

O efeito da cura carbônica e da cura térmica na resistência de argamassas geopoliméricas e avaliação da eflorescência

The effect of carbon curing and thermal curing on the strength of geopolymers mortars and efflorescence assessment

¹Gesielle Cristina de Amorim Barros, ²Alex Neves Junior

¹Engenheira Civil (gesiellebarros@gmail.com)

²Doutor em Ciências da Engenharia Civil – Universidade Federal de Mato Grosso (alexnevesjr@gmail.com)

RESUMO: A intensificação do aquecimento global tem sido associada ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2), sendo a construção civil uma das principais responsáveis. A produção de cimento Portland contribui significativamente para essas emissões, o que tem motivado a busca por materiais alternativos de menor impacto ambiental. Entre esses materiais, destacam-se os geopolímeros, produzidos a partir da ativação alcalina de resíduos ricos em silício e alumínio, como a cinza volante e a metacaúlinita, com possibilidade de incorporação de aditivos como o biochar. Este estudo avaliou o efeito da cura térmica e da cura carbônica sobre a resistência mecânica e a eflorescência de argamassas geopoliméricas com e sem biochar, utilizando dois traços distintos (REF-5 e BCA-6). Os corpos de prova foram submetidos a três condições de cura: ambiente, térmica e carbônica. Os resultados indicaram que a cura ambiente proporcionou os melhores desempenhos mecânicos (21,1 MPa para REF-5 e 19,3 MPa para BCA-6), enquanto as curas térmica e carbônica resultaram em valores inferiores. A adição de biochar mostrou-se benéfica nas idades iniciais (14 dias) e reduziu significativamente o acúmulo de sais superficiais, sugerindo menor suscetibilidade à eflorescência. Conclui-se que o uso de geopolímeros com biochar, sob cura ambiente, é uma alternativa sustentável viável ao cimento Portland, mas que as curas térmica e carbônica não trouxeram vantagens significativas quanto à resistência mecânica.

Palavras Chave: Sustentabilidade. Biochar. Materiais alternativos. Desempenho mecânico.

ABSTRACT: The intensification of global warming has been linked to increased carbon dioxide (CO_2) emissions, with the construction industry among the main contributors. Portland cement production plays a significant role in these emissions, encouraging the development of alternative materials with a lower environmental footprint. Among these alternatives are geopolymers, produced through the alkaline activation of aluminosilicate-rich residues such as fly ash and metakaolin, with the possibility of incorporating additives like biochar. This study evaluated the effect of thermal and carbon curing on the mechanical strength and efflorescence of geopolymers mortars with and without biochar, using two mix designs (REF-5 and BCA-6). Specimens were subjected to three curing conditions: ambient, thermal, and carbon. Results showed that ambient curing led to the best mechanical performance (21.1 MPa for REF-5 and 19.3 MPa for BCA-6), while thermal and carbon curing resulted in lower values. The inclusion of biochar improved early-age strength (14 days) and significantly reduced surface salt accumulation, indicating lower susceptibility to efflorescence. It is concluded that the use of geopolymers with biochar under ambient curing presents a viable and sustainable alternative to Portland cement, although thermal and carbon curing did not show mechanical advantages.

Keywords: Sustainability. Biochar. Alternative materials. Mechanical performance.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel central no desenvolvimento econômico global, sendo responsável por grande geração de empregos, movimentação de capital e avanços tecnológicos. Contudo, é também uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO_2), devido ao uso intensivo de cimento Portland. Estima-se que esse processo represente aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2 , principalmente por conta da calcinação do calcário, etapa essencial na produção do cimento, conforme destacado por Fast Company (2024) e Rodgers (2024).

Diante desse cenário, cresce o interesse por alternativas sustentáveis que reduzam a pegada de carbono. Entre essas alternativas, os geopolímeros se destacam como materiais cimentícios

obtidos a partir da ativação alcalina de precursores ricos em silício e alumínio, como a metacaulinita e a cinza volante. Tais materiais oferecem vantagens como baixo impacto ambiental, rápida evolução da resistência mecânica e boa durabilidade, podendo ser produzidos em temperatura ambiente, conforme Davidovits (2008) e Borges et al. (2014).

Pesquisas recentes, como Mota (2024), têm demonstrado o potencial da incorporação de biochar, subproduto da pirólise de resíduos orgânicos, na formulação de argamassas geopoliméricas. Mota (2024) avaliou a resistência de diferentes traços, com e sem biochar da casca de arros, referentes a dez traços sob cura ambiente. No entanto, não abordou o efeito de outras condições de cura, como a cura térmica e a cura carbônica, nem investigou o fenômeno da eflorescência, patologia superficial causada pela migração de sais solúveis, que pode comprometer a durabilidade dos materiais, conforme Longhi et al. (2020).

A cura térmica, segundo Yuan et al. (2016), pode promover ganhos mecânicos ao acelerar a geopolimerização, desde que bem controlada. Já a cura carbônica tem sido explorada como processo de exposição controlada ao CO₂ para potencial densificação da matriz, embora seus efeitos em materiais geopoliméricos ainda sejam objeto de investigação, conforme Jerônimo (2022) e Provis e Van Deventer (2014).

Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir para o avanço do conhecimento sobre a durabilidade e o desempenho mecânico de argamassas geopoliméricas. O objetivo geral foi avaliar o efeito da cura térmica e carbônica em argamassas geopoliméricas nas propriedades mecânicas e a suscetibilidade ao efeito da eflorescência. Especificamente, buscou-se: avaliar a resistência à compressão simples de argamassas ternárias geopoliméricas submetidas à cura térmica e à cura carbônica, comparando-se os resultados obtidos com os de argamassas curadas em condições ambientais, conforme os parâmetros definidos no estudo de Mota (2024); avaliar a ocorrência de eflorescência nas argamassas submetidas à cura ambiente; e, por fim, comparar o desempenho mecânico das argamassas estudadas com os resultados da pesquisa de Mota (2024), de modo a identificar possíveis variações decorrentes dos diferentes métodos de cura empregados.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Seleção dos traços

Foram selecionados dois traços de argamassas geopoliméricas desenvolvidos anteriormente por Mota (2024), escolhidos com base em critérios de trabalhabilidade e desempenho mecânico. O traço REF-5, sem biochar, foi utilizado como referência e sua resistência à compressão, segundo os dados obtidos por Mota (2024) foi de 19,12 MPa, enquanto o traço BCA-6 continha biochar da casca de arroz em sua composição e sua resistência à compressão foi de 20,35 MPa. Na Tabela 1 estão especificados os traços estudados por Mota (2024), dos quais foram utilizados o REF-5 e o BCA-6 nesta pesquisa.

Tabela 1: Quadro de traços para processo de moldagem

Traços	Metacaulinita (%)	Cinza Volante (%)	Areia (%)	Biochar (%)	Hidróxido de sódio (%)	Silicato de Sódio (%)		Sólidos (ga)	SA/Sólidos
						SAA (g)	Sólidos (ga)		
REF-1	27,05	12,05	17,26	0,00	10,00	33,64	130,92	169,08	0,77
REF-2	30,00	10,00	15,00	0,00	10,00	35,00	135,00	165,00	0,82
REF-3	28,00	10,00	17,72	0,00	15,39	28,89	132,84	167,16	0,79
REF-4	25,00	10,00	15,00	0,00	20,00	30,00	150,00	150,00	1,00
REF-5	25,06	13,98	20,00	0,00	15,96	25,00	122,89	177,11	0,69
BCA-6	30,00	10,70	15,00	2,36	12,41	29,53	125,83	174,17	0,72
BCA-7	25,00	11,86	18,11	3,12	10,37	31,54	125,73	174,27	0,72

BCA-8	25,53	10,00	20,00	5,59	11,15	27,73	116,64	183,36	0,64
BCA-9	26,72	10,00	15,08	7,71	10,00	30,50	121,49	178,51	0,68
BCA-10	25,00	11,93	15,00	10,00	13,08	25,00	114,23	185,78	0,61

SAA: Solução Alcalina Ativadora (Hidróxido de Sódio + Silicato de Sódio)

Sólidos: Soma de Metacaulinita, Cinza Volante, Areia e Biochar

Fonte: Mota, G. N. (2024)

2.2 Preparação das amostras

Para confecção das amostras, foram utilizados os seguintes materiais: cinza volante, metacaulinita, areia média natural (granulometria 1,2 mm), biochar da casca de arroz, hidróxido de sódio e silicato de sódio, ambos como solução. Ressalta-se que a seleção e o uso desses materiais seguiram o mesmo conjunto de insumos adotados por Mota (2024), a fim de manter a comparabilidade metodológica entre os estudos.

Foram realizados os seguintes procedimentos para a moldagem das argamassas geopoliméricas. Primeiramente, dissolveu-se o hidróxido de sódio em pérolas em água, realizando-se a mistura até a completa dissolução, com uma concentração de 10 mol/L (400 g/L). Em razão de se tratar de uma reação exotérmica, a solução foi deixada em repouso por 24 horas, a fim de permitir seu resfriamento completo. Na sequência, os ativadores alcalinos, compostos pelo hidróxido de sódio e pelo silicato de sódio, foram misturados no agitador mecânico por 30 segundos, formando a solução alcalina ativadora. Para o traço REF-5, adicionou-se metade da metacaulinita e da cinza volante à solução ativadora. No traço BCA-6, adicionou-se metade da metacaulinita, da cinza volante e do biochar. Em ambos os traços, os precursores sólidos foram misturados aos ativadores alcalinos no agitador mecânico por um minuto, utilizando-se a velocidade máxima do equipamento (2000 r/min). Após essa etapa, realizou-se a raspagem manual das paredes internas do recipiente com o auxílio de uma espátula de alumínio, a fim de reincorporar o material aderido. Em seguida, no traço REF-5, adicionou-se a areia juntamente à outra metade da metacaulinita e da cinza volante; no traço BCA-6, adicionaram-se a areia e a segunda metade da metacaulinita, da cinza volante e do biochar. Em ambos os casos, a nova porção foi incorporada à mistura previamente preparada e homogeneizada por aproximadamente dois minutos no agitador mecânico, em velocidade máxima. Por fim, realizou-se a moldagem dos corpos de prova, como indicado na Figura 1.

Figura 1: Moldagem das amostras



Vale enfatizar que todo o procedimento de moldagem dos corpos de prova foi realizado sob as mesmas condições do estudo feito por Mota (2024), em temperatura ambiente na cidade de Cuiabá, Mato Grosso, com média de aproximadamente 26°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Essa temperatura foi mantida durante a preparação de todas as amostras, independentemente do tipo de cura a que foram posteriormente submetidas.

Ao todo, foram confeccionados 8 corpos de prova para cada variável estudada, sendo 4 referentes ao traço BCA e 4 ao traço REF em cada condição de cura avaliada. Essa quantidade de amostras foi adotada para assegurar maior confiabilidade estatística aos resultados obtidos e difere do procedimento utilizado por Mota (2024), que empregou apenas três corpos de prova por traço em seu estudo, todos submetidos exclusivamente à cura ambiente, totalizando 30 amostras.

2.3 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cúbicos de silicone com dimensões de 50mm x 50mm x 50mm, encaixados em moldes cúbicos de madeira. A dimensão dos corpos de prova não é normatizada para este tipo de estudo, tendo sido adotada por razões de padronização interna do experimento e compatibilidade com os procedimentos utilizados em pesquisas anteriores.

Após a produção das argamassas, as misturas foram moldadas e permaneceram nos moldes por 24 horas em temperatura ambiente. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, envolvidos em filme plástico para evitar a perda de umidade e armazenados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Esses corpos de prova foram submetidos à cura ambiente por 14 dias, a fim de avaliar o desempenho das argamassas nesse estágio de endurecimento precoce. O ensaio de resistência à compressão foi realizado após esse período, para analisar as propriedades mecânicas das argamassas.

Passado esse período inicial, os corpos de prova foram divididos em três grupos distintos. O primeiro grupo foi mantido em cura ambiente por mais 14 dias, totalizando 28 dias sob essa condição. O segundo grupo foi submetido à cura térmica em estufa a 50°C por 24 horas. Após esse tratamento, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente, envolvidos em plástico filme, até completar 28 dias de idade. O terceiro grupo passou por cura carbônica por 24 horas e, após esse tratamento, também foi mantido em temperatura ambiente, envolto em plástico filme, até atingir os 28 dias.

Por fim, todos os corpos de prova foram avaliados aos 28 dias de idade, quando foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples, visando analisar o desempenho mecânico das argamassas geopoliméricas em função dos diferentes tipos de cura.

2.4 Cura carbônica

Este ensaio visou avaliar a penetração de CO₂ no interior das amostras de argamassa geopoliméricas.

Os corpos de prova foram inseridos na câmara de carbonatação, do Laboratório de Compósitos e Materiais Sustentáveis (LABCOMAT) localizado na Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologias da UFMT. Foi definida a umidade relativa da máquina em torno de 60%. A concentração de CO₂ no interior da câmara foi de 100%, e a temperatura ambiente de 26°C (± 2°C).

2.5 Cura térmica

O método de tratamento térmico utilizado nesta pesquisa consistiu em submeter os corpos de prova a ciclos de temperatura em torno de 50°C, durante 24 horas. Segundo Yuan et al. (2016), as temperaturas na faixa de 50°C e 90°C são as que apresentam resultados benéficos para as propriedades mecânicas do material, trazendo melhorias na densificação e diminuição da porosidade. A estufa utilizada para controle do tratamento térmico neste ensaio foi o da SolidSteel, com precisão térmica de ±1°C, localizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) da UFMT.

Após a retirada e resfriamento (ambiente e natural) das amostras da estufa, elas foram envoltas, novamente, em plástico filme.

2.6 Eflorescência

Para a realização deste ensaio foi utilizada a metodologia estudada e proposta por Longhi et al. (2020). Consistiu em submeter os corpos de prova em um recipiente com lâmina d'água de 1 milímetro de altura, o qual foi reabastecido a cada dois dias. Foram efetuados 25 ciclos, ou seja, durante 69 dias, com o objetivo de analisar a quantidade de eflorescência formada. Os corpos de prova foram mantidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil, na FAET, UFMT, com temperatura ambiente de 26°C (± 2,0°C). Após os 69 dias, o material eflorescente foi cuidadosamente extraído da superfície dos corpos de prova, com auxílio de espátula plástica e pincel, e então, pesado na balança com precisão de ± 0,0001g, localizada na Central Analítica de Laboratório de Pesquisa em Química de Produtos Naturais (CALPQPN), UFMT.

2.7 Ensaio no estado endurecido

Os ensaios propostos para o estado endurecido têm como finalidade avaliar as propriedades mecânicas das amostras. O estado endurecido, em relação à cura carbônica, térmica desses corpos de prova foi definido como aos 28 dias. Os corpos de prova relacionados à cura ambiente foram definidos aos 14 e 28 dias com objetivo de comparação. Já os corpos de prova relacionados ao ensaio de eflorescência foram definidos com idade final de 69 dias.

2.8 Propriedades mecânicas: resistência à compressão

Para realização do ensaio de Resistência à Compressão das amostras cúbicas foi utilizada a máquina Tokio Testing Machine, localizada no Laboratório de Materiais de Construção, da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e tecnologias da UFMT.

O ensaio de resistência seguiu as diretrizes da norma técnica NBR 7215 (ABNT, 1996). A carga foi aplicada de forma gradual, com uma taxa de incremento constante de cerca de 1,0 mm/min, até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão foi determinada pela

relação entre a carga de ruptura e a área inicial da seção transversal do corpo de prova, e expressa em Mega Pascal (MPa). As resistências foram determinadas aos 14, 28 e 69 dias de idade, de modo a analisar o desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas ao longo do tempo.

3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

3.1 Cura carbônica

Após o período de cura carbônica, foi observado esbranquiçamento superficial nos corpos de prova, resultado da formação de sais, como carbonatos, decorrentes da reação entre os compostos alcalinos da matriz e o CO₂ presente na câmara. Nas argamassas sem biochar, o efeito foi mais intenso e localizado, indicando maior migração de umidade e íons para a superfície, como evidencia a Figura 2. Já nas amostras com biochar, o esbranquiçamento foi mais discreto e uniformemente distribuído, provavelmente devido à capacidade do biochar de reter parte da solução alcalina, reduzindo a percolação e a migração de sais, como mostra a Figura 3.

Figura 2: Amostra REF-5 – Cura carbônica aos 15 dias



Figura 3: Amostra BCA-6 – Cura carbônica aos 15 dias



Após a exposição à cura ambiente até os 28 dias, o esbranquiçamento se tornou mais evidente em ambos os traços, com maior difusão nas amostras com biochar, o que pode estar relacionado à liberação gradual de umidade e íons proporcionada pela estrutura porosa do aditivo. O efeito está evidenciado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4: Amostra REF-5 - Cura carbônica aos 28 dias



Figura 5: Amostra BCA-6 - Cura carbônica aos 28 dias



Nos ensaios de resistência à compressão, sob cura carbônica, o traço REF-5 (sem biochar) apresentou resistência média de 17,1 MPa, enquanto o BCA-6 (com biochar) obteve 15,9 MPa. Esses valores foram inferiores aos observados por Mota (2024) sob cura ambiente, em que REF-5 alcançou 19,1 MPa e BCA-6, 20,3 MPa, indicando que a cura carbônica, nas condições testadas, resultou em desempenho mecânico inferior.

A Figura 6 mostra o resultado em MPa da resistência média à compressão obtida nesta pesquisa. A Tabela 2 mostra a comparação dos resultados desta pesquisa com Mota (2024).

Figura 6: Resistência à compressão - Cura carbônica - Com e sem biochar - 28 dias

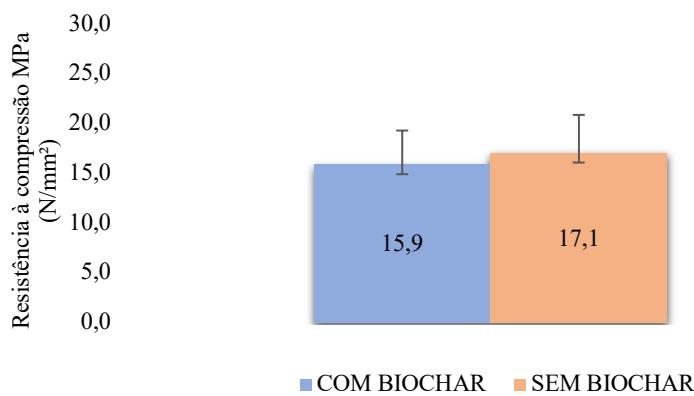


Tabela 2: Comparativo com Mota (2024) – Resistência à compressão - Cura carbônica

	COM BIOCHAR	SEM BIOCHAR
CURA CARBÔNICA	15,9	17,1
MOTA (2024)	19,1	20,3
VARIAÇÃO (%)	-16,64%	-15,78%

3.2 Cura térmica

Após 28 dias de idade, foi observado um leve descoloramento das amostras, embora pouco significativo em comparação às amostras submetidas à cura carbônica. Além disso, verificou-se a formação de uma fina camada de eflorescência (esbranquiçamento) na superfície dos corpos de prova, resultante da exposição ao ambiente externo, como é evidenciado na Figura 7.

Figura 7: Amostra REF-5 - Cura térmica aos 28 dias



Após o ensaio de resistência à compressão, foram obtidas as médias dos valores em MPa, conforme ilustrado na Figura 8. O traço contendo biochar (BCA-6) apresentou uma resistência média de 16,1 MPa, enquanto o traço sem biochar (REF-5) atingiu 14,7 MPa, evidenciando um menor desempenho. Ao comparar com os resultados de Mota (2024), que utilizou cura ambiente para os mesmos traços, observa-se que os valores obtidos por ela foram superiores: 20,3 MPa para o BCA-6 e 19,1 MPa para o REF-5. Considerando que a única variável alterada foi a condição de cura, os resultados sugerem que a cura térmica a 50°C por 24 horas, avaliados nesta pesquisa, aplicadas após 14 dias em cura ambiente, não favoreceu o desenvolvimento da resistência mecânica.

Na Tabela 3 está exposto o comparativo entre os resultados deste trabalho com o de Mota (2024).

Figura 8: Resistência à compressão - Cura térmica - Com e sem biochar - 28 dias

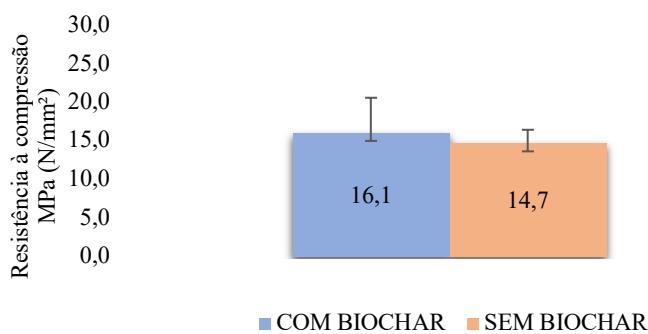


Tabela 3: Comparativo com Mota (2024) – Resistência à compressão - Cura térmica

	COM BIOCHAR	SEM BIOCHAR
CURA TÉRMICA	16,1	14,7
MOTA (2024)	19,1	20,3
VARIAÇÃO (%)	-15,91%	-27,56%

3.3 Cura ambiente

Com o objetivo de analisar o desempenho mecânico das argamassas em fase inicial de cura, foram moldados corpos de prova dos traços REF-5 e BCA-6, submetidos ao teste de resistência à compressão simples aos 14 dias sob cura ambiente, sem aplicação de outros tratamentos. Os resultados indicaram resistência média de 25,5 MPa para o traço BCA-6 (com biochar) e 13,9 MPa para o REF-5 (sem biochar), conforme apresentado na Figura 9. A Tabela 4 traz o comparativo entre esses dados e os resultados obtidos por Mota (2024), evidenciando o impacto positivo do biochar na resistência mecânica em idades iniciais.

Figura 9: Resistência à compressão - Cura ambiente - Com e sem biochar - 14 dias

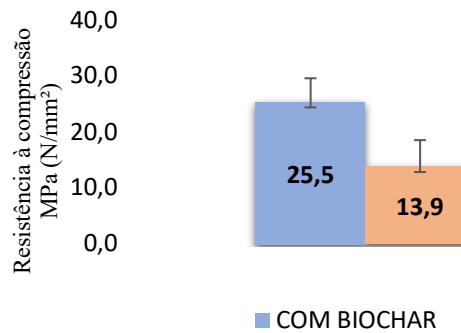


Tabela 4: Comparativo com Mota (2024) – Resistência à compressão - Cura ambiente - 14 dias

	COM BIOCHAR	SEM BIOCHAR
CURA AMBIENTE - 14 DIAS	25,5	13,9
MOTA (2024)	19,1	20,3
VARIAÇÃO (%)	33,31%	-31,48%

Aos 28 dias de cura em ambiente controlado, os corpos de prova apresentaram-se visualmente íntegros, embora com leve descoloração superficial. Durante todo o período, permaneceram envolvidos em filme plástico, o que contribuiu para a uniformidade das condições de cura. Os ensaios de resistência à compressão resultaram em 21,1 MPa para o traço REF-5 e 19,3 MPa para o BCA-6, conforme mostra a Figura 10. A Tabela 5 apresenta a comparação desses resultados com os obtidos por Mota (2024), evidenciando diferenças no desempenho mecânico sob cura ambiente.

Figura 10: Cura ambiente - com e sem biochar - 28 dias

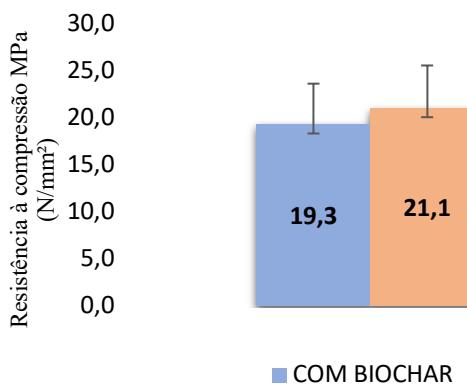


Tabela 5: Comparativo com Mota (2024) – Resistência à compressão - Cura ambiente - 28 dias

	COM BIOCHAR	SEM BIOCHAR
CURA AMBIENTE - 28 DIAS	19,3	21,1
MOTA (2024)	19,1	20,3
VARIAÇÃO (%)	1,19%	3,75%

A comparação entre os resultados aos 14 e 28 dias sob cura ambiente revelou comportamentos distintos entre os traços. O BCA-6 (com biochar) apresentou redução de resistência, passando de 25,5 MPa para 19,3 MPa, enquanto o REF-5 (sem biochar) teve aumento significativo, de 13,9 MPa para 21,1 MPa. Isso sugere que o biochar favorece o ganho de resistência em idades iniciais, mas com menor evolução posterior, ao passo que a matriz sem biochar apresenta um desenvolvimento mais gradual. Comparando com os dados de Mota

(2024), que também utilizou cura ambiente, os resultados são semelhantes, 20,3 MPa para BCA-6 e 19,1 MPa para REF-5, reforçando a consistência dos dados obtidos neste estudo.

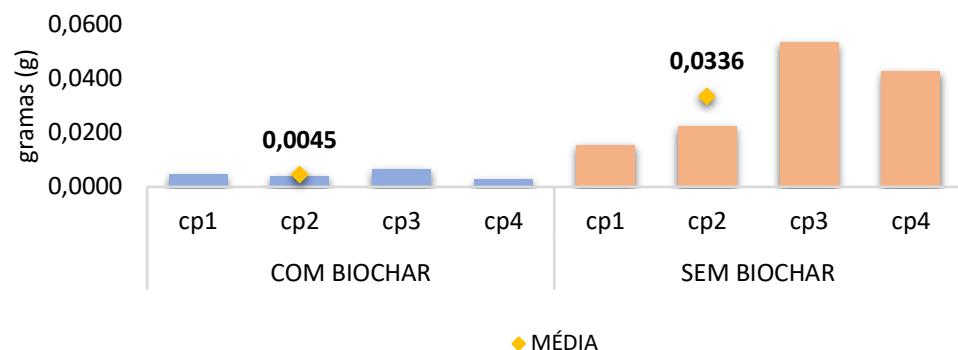
3.4 Eflorescência

Os corpos de prova foram desmoldados com um dia de idade, após permanecerem por 24 horas nos moldes em temperatura ambiente. O processo de indução da eflorescência foi iniciado quando as amostras completaram quatro dias de idade. A evolução visual do fenômeno foi acompanhada em diferentes momentos ao longo do tempo.

A partir da inspeção visual, foi possível observar o início da formação de material eflorescente em algumas das amostras aos 18 dias de idade. Já aos 66 dias, constatou-se a presença de umidade excessiva na superfície de determinadas amostras. Esse comportamento pode ser atribuído às condições climáticas locais durante o período de exposição, caracterizadas por elevada umidade relativa do ar, favorecendo a absorção de umidade pelas argamassas e dificultando a evaporação da água acumulada na superfície.

A Figura 11 mostra a quantidade de eflorescência formada nas amostras com e sem biochar, medida por pesagem após o ensaio. Observa-se que os corpos de prova sem biochar (à direita) apresentaram valores significativamente mais altos, com uma média de 0,0336g. Já os corpos de prova com biochar (à esquerda) apresentaram valores muito menores, com média de apenas 0,0045g. Esses resultados sugerem que o uso de biochar contribuiu para a redução da formação de sais na superfície das amostras, ou seja, diminuiu a eflorescência. As colunas representam cada corpo de prova individualmente (cp1 a cp4), e os losangos amarelos indicam a média de cada grupo.

Figura 11: Material eflorescente - Com e sem biochar



A Figura 12 apresenta os valores médios de resistência à compressão, em MPa, obtidos a partir dos quatro corpos de prova da formulação REF-5 (sem biochar) e outros quatro corpos de prova da formulação BCA-6 (com biochar). Observa-se que, após 69 dias de exposição ao ambiente úmido, os corpos de prova contendo biochar (BCA-6) apresentaram desempenho superior (20,6 MPa) em relação àqueles sem biochar (15,4 MPa), indicando um efeito positivo da adição do biochar na resistência mecânica ao longo do tempo. Comparando esses resultados com os obtidos por Mota (2024), que avaliou os mesmos traços sob cura ambiente convencional aos 28 dias, em que obteve valores de 20,3 MPa para o BCA-6 e 19,1 MPa para o REF-5, observa-se que, embora tenha ocorrido uma redução da resistência no traço sem biochar (de 19,1 MPa para 15,4 MPa), o traço com biochar apresentou um pequeno aumento (de 20,3 MPa para 20,6 MPa). Isso evidencia que a incorporação do biochar favoreceu a estabilidade mecânica da argamassa geopolimérica ao longo do tempo, mesmo sob condições de umidade que propiciam a formação de eflorescência.

Na Tabela 6 está exposto o comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho com o de Mota (2024).

Figura 12: Eflorescência - Resistência à com pressão com e sem biochar – 69 dias

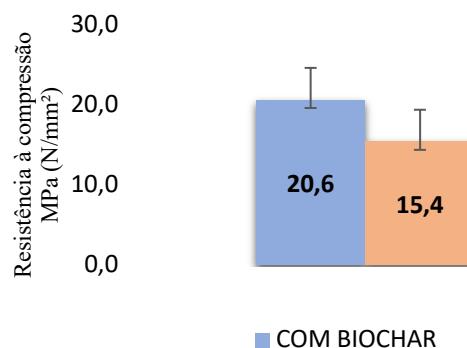


Tabela 6: Comparativo com Mota (2024) – Resistência à compressão - Eflorescência

	COM BIOCHAR	SEM BIOCHAR
EFLORESCÊNCIA	20,6	15,4
MOTA (2024)	19,1	20,3
VARIAÇÃO (%)	7,76%	-24,32%

4. CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar o efeito da cura térmica e carbônica em argamassas geopoliméricas nas propriedades mecânicas e na suscetibilidade ao efeito da eflorescência. Os resultados obtidos permitem concluir que a cura ambiente proporcionou os melhores desempenhos mecânicos em ambos os traços avaliados, superando as curas térmica e carbônica.

A presença do biochar favoreceu o ganho de resistência nas idades iniciais e contribuiu de forma significativa para a redução da eflorescência superficial, indicando que sua incorporação pode melhorar a durabilidade do material, especialmente em ambientes úmidos.

A cura térmica e a cura carbônica, ao contrário do que se poderia esperar, não trouxeram vantagens em termos de resistência à compressão quando comparadas à cura ambiente. Além disso, a cura carbônica demonstrou potencial para intensificar a migração de sais, especialmente nas argamassas sem biochar, aumentando a manifestação de eflorescência.

Portanto, os objetivos específicos da pesquisa foram plenamente atendidos. A resistência à compressão foi analisada em diferentes condições de cura, a eflorescência foi identificada e quantificada, e os resultados obtidos foram comparados com os do estudo de Mota (2024), confirmando o potencial do biochar como aditivo benéfico e sustentável para argamassas geopoliméricas sob cura ambiente.

5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 3 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2008. 320 p.

Fast Company. **Como reduzir a pegada do cimento, responsável por 8% das emissões de carbono.** Disponível em: <https://fastcompanybrasil.com/impacto/como-reduzir-a-pegada-do-cimento-responsavel-por-8-das-emissoes-de-carbono/#:~:text=As%20bilh%C3%B5es%20de%20toneladas%20de,tamb%C3%A9m%20libera%20CO2%20quando%20aquecido. Acesso em: 09 dez. de 2024.>

JERONIMO, P. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas a partir da incorporação de cinza de casca de arroz em substituição parcial ao silicato de sódio e ao metacaulim.** 2022. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

LONGHI, M. A.; RODRIGUEZ, E.D.; WALKLEY, B.; ZHANG, Z.; KIRCHHEIM, A. P. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation. **Composites Part B: Engineering**, v. 182, p. 107671, fev. 2020.

MOTA, G. N. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas a base de cinza volante e metacaulinita com incorporação de biochar da casca de arroz.** 2024. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2024.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.** Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. 454 p.

RODGERS, L. Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO₂ que está por toda parte, mas você talvez não saiba. **BBC News Brasil.** Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 04 out. 2024.

SANTANA, H. A.; ANDRADE NETO, J. S.; ANDRADE NETO, N. S.; RIBEIRO, D. V.; CILLA, M. S.; DIAS, C. M. Self-compacting geopolymer mixture: Dosing based on statistical mixture design and simultaneous optimization. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118677, jul. 2020.

YUAN, J. et al. **Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers.** *Ceramics International*, v. 42, n. 14, p. 16184-16190, 2016.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.