura por 24h, em matrizes com biocarvão, que adsorvem água, podem ter prejudicado não apenas a hidratação, mas a própria reação pozolânica, que por retração hidráulica e térmica, criou poros que apesar de benéficas para a carbonatação, comprometeu o desempenho mecânico. Não se pode descartar a potencialização da própria retração autógena, já que essa etapa suprimiu umidade. Resultados semelhantes foram verificados por Neves Júnior et al (2013), que relatam que apesar do tempo de exposição ao CO2 aumentar a sua captura, quando carbonatada a pasta, deve-se determinar um limite de tempo prático para que não haja consequências negativas para a resistência mecânica da amostra.

4.3 Absorção de água por capilaridade

A tabela 4, apresenta os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade, submetidos ao tratamento estatístico. O tratamento estatístico mostra que o nível de significância é superior a 0,05 para todos os casos, desse modo a diferença de valores das médias não apresenta

diferença significativa. Entre eles, o valor mais distinto foi o com 20% de biocarvão com significância de 0,25.

Tabela 4 - Tratamento estatístico para a absorção por capilaridade.

ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE							
Nomenclatura		**Média (g/cm²)**	**Nº de Amostras**	**Desvio Padrão (g/cm²)**	**Teste t**	**Grau de liberdade**	**Nível de Significância**
Comparação 1	PREF-SC	0,258	6	0,027	0,018	8	0,47
	PREF-CC	0,240	6	0,028			
Comparação 2	PB05-SC	0,218	6	0,0245	0,12	8	0,44
	PB05-CC	0,231	6	0,0208			
Comparação 3	PB20-SC	0,256	6	0,0245	0,67	7	0,25
	PB20-CC	0,330	6	0,0488			

A absorção capilar dos materiais cimentícios pode ser distinguido em absorção inicial (ou primária) e secundária, com base nas diferentes taxas de absorção de água. Pode-se notar que a pasta carbonatada, com adição de biocarvão em 20%, apresenta maior nível de absorção por capilaridade. Esse resultado pode ser correlacionado com a redução da resistência mecânica. Essa diminuição pode ser relacionada ao aumento da absorção de água por capilaridade nos corpos de prova carbonatados, uma vez que PB05-SC e PB20-SC apresentam menores valores de absorção em comparação com os respectivos carbonatados. Por outro lado, em relação à captura de CO_2, foi observado anteriormente que corpos de prova com maior quantidade de biocarvão absorveram mais CO_2. Todavia, na análise da absorção de água por capilaridade, onde PB05-SC e PB20-SC, que possuem maior teor de biocarvão, apresentam menor absorção de água em comparação com PREF-SC. Tal comportamento foi observado por Menegon e Neves Júnior (2018), usando substituições de cimento por componentes porosos, com baixa relação água cimento submetidos à carbonatação acelerada, onde os efeitos de sobreposição de hidratação, pozolânicos e de carbonatação, apesar de contribuir com a captura de carbono, afetaram a resistência.

4.4 Absorção total

A figura 3, apresenta os resultados obtidos nos ensaios de absorção total, submetidos ao tratamento estatístico. Para as amostras carbonatadas houve maior absorção de água, como mostrado pela figura 3. A absorção mostra que as pastas com carbonatação acelerada absorveram maior quantidade de água em relação às amostras sem carbonatação. Ainda se observou que a maior diferença ocorreu para a pasta com 20% de biocarvão. Para o índice de vazios (Figura 4) ocorreu o mesmo comportamento que os índices de absorção total e de água por capilaridade, sendo as amostras carbonatadas, com aumento do teor de biocarvão, com as maiores diferenças percentuais entre os valores. Os resultados mostraram que houve correlação entre os resultados mecânicos e os ensaios de porosidade em que houve uma queda na resistência mecânica atrelada ao aumento do nível de porosidade. Fica evidente que o processo de pré-tratamento das pastas por 24h para controle da umidade dos corpos de prova, antes da cura carbônica, apesar de favorecer o ingresso do CO_2, desfavoreceu a consolidação da hidratação e da pozolanicidade, no que possivelmente aumentou os índices de porosidade, por efeitos de retração térmica, com a elevada taxa de

pozolanicidade da sílica amorfa do biocarvão, atrelada a possíveis fenômenos de retração química, hidráulica e autógena, que pela perda precoce e rápida da água em matrizes de baixa relação a/c, são mais severas. Este problema, no entanto, não ocorreu nas pastas com e sem biocarvão, curadas convencionalmente. Porém uma análise por microscopia eletrônica de varredura para entendimento da estrutura porosa é recomendável.

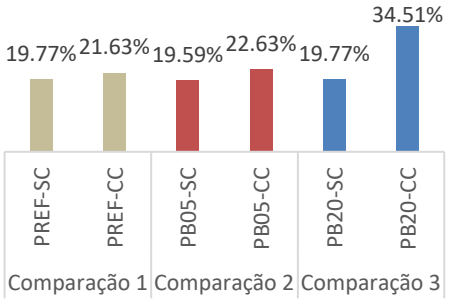

Figura 3 – Absorção total

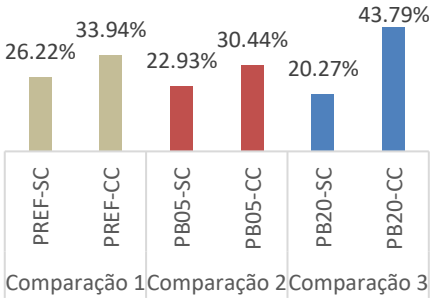

Figura 4 – Índice de vazios

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que houve correlação entre os resultados mecânicos e os ensaios de porosidade no qual houve uma queda na resistência mecânica atrelada ao aumento do nível de porosidade. Desse modo, fica evidente que o processo de pré-tratamento das pastas por 24h para controle da umidade dos corpos de prova, antes da cura carbônica, apesar de favorecer o ingresso do CO_2, desfavoreceu a consolidação da hidratação e da pozolanicidade, no que possivelmente aumentou os índices de porosidade, por efeitos de retração térmica, com a elevada taxa de pozolanicidade da sílica amorfa do biocarvão, atrelada a possíveis fenômenos de retração química, hidráulica e autógena, que pela perda precoce e rápida da água em matrizes de baixa relação a/c, são mais severas. Este problema, no entanto, não ocorreu nas pastas com e sem biocarvão, curadas convencionalmente. Porém uma análise por microscopia eletrônica de varredura para entendimento da estrutura porosa é recomendável. Observa-se que a adoção de materiais suplementares de elevada pozolanicidade em matrizes de baixa relação a/c, como em concretos especiais, requer cuidado de cura e tratamento e um devido estudo de traço para contornar os problemas que lhe são inerentes, para que a matriz possa ser utilizada para captura de CO_2, por cura carbônica, melhorando, por exemplo, o processo de pré-tratamento do material.

Pode-se concluir que o uso adequado do biocarvão em matrizes cimentícias de baixa relação água-cimento é benéfico, desde que o traço seja cuidadosamente estudado para incorporar essa sílica de alta reatividade. É importante destacar que o uso de agregados miúdos e graúdos em aplicações mais refinadas naturalmente inibirá as reações químicas e autógenas, seja devido ao efeito de escala ou à presença de outros componentes na mistura. O benefício ambiental do biocarvão, comprovado por este estudo, reside no fato de ser carbono negativo e potencializar a cura carbônica.

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).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: Cimento Portland determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF, 2021. cap. 2, p. 80-181.

Choi, W.C. Yun, H.D. Lee, J.Y. Mechanical properties of mortar containing biochar from pyrolysis, Journal. Korea Inst. Struct. Mainten. Insp. 16 2012.

Gupta, S. Kua, H.W. Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material: critical review, J. Mater. Civ. Eng. 2017.

Gupta, S.; Kua, H. W.; Low, C. Y. Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. Cement and Concrete Composites, v. 87, p. 110–129, mar. 2017.

Menegon, R. O. Neves Junior, A. Study of the use of accelerated carbonation in cement Portland pastes using recovered diatomite waste. Engineering and Science. 2018.

Nascimento, E. R. DO; Morais, D. P. F. DE; Lopes, S. C. Sustentabilidade na construção civil no Brasil: Uma revisão da literatura. Research, Society and Development, v. 11, n. 14, p. e524111436611, 5 nov. 2022.

Neves Junior, A. Captura de CO_2 em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada. Alex Neves Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

Neves Junior, A. et al. Early carbonation curing effects on the microstructure of high initial strength Portland cement pastes. ADVANCES IN CEMENT RESEARCH , p. 1-7, 2018.

Neves Junior, A. Toledo Filho, R.D. Fairbairn, E.M.R, Dweck, J. A study of the carbonations profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. Journal Therm Anal Calorim. 2013.

Neville, A. M. Propriedades do concreto [recurso eletrônico] /A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

Shao Y., Zhou X., Monkman S. A new CO2 sequestration process via concrete products production. EIC Climate Change Technology, Canada, Ottawa, 10-12 May 2006.