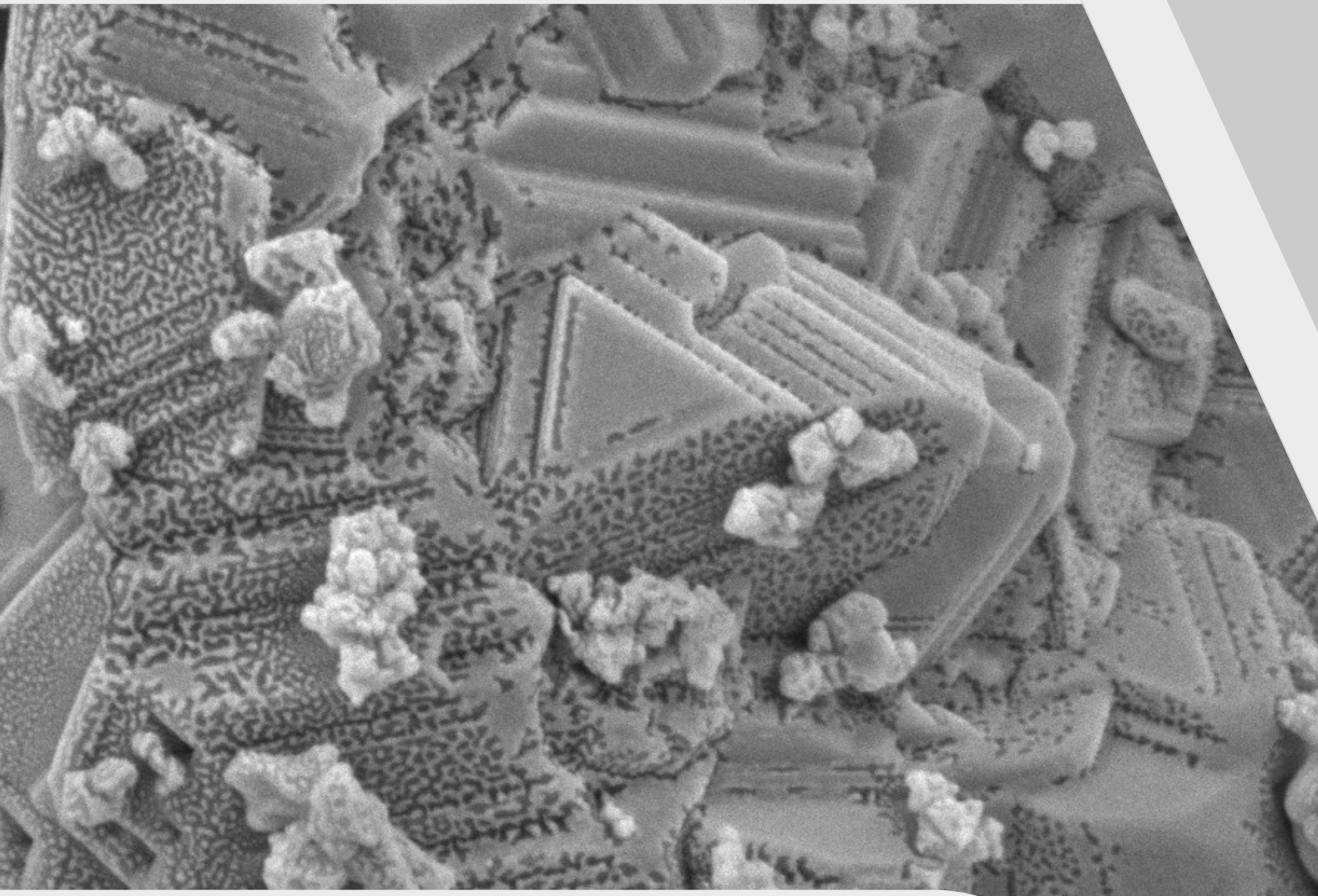
EDITORA
OMNIS SCIENTIA



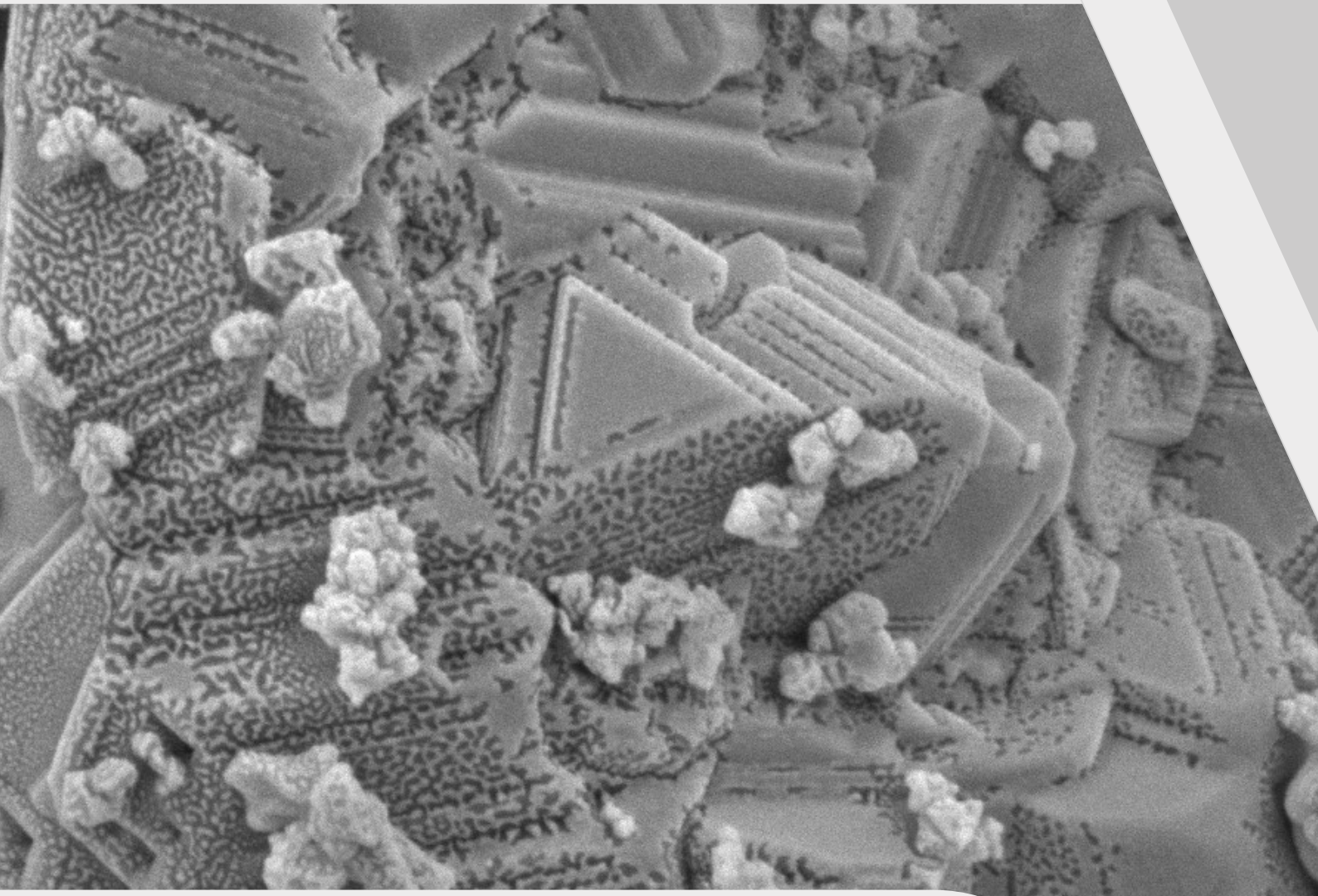
ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS PERSPECTIVAS

VOLUME 5

Organizadores

Aluska do Nascimento Simões Braga
José Rosa de Souza Farias
Érica Karine Alves de Lima
Valdeci Bosco dos Santos

EDITORA
OMNIS SCIENTIA



ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS PERSPECTIVAS

VOLUME 5

Organizadores

Aluska do Nascimento Simões Braga
José Rosa de Souza Farias
Érica Karine Alves de Lima
Valdeci Bosco dos Santos

Editora Omnis Scientia

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS PERSPECTIVAS

Volume 5

1ª Edição

RECIFE - PE

2026

Editor-Chefe

Dr. Daniel Luís Viana Cruz

Organizadores

Aluska do Nascimento Simões Braga

José Rosa de Souza Farias

Érica Karine Alves de Lima

Valdeci Bosco dos Santos

Conselho Editorial

Dr. Amâncio António de Sousa Carvalho – ESS-UTAD – Portugal

Dr. Cássio Brancaleone – UFFS – Brasil

Dr. Marcelo Luiz Bezerra da Silva – UEPa – Brasil

Dra. Pauliana Valéria Machado Galvão – UPE – Brasil

Dr. Plínio Pereira Gomes Júnior – UFRPE – Brasil

Dr. Walter Santos Evangelista Júnior – UFRPE – Brasil

Dr. Wendel José Teles Pontes – UFPE – Brasil

Editores de Área - Engenharias

Dra. Elba Gomes dos Santos Leal

Dr. Mauro de Paula Moreira

Assistente Editorial

Thialla Larangeira Amorim

Imagem de Capa

Canva e Magnific

Edição de Arte

Vileide Vitória Larangeira Amorim

Revisão

Os autores



Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons – Atribuição - Não Comercial - Sem Derivações 4.0 Internacional.

O conteúdo abordado nos artigos, seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Lumos Assessoria Editorial

A532
Análise e desenvolvimento de materiais cerâmicos : novas perspectivas : volume 5 [recurso eletrônico] / organizadores Aluska do Nascimento Simões Braga ... [et al.]. — 1. ed. — Recife : Omnis Scientia, 2026.
Dados eletrônicos (pdf).

Inclui bibliografia.
ISBN 978-65-284-0671-5
DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5

1. Material cerâmico. 2. Engenharia de materiais. 3. Cerâmica (Tecnologia). I. Braga, Aluska do Nascimento Simões. II. Farias, José Rosa de Souza. III. Lima, Érica Karine Alves de. IV. Santos, Valdeci Bosco dos.

CDD23: 620.11

I-2010263

Bibliotecária: Priscila Pena Machado – CRB-7/6971

Editora Omnis Scientia

Av. República do Líbano, nº 251, Sala 2205, Torre A,

Bairro Pina, CEP 51.110-160, Recife-PE.

Telefone: +55 87 99920-5762

editoraomnisscientia.com.br

contato@editoraomnisscientia.com.br



PREFÁCIO

Os materiais cerâmicos constituem uma ampla classe de materiais inorgânicos, formados por elementos metálicos e não metálicos, cujas propriedades estão diretamente relacionadas à composição, à estrutura e às condições de processamento.

De modo geral, podem ser classificados em cerâmicas tradicionais, produzidas predominantemente a partir de matérias-primas naturais (ou de sua mistura industrial), como argila e cimento, e cerâmicas avançadas, desenvolvidas com matérias-primas sintéticas (elevada pureza e composição química controlada) para obtenção de propriedades específicas e aplicações de maior complexidade.

Essa diversidade de composições das matérias-primas possibilita a utilização dos materiais cerâmicos em diferentes áreas científicas e tecnológicas. Assim, este e-book reúne relatos sobre as cerâmicas avançadas, com destaque para aquelas à base de fosfatos de cálcio amplamente estudadas para aplicações biomédicas devido à biocompatibilidade, bioatividade e capacidade de interação com o tecido ósseo. A classe das ferritas, que apresentam propriedades de interesse para aplicações em áreas como eletrônica, catálise e armazenamento de energia. Paralelamente, componentes tradicionais destinados à construção civil, como argamassa e tijolo de adobe, tão essenciais para as infraestruturas urbanas e rurais, e que se mostram capazes de atender às necessidades socioeconômicas.

Além dos métodos convencionais de produção desses materiais, abordagens sustentáveis seja por meio da síntese verde ou por reaproveitamento de resíduos, têm se mostrado viáveis e promissoras. Essas estratégias visam conciliar o desenvolvimento de materiais com propriedades adequadas à redução dos impactos ambientais e ao aproveitamento mais produtivo dos recursos naturais.

Dada a importância dos materiais cerâmicos e a busca por processos de obtenção e aplicação cada vez mais eficientes e sustentáveis, esta obra contempla pesquisas relacionadas ao processamento e à caracterização desses materiais, apresentando estudos sobre suas propriedades e potenciais aplicações científicas e tecnológicas.

Os organizadores.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....9

OBTENÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE BETA FOSFATO TRICÁLCICO (β-TCP) POR DIFERENTES ROTAS: SÍNTESE VERDE E QUÍMICA

Rebeca Alana Barros Brasileiro

Cauan Pablo Campos Lira

Érica Karine Alves de Lima

José Rosa de Souza Farias

Veruska do Nascimento Simões

Valdeci Bosco dos Santos

Aluska do Nascimento Simões Braga

DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5/9-19

CAPÍTULO 2.....20

SÍNTESE DO BETA FOSFATO TRICÁLCICO (β-TCP) PELO MÉTODO PECHINI EM MEIO ALCOÓLICO

Gabriel Lima Bastos

José Rosa de Souza Farias

Luana Jacobina Lago

Érica Karine Alves de Lima

Veruska do Nascimento Simões

Valdeci Bosco dos Santos

Aluska do Nascimento Simões Braga

DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5/20-31

CAPÍTULO 3.....32

NANO-$CuFe_2O_4$ SINTETIZADAS A PARTIR DE TAPIOCA

Érica Karine Alves de Lima

Geovana Tayná Silva de Morais

Ilana Maria Rocha Batista

Vilmaria Lima da Silva

José Rosa de Souza Farias

Aluska do Nascimento Simões Braga

Valdeci Bosco dos Santos

DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5/32-43

CAPÍTULO 4.....44

RESISTÊNCIA DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRA DE COCO BABAÇU ALCALINA

Geovana Tayná Silva de Morais

Ilana Maria Rocha Batista

Vilmaria Lima da Silva

Érica Karine Alves de Lima

José Rosa de Souza Farias

Luciana Barbosa Amâncio

Aluska do Nascimento Simões Braga

Valdeci Bosco dos Santos

DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5/44-55

CAPÍTULO 5.....56

ANÁLISE DIMENSIONAL DE TIJOLOS DE ADOBE FABRICADOS COM APARAS TÊXTEIS

Ítalo Ronald Marques Torres Lopes

Érica Karine Alves de Lima

José Rosa de Souza Farias

Aluska do Nascimento Simões Braga

Valdeci Bosco dos Santos

Luciana Barbosa Amâncio

DOI: 10.47094/978-65-284-0671-5/56-65

CAPÍTULO 1

OBTENÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE BETA FOSFATO TRICÁLCICO (β-TCP) POR DIFERENTES ROTAS: SÍNTESE VERDE E QUÍMICA.

Rebeca Alana Barros Brasileiro[1];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba

http://lattes.cnpq.br/3969128938979474

Cauan Pablo Campos Lira[2];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba

http://lattes.cnpq.br/9323865762071627

Érica Karine Alves de Lima[3];

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo.

http://lattes.cnpq.br/8186490901865658

José Rosa de Souza Farias[4];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

http://lattes.cnpq.br/9404467330103347

Veruska do Nascimento Simões[5];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba

http://lattes.cnpq.br/1149592827133122

Valdeci Bosco dos Santos[6];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

Aluska do Nascimento Simões Braga[7].

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

RESUMO: O beta fosfato tricálcico (β-TCP) é uma biocerâmica amplamente estudada devido à sua excelente biocompatibilidade, osteocondutividade e potencial na regeneração óssea. Este trabalho teve como objetivo sintetizar β-TCP nanométrico por uma rota verde utilizando extrato de Aloe vera e por uma rota química convencional (método Pechini), realizando uma análise comparativa de suas características estruturais e morfológicas. As amostras foram calcinadas a 800 °C por 1 hora e caracterizadas por difração de raios X

(DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados de DRX confirmaram a formação de β-TCP em ambas as rotas, embora a rota verde também tenha gerado pirofosfato de cálcio. O FTIR evidenciou bandas características do grupo fosfato (PO_4^{3-}). A MEV revelou morfologias distintas entre as amostras. Ambas as rotas foram eficazes, apresentando diferenças estruturais e morfológicas.

PALAVRAS-CHAVE: Síntese Verde. *Aloe Vera*. β-TCP.

SYNTHESIS OF BETA TRICALCIUM PHOSPHATE (B-TCP) NANOPARTICLES VIA DIFFERENT ROUTES: GREEN AND CHEMICAL METHODS

ABSTRACT: Beta tricalcium phosphate (β-TCP) is a bioceramic widely studied for its excellent biocompatibility, osteoconductivity, and potential in bone regeneration. This study aimed to synthesize nanometric β-TCP via a green route using *Aloe vera* extract and a conventional chemical route (Pechini method), followed by a comparative analysis of their structural and morphological characteristics. The samples were calcined at 800 °C for 1 hour and characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). XRD results confirmed the formation of β-TCP in both methods, although the green route also produced calcium pyrophosphate. FTIR spectra showed characteristic phosphate group (PO_4^{3-}) bands in all samples. SEM analysis revealed distinct morphologies depending on the synthesis route. Both methods were effective for β-TCP synthesis, but differences in structural and morphological properties were observed.

KEY-WORDS: Green Synthesis. *Aloe vera*. β-TCP

INTRODUÇÃO

A engenharia tecidual tem se destacado na busca por recursos e rotas tecnológicas que ofereçam suporte à saúde humana, com o objetivo de minimizar danos causados pela perda ou falha de tecidos e órgãos, por meio da mimetização do microambiente fisiológico. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos materiais substitutos ósseos, que apresentem osteocondutividade, funcionalidade biológica e propriedades mecânicas aprimoradas, torna-se altamente relevante.

Atualmente, as biocerâmicas à base de fosfatos de cálcio, como a hidroxiapatita (HAp) e o beta fosfato tricálcico (β-TCP), estão entre os materiais mais utilizados na engenharia tecidual e na regeneração óssea, devido à sua semelhança química com a fase inorgânica do osso, além de apresentarem elevada biocompatibilidade e osteocondutividade (Hossen *et al*., 2025). Entretanto, a HAp possui limitações associadas à sua baixa taxa de degradação

e às propriedades mecânicas insatisfatórias, o que restringe parte de suas aplicações (Jang *et al*., 2024; Liang *et al*., 2024).

Nas últimas décadas, diversas rotas químicas de síntese foram desenvolvidas para a obtenção dessas biocerâmicas (Alam *et al*., 2024). Dentre elas, destacam-se o método Pechini, uma rota derivada do processo sol-gel. Essa técnica baseia-se na formação de uma resina polimérica produzida pela poliesterificação entre um complexo metálico quelatado usando ácidos hidroxicarboxílicos e um álcool polihidróxi. O aquecimento dessa mistura resulta em uma resina polimérica homogênea que, após calcinação, origina óxidos cerâmicos com elevada pureza e alta homogeneidade composicional. O intermediário polimérico formado é constituído por uma rede tridimensional de complexos metal–orgânicos interligados por ligações de oxigênio, o que favorece a distribuição uniforme das espécies precursoras e a formação de fases cristalinas bem definidas (Nguyen *et al*., 2019). O método Pechini apresenta vantagens significativas, como controle do tamanho de grãos, homogeneidade química em escala atômica e menor temperatura de processamento, quando comparado a outras rotas convencionais (Alhaji *et al*., 2017).

Paralelamente às rotas convencionais de síntese, tem crescido o interesse por métodos baseados nos princípios da química verde, visando reduzir impactos ambientais, consumo energético e utilização de reagentes tóxicos durante a obtenção de biomateriais. As chamadas rotas de síntese verde empregam frequentemente extratos vegetais, resíduos biológicos, solventes menos agressivos e condições brandas de processamento, permitindo a produção de nanopartículas de fosfatos de cálcio com elevada biocompatibilidade e propriedades físico-químicas adequadas para aplicações biomédicas (Osman *et al*., 2024; Kharissova *et al*., 2024; Oladele *et al*., 2024). Além disso, essas abordagens podem favorecer o controle morfológico e a estabilidade das partículas devido à ação de compostos naturais como agentes redutores, quelantes ou estabilizantes (Alam *et al*., 2024). Estudos recentes demonstram que a síntese verde de fosfatos de cálcio e nanocompósitos bioativos apresenta potencial significativo para aplicações em regeneração óssea, engenharia tecidual e liberação controlada de fármacos, associando sustentabilidade ambiental e desempenho biológico aprimorado (Silveira *et al*., 2024).

A síntese verde mais popular para obtenção de nanopartículas é o método mediado por extrato vegetal (Baladi *et al*., 2023; Xiao *et al*., 2024; Naik *et al*., 2024; Wellia *et al*., 2024), pois leva a uma formação bem-sucedida de nanopartículas com menos tempo e recursos, resultando em um ambiente de síntese estável. Dentre as diversas espécies de plantas, a *Aloe vera*, uma planta medicinal bem conhecida, demonstrou notáveis capacidades de síntese verde. As propriedades antibacterianas, antifúngicas, antioxidantes, antinflamatórias e anticancerígenas inerentes da *Aloe vera*, atribuído à sua rica composição fitoquímica, a torna uma candidata ideal para a síntese controlada de nanopartículas (Rashid *et al*., 2024; Jose *et al*., 2021).

Porém, não foram encontrados estudos na literatura utilizando extrato de aloe vera para obtenção do β-TCP, e o método Pechini, também é pouquíssimo relatado na literatura para obtenção do β-TCP (Pena e Vallet-Regı, 2003).

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo a síntese de β-TCP nanométrico pelo método da síntese verde usando extrato de *Aloe Vera*, e por uma rota química através do método Pechini, visando uma análise comparativa das características estruturais e morfológicas das amostras obtidas através das diferentes rotas de síntese.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os reagentes utilizados foram: água destilada, álcool etílico absoluto (99,5% P.A.), pó comercial de *Aloe vera*; ácido cítrico monoidratado, etileno glicol, nitrato de cálcio e fosfato de amônio dibásico.

A síntese do β-fosfato tricálcico (β-TCP) pelo método Pechini foi conduzida a partir da dissolução do ácido cítrico em 100 mL de água destilada a aproximadamente 70 °C, sob agitação magnética constante, adotando-se uma razão molar ácido cítrico/cátions metálicos (AC/CM) de 3:1. Após completa dissolução, os precursores nitrato de cálcio e fosfato de amônio dibásico foram adicionados de forma gradual, visando melhor homogeneização do sistema. Em seguida, foi adicionado o etilenoglicol como agente polimerizante, mantendo-se a agitação contínua. A temperatura foi elevada até cerca de 120 °C para promover as reações de esterificação e poliesterificação, resultando na formação de um gel polimérico homogêneo.

O gel obtido foi submetido a uma calcinação inicial a 400 °C por 1 hora, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, para eliminação da matéria orgânica, formando um material poroso (puff). Esse material foi então desaglomerado em almofariz, peneirado em malha ABNT nº 200 (0,074 mm) e submetido à calcinação final a 800 °C por 1 hora, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, visando a obtenção da fase cristalina β-TCP.

Para a rota de síntese verde, inicialmente foi preparado o extrato de *Aloe vera* pela dissolução de 20 g do pó em 100 ml de álcool etílico absoluto. A mistura foi submetida à extração em rotoevaporador a 60 °C e 120 rpm por 3 horas. Em seguida, o extrato obtido foi filtrado e armazenado para uso na síntese. Para obtenção do pó de b-TCP, o nitrato de cálcio foi dissolvido em água destilada (solução 1). Paralelamente, o fosfato de amônio dibásico foi dissolvido em uma mistura contendo o extrato alcóolico de Aloe vera e água destilada (solução 2), garantindo completa solubilização. Em seguida, as soluções foram combinadas sob agitação por aproximadamente 30 minutos, promovendo a formação de um sistema homogêneo. O material resultante foi seco em estufa a 60 °C por 48 horas, e posteriormente, foi realizada uma calcinação inicial a 200 °C por 2 horas para remoção de compostos orgânicos residuais. Após essa etapa, o material foi desaglomerado, peneirado (ABNT n° 300) e submetido à calcinação final a 800 °C por 1 hora. As amostras obtidas

foram nomeadas de β-TCP-800 e β-TCP-Verde 800, quando sintetizadas pelo método Pechini e por síntese verde, respectivamente.

As amostras foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), para identificação das fases formadas, quantificação das fases, cristalinidade e tamanho de cristalito. O equipamento utilizado para essa análise foi o difratômetro de raios X modelo D2 PHASER da Bruker, com radiação kα do cobre e varredura de 10 a 60º. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões JCPDS, 31 do International Centre for Diffraction (anteriormente conhecido como Joint Committee on Powder Diffraction Standards). A identificação e quantificação das fases foi realizada por meio do programa HighScore Plus. A cristalinidade foi determinada pela razão entre a área integrada referente à fase cristalina e a área total utilizando a Eq. (1) :

$$Xc(\%) = (\text{Área Cristalina}) / (\text{Área Total}) * 100 \quad (1)$$

O cálculo do tamanho de cristalito foi realizado a partir da deconvolução do pico de reflexão basal de maior intensidade conhecida como equação de Scherrer (Scherrer, 1918) utilizando a Eq. (2) :

$$D = (K.\lambda) / (\beta.\cos\theta) \quad (2)$$

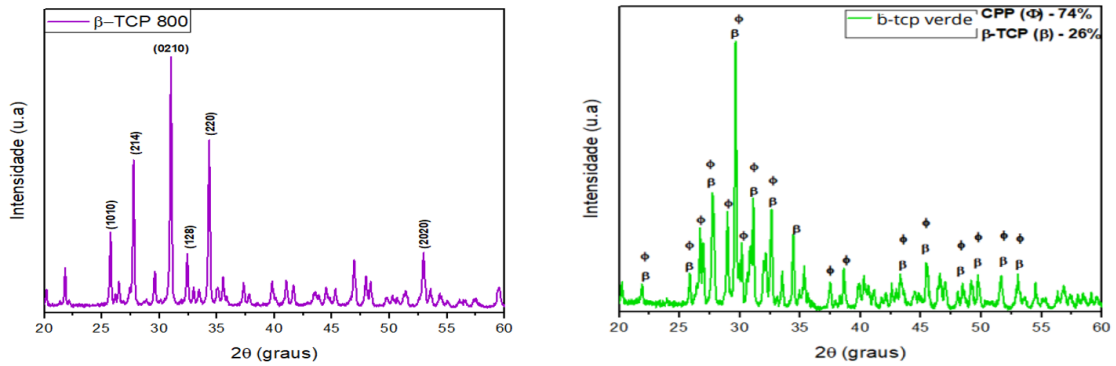
Na formulação, D corresponde ao tamanho médio do cristalito. K é uma constante que depende da configuração experimental utilizada e da geometria da amostra, que neste caso corresponde a 0,90. λ é o comprimento de onda da radiação incidente, que neste caso é 0,15 referente ao comprimento de onda do ânodo de cobre. β é a largura à meia altura dos picos de difração (FWHM – Largura Total à Meia Altura) e θ é o ângulo de difração do plano cristalino ou ângulo de Bragg.

Foram realizadas análises por espectrometria de infravermelho (FT-IR), usando um espectrômetro Bruker Vertex 70 ATR equipado com um módulo de refletância total atenuada (ATR), cobrindo a faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras por espectro. Os aspectos morfológicos foram analisados por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) usando um equipamento Tescan VEGA3 SBH.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os difratogramas de raios X das amostras obtidas pelo método Pechini (a) e por síntese verde (b), ambas calcinadas a 800 °C.

Figura 1. Difratogramas de raios X das amostras obtidas pelo método Pechini (a) e por síntese verde (b).



Os difratogramas de ambas as amostras exibem picos característicos da fase β-TCP, confirmando sua formação independentemente da rota de síntese. Os principais picos observados entre 2θ = 25° e 35° correspondem às reflexões típicas dessa fase cristalina, em concordância com o padrão JCPDS nº 09-0169 e para a determinação da fase pirofosfato foi usada a ficha de banco de dados da NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (U.S.), Monograph 25, 7, 95 (código referencial: 00-020-0024, para o pirofosfato)

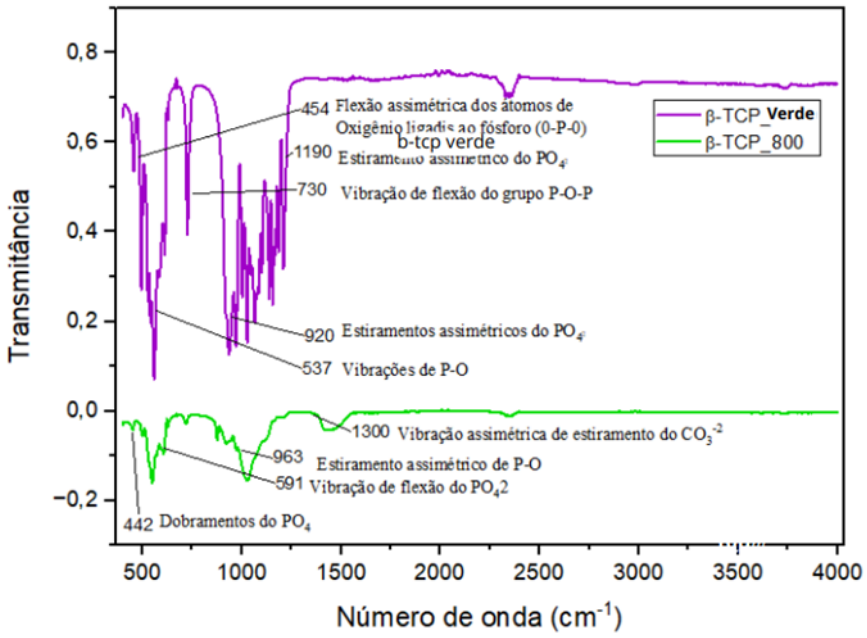
Porém, os difratogramas evidenciaram diferenças significativas entre as amostras sintetizadas por rota verde e pelo método Pechini. Na amostra β-TCP verde nota-se a formação de uma cerâmica bifásica, constituída de β-fosfato tricálcico (β-TCP) e pirofosfato de cálcio (CPP), sendo a fase predominante. A formação dessa fase de pirofosfato de cálcio pode estar relacionada ao desbalanceamento estequiométrico entre cálcio e fósforo, evidenciando que não ocorreu uma mistura homogênea entre os íons de forma tão eficiente, na síntese verde (Enderle *et al*., 2005). Outros estudos relatam a formação de compostos secundários, como o CPP, durante a síntese de β-TCP (Furko, 2025).

Por outro lado, a amostra β-TCP 800 sintetizada pelo método Pechini apresentou apenas picos característicos da fase β-TCP, indicando elevada pureza de fase e alta cristalinidade. Esse comportamento demonstra a eficiência do método Pechini na homogeneização dos íons precursores, favorecendo a formação de uma única fase cristalina após a calcinação.

Os resultados do tamanho de cristalito mostraram valores de 67,34 nm para a amostra β-TCP 800°C e 71,73 nm para a β-TCP-verde, confirmando o caráter nanométrico das partículas. O maior grau de cristalinidade foi observado na amostra sintetizada via Pechini, com 81%, indicando melhor organização estrutural quando comparada à rota verde, com 74% de cristalinidade.

A Figura 2 mostra os espectros infravermelhos (FTIR) das amostras sintetizadas pela rota verde e pela rota Pechini.

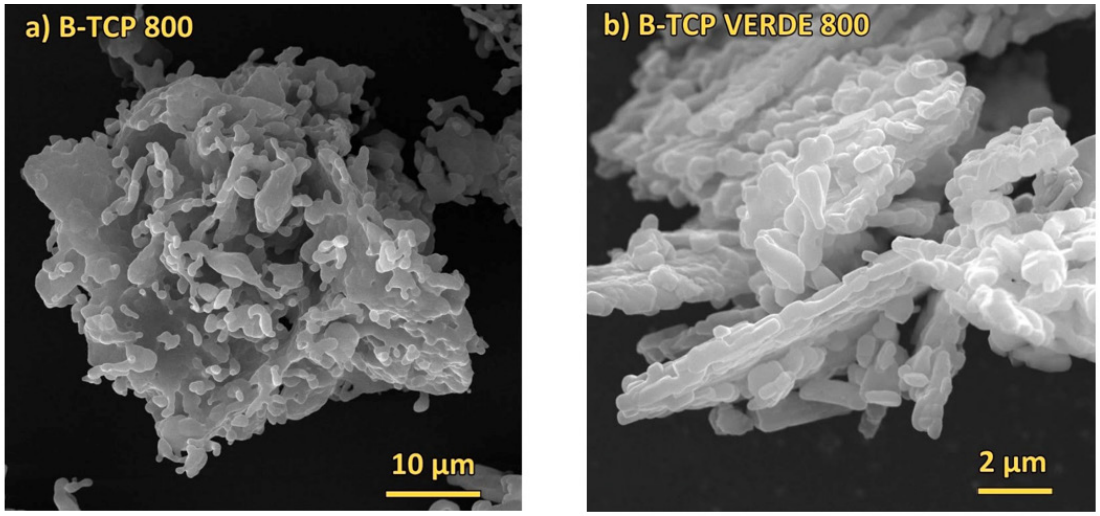
Figura 2. Espectros infravermelhos da amostra via Pechini (B-TCP-800) e pela rota verde (B-TCP-verde-800).



A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) revelou a presença de bandas características dos grupos fosfato (PO_4^{3-}) em ambas as amostras, indicando a formação do β-fosfato tricálcico (β-TCP). De acordo com a literatura, o β-TCP apresenta bandas de estiramento (v_1 e v_3) na região de 900–1200 cm^{-1} e bandas de flexão (v_2 e v_4) entre 400–650 cm^{-1}, o que foi observado nos espectros analisados (Pereira *et al*., 2024). Na amostra obtida por síntese verde, foram identificadas bandas em aproximadamente 1190 e 920 cm^{-1}, atribuídas às vibrações de estiramento do grupo PO_4^{3-}. As bandas em ~537 e ~454 cm^{-1} correspondem às vibrações de flexão do grupo fosfato (O–P–O). Além disso, a presença de uma banda em torno de 730 cm^{-1}, associada a ligações P–O–P, indica a formação de pirofosfato de cálcio ($Ca_2P_2O_7$). Para a amostra sintetizada pelo método Pechini, observaram-se bandas em ~963 cm^{-1} (estiramento assimétrico P–O), ~591 cm^{-1} e ~442 cm^{-1} (modos de flexão do grupo fosfato), confirmando também a formação de β-TCP. No entanto, a presença de uma banda intensa em ~1300 cm^{-1}, atribuída ao estiramento assimétrico do grupo carbonato (CO_3^{2-}), indica incorporação de carbonatos na estrutura. Essa carbonatação pode estar relacionada à decomposição incompleta dos precursores orgânicos ou à absorção de CO_2 durante o tratamento térmico (Eknapakul *et al*., 2024). Dessa forma, os resultados de FTIR corroboram com os dados da difração de raios X (Figura 1).

A Figura 3 exibe as morfologias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras via Pechini (a) e síntese verde (b), com ampliação de 20 kx.

Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura das amostras via Pechini (a) e via síntese verde (b), com ampliação de 20 kx.



A análise morfológica das amostras de β-fosfato tricálcico (β-TCP) calcinadas a 800 °C revelou diferenças significativas relacionadas ao método de síntese empregado. A amostra sintetizada pelo método Pechini (a) apresentou partículas mais aglomeradas e de formato irregular. Essas diferenças indicam que o método de síntese exerce influência direta sobre a morfologia do β-TCP, podendo afetar suas propriedades físico-químicas e biológicas em aplicações de regeneração óssea. Por outro lado, A amostra obtida por síntese verde (a) apresentou partículas alongadas com aspecto lamelar, organizadas na forma de placas sobrepostas.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o β-fosfato tricálcico pode ser eficientemente obtido tanto pela rota tradicional (Pechini) quanto pela rota verde. Porém, na rota verde foi formada uma cerâmica bifásica, com B-TCP e pirofosfato de cálcio, enquanto pela rota Pechini o b-TCP foi obtido como fase única. Por ambos os métodos, as amostras apresentaram cristalitos na ordem de nanômetros e elevadas cristalinidades. A análise de FTIR confirmou a presença dos grupos fosfato característicos do β-TCP em ambas as amostras. O uso dos diferentes métodos influenciou na morfologia das amostras, onde a amostra verde formou partículas alongadas com aspecto lamelar, organizadas na forma de placas sobrepostas. Por outro lado, a amostra sintetizada pelo método Pechini apresentou partículas mais aglomeradas e de formato irregular

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Os autores do artigo declaram que não possuem conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, política, acadêmica e pessoal.

REFERÊNCIAS

Alam, M. K.; Hossain, M. S.; Kawsar, M.; Bahadur, N. M.; Ahmed, S. Synthesis of nano-hydroxyapatite using emulsion, pyrolysis, combustion, and sonochemical methods and biogenic sources: a review. **RSC Advance**s, v. 14, p. 3548–3559, 2024.

Alhaji, A.; Razavi, R. S.; Ghasemi, A.; Loghman-Estarki, M. R. Modification of Pechini sol–gel process for the synthesis of MgO-Y2O3 composite nanopowder using sucrose-mediated technique. **Ceramics International**, v. 43, n. 2, p. 2541-2548, 2017.

Baladi, M.; Amiri, M.; Mohammadi, P.; Mahdi, K. S.; Golshani, Z.; Razavi, R.; Salavati-Niasari , M. Green sol–gel synthesis of hydroxyapatite nanoparticles using lemon extract as capping agent and investigation of its anticancer activity against human cancer cell lines (T98, and SHSY5). **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, 2023.

Eknapakul, T.; Jiamprasertboon, A.; Amonpattaratkit, P.; Pimsawat, A.; Daengsakul, S.; Tanapongpisit, N.; Saenrang, W.; Bootchanont, A.; Wannapraphai, P.; Phetrattanarangsi, T.; Boonchuduang, T.; Khamkongkaeo, A.; Yimnirun, R. Unraveling the structural complexity of and the effect of calcination temperature on calcium phosphates derived from Oreochromis niloticus bones. **Heliyon**, v. 10, n. 8, 2024.

Enderle, R.; Götz-Neunhoeffer, F.; Göbbels, M.; Müller, F. A.; Greil, P. Influence of magnesium doping on the phase transformation temperature of β-TCP ceramics examined by Rietveld refinement. **Biomaterials**, v. 26, n. 17, p. 3379-3384, 2005.

Furko, M. Bioglasses Versus Bioactive Calcium Phosphate Derivatives as Advanced Ceramics in Tissue Engineering: Comparative and Comprehensive Study, Current Trends, and Innovative Solutions. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 16, 2025.

Galea, L.; Bohner, M.; Thuering, J.; Doebelin, N.; Ring, T. A.; Aneziris, C. G.; Graule, T. Growth kinetics of hexagonal sub-micrometric β-tricalcium phosphate particles in ethylene glycol. **Acta Biomaterialia**, v. 10, n. 9, p. 3922-3930, 2014.

Hossen, S. M. M.; Khaleque, M. A.; Lim, M.; Kang, J.; Kim, D.; Lee, W.; Kim, Y. Biomimetic Strategies for Bone Regeneration: Smart *Scaffolds* and Multiscale Cues. **Biomimetics**, v. 11, 2026.

Jang, W. Y.; Pyun, J. C.; Chang, J. H. Comparative In Vitro Dissolution Assessment of Calcined and Uncalcined Hydroxyapatite Using Differences in Bioresorbability and Biomineralization. **Molecular Sciences**, v. 25, 2024.

Jose, L. M.; Raj, R. S. A.; Sajan, D.; Aravind, A. Adsorption and photocatalytic activity of biosynthesised ZnO nanoparticles using Aloe Vera leaf extract. **Nano Express**, v. 2, n. 1, 2021.

Kharissova, O. V.; Nikolaev, A. L.; Kharisov, B. I.; Dorozhkin, S. V.; López, I.; Méndez, Y. P.; Fuente, I. G. Enzymatic synthesis of calcium phosphates: A review. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 39, n. 101214, 2024.

Liang, Q.; Dong, J.; Ren, J.; Xiao, C.; Deng, C. Intensified cross-linking dramatically improved the mechanical properties of hydroxyapatite and cellulose composites for repairing bone segmental defects. **Materials Advances**, v. 5, p. 2556–2569, 2024.

Naik, R.; Kumar, A. N.; Naik, Y. V.; Basavaraju, N.; Reddy, G. V. A.; Nagaswarupa, H. P.; Al-Asbahi, B. A.; Roy, N.; Joo, S. W. Green combustion synthesis of multifunctional inorganic ZnO: Co2+ (1–11 mol%) nanoparticles: Electrochemical and photocatalytic applications. **Inorganica Chimica Acta**, v. 563, 2024.

Nguyen, D. K.; Bach, Q.; Kim, B.; Lee, H.; Kang, C.; Kim, I. Synthesis of Cr-doped Al2O3 by Pechini sol-gel method and its application for reversible thermochromic sensors. **Materials Chemistry and Physics**, v. 223, p.708-714, 2019.

Oladele, I. O.; Adekola, S. A.; Agbeboh, N. I.; Isola-Makinde, B. A.; Adewuyi, B. O. Synthesis and Application of Sustainable Tricalcium Phosphate Based Biomaterials From Agro-Based Materials: A Review. **Biomedical Engineering and Computational Biology**, v. 15, 2024.

Osman, A. I.; Zhang, Y.; Farghali, M.; Rashwan, A. K.; Eltaweil, A. S.; Abd El-Monaem, E. M.; Mohamed, I. M. A.; Badr, M. M.; Ihara, I.; Rooney, D. W.; Yap, P. S. Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22. p. 841–887, 2024.

Peña, J.; Vallet-Regi, M. Hydroxyapatite, tricalcium phosphate and biphasic materials prepared by a liquid mix technique. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 23, n. 10, 2003.

Pereira, A. C.; Tovar, N.; Nayak, V. V.; Mijares, D. Q.; Smay, J. E.; Torroni, A.; Flores, R. L.; Witek, L. Direct inkjet writing type 1 bovine collagen/β-tricalcium phosphate scaffolds for bone regeneration. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 112, 2024.

Rashid, M. H.; Sujoy, S. I.; Rahman, M. S.; Haque, M. J. Aloe vera assisted green synthesis of Ag and Cu co-doped ZnO nanoparticles and a comprehensive analysis of their structural, morphological, optical, electrical and antibacterial properties. **Heliyon**, v. 10, n. 3, 2024.

Scherrer, P. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen. **Mathematisch-Physikalische Klasse**, vol. 2, p. 98-100, 1918.

Silveira, P. H. P. M.; Lopes, I. J. V. R.; Ribeiro, S. B. N.; Le Sénéchal, N. V.; dos Santos, J. L.; da Rocha, D. N.; da Silva, M. H. P. Synthesis and characterization of lithium fluoride-doped hydroxyapatite by aqueous precipitation. **Revista contribuciones a las ciencias sociales**, v. 17, n. 7, 2024.

Wellia, D. V.; Syuadi, A. F.; Rahma, R. M.; Syafawi, A.; Habibillah, M. R.; Arief, S.; Kurnia, K. A.; Saepurahman, Kusumawati, Y.; Saefumillah, A. Rind of Aloe vera (L.) Burm. f extract for the synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Properties and application in model dye pollutant degradation. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9,

2024.

Xiao, S.; Lao, Y.; Liu, H.; Li, D.; Wei, Q.; Ye, L.; Lu, S. A nanocomposite hydrogel loaded with Ag nanoparticles reduced by aloe vera polysaccharides as an antimicrobial multifunctional sensor. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 267, 2024.

CAPÍTULO 2

SÍNTESE DO BETA FOSFATO TRICÁLCICO (β-TCP) PELO MÉTODO PECHINI EM MEIO ALCOÓLICO

Gabriel Lima Bastos[1];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/2549357911573252

José Rosa de Souza Farias[2];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/9404467330103347

Luana Jacobina Lago[3];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/4043688882733037

Érica Karine Alves de Lima[4];

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo.

http://lattes.cnpq.br/8186490901865658

Veruska do Nascimento Simões[5];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

http://lattes.cnpq.br/1149592827133122

Valdeci Bosco dos Santos[6];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/0011700686113389

Aluska do Nascimento Simões Braga[7].

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

RESUMO: O beta fosfato tricálcico (β-TCP) é amplamente utilizado na regeneração óssea devido à sua bioatividade e reabsorção. Este estudo investigou sua síntese pelo método Pechini, avaliando o efeito de diferentes solventes. As amostras foram caracterizadas por DRX, MEV e EDS. Os resultados indicaram formação de diferentes fases dependendo do álcool utilizado como solvente, destacando o impacto do solvente na pureza e estrutura do material.

PALAVRAS-CHAVE: β-TCP. Solventes. Método Pechini

SYNTHESIS OF BETA TRICALCIUM PHOSPHATE (B-TCP) BY THE PECHINI METHOD IN AN ALCOHOLIC MEDIUM

ABSTRACT: Beta-tricalcium phosphate (β-TCP) is widely used in bone regeneration due to its bioactivity and resorbability. This study investigated its synthesis via the Pechini method, evaluating the effect of different solvents. The samples were characterized by XRD, SEM, and EDS. The results indicated the formation of different phases depending on the alcohol used as the solvent, highlighting the impact of the solvent on the material's purity and structure.

KEY-WORDS: β-TCP. Solvents. Pechini method.

INTRODUÇÃO

A regeneração de tecidos ósseos em regiões onde houve uma perda devido a traumas ou doenças, permanece um desafio, em diversos casos é necessário o uso de enxertos ou próteses, os quais suas propriedades geram uma reação esperada do organismo. O estudo dessas características é feito pela engenharia tecidual. A engenharia tecidual aplica os princípios da biologia e da engenharia ao desenvolvimento de substitutos funcionais para tecidos danificados, e os materiais empregados são denominados biomateriais (Xu *et al*., 2024; Sharahi *et al*., 2025).

Biomaterial é um termo que vem sendo definido de diversas formas, podendo ser definidos como substâncias naturais ou sintéticas, formadas por diferentes elementos, projetadas para interagir com sistemas biológicos, contribuindo para a reparação, substituição ou aprimoramento de tecidos ou órgãos do corpo humano ao longo do tempo (Ajmal *et al*., 2022; Pires *et al*., 2015).

Os biomateriais podem ser classificados de acordo com seu comportamento fisiológico, podendo ser biocompatíveis, bioinertes, bioativos e bioreabsorvíveis, sendo compostos por diversos tipos de materiais como metais, polímeros, compósitos e cerâmicas. Entre as cerâmicas cita-se os fosfatos de cálcio, comumente aplicados com foco no reparo de danos ao tecido ósseo. Atualmente, os principais fosfatos de cálcio sintéticos usados são classificados como hidroxiapatita (HAp), beta fosfato tricálcico (β-TCP) e fosfatos de cálcio bifásicos (BCPs) (Oréfice *et al*., 2006; Farias *et al*., 2021).

O β-TCP é o segundo fosfato de cálcio mais utilizado, sendo superado apenas pela hidroxiapatita. Devido à sua elevada taxa de reabsorção pelo organismo, é amplamente empregado no preenchimento de defeitos ósseos, demonstrando eficácia na estimulação da regeneração tecidual. Trata-se de um biomaterial biocompatível, cuja estrutura

cristalográfica apresenta alta similaridade com a apatita presente em ossos e dentes, favorecendo os processos de osteoindução e osteointegração quando implantado in vivo. A síntese do β-TCP pode ser realizada por diferentes métodos, dentre os quais se destaca o método Pechini, uma variação do processo sol-gel (Kharissova *et al*., 2024; Bulina *et al*., 2024).

O método Pechini é uma técnica avançada de síntese baseada na formação de citratos metálicos em solução. Nesse processo, íons metálicos interagem com grupos hidroxila e carboxila presentes na solução, resultando na formação de um gel polimérico. Posteriormente, esse gel é submetido a etapas de pirólise e calcinação, levando à obtenção do material cerâmico com elevada pureza e controle estrutural (Muñoz *et al*., 2022).

As cerâmicas de fosfato de cálcio apresentam limitações relacionadas à baixa resistência mecânica, presença de impurezas, granulação em escala micrométrica e distribuição não homogênea de tamanho e forma das partículas. Para superar essas limitações e aprimorar suas propriedades físico-químicas, diversos parâmetros de síntese são amplamente investigados, incluindo temperatura de sintetização e calcinação, tempo de imersão, tipo de solvente utilizado, controle do pH e pureza dos reagentes iniciais (Farias *et al*., 2021; Ebrahimi *et al*., 2017).

Neste sentido, em virtude da carência na literatura se tratando da síntese de β-TCP pelo método Pechini utilizando diferentes álcoois como solvente e levando em consideração a importância desse material, este estudo teve como objetivo a síntese de β-TCP pela rota Pechini, com análise focada na influência do tipo de solvente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os solventes utilizados foram o álcool etílico e o isopropílico das marcas Synth e Cromoline respectivamente, ambos com pureza mínima de 99,5%. Foram empregados como precursores o nitrato de cálcio (Dinâmica, grau de pureza 99%) e fosfato de amônio dibásico (Neon, grau de pureza 98%), o ácido cítrico (Dinâmica, grau de pureza 99,5%) para formação dos quelatos, e o etilenoglicol (Dinâmica, grau de pureza 99,5%) foi utilizado como agente de polimerização.

No presente estudo foram feitas oito amostras, variando os solventes — álcool isopropílico e álcool etílico — e as proporções entre ácido cítrico e cátions metálicos (AC/CM), sendo elas 1:1 e 3:1, bem como a temperatura de síntese, 800 e 1000°C.

Inicialmente em um becker foi adicionado 100 ml do solvente em estudo (álcool etílico ou álcool isopropílico) a uma temperatura de aproximadamente 70° C (temperatura controlada por termômetro) em uma placa de aquecimento e a agitação foi mantida constante até a formação do gel. Em seguida foi adicionado ácido cítrico de forma fracionada para que o mesmo se dissolvesse totalmente. Após a homogeneização da solução foi adicionado fosfato de amônio e nitrato de cálcio, de modo que a proporção entre ácido cítrico e cátions

metálicos seja a desejada, 1:1 e 3:1, onde a temperatura de 70°C foi mantida constante.

Após 15 minutos foi adicionado o etileno glicol, de modo que a proporção entre ácido cítrico e o etilenoglicol foi de 60/40, e a temperatura foi elevada para manter uma média entre 100 e 120°C de forma a dar início nas reações de esterificação e poliesterificação, formando o gel. Este gel passou por uma pirólise a 400°C/1h, com taxa de aquecimento de 10°C/min, para eliminação da matéria orgânica, formando assim, o puff. Após o resfriamento, o puff obtido foi desaglomerado em um almofariz, passado em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), e os pós foram calcinados nas temperaturas de 800 e 1000°C, durante 1 hora. A nomenclatura e os parâmetros de síntese das amostras estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura e os parâmetros de síntese.

Amostra	Temperatura de Calcinação (°C)	Relação ácido cítrico/ cátions metálicos	Solvente utilizado
B18e	800	1:1	Álcool Etílico
B11e	1000	1:1	
B38e	800	3:1	
B31e	1000	3:1	
B18i	800	1:1	Álcool Isopropílico
B11i	1000	1:1	
B38i	800	3:1	
B31i	1000	3:1	

As amostras sintetizadas pelo método Pechini foram caracterizadas por difração de raios X (DRX) para identificação e quantificação das fases formadas, cálculo de cristalinidade e tamanho de cristalitos. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para identificação dos aspectos morfológicos das amostras e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) para identificação dos elementos químicos da amostra.

A difração de raios X (DRX) foi realizada no equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD-6000. A radiação empregada foi Cu Kα(40Kv/30mA) e modo de operação tempo fixo, tempo de permanência 0,6 segundos e passo 0,02°, com varredura de 20 a 60°. A comparação com os padrões JCPDS, do International Centre for Diffraction (anteriormente conhecido como Joint Committee on Powder Diffraction Standards), foi utilizada para realizar a interpretação. Além disso, a quantificação das fases foi executada por meio do programa HighScore Plus.

A cristalinidade foi determinada pela razão entre a área integrada referente à fase cristalina e a área total utilizando a Eq. (1) :

$$Xc(\%) = \frac{Área\ Cristalina}{Área\ Total} * 100 \quad (1)$$

O cálculo do tamanho de cristalito foi realizado a partir da deconvolução do pico de reflexão basal de maior intensidade conhecida como equação de Scherrer (Scherrer, 1918) utilizando a Eq. (2) :

$$D = \frac{K.\lambda}{\beta.Cos\,\theta} \quad (2)$$

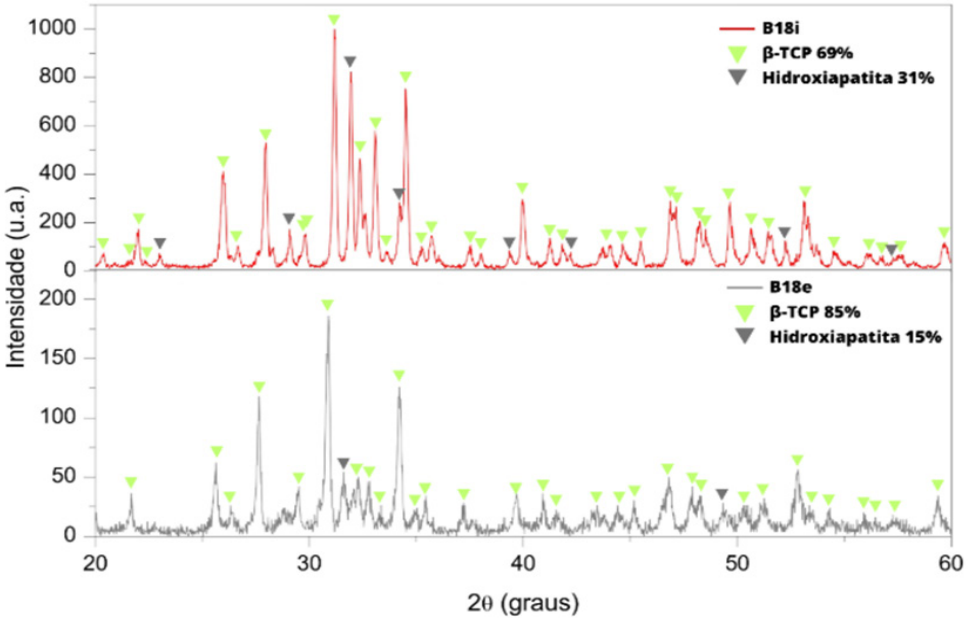
Na formulação, D corresponde ao tamanho médio do cristalito. K é uma constante que depende da configuração experimental utilizada e da geometria da amostra, que neste caso corresponde a 0,90. λ é o comprimento de onda da radiação incidente, que neste caso é 0,15 referente ao comprimento de onda do ânodo de cobre. β é a largura à meia altura dos picos de difração (FWHM – Largura Total à Meia Altura) e θ é o ângulo de difração do plano cristalino ou ângulo de Bragg.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) foram feitas utilizando um microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo Carl Zeiss Auriga a 5,00Kv de tensão de aceleração de trabalho e detector de elétron secundário (SE).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os difratogramas de raios-X das amostras B18i e B18e, as quais foram sintetizadas na mesma proporção AC/CM 1:1, a temperatura de calcinação foi de 800°C, variando o solvente entre álcool isopropílico e álcool etílico, respectivamente.

Figura 1. Difratograma de Raios-X das amostras B18i e B18e

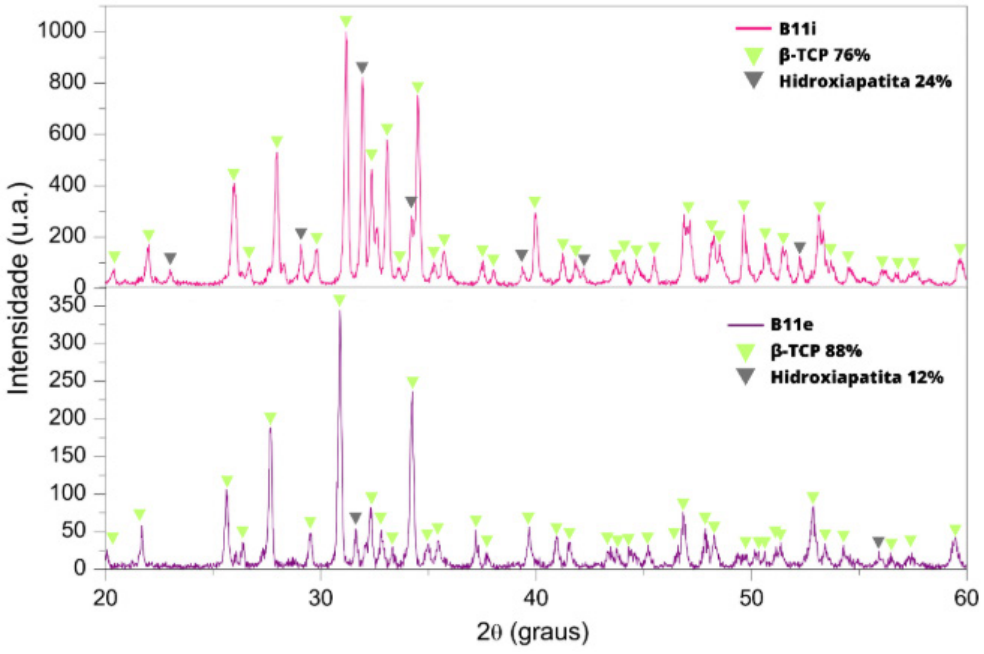


A partir da Figura 1 foi possível observar que ocorreu a formação da fase beta do fosfato de cálcio, identificada pela ficha padrão JCPDS 9 – 169, e também da hidroxiapatita — identificada pela ficha padrão JCPDS 9, com o uso dos dois solventes diferentes. Logo, ocorreu a formação de uma cerâmica bifásica, provavelmente pela diferença no ponto de ebulição entre os solventes utilizados. Comparativamente com a água, que é considerada o solvente universal.

Na síntese via método Pechini o solvente é aquecido passando pelo processo de evaporação, portanto, o ponto de ebulição do solvente interfere diretamente no tempo de síntese, logo, um solvente com ponto de ebulição menor leva a uma aceleração da reação de poliesterificação, que acarreta num aumento rápido da viscosidade da solução, dificultando a difusão dos íons, fazendo com que ocorra a formação de uma segunda fase e torna o material menos cristalino (Farias et al., 2021; Aminzare et al., 2013). No presente estudo, foram utilizados dois solventes com diferentes pontos de ebulição (álcool etílico 78,37°C e álcool isopropílico 82,5°).

A Figura 2 apresenta o difratograma de raios-X das amostras B11i e B11e, comparando a diferença entre os solventes utilizados — álcool isopropílico e álcool etílico respectivamente. Ambas as amostras foram obtidas com a proporção AC/CM 1:1 e calcinadas a 1000°C/1hr.

Figura 2. Difratograma de Raios-X das amostras B11i e B11e

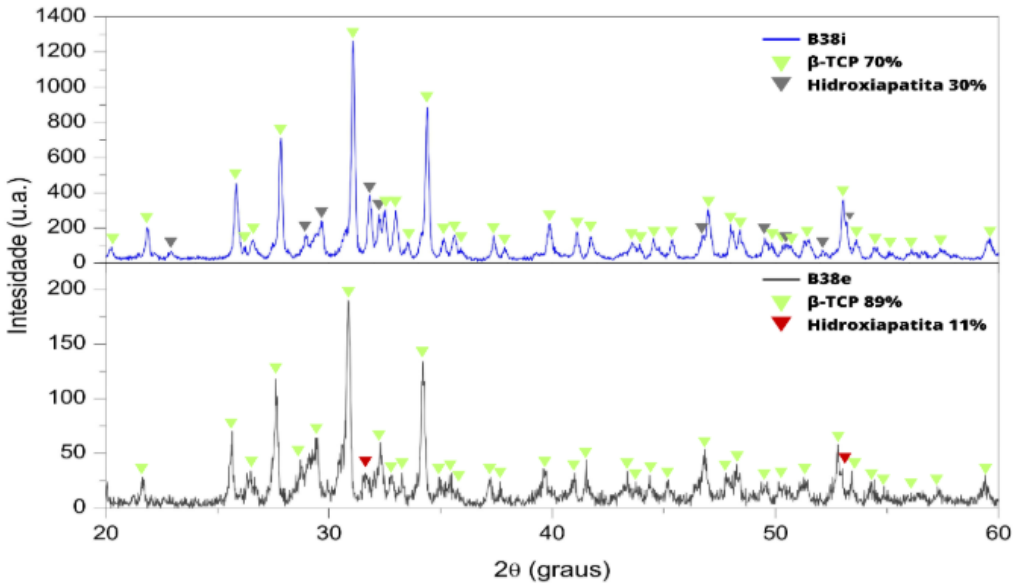


A partir das amostras B11i e B11e foi possível observar que novamente ocorreu a formação de uma cerâmica bifásica para ambos os solventes. Porém, nota-se que o álcool etílico favoreceu a formação do β-TCP, apresentando apenas dois picos característicos da hidroxiapatita.

Durante a síntese utilizando o álcool isopropílico foi possível observar a formação de precipitado, indicando uma baixa solubilidade do solvente, provavelmente devido a sua baixa constante dielétrica (18,3 no álcool isopropílico), comparada com a do álcool etílico (24,3 no etanol). A constante dielétrica pode influenciar na solubilidade de substâncias em uma solução. Solventes com alta constante dielétrica tendem a solvatar íons e moléculas polares com mais eficiência, ou seja, aumenta a dissolução dos precursores, explicando assim a maior eficácia do álcool etílico (Farias et al., 2021; Magalhães et al., 2007; Reis et al., 2019).

A Figura 3 mostra os difratogramas de raios-X das amostras B38i e B38e. Tais amostras foram sintetizadas aumentando a proporção AC/CM para 3:1, a temperatura de calcinação foi de 800°C e a variação nos solventes se repetiu.

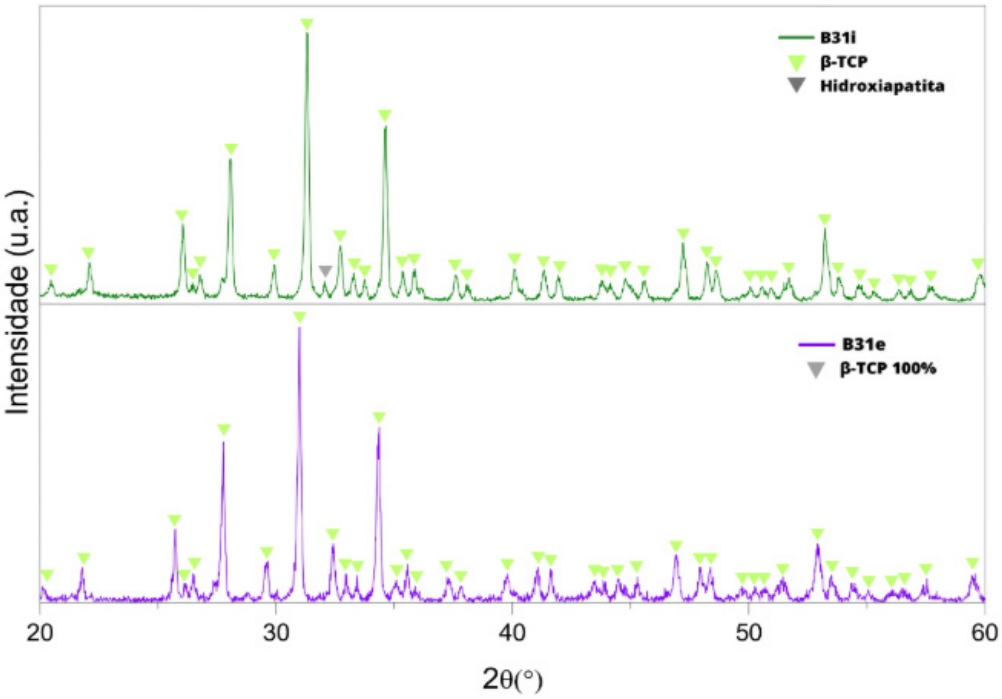
Figura 3. Difratograma de raios-X das amostras B38i e B38e



De acordo com a Figura 3 novamente ocorreu a formação da cerâmica bifásica, reafirmando a influência do ponto de ebulição e da constante dielétrica dos solventes na formação das fases. É notável também que o aumento da proporção AC/CM beneficiou a formação do β-TCP, para ambos os solventes. O ácido cítrico atua como agente quelante se ligando aos íons metálicos presentes na solução, atuando na formação de complexos. A presença de mais ácido cítrico resulta em mais grupos carboxílicos participando da quelação dos cátions metálicos promovendo a distribuição mais uniforme dos elementos metálicos no éster, favorecendo a formação da fase beta (Carvalho et al., 2020).

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios-X das amostras B31i e B31e, ambas sintetizadas com proporção AC/CM 3:1, aumentando a temperatura de calcinação para 1000°C, com solventes diferentes, a primeira com álcool isopropílico e a segunda com álcool etílico.

Figura 4. Difratogramas de raios-X das amostras B31i e B31e.



Na Figura 4 é possível notar que a proporção AC/CM 3:1, juntamente com o aumento da temperatura favoreceu a formação do β-TCP monofásico, quando do uso do álcool etílico com solvente (amostra B31e).

Analisando a taxa de cristalinidade é notável que as amostras sintetizadas com álcool isopropílico (solvente com maior ponto de ebulição) são levemente mais cristalinas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Taxa de cristalinidade e tamanho de cristalito das amostras.

Amostra	Taxa de cristalinidade (%)	Tamanho médio de cristalito (nm)
B11e	94,51	54,991
B11i	98,42	47,176
B18e	95,88	65,954
B18i	97,44	55,558
B31e	97,74	54,393
B31i	98,42	21,038
B38e	96,94	46,274
B38i	97,38	50,292

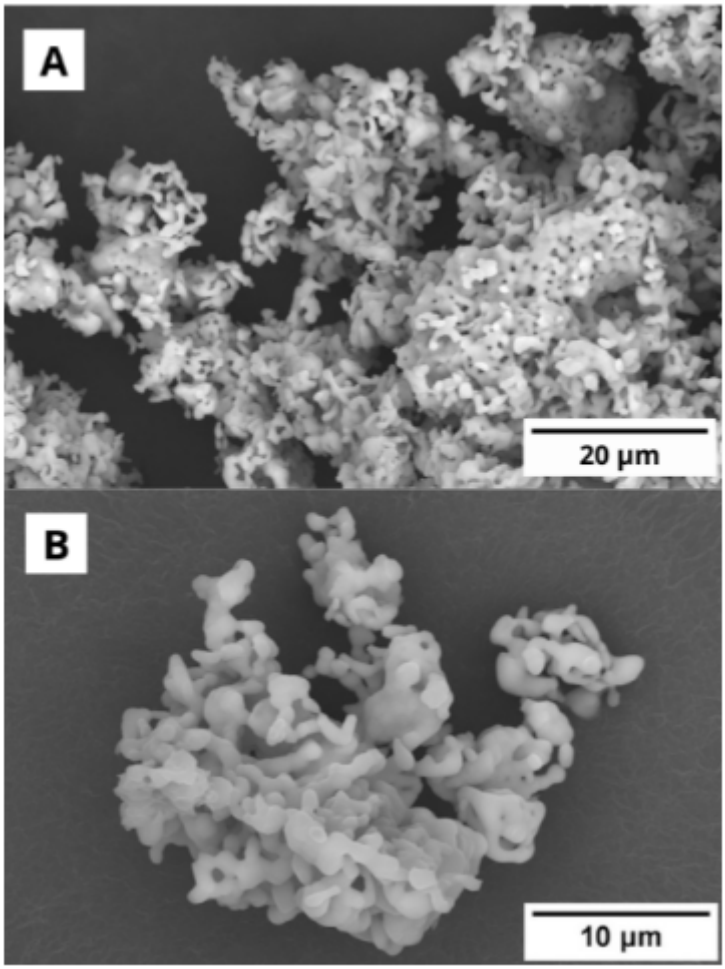
O tempo de síntese afetou a taxa de cristalinidade das amostras, pois, como citado anteriormente, o ponto de ebulição menor reduz o tempo de síntese, interrompendo a difusão dos íons durante a cristalização do material. O tamanho médio de cristalito obtido variou de 21,038 até 65,954 nm mantendo um caráter nanométrico adequado para a aplicação

biomédica assim como a porosidade do material (Azevedo e Strecker, 2014).

Apenas a amostra B31e prosseguiu com as demais caracterizações, pois foi a única que formou a fase β-TCP pura.

A Figura 5 apresenta a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra B31e com aproximação de cinco mil vezes em (A) e quinze mil vezes em (B).

Figura 5. Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra B31e.

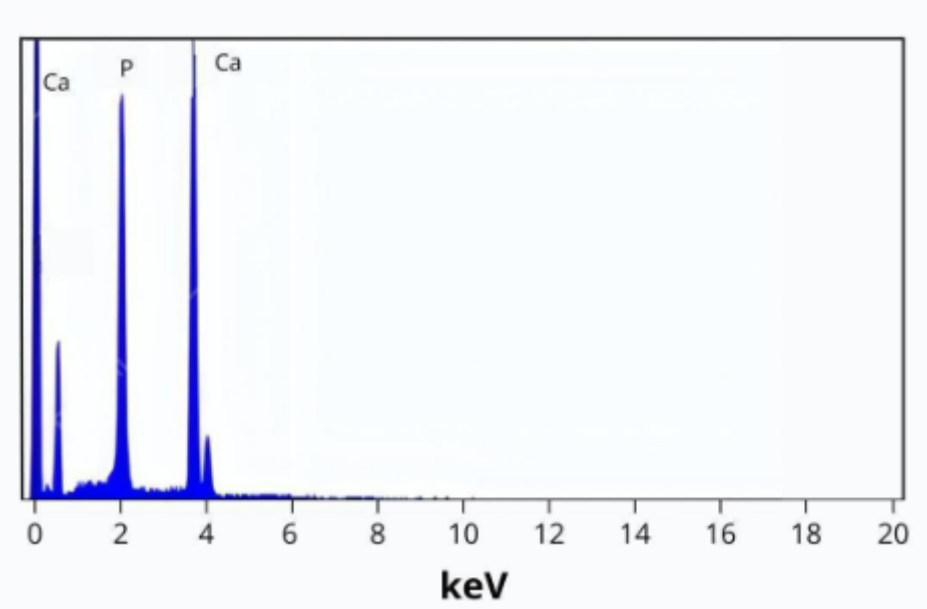


Conforme observado na figura 5, percebe-se que as microscopias apresentam estrutura regular e aglomerada como reportado na literatura científica (Hashimoto *et al*., 2024; Zhang *et al*., 2022; Boanini *et al*., 2019). Além disso, a superfície do material é uniforme e não porosa, o que pode influenciar diretamente suas propriedades para aplicações biomédicas. A ausência de poros pode conferir maior resistência mecânica ao material, reduzindo a fragilidade estrutural e tornando-o mais adequado para aplicações que exigem maior durabilidade. A morfologia aglomerada pode favorecer a interação celular e a adesão de biomoléculas, tornando o material promissor para revestimentos de implantes ou enxertos ósseos. Neste sentido, a superfície uniforme pode facilitar processos de funcionalização, permitindo a incorporação de agentes bioativos ou medicamentos para

liberação controlada. Dessa forma, as características observadas sugerem que o material obtido pode apresentar um desempenho favorável em diversas aplicações na área de biomateriais.

A Figura 6 apresenta a Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) da amostra B31e.

Figura 6. Espectroscopia de Dispersão de Energia da amostra B31e.



Conforme observado na Figura 6 foi possível confirmar a composição química do material obtido, sendo composto majoritariamente por fósforo e cálcio.

CONCLUSÃO

A rota Pechini utilizando álcool etílico e álcool isopropílico como solventes demonstrou eficiência na síntese de β-TCP. A amostra sintetizada com álcool etílico como solvente, na proporção AC/CM de 3:1 e submetida à calcinação a 1000 °C, resultou na obtenção de 100% da fase beta. O ponto de ebulição do solvente influenciou diretamente o tempo de aumento da viscosidade do material, reduzindo o período necessário para a difusão dos íons e, consequentemente, dificultando a cristalização do β-TCP. A análise por MEV revelou que o material obtido apresenta morfologia regular e aglomerada, com superfície uniforme e não porosa. Essas características podem conferir maior resistência mecânica e favorecer a interação celular, tornando o material promissor para aplicações biomédicas. Além disso, a composição majoritária de fósforo e cálcio reforça sua adequação para uso como biomaterial.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Os autores do artigo declaram que não possuem conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, política, acadêmica e pessoal.

REFERÊNCIAS

Ajmal, S.; Hashmi, F. A.; Imran, I. Recent progress in development and applications of biomaterials. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 385-391, 2022.

Aminzare, M.; Eskandari, A.; Baroonian, M. H.; Berenov, A.; Hesabi, Z. R.; Taheri, M.; Sadrnezhaad, S. K. Hydroxyapatite nanocomposites: Synthesis, sintering and mechanical properties. **Ceramics International**, v. 39, n. 3, p. 2197-2206, 2013.

Azevedo, A. G. S.; Strecker, K. Avaliação da influência da razão ca/p nos valores de cristalinidade e crescimento de cristalitos durante a sinterização de pós de hidroxiapatita. **Eclética Química Journal**, v. 39, n. 1, p. 141, 2014.

Boanini, E.; Gazzano, M.; Nervi, C.; Chierotti, M. R.; Rubini, K.; Gobetto, R.; Bigi, A. Strontium and Zinc Substitution in ?-Tricalcium Phosphate: An X-ray Diffraction, Solid State NMR and ATR-FTIR Study. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 10, n. 2, 2019.

Bulina, N. V.; Khvostov, M. V.; Borodulina, I. A.; Makarova, S. V.; Zhukova, N. A.; Tolstikova, T. G. Substituted hydroxyapatite and β-tricalcium phosphate as osteogenesis enhancers. **Ceramics International**, v. 50, p. 33258-33269, 2024.

Carvalho, G. K. G; Almeida, Y. B. A; Alves, K. E. S; Farias, J. R. S; Simões, V. N; Braga, A. N. S. Avaliação estrutural e morfológica da hidroxiapatita sintetizada por Pechini. **Brazilian Journal of Development**, vol. 6, n. 9, p.71812-71821, 2020.

Farias, J. R. S.; Carvalho, G. K. G.; Almeida, Y. B.A.; Furtini, J. A. O.; Filho, E. C. S.; Braga, A. N. S. Síntese de cerâmicas bifásicas de fosfato de cálcio pelo método Pechini. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, 18:e2358, 2021.

Hashimoto, K.; Oiwa, M.; Shibata, H. Effect of Silicon Dioxide Nanoparticles on the Sintering Properties of Beta-Tricalcium Phosphate Composites. **Materials**, v. 17, n. 4, 2024.

Kharissova, O. V.; Nikolaev, A. L.; Kharisov, B. I.; Dorozhkin, S. V.; López, I.; Méndez, Y. P.; de la Fuente, I. G. Enzymatic synthesis of calcium phosphates: A review. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 39, 2024.

Magalhães, B. S.; Johann, J. E.; Lund, R. G.; Martos, J.; Del Pino, F. A. B. Dissolving efficacy of some organic solvents on gutta-percha. **Endodontics**, v. 21, n. 4, p. 303–307, 2007.

Monção, M. M.; Rosa, F.P. Estudo das propriedades físicas de um biomaterial com nova composição de wollastonita e beta fosfato tricálcico para regeneração óssea após implante in vivo. **Revista De Ciências Médicas E Biológicas**, v. 18, n. 2, p. 239–248, 2019.

Muñoz, H. J.; Korili, S. A.; Gil, A. Progress and Recent Strategies in the Synthesis and

Catalytic Applications of Perovskites Based on Lanthanum and Aluminum. **Materials**, v. 15, n. 9, 2022.

Oréfice, R. L.; Pereira, M. M. & Mansur, H. S. Biomateriais: fundamentos e aplicações. **Cultura Médica**, São Paulo, 2006.

Pires, A. L. R.; Bierhalz, A. C. K.; Moraes, A. M. Biomateriais: Tipos, aplicações e mercado. **Química Nova**, v. 38, n. 7, p. 957-971, 2015.

Reis, J. R. T.; Rodrigues, A. G.; Barbosa Neto, N. M. Medindo a constante dielétrica em líquidos: um estudo de caso para elaboração de uma proposta para formação de físicos experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, 2019.

Sharahi, M.; Bahrami, S. H.; Karimi, A. A comprehensive review on guar gum and its modified biopolymers: Their potential applications in tissue engineering. **Carbohydrate Polymers**, v. 347, n. 122739, 2025.

Xu, L.; Zhou, S.; Dai, X.; Gu, X.; Ouyang, Z. **Tissue Engineering and Spinal Cord Injury Repair**. Engineering, 2024.

Zhang, F.; Yang, J.; Zuo, Y.; Li, K.; Mao, Z.; Jin, X.; Zhang, S.; Gao, H.; Cui, Y. Digital light processing of β-tricalcium phosphate bioceramic scaffolds with controllable porous structures for patient specific craniomaxillofacial bone reconstruction. **Materials & Design**, v. 216, 2022.

CAPÍTULO 3

NANO-$CUFE_2O_4$ SINTETIZADAS A PARTIR DE TAPIOCA

Érica Karine Alves de Lima[1];

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo.

http://lattes.cnpq.br/8186490901865658

Geovana Tayná Silva de Morais[2];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

https://lattes.cnpq.br/2530512747294418

Ilana Maria Rocha Batista[3];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/5607551430487319

Vilmaria Lima da Silva[4];

Universidade Federal do Piauí (UFPI)Teresina Piauí

https://lattes.cnpq.br/9142341376013255

José Rosa de Souza Farias[5];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/9404467330103347

Aluska do Nascimento Simões Braga[6];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

Valdeci Bosco dos Santos[7].

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

RESUMO: As nanopartículas de ferrita de cobre ($CuFe_2O_4$) têm recebido considerável atenção para aplicações biomédicas, remediação ambiental, aparelhos eletronicos, magnéticos, dentre outros. A síntese verde oferece uma alternativa ecologicamente correta à síntese química convencional, por meio do uso de agentes naturais. Este estudo avaliou a síntese sustentável de nanopartículas de $CuFe_2O_4$ utilizando tapioca como agente quelante natural (proporções 1:1 e 2:1). As propriedades estruturais e morfológicas das amostras foram investigadas por Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho

com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados de DRX confirmaram a formação predominante da fase espinélio tetragonal, com elevada cristalinidade, atingindo 93% na proporção 2:1, além de tamanho médio de cristalito de aproximadamente 48 nm. Os espectros de FTIR indicaram as bandas vibracionais associadas Fe–O e Cu–O, confirmando a formação da estrutura desejada. As imagens de MEV revelaram partículas poliédricas aglomeradas, comportamento típico de natureza magnética. Os resultados demonstram que a tapioca constitui um agente quelante eficiente, sustentável e de baixo custo para a obtenção de nanopartículas de $CuFe_2O_4$, contribuindo para o desenvolvimento de rotas de síntese alinhadas aos princípios da química verde e ampliando o potencial de aplicação desses nanomateriais em diferentes áreas tecnológicas.

PALAVRAS-CHAVE: Ferrita de cobre. Síntese verde. Propriedade estrutural e microestrutural.

NANO- $CuFe_2O_4$ SYNTHESIZED FROM TAPIOCA

ABSTRACT: Copper ferrite ($CuFe_2O_4$) nanoparticles have attracted considerable attention due to their potential applications in biomedicine, environmental remediation, electronic and magnetic devices, among other technological fields. Green synthesis has emerged as an environmentally friendly alternative to conventional chemical methods by employing natural chelating agents. This study investigated the sustainable synthesis of $CuFe_2O_4$ nanoparticles using tapioca as a natural chelating agent at tapioca-to-metal ion ratios of 1:1 and 2:1. The structural and morphological properties of the synthesized samples were characterized by X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM). XRD analysis confirmed the predominant formation of the tetragonal spinel phase with high crystallinity, reaching 93% for the 2:1 ratio, and an average crystallite size of approximately 48 nm. FTIR spectra revealed the characteristic Fe–O and Cu–O vibrational bands, confirming the successful formation of the desired crystal structure. SEM images showed agglomerated polyhedral particles, a typical feature of magnetic materials. The results demonstrate that tapioca is an efficient, sustainable, and low-cost natural chelating agent for the synthesis of $CuFe_2O_4$ nanoparticles, contributing to the development of environmentally friendly synthesis routes in accordance with the principles of green chemistry and expanding the potential technological applications of these nanomaterials.

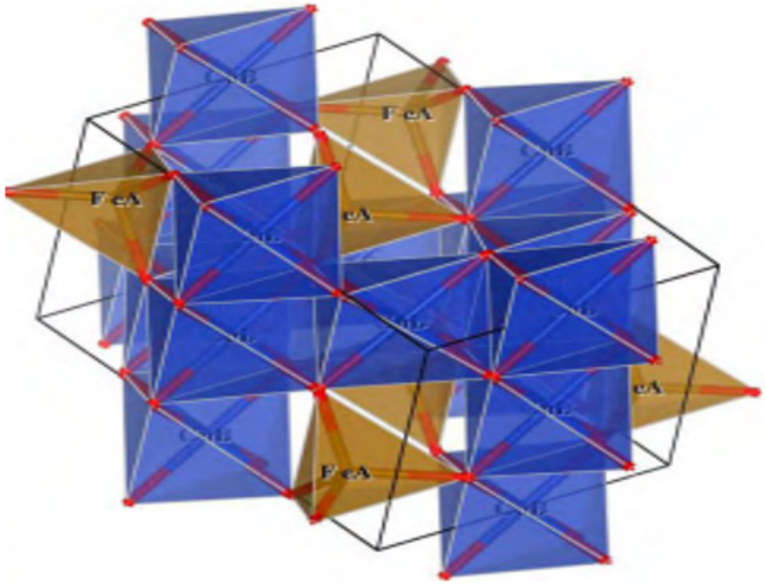
KEY-WORDS: Copper ferrite. Green synthesis. Structural and microstructural properties.

INTRODUÇÃO

As ferritas de cobre ($CuFe_2O_4$) são cerâmicos com importantes propriedades magnéticas, condutividade térmica, e estabilidade térmica, usadas em diversas aplicações

tecnológicas (eletrônica, meio ambiente e biomedicina) (Lang *et al.*, 2026; Cardoso *et al.*, 2025; El Messaoudi *et al.*, 2025). Possuem estrutura cristalina do tipo espinélio (AB_2O_4), com íons Cu^{2+} e Fe^{3+} distribuídos em sítios tetraédricos e octaédricos, influenciando suas propriedades (Figura 1).

Figura 1. Representação do CuFe2O4 com configuração cristalina tetragonal.



Fonte: Andrade, 2012.

Essa organização estrutural confere ao material comportamento ferrimagnético, caracterizado pelo alinhamento antiparalelo dos momentos magnéticos nos sítios A e B, porém com magnitudes distintas, resultando em magnetização líquida diferente de zero. Como consequência, o $CuFe_2O_4$ apresenta resposta significativa a campos magnéticos externos, o que amplia seu potencial em aplicações tecnológicas (Awad e Zhitomirsky, 2024; Callister e Rethwisch *et al.*, 2018).

Além disso, essa configuração estrutural está associada a elevada densidade, estabilidade e anisotropia magnética, podendo ser ajustada pelas condições de síntese. Por essas características, $CuFe_2O_4$ é um material versátil e amplamente estudado (El Messaoudi *et al.*, 2025; Kumar *et al.,* 2025).

Para a obtenção dessas ferritas, o método de síntese sol-gel é amplamente usado devido ao controle da composição química e da estrutura cristalina, bem como a simplicidade do processo, eficiência, baixo consumo de energia, e alta pureza do produto final (Mazurenko *et al.*, 2025; Zate *et al.*, 2020). O tamanho das partículas depende da temperatura, da taxa de evaporação e do agente quelante, permitindo obter nanomateriais com propriedades controladas (El Messaoudi *et al.*, 2025).

Visando uma abordagem mais sustentável, a síntese verde tem como objetivo produzir materiais de maneira ecologicamente correta, utilizando recursos naturais e menos agressivos ao meio ambiente (SHEENA *et al*., 2026; CARDOSO *et al*., 2025). Nesse contexto, a tapioca (amido de mandioca) (Figura 2) surge como uma alternativa promissora devido à sua abundância no Brasil, baixo custo e afinidade com íons metálicos, funcionando como agente quelante natural. Seu uso permite uma síntese mais ecológica, reduzindo o impacto ambiental e o custo final do produto, e mantendo o controle sobre a formação e propriedades das nanopartículas (De Almeida *et al*., 2020).

Figura 2. Amido de mandioca (tapioca).



Fonte: Carvalho, 2022.

Apesar das vantagens dessa abordagem, a partir de plataformas de periódicos (Tabela 1), não foram encontrados resultados sobre nanopartículas de $CuFe_2O_4$ sintetizadas pelo método sol-gel modificado por tapioca, até o presente momento. Desta forma, este trabalho teve por objetivo cooperar para a produção sustentável de nanopartículas de $CuFe_2O_4$ através da síntese sol-gel modificado usando tapioca. O efeito deste agente quelante natural, e das propriedades estruturais e microestruturais foram avaliados.

Tabela 1. Resultados das buscas de anterioridades de artigos até 31 de abril de 2026.

PALAVRAS-CHAVE	ARTIGOS	
	SCOPUS	WEB OF SCINECE
Cassava starch and sol gel	22	21
Cassava starch and sol gel and tapioca	4	4
Cassava starch and sol gel and tapioca and $CuFe_2O_4$ nanoparticles	0	0

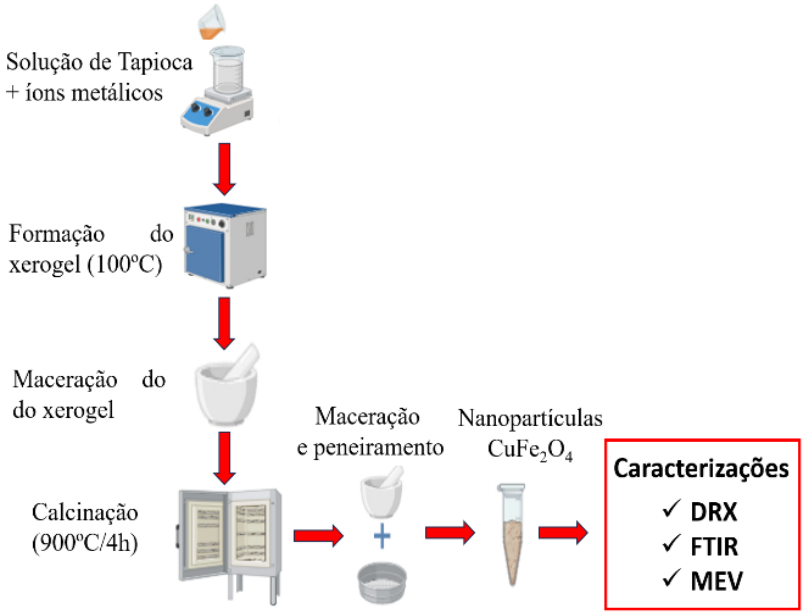
Fonte: Autoria própria, 2026.

METODOLOGIA

Como materiais de partidas para a preparação das nanopartículas de $CuFe_2O_4$, foram utilizados os reagentes químicos, Nitrato de Ferro nonahidratado ($Fe(NO_3)_3.9H_2O$) e Nitrato de Cobre trihidratado ($Cu(NO_3)_2.3H_2O$), ambos de alta pureza. Amido de mandioca (tapioca) de origem comercial, foi utilizada como agente quelante.

Para a síntese foram usadas razões de Tapioca: Metal na proporção de 1:1 e 2:1. Primeiramente, iniciou-se o processo de gelificação da tapioca sob agitação mecânica e temperatura. Em seguida, soluções de íons metálicos de cobre e ferro foram adicionados à solução precursora. A mistura obtida foi então seca, seguida por maceramento e posterior calcinação por 900ºC/4h. Por fim, o pó calcinado passou por nova maceração e peneiramento, obtendo-se o produto final. A Figura 3 mostra um resumo da preparação da ferrita de cobre.

Figura 3. Fluxograma geral da produção da $CuFe_2O_4$.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Nesse trabalho a Difração de raios X (DRX) foi utilizada para caracterizar a estrutura cristalina dos pós de $CuFe_2O_4$, assim como estimar o tamanho de cristalito e taxa de cristalinidade. Foi usado um difratômetro de raios X (Shimadzu XRD-6000), com velocidade de varredura de 2°/min, ângulo 20 = 5° a 80°, tensão de 40 KV, e com corrente de 30 mA. O software HighScore em conjunto ao banco de dados cristalográficos do JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) foram utilizados para a identificação das fases cristalinas presentes na amostra. O cálculo do tamanho do cristalito foi baseado na "Equação de *Scherrer*" (1) (Ghobashy *et al*., 2024), usando o pico de difração de maior intensidade (100 %).

$$D = \frac{K.\lambda}{\beta.Cos\,\theta} \quad (1)$$

Onde D é o tamanho do cristalito (nm); k = 0,91 é a constante de Scherrer; λ = 1,5406 Å é o comprimento de onda dos raios-X; β é a largura à meia altura do pico de difração (em radianos); e θ é o ângulo de difração. Para o cálculo de taxa de cristalinidade (Du *et al*., 2024), foi utilizada a Equação (2):

$$Xc = \frac{\Sigma\, Ic}{\Sigma\,(Ic\, +\, Ia)}\, x\, 100 \quad (2)$$

Sendo, Xc igual a taxa de cristalinidade (%); Ic correspondendo à soma das intensidades integradas dos picos de difração das fases cristalinas; e Ia é a intensidade integrada da dispersão amorfa.

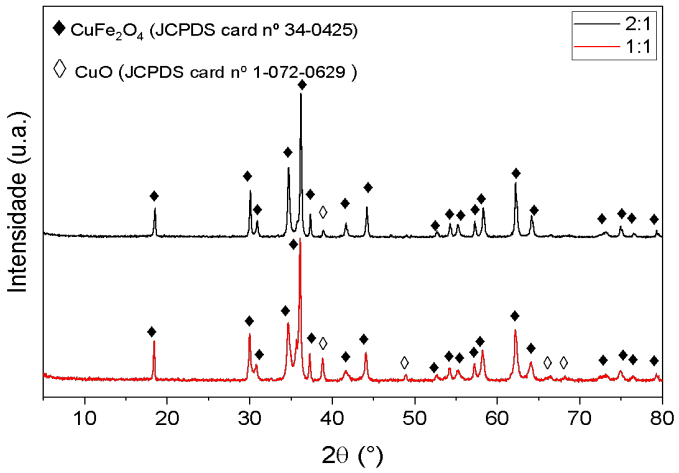
A análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada com o objetivo de identificar e avaliar os grupos funcionais presentes nos materiais estudados. Para isso, as amostras foram preparadas na forma de pastilhas contendo brometo de potássio (KBr), utilizado como matriz para dispersão do material e aumento da transmitância do feixe de radiação. As medições foram conduzidas em um espectrômetro modelo IRSpirit (Shimadzu), operando no modo de transmitância, na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1}.

A morfologia superficial do nanopó de ferrita de cobre foi analisada através de microscópio eletrônico de varredura (MEV, marca TESCAN – MIRA3 LMH). A metalização da amostra ocorreu com deposição de ouro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios X das amostras de $CuFe_2O_4$ calcinadas a 900 °C por 4 h, para as proporções 1:1 e 2:1 (agente quelante: íons metálicos). Observa-se a presença de picos, correspondentes às reflexões das redes cristalinas características do material. Os resultados indicam a formação predominante da fase tetragonal de $CuFe_2O_4$, conforme a ficha cristalográfica JCPDS nº 034-0425. Além disso, como fase secundária apenas o CuO (óxido de cobre, JCPDS nº 1-072-0629) foi formado. A presença desse segundo composto também foi observada em outros trabalhos tais como o de Siqueira *et al.* (2026), Cui *et al.* (2022) que produziram ferrita de cobre sob parâmetros semelhantes.

Figura 4. DRX das nanopartículas de $CuFe_2O_4$.

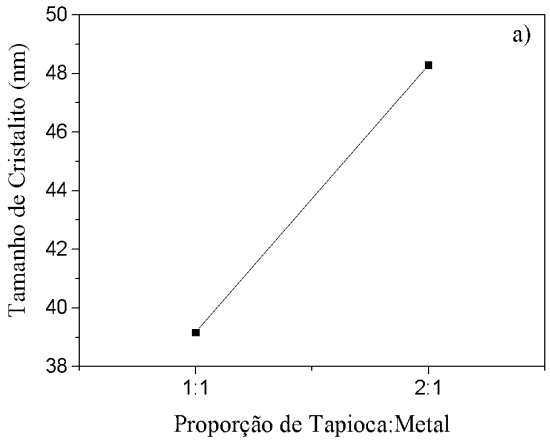


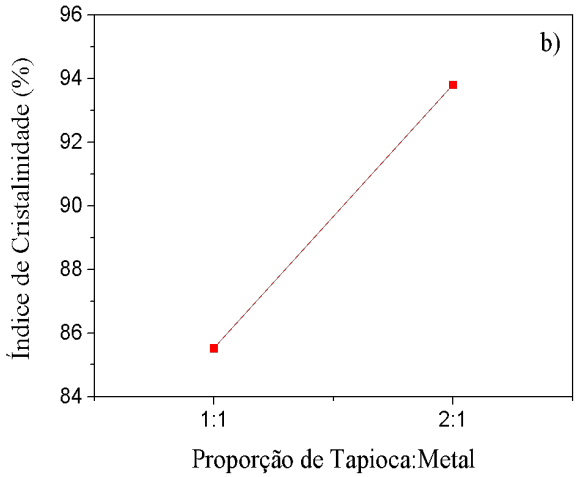
Fonte: Autoria própria, 2026.

É possível observar picos cristalinos bem mais definidos na curva referente à amostra de 2:1, com diminuição da quantidade e intensidade de picos que representam as segundas fases (CuO), indicando que houve um aumento no controle e na estabilização íons metálicos dentro da estrutura, assim como na cristalinidade do material.

A Figura 5 (a, b) mostra que com o aumento da concentração de agente quelante (Tapioca), é possível observar diferença considerável nos tamanhos de cristalitos (39,2 nm e 48,3 nm, respectivamente, proporção 1:1 e 2:1), assim como nas taxas de cristalinidade (85,5% - proporção 1:1 e 93,1% - proporção 2:1).

Figura 5. a) Tamanho de cristalito; b) Taxa de cristalinidade das amostras de $CuFe_2O_4$..





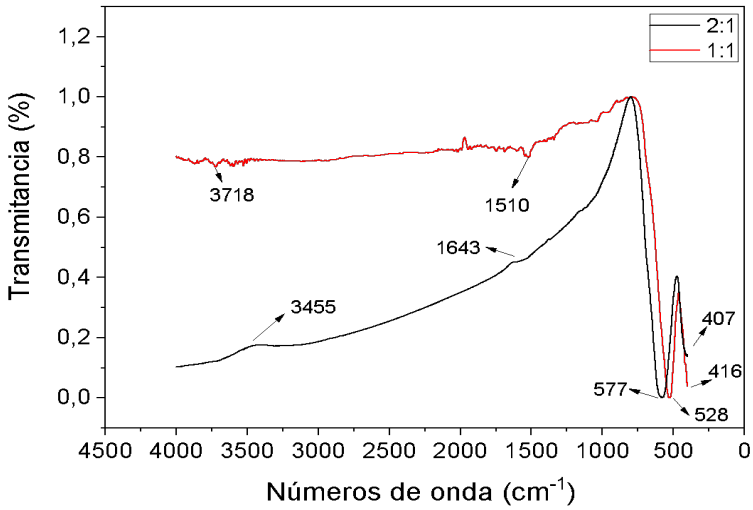
Fonte: Autoria própria, 2026.

Pode-se atribuir essas diferenças a quantidade de agente quelante dentro do processo, tendo em vista que ambas amostras foram submetidas aos mesmos parâmetros de calcinação, corroborando que a função do agente quelante é controlar e estabilizar os íons metálicos permitindo um controle refinado durante a síntese (El Messaoudi *et al*. 2025; De Almeida *et al*., 2020).

Nota se a proficiência do amido de mandioca como substituto do reagente de grau analítico, em comparação com o extrato da folha *Morus alba L*. usado para a síntese verde de nanopartículas de $CuFe_2O_4$ com valores de tamanho de cristalito de 20-40 nm (Cahyana *et al*., 2021). Da mesma forma, com o estudo de Yadav *et al.* (2017), que gerou nanopartículas de $CuFe_2O_4$ com tamanho de cristalito de 43 nm, utilizando glicose e frutose, ou seja, mel.

A Figura 6 apresenta os espectros de FTIR das amostras de $CuFe_2O_4$ calcinadas, para as proporções 1:1 e 2:1 (agente quelante: íons metálicos). Nos espectros, as bandas entre 400 e 600 cm^{-1}, são atribuídas às vibrações de estiramento das ligações metal–oxigênio (M–O), que são características da estrutura espinela (Kumar *et al*., 2025; Nikam *et al*., 2024). As amostras com proporção 1:1 e 2:1, apresentam uma banda absorção predominante em 528,53 cm^{-1} e 577,36 cm^{-1}, respectivamente. São bandas associadas às ligações Fe–O e Cu–O nos sítios tetraédricos presentes na estrutura espinela da ferrita de cobre (Ramadan e El-masry, 2023). Na banda em torno de ~400 cm^{-1} é tipicamente atribuída às vibrações de alongamento dos cátions metálicos que ocupam sítios octaédricos. Estes resultados corroboram com aqueles obtidos por DRX (Figura 4).

Figura 6. FTIR das nanopartículas de $CuFe_2O_4$.



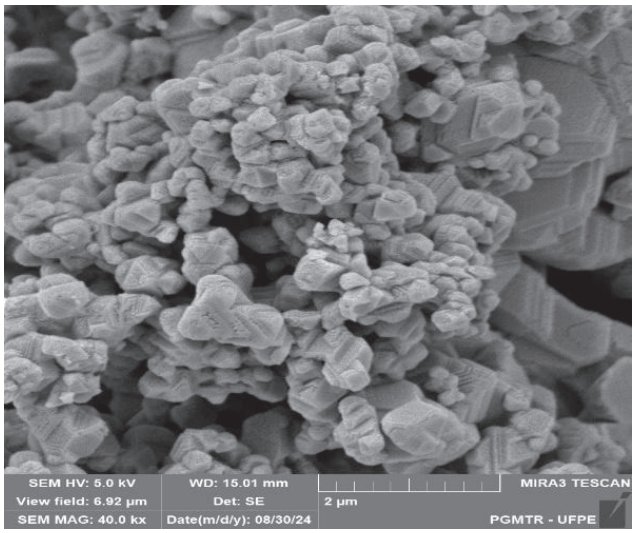
Fonte: Autoria própria, 2026.

Em relação ao deslocamento para frequências mais elevadas na formulação com maior quantidade de agente quelante (2:1), pode ser atribuído à formação de uma rede cristalina mais ordenada e compacta, fruto de uma complexação mais eficaz dos íons metálicos pela tapioca durante o processo sol-gel (Rotjanasuworapong *et al*., 2021).

Além das bandas citadas, há também bandas secundárias em torno de 3500-4000 cm^{-1}, relacionadas as vibrações de estiramento da ligação O–H, indicando a presença de água adsorvida ou hidroxilas superficiais. As bandas de ~1510 e 1630 cm^{-1}, referem-se à vibração angular da molécula de H_2O (Goli *et al*., 2025).

Na análise morfológica (Figura 7) das nanopartículas de ferrita de cobre (proporção 2:1) calcinada à 900ºC, é observado partículas em estado aglomerado, possivelmente pela natureza magnética das mesmas, além de morfologia poliédrica (Kiani *et al*., 2022).

Figura 7. MEV das nanopartículas de $CuFe_2O_4$.



Fonte: Autoria própria, 2026.

CONCLUSÃO

Os resultados de DRX confirmaram a formação predominante da fase tetragonal característica do material, com menor presença de fases secundárias na proporção 2:1, evidenciando maior controle na estabilização dos íons metálicos. Observou-se que a razão mais elevada de agente quelante (2:1) proporcionou aumento na cristalinidade (93,1%) e no tamanho de cristalito (48,3 nm), em comparação à razão 1:1.

As análises de FTIR confirmaram a presença das ligações metal-oxigênio típicas da estrutura espinela, com deslocamento das bandas para frequências mais altas na formulação com maior teor de tapioca, indicando uma rede cristalina mais ordenada. A morfologia observada por MEV revelou partículas poliédricas com tendência ao aglomeramento, comum em materiais com características magnéticas.

Dessa forma, este trabalho evidencia o potencial do uso da tapioca como alternativa sustentável e de baixo custo na síntese de ferritas, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais ecológicos e alinhados com os princípios da química verde. Além disso, os resultados obtidos abrem caminho para futuras aplicações das nanopartículas de $CuFe_2O_4$ em diferentes áreas tecnológicas, incluindo eletrônica, catálise e sistemas de armazenamento de energia.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Nós, autores deste artigo, declaramos que não possuímos conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, político, acadêmico e pessoal.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. M. **Ferritas de cobre e zinco do tipo espinélio sintetizadas pelos métodos: hidrotermal assistido por micro-ondas, precursores polímericos, reação de estado sólido e decomposição térmica**. Tese de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012.

AWAD, M; ZHITOMIRSKY, I. Magnetic $CuFe_2O_4$ spinel–polypyrrole pseudocapacitive composites for energy storage. **Materials,** v. 17, n. 21, p. 5249, 2024.

CAHYANA, A. H *et al*. Green synthesis of $CuFe_2O_4$ nanoparticles mediated by Morus alba L. leaf extract: crystal structure, grain morphology, particle size, magnetic and catalytic properties in Mannich reaction. **Ceramics International**, v. 47, n. 15, p. 21373-21380, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G**. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, v. 9, 2018.

CARDOSO, Beatriz *et al*. Green synthesis of copper ferrite-based nanofluids using Chlorella vulgaris for heat transfer enhancement. Journal of Molecular **Liquids,** v. 428, p. 127498,

2025.

CARVALHO. T. **Tapioca-mandioca**. Clinica de Nutrição, 2022. Disponível em: https://www.nutricionistaesportiva.com/como-fazer-tapioca/farinha-e-mandioca/. Acesso em: 31 de março de 2026.

CHALA, S. *et al*. Enhanced visible-light-response photocatalytic degradation of methylene blue on Fe-loaded $BiVO_4$ photocatalyst. **Journal of Alloys and Compounds,** v. 597, p. 129-135, 2014.

CUI, K. *et al*. Facile solid-state synthesis of tetragonal CuFe2O4 spinels with improved infrared radiation performance. **Ceramics International,** v. 48, n. 8, p. 10555-10561, 2022.

DE ALMEIDA, W. L. *et al*. Environmentally friendly and low-cost synthesis of zno nanopowders by tapioca-assisted sol-gel route. **Ceramics International,** v. 46, n. 8, p. 10835-10842, 2020.

DU, J. *et al*. Synthesis and characterization of absorption-enhanced alumina solid particle materials for direct irradiation solar-thermal conversion. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 272, p. 112853, 2024.

EL MESSAOUDI, N. *et al*. Green synthesis of $CuFe_2O_4$ nanoparticles from bioresource extracts and their applications in different areas: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 1, p. 99-120, 2025.

GHOBASHY, M. M. *et al*. Investigating the impact of electron beam irradiation on electrical, magnetic, and optical properties of XLPE/Co_3O_4 nanocomposites. **Scientific Reports,** v. 14, n. 1, p. 4829, 2024.

KIANI, A; DAVAR, F; BAZARGANIPOUR, M. Influence of verjuice extract on the morphology, phase, and magnetic properties of green synthesized $CoFe_2O_4$ nanoparticle: its application as an anticancer drug delivery**. Ceramics International,** v. 48, n. 23, p. 34895-34906, 2022.

KUMAR, N. *et al*. $CuFe_2O_4$ nanoparticles as a potential electrode material for asymmetric supercapacitor applications. **Journal of Power Sources,** v. 642, p. 236-960, 2025.

LANG, Q; FENG, R; SHI, B. Facile calcination-free synthesis of magnetically separable nano-CuFe2O4: Activating peroxymonosulfate to degrade organic contaminants. **Journal of Water Process Engineering,** v. 82, p. 109465, 2026.

MAHHOUTI, Z. *et al*. Structural and magnetic properties of $Co_{0.7}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ nanoparticles synthesized by sol-gel method. **Applied Physics** A, v. 122, n. 7, p. 651, 2016.

MAZURENKO, J. *et al*. Synthesis and characterization of copper ferrite nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of organic dyes. **Journal of Nanotechnology,** v. 2025, n. 1, p. 8899491, 2025.

NIKAM, P. N. *et al*. Synthesis and characterization of $CuFe_2O_4$ spinel ferrite for supercapacitor application. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 101, n. 10, p. 101277, 2024.

RAMADAN, R; EL-MASRY, M. M. Effect of (Co and Zn) doping on structural, characterization and the heavy metal removal efficiency of $CuFe_2O_4$ nanoparticles. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 60, n. 2, p. 509-524, 2024.

ROTJANASUWORAPONG, K; LERDWIJITJARUD, W; SIRIVAT, A. Synthesis and characterization of $Fe_{0.8}Mn_{0.2}Fe_2O_4$ ferrite nanoparticle with high saturation magnetization via the surfactant assisted co-precipitation. **Nanomaterials,** v. 11, n. 4, p. 876, 2021.

SHEENA, T. V.; JYOTHISH, B.; JACOB, J. Green synthesis and characterization of nanocrystalline Ni-Co spinel ferrites using Vitex negundo leaf extract for biomedical applications. **Next Materials**, v. 11, p. 101717, 2026.

SIQUEIRA, C. *et al*. $CuFe_2O_4$ nanoparticles via thermal decomposition as recyclable magnetic catalysts for perimidine synthesis. **Scientific Reports**, 2025.

YADAV, R. S. *et al*. Structural, dielectric, electrical and magnetic properties of $CuFe_2O_4$ nanoparticles synthesized by honey mediated sol–gel combustion method and annealing effect. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics,** v. 28, n. 8, p. 6245-6261, 2017.

ZATE, M. K. *et al*. Ferrite nanostructures: Synthesis methods. In: Spinel ferrite nanostructures for energy storage devices. **Elsevier**, 2020. P. 13-34.

CAPÍTULO 4

RESISTÊNCIA DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRA DE COCO BABAÇU ALCALINA

Geovana Tayná Silva de Morais[1];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

https://lattes.cnpq.br/2530512747294418

Ilana Maria Rocha Batista[2];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/5607551430487319

Vilmaria Lima da Silva[3];

Universidade Federal do Piauí (UFPI)Teresina Piauí

https://lattes.cnpq.br/9142341376013255

Érica Karine Alves de Lima[4];

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo.

http://lattes.cnpq.br/8186490901865658

José Rosa de Souza Farias[5];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/9404467330103347

Luciana Barbosa Amâncio[6];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/6772113176588028

Aluska do Nascimento Simões Braga[7];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

Valdeci Bosco dos Santos[8].

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

RESUMO: A indústria da construção enfrenta desafios ambientais, como o consumo excessivo de energia e as emissões globais de CO_2 na produção de cimento. Assim, a busca por novas formulações tem se mostrado uma estratégia promissora para minimizar esses impactos, além da possibilidade de reduzir os custos de produção na construção civil. Neste contexto, fibras naturais são biodegradáveis, não emissão de CO_2, leves e de baixo custo. Tem sido frequentemente usada como possibilidade de reforço mecânico em argamassas. O estudo investigou argamassas cimentícias com FCB (fibras de coco babaçu alcalinas - 0,5%, em adição). Essas argamassas cimentícias foram preparadas de acordo com o traço de 1:3 (cimento/areia) e água/cimento de 0,70. A microestrutura da FCB foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As argamassas foram caracterizadas por consistência de massa e resistência à compressão, aos 28 e 90 dias. MEV indicou superfície rugosa para FCB alcalinas, possibilitando melhor adesão entre fibra-matriz cimentícia. A massa fresca apresentou uma trabalhabilidade de 30,00 ± 1,00 cm. Já a resistência à compressão foi de 14,34 ± 0,49 MPa (28 dias) e 13,19 ± 0,75 MPa (90 dias). Essas argamassas foram classificadas para uso na classe AAE12. FCB oferecem uma solução viável para uma construção sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra de coco babaçu. Argamassa. Tempos de cura. Compressão.

MORTAR RESISTANCE WITH THE ADDITION OF ALKALINE BABASSU COCONUT FIBER

ABSTRACT: The construction industry faces environmental challenges, such as excessive energy consumption and global CO_2 emissions from cement production. Therefore, the search for new formulations has proven to be a promising strategy to minimize these impacts, in addition to the possibility of reducing production costs in civil construction. In this context, natural fibers are biodegradable, have no CO_2 emissions, are lightweight, and low-cost. They have been frequently used as a possible mechanical reinforcement in mortars. This study investigated cementitious mortars with FCB (alkaline babassu coconut fibers - 0.5%, in addition). These cementitious mortars were prepared according to a 1:3 mix (cement/sand) and a water/cement ratio of 0.70. The microstructure of the FCB was evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM). The mortars were characterized by consistency of mass and compressive strength at 28 and 90 days. SEM indicated a rough surface for the alkaline FCB, enabling better adhesion between fiber and cementitious matrix. The fresh mass showed a workability of 30.00 ± 1.00 cm. The compressive strength was 14.34 ± 0.49 MPa (28 days) and 13.19 ± 0.75 MPa (90 days). These mortars have been classified for use in class AAE12. FCB offers a viable solution for sustainable construction.

KEY-WORDS: Babassu coconut fiber. Mortar. Curing times. Compression.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção abrange a execução de uma variedade de obras, como a construção de prédios, residências, instalações industriais e infraestruturas. Desempenha um papel fundamental na economia do país, gerando uma grande quantidade de mão de obra (IBGE, 2024; RAIS, 2023; Fernandes *et al*., 2025).

No entanto, o setor da construção enfrenta desafios como por exemplo, a geração de 8% das emissões globais de CO_2 na produção de cimento (Lopes *et al*., 2023; Chindaprasirt *et al*., 2026). Também produz grandes volumes de resíduos sólidos, além da degradação do solo (Lima, 2024).

Nesse contexto, em escala global, a busca por práticas sustentáveis na indústria da construção tornou-se uma prioridade. Assim, do ponto de vista ambiental relacionado ao setor da construção, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 3 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1) a serem implementados até 2030 (ONU, s.d.): construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (ODS 9), tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (ODS 11), e garantir padrões de consumo e de produção responsável, incluindo o uso eficiente de recursos naturais (ODS 12).

Figura 1. Metas globais com eixo ambiental dos ODS.



Fonte: Adaptado da ONU, s.d.

O desenvolvimento de produtos sustentáveis e economicamente viáveis, com um menor custo, pode contribuir para a economia circular e a preservação ambiental (Navaneetha *et al*., 2026; Almeida e Colombo, 2021; Kapoor e Rafatullah, 2025; Matos *et al.,* 2021).

Entre as alternativas sustentáveis, a utilização de fibras naturais derivadas de plantas (Figura 2), como bambu (Fadlelmola *et al*., 2021), sisal (Veigas *et al*., 2022), cânhamo (Ezugwu *et al*., 2023), banana (Lamichhane *et al*., 2024), coco (Ahmad *et al*., 2020) e

outras, têm sido frequentemente usadas como possibilidade de reforço mecânico nos mais diversos materiais de construção (argamassa, concreto, tijolos, painéis, dentre outros) à base de cimento (Fadlelmola *et al*., 2021; Dourado *et al*., 2023; Saini *et al*., 2023; Soares *et al*., 2026).

Figura 2. Fibras naturais derivadas de plantas comumente usadas na construção.



Fonte: Adaptado de Saini *et al*., 2023.

Fibras naturais destacam-se por apresentarem vantagens como sua natureza renovável, biodegradabilidade, não emitem CO_2, amplamente disponíveis, alto desempenho mecânico, baixa densidade e custo benefício (Camargo *et al*., 2020; Kumar *et al*., 2024; Veigas *et al*., 2022). Suas características físico-químicas e mecânicas serão determinantes para o material construtivo final (Balaji *et al.*, 2025; Bui *et al.*, 2022).

Estas fibras são capazes de melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias, aumentando sua resistência, ductilidade, elasticidade, durabilidade, por exemplo (Shcherban' *et al.*, 2022). Por outro lado, a presença de grupos OH na estrutura química das fibras naturais estabelece seu caráter hidrofílico, resultando em alta absorção de umidade que pode ser incompatível para a boa ligação com a matriz cimentícia (Camargo *et al*., 2020; Ezugwu *et al*., 2023; Lee e Choi, 2022; Dourado *et al*., 2023; Soares *et al*., 2026). À vista disso, é comum o emprego de tratamentos superficiais (físicos ou químicos) com o intuito de reduzir essa desvantagem (Yimer e Gebre, 2023).

Recentemente, o uso de fibra de coco babaçu tem sido explorado como fonte viável para a produção de materiais compósitos cimentícios. De acordo com Oliveira Junior (2019) e Dourado (2023), as fibras de coco babaçu contribuíram para o aumento de até 46% e 74% da resistência mecânica (28 dias), respectivamente, para o concreto e argamassa.

A palmeira de coco babaçu (*Orbignya phalerata*) (Figura 3) é amplamente cultivada nos estados do Piauí e Maranhão (CONAB, 2022). Seu cultivo é de fundamental importância para as 300.000 mulheres que trabalham como “quebradoras de coco babaçu” nas populações rurais (IBGE, 2023; Sousa; Cordeiro, 2022).

Figura 3. Palmeira do babaçu com cachos do fruto coco babaçu.



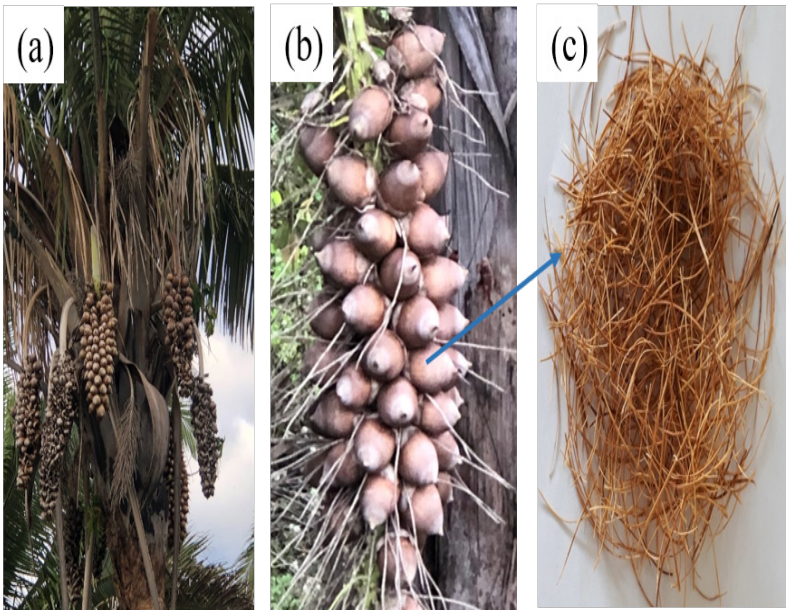
Fonte: Globo Rural, 2023.

METODOLOGIA

Os materiais utilizados foram as fibras do coco babaçu extraídas da casca (epicarpo), e doados pela Babcoall Inc. do Brasil LTDA associada à Incubadora de Agronegócios da UFPI (INEAGRO), cimento CP II-E 32 (Poty), areia natural e água. Todos adquiridos em Teresina - Piauí.

Para melhorar o desempenho mecânico, as fibras do coco babaçu (FCB) passaram por tratamento com solução de 5% de NaOH por 3 horas, lavada até atingir pH neutro, seca às 60 ºC, conforme indicado por Dourado *et al*., 2023. Essas fibras são mostradas na Figura 4. As mesmas foram caracterizadas superficialmente por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura, Quanta FEG 250 - FEI).

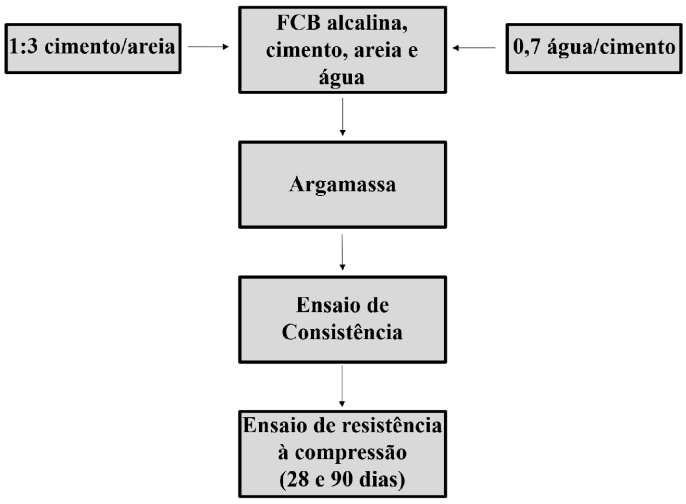
Figura 4. Fibras de coco babaçu alcalina.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Foram preparadas argamassas cimentícias com 0,5% de adição de FCB tratada quimicamente, denominadas de MF, seguindo o traço de 1:3 (cimento/areia) e água/cimento de 0,70. Após a mistura da areia, cimento e FCB, foi adicionada toda água para homogeneização da massa. Um resumo da preparação da argamassa está representado na Figura 5. A trabalhabilidade da mistura fresca foi avaliada via ensaio de consistência conforme a ABNT NBR 7215 (2019). A resistência à compressão aos 28 e 90 dias de cura foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 16868-2 -Anexo A (2020), a partir da média aritmética de 4 (quatro) corpos de prova cúbicos (40 mm^3). O ensaio foi realizado no equipamento EMIC/PC200C, com aplicação de uma carga de 500 ± 50 N/s.

Figura 5. Fluxograma da preparação das argamassas cimentícias com FCB alcalina.



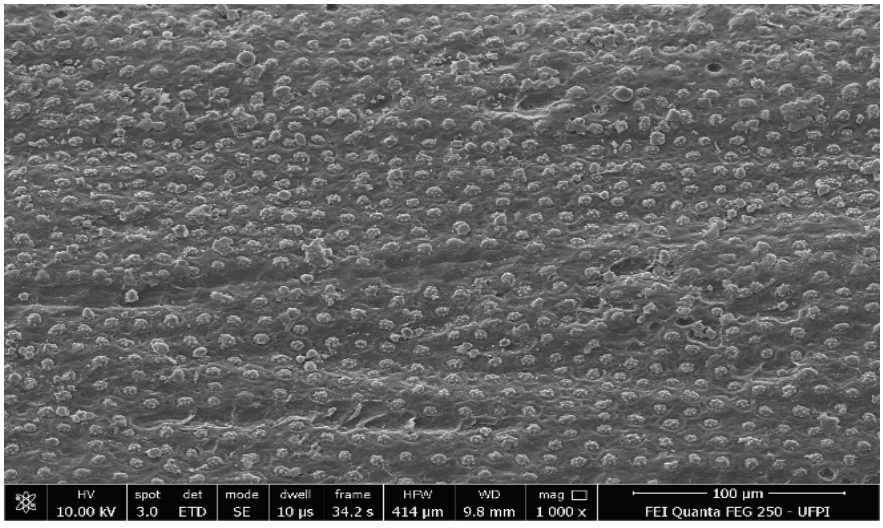
Fonte: Autoria própria, 2026.

Foram preparadas argamassas cimentícias com 0,5% de adição de FCB tratada quimicamente, denominadas de MF, seguindo o traço de 1:3 (cimento/areia) e água/cimento de 0,70. Após a mistura da areia, cimento e FCB, foi adicionada toda água para homogeneização da massa. Um resumo da preparação da argamassa está representado na Figura 5. A trabalhabilidade da mistura fresca foi avaliada via ensaio de consistência conforme a ABNT NBR 7215 (2019). A resistência à compressão aos 28 e 90 dias de cura foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 16868-2 -Anexo A (2020), a partir da média aritmética de 4 (quatro) corpos de prova cúbicos (40 mm^3). O ensaio foi realizado no equipamento EMIC/PC200C, com aplicação de uma carga de 500 ± 50 N/s.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na MEV da FCB tratada quimicamente (Figura 6), observa-se a superfície rugosa, indicando a redução de hemicelulose e lignina após o tratamento alcalino. Estes dois constituintes das fibras, são componentes amorfos e com alta afinidade por água. Portanto, o uso do tratamento alcalino possivelmente pode resultar em melhor adesão entre fibra-matriz cimentícia. Conforme Lima *et al*. (2024) nas regiões fibriladas ocorre a penetração do cimento que formam “ganchos” e proporciona hidratação ao compósito. Esse resultado foi semelhante aos observados com as fibras de banana e de coco tratadas alcalinamente (Barrera-Fajardo *et al.,* 2024).

Figura 6. MEV da FCB tratada com NaOH.

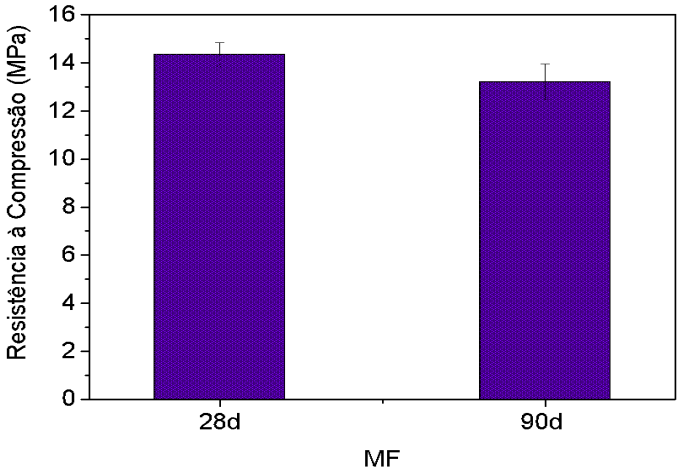


Fonte: Autoria própria, 2026.

A consistência da argamassa é uma propriedade fundamental que impacta sua trabalhabilidade e aplicação. Assim, a MF apresentou 30,00 ± 1,00 cm de consistência de massa. As FCB tratadas, por apresentarem baixos teores de componentes hidrofílicos (hemicelulose e lignina), podem ter contribuído para a boa fluidez da massa.

É conhecido que com o avanço da hidratação ao longo do tempo de cura, a reação pozolânica tende a ser mais intensificada, contribuindo para o aumento das características mecânicas (Abderraouf Belkadi *et al.*, 2024; Reis e Calado, 2023; Kounnavong e Iwanami, 2026). A Figura 7 apresenta a resistência à compressão aos 28 e 90 dias das MF. Observa-se que houve um ligeiro melhor desempenho mecânico para a MF aos 28 dias (14,34 ± 0,49 MPa) de cura, comparativamente aos 90 dias (13,19 ± 0,75 MPa).

Figura 7. Resistência à compressão das MF aos 28 e 90 dias.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Possivelmente, as FCB tratadas com NaOH presentes nas argamassas, as quais foram expostas ao processo de cura de 90 dias, tenham absorvido ligeiramente algum teor de água durante esse longo prazo de cura. Isto poderia causar o enfraquecimento da área interfacial entre as FCB e a matriz cimentícia, resultando em uma suave menor resistência mecânica (Jamshaid *et al.*, 2023)**.** Ressalta se que o fato das FCB serem tratadas quimicamente (Figura 6), e que, portanto, com menor teor de constituintes (hemicelulose e lignina) hidrofílicos, contribuiu para que o declínio na resistência mecânica das MF aos 90 dias de cura, tenha sido muito sutil.

Após a análise dos resultados mecânicos, verificou-se que as argamassas em estudo podem ser destinadas ao assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE), de acordo com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 13281-2 (2023). Assim, independente do tempo de cura, as argamassas exibiram possíveis uso na classe AAE12 (12,0 MPa ≤ x < 16,0 Mpa).

CONCLUSÃO

Neste presente trabalho, investigou-se o potencial de argamassas cimentícias reforçadas por FCB alcalinas (0,5%, em adição), aos 28 e 90 dias de cura. Em relação à massa

fresca, a MF atingiu uma consistência de valor igual a 30,00 ± 1,00 cm. Comparativamente aos 90 dias de cura (13,19 ± 0,75 MPa), a MF apresentou um ligeiro aumento em sua resistência à compressão (14,34 ± 0,49 MPa) aos 28 dias. Isso pode ser atribuído a uma melhor adesão interfacial entre as FCB tratadas com NaOH e a matriz cimentícia, em virtude de menor teor de absorção de água por estas fibras durante esse curto prazo de cura (28 dias). Independente do tempo de cura, as MF atenderam à NBR 13281-2:2023 na classe AAE12. Portanto, os resultados contribuem significativamente para o avanço de práticas de construção civil mais sustentáveis.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Nós, autores deste artigo, declaramos que não possuímos conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, político, acadêmico e pessoal.

REFERÊNCIAS

ABDERRAOUF BELKADI, A. *et al.* Experimental investigation into the potential of recycled concrete and waste glass powders for improving the sustainability and performance of cement mortars properties. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 64, p. 103710, abr. 2024.

AHMAD, W. *et al.* Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete. **Materials,** v. 13, n. 5, p. 1075, 28 fev. 2020.

ALMEIDA, M. A. DE; COLOMBO, R. Construction of green roofs via using the substrates made from humus and green coconut fiber or sugarcane bagasse. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 22, p. 100477, set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281-2**: Argamassas inorgânicas: Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16868-2**: Alvenaria estrutural – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 23 p.

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. 12 p.

BALAJI, D. *et al.* A review on effect of nanoparticle addition on thermal behavior of natural fiber–reinforced composites**. Heliyon,** v. 11, n. 1, p. e41192, jan. 2025.

BARRERA-FAJARDO, I.; RIVERO-ROMERO, O.; UNFRIED-SILGADO, J. Investigation of the Effect of Chemical Treatment on the Properties of Colombian Banana and Coir Fibers and Their Adhesion Behavior on Polylactic Acid and Unsaturated Polyester Matrices. **Fibers,**

v. 12, n. 1, p. 6, 3 jan. 2024.

BUI, H. *et al.* Hydration characteristics of coconut fibre-reinforced mortars containing CSA and Portland cement. **Journal of Material Cycles and Waste Management,** v. 24, n. 4, p. 1295–1303, 13 jul. 2022.

CAMARGO, M. *et al.* A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites. **Materials,** v. 13, n. 20, p. 4603, 16 out. 2020.

CHINDAPRASIRT, P. *et al.* Upcycling industrial waste into zero-clinker alkali-activated binders for low-carbon construction**. iScience,** v. 29, n. 4, 17 abr. 2026.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da Sociobiodiversidade**. Brasilia, v. 6, n. 1, p. 1-36, 2022.

DOURADO, J. B. DE O. L. *et al.* Babassu Fibers as Green Mortar Additives. **Journal of Natural Fibers,** v. 20, n. 2, 2023.

EZUGWU, E. K.; CALABRIA-HOLLEY, J.; PAINE, K. Physico-mechanical and morphological behavior of hydrothermally treated plant fibers in cementitious composites. **Industrial Crops and Products,** v. 200, p. 116832, set. 2023.

FADLELMOLA, A. B. F A. *et al.* Experimental investigation and design method on a lightweight bamboo-concrete sandwich panel under bending load. **Structures,** v. 34, p. 856–874, 2021.

FERNANDES, E. F. DOS S. *et al.* Efeito combinado de fibras naturais e resíduos pozolânicos no desenvolvimento de compósitos cimentícios sustentáveis: uma revisão de literatura. **Cerâmica industrial,** v. 30, p. e00032025, 2025.

GLOBO RURAL, 2023. **Pesquisa desenvolve primeira bebida e queijo à base de coco-babaçu do Brasil.** Disponível em: https://globorural.globo.com/inovacao/noticia/2023/04/pesquisa-desenvolve-primeira-bebida-e-queijo-a-base-de-coco-babacu-do-brasil.ghtml. Acesso em: 14 de março de 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2024. **Brasil - PIB Taxa de Crescimento Anual 2024**. Disponível em: https://pt.tradingeconomics.com/brazil/gdp-growth-annual. Acesso em: 29 de março de 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2023. **Produção de babaçu.** Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/babacu/ma. Acesso em: 15 de março de 2026.

JAMSHAID, H. *et al.* Durability and Accelerated Ageing of Natural Fibers in Concrete as a Sustainable Construction Material. **Materials,** v. 16, n. 21, p. 6905, 27 out. 2023.

KAPOOR, R. T.; RAFATULLAH, M. Valorization of industrial and agro-wastes for production of green construction materials: an innovative circular economy approach. *In*: Recent Developments and Innovations in the Sustainable Production of Concrete. **Elsevier,** 2025. p. 3–24.

KOUNNAVONG, B.; IWANAMI, M. Effect of curing age and water-cement ratio on the mechanical behavior of concrete under high water pressure. **Materials Today Communications,** p. 114690, fev. 2026.

KUMAR, S. S. *et al.* Mechanical (static and dynamic) characterization and thermal stability of hybrid green composites for engineering applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 7214–7227, 2024.

LAMICHHANE, N.; LAMICHHANE, A.; GYAWALI, T. R. Enhancing mechanical properties of mortar with short and thin banana fibers: A sustainable alternative to synthetic fibers. **Heliyon,** v. 10, n. 10, p. e30652, maio 2024.

LEE, G.-W.; CHOI, Y.-C. Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite. **Journal of Building Engineering**, v. 56, p. 104719, set. 2022.

LIMA, R. R. F. DE. Produtos ecológicos para a Indústria da Construção Civil. **Cerâmica industrial,** v. 29, p. e0529, 2024.

LIMA, T. E. S. DE *et al*. Potentiality of using guarumã natural fiber (Ischinosiphon koern) in sustainable coating mortars. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 1301–1309, maio 2024.

LOPES, M. A. P. *et al.* **Uso do biocarvão da casca de arroz em pastas de baixa relação água x cimento para captura de CO_2.** In: Encontro Latino Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 5., 2023. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/3266. Acesso em: 19 de março de 2026.

MATOS, W. E. DE C. *et al.* Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, 2021.

Ministério do Trabalho e Emprego. Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) 2023. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/rais/rais-2023. Acesso em: 10 de abril de 2026.

NAVANEETHA, E.; RAO, P. N.; BAHURUDEEN, A**.** Waste glass in cementitious materials: Applications, properties, and performance in construction and infrastructure. **Progress in Engineering ScienceElsevier** B.V. 3, p. 100223 1 mar. 2026.

OLIVEIRA JUNIOR, W. A. O. **Desempenho mecânico de concreto sustentáveis incorporando fibra de coco babaçu**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [s.l.]: ONU, [s.d.]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 20 de abril de 2026.

REIS, E. B. R.; CALADO, C. R. Estudo da viabilidade da substituição do agregado miúdo. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 15, n. 4, 2023.

SAINI, K.; MATSAGAR, V.; KODUR, V. Recent Advances in the Use of Natural Fibers in Civil Engineering Structures. **Construction and Building Materials,** v. 411, p. 134364, 6 dez. 2023.

SHCHERBAN', E. M. *et al.* Normal-Weight Concrete with Improved Stress–Strain Characteristics Reinforced with Dispersed Coconut Fibers. **Applied Sciences,** v. 12, n. 22, p. 11734, 18 nov. 2022.

SOARES, E. N. C. *et al.* Interfacial behavior and mechanical and microstructural properties of cement-based composites reinforced with banana, eucalyptus and sisal fibers. **Construction and Building Materials,** v. 507, 17 jan. 2026.

VEIGAS, M. G.; NAJIMI, M.; SHAFEI, B. **Cementitious composites made with natural fibers: Investigation of uncoated and coated sisal fibers.** Case Studies in Construction Materials, v. 16, p. e00788, 2022.

YIMER, T.; GEBRE, A. Effect of Fiber Treatments on the Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete Composites**. Advances in Civil Engineering,** v. 2023, p. 1–15, 2023.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DIMENSIONAL DE TIJOLOS DE ADOBE FABRICADOS COM APARAS TÊXTEIS

Ítalo Ronald Marques Torres Lopes[1];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

http://lattes.cnpq.br/3425100811566064

Érica Karine Alves de Lima[2];

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo.

http://lattes.cnpq.br/8186490901865658

José Rosa de Souza Farias[3];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/9404467330103347

Aluska do Nascimento Simões Braga[4];

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

Valdeci Bosco dos Santos[5];

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/2429557575387821

Luciana Barbosa Amâncio[6].

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

http://lattes.cnpq.br/6772113176588028

RESUMO: A crescente geração de resíduos sólidos, pelas indústrias têxtil e da construção civil, tem impulsionado a busca por materiais construtivos mais sustentáveis. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar as dimensões de tijolos de adobe produzidos com a adição de diferentes quantidades (em g) de aparas têxteis à matriz argilosa. O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma fábrica de materiais cerâmicos da cidade de Timon – MA, enquanto as aparas têxteis foram obtidas em uma fábrica de roupas femininas, localizada em Teresina – PI. A partir da caracterização do solo, constatou-se que a densidade dos grãos é igual a 2,59 g/cm³ e o índice de plasticidade é aproximadamente 28% (sendo considerado altamente plástico). Para a confecção dos adobes, corrigiu-se a granulometria do solo altamente plástico mediante a adição de 65% de areia bem graduada, atendendo às

exigências da NBR 16814 (2020). O solo corrigido foi homogeneizado com água, seguido da incorporação das aparas têxteis. A mistura apresentou boa trabalhabilidade, sem a necessidade de tratamentos prévios do resíduo têxtil. A moldagem dos tijolos de adobe foi realizada em fôrmas confeccionadas com placas de poliestireno expandido, contemplando três grupos experimentais: 100 g, 150 g e 200 g de apara têxtil. Após a cura dos tijolos de adobe, efetuou-se a análise dimensional e verificou-se que os critérios estabelecidos pela NBR 16814 (2020) não foram atendidos, pois ocorreu retração nos tijolos. Conclui-se que a utilização de fôrmas de poliestireno expandido influenciou os resultados obtidos, indicando que a análise da incorporação de aparas têxteis deve ser realizada com fôrmas de madeira ou metálicas, para garantir mais uniformidade nos tijolos. Ademais, recomenda-se a execução de ensaios de compressão e absorção de água para a validação estrutural dos tijolos.

PALAVRAS-CHAVE: Adobe. Resíduos Têxteis. Análise Dimensional.

DIMENSIONAL ANALYSIS OF ADOBE BRICKS MADE WITH TEXTILE SCRAPS

ABSTRACT: The growing volume of solid waste generated by the textile and construction industries has spurred the search for more sustainable building materials. In this context, the present study aims to investigate the dimensions of adobe bricks produced by adding different amounts (in grams) of textile scraps to the clay matrix. The soil used in this research was collected at a ceramic materials factory in the city of Timon, Maranhão, while the textile scraps were obtained from a women's clothing factory located in Teresina, Piauí. Based on the soil characterization, it was found that the grain density is 2.59 g/cm³ and the plasticity index is approximately 28% (considered highly plastic). To manufacture the adobe bricks, the particle size distribution of the highly plastic soil was adjusted by adding 65% of well-graded sand, in accordance with the requirements of NBR 16814 (2020). The adjusted soil was homogenized with water, followed by the incorporation of the textile scraps. The mixture exhibited good workability, without the need for prior treatment of the textile waste. The adobe bricks were molded in forms made from expanded polystyrene sheets, comprising three experimental groups: 100 g, 150 g, and 200 g of textile scraps. After the adobe bricks had cured, a dimensional analysis was performed, and it was found that the criteria established by NBR 16814 (2020) were not met, as shrinkage occurred in the bricks. It is concluded that the use of expanded polystyrene molds influenced the results obtained, indicating that the analysis of textile scrap incorporation should be performed using wooden or metal molds to ensure greater uniformity in the bricks. Furthermore, it is recommended that compression and water absorption tests be conducted for the structural validation of the bricks.

KEY-WORDS: Adobe. Textile Waste. Dimensional Analysis.

INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos tem se consolidado como um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Dentre os setores que mais contribuem para esse cenário, destacam-se a indústria têxtil e a construção civil. A indústria da moda está entre as que mais impactam negativamente o meio ambiente, produzindo cerca de 175 mil toneladas de resíduos têxteis anualmente no Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Indústria Têxtil (ABIT) (BASTOS, 2024). Paralelamente, a crescente indústria da construção civil vem causando danos irreversíveis à biosfera, usufruindo do espaço e de recursos não renováveis utilizados na confecção dos materiais e pela intensa emissão de gases do efeito estufa. (ALVES *et al*., 2018).

Trazida pelos colonizadores portugueses, a técnica de construção com tijolos de adobe, ou terra crua, chegou a ser uma das mais utilizadas no país, tendo como suas características principais: fácil fabricação, dispensa mão de obra especializada, baixo custo, isolamento térmico e acústico, além de possuir mão de obra abundante (LOPES, DE ALEXANDRIA, 2006). Contudo, com o avanço da tecnologia, novos métodos foram desenvolvidos a partir de materiais industrializados. Assim, esta técnica que um dia já foi tão difundida teve sua utilização gradativamente reduzida tendo sua continuidade sendo reproduzida pelas populações mais carentes e marginalizadas.

A fim de se renovar os métodos construtivos, visando à diminuição da produção de resíduos, vários pesquisadores (BARROSO, *et al*., 2023; SOLER *et al*., 2021; SANTOS *et al*., 2018) apontam que a inserção de fibras de diferentes materiais pode aumentar a resistência e a impermeabilização de tijolos de adobe. Tais pesquisas estão alinhadas com o nono Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), “Indústria, inovação e infraestrutura” (ONU, 2025).

Contudo, ainda são limitados, no contexto brasileiro, estudos acerca da inserção de resíduos têxteis incorporados na argila de tijolos de adobe e seus efeitos sobre as propriedades físicas desses elementos construtivos. Portanto, este estudo tem como objetivo analisar os impactos da incorporação de aparas têxtil na argila dos tijolos de adobe, considerando diferentes proporções de tecido-solo e suas influências nas características físicas do tijolo.

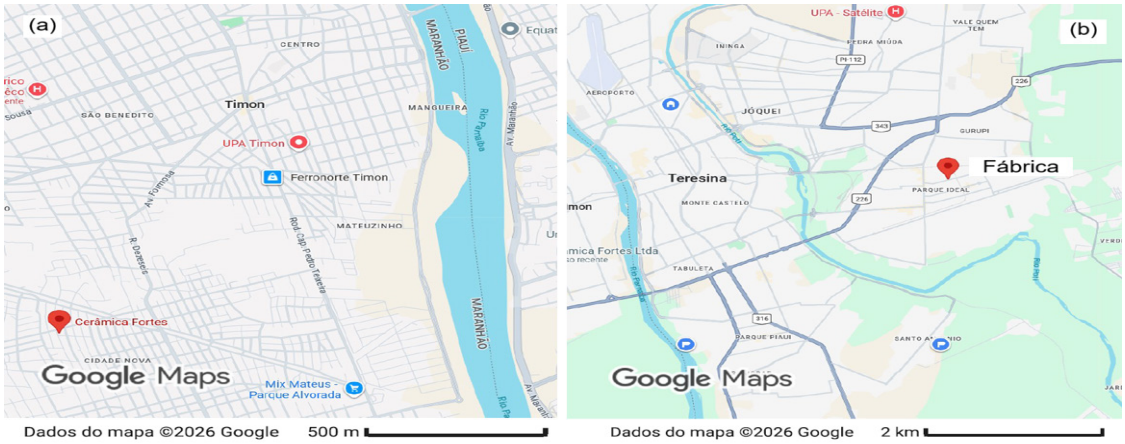
MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa classifica-se como aplicada, de abordagem quantitativa, com procedimentos experimentais e caráter descritivo. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Solos do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí (UFPI), em Teresina-PI.

Os materiais utilizados para a confecção dos tijolos de adobe foram: solo e resíduo têxtil composto 100% de poliéster. O solo foi coletado na fábrica de telhas cerâmicas, Cerâmicas Forte Ltda., localizada na zona rural de Timon - MA. Os resíduos têxteis,

totalizando aproximadamente 11,58 kg, foram oriundos de aparas de corte e costura doadas por uma empresa que fabrica roupas femininas, localizada na zona sudeste de Teresina - PI. Na Figura 1 estão apresentados os mapas situando os pontos de coletas desses materiais.

Figura 1. Localização dos pontos de coleta: (a) Cerâmica Forte e (b) Fábrica de roupas femininas.



Fonte: Google maps.

Caracterização dos solos

Para a caracterização dos solos, foram realizados os ensaios de preparação de amostras, densidade real dos grãos, limite de liquidez, limite de plasticidade e análise granulométrica, seguindo as normativas NBR 6457 (2024), DNER 093 (1994), NBR 6459 (2025), NBR 7180 (2025), NBR 7181 (2025) e, respectivamente.

Confecção dos tijolos de adobe

A norma NBR 16814 (2020) estabelece os requisitos para a produção de adobe e execução da alvenaria, além dos métodos de ensaio para sua caracterização física e mecânica. Para atingir o formato e dimensões exigidas pela norma, foram confeccionadas fôrmas com placas de poliestireno expandido de 20 mm de espessura, material escolhido pela fácil disponibilidade e por não reagir quimicamente com os materiais dos tijolos, no formato de um paralelepípedo retangular com altura de 7 cm, largura de 16 cm e comprimento de 34 cm.

Para atender aos critérios da NBR 16814 (2020) em relação aos percentuais de areia, silte e argila, foi necessária uma correção granulométrica com adição de 65% de areia a 35% de argila, sendo tais percentuais definidos a partir dos pesos dos tijolos.

Para a confecção dos tijolos de adobe, primeiramente a argila e a areia foram destorroadas, colocadas em um recipiente aberto, misturadas a seco e logo em seguida adicionou-se água aos poucos até atingir uma massa homogênea. Dando seguimento ao

processo, foram incorporadas as aparas de poliéster (Figura 2) e, por fim, a massa foi conformada (Figuras 3 e 4).

Figura 2. Incorporação das fibras de poliéster à massa do adobe



Figura 3. Moldagem dos tijolos em formas de isopor



Figura 4. Tijolo de adobe após a moldagem



Foram confeccionados 9 tijolos de adobe ao todo, divididos em 3 categorias: 3 com 200 g de aparas de poliéster (traço A), 3 com 150g de aparas de poliéster (traço B) e 3 com 100g de aparas de poliéster (traço C).

Análise dimensional

Após o período de cura dos tijolos, foram realizadas as medições das dimensões (altura, largura e comprimento), com auxílio de régua graduada. Os resultados foram comparados aos limites estabelecidos pela NBR 16814 (2020), considerando-se as tolerâncias dimensionais previstas na norma. Para análise dos dados, foram calculadas médias aritméticas simples das dimensões obtidas para cada traço experimental.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização dos materiais

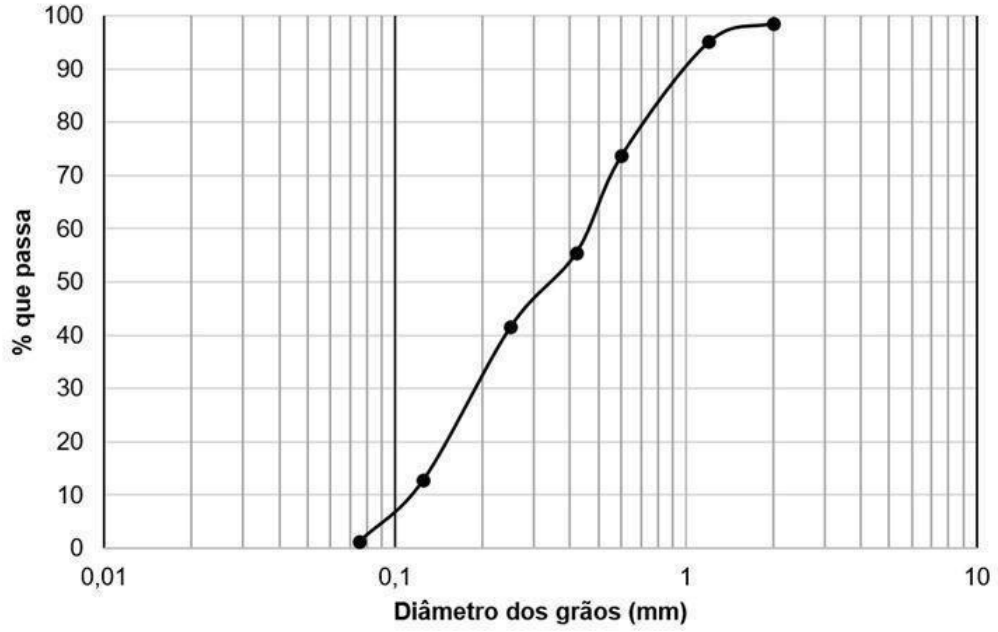
Na Tabela 1, encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física do solo coletado na fábrica de materiais cerâmicos. Observa-se que a densidade real dos grãos encontrada é compatível com os valores referenciados em Sánchez-Soto et al. (2022) para solos argilosos. De acordo com os critérios de Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2022), o solo é altamente plástico, característica típica de solos com presença de argila em sua composição.

Tabela 1. Propriedades físicas do solo coletado na fábrica de materiais cerâmicos.

Propriedades Físicas	
Densidade real dos grãos (g/cm^3)	2,59
Limite de Liquidez	62,50%
Limite de Plasticidade	34,69%
Índice de plasticidade	27,81%

As características desse solo não atendem às exigências da NBR 16814 (2020) acerca da matéria-prima para tijolo de adobe, justificando a necessidade da correção granulométrica. A Figura 5 apresenta a curva granulométrica do solo utilizado para a correção granulométrica do solo altamente plástico (provavelmente argila). De acordo com o sistema unificado de classificação (SUCS) e com a NBR 6502 (2022), trata-se de uma areia bem graduada (SP). A predominância de um material arenoso, além de corrigir as proporções de areia e argila, pode amenizar a retração ocasionada pela argila nos tijolos de adobe e reduzirá a alta plasticidade da mistura.

Figura 5. Curva Granulométrica do solo utilizado para correção granulométrica



Quanto ao resíduo têxtil (100% poliéster), o material apresentou-se em formatos variados, desde tiras até fios soltos. Essa diversidade física facilitou significativamente sua incorporação e homogeneização à matriz de solo-areia, dispensando a necessidade de moagem, lavagem ou qualquer tratamento prévio.

Análise Dimensional

A massa média dos tijolos variou conforme o teor de aparas adicionadas, sendo de aproximadamente 5.000 g para o traço A, 5.300 g para o traço B e 5.600 g para o traço C. Observa-se que a redução do teor de aparas exigiu um aumento na massa total de solo para que os corpos de prova preenchessem as fôrmas adequadamente. Os resultados das médias aritméticas das dimensões finais de cada grupo experimental estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensões dos tijolos de adobe

TRAÇO A		TRAÇO B		TRAÇO C	
H_m	6 cm	H_m	6,8 cm	H_m	6,3 cm
L_m	15,1 cm	L_m	15,1 cm	L_m	15,3 cm
C_m	32,6 cm	C_m	32,3 cm	C_m	32,6 cm

Nota-se uma redução generalizada nas dimensões finais em relação às fôrmas originais (7 x 16 x 34 cm). Essa variação dimensional é atribuída ao fenômeno de retração por secagem, causado pela perda de água de amassamento por evaporação. Esse resultado diverge da análise anterior, indicando que o percentual de areia (65%) ainda não suficiente para amezinhar esse efeito da retração da argila.

A NBR 16814 (2020) estabelece uma tolerância dimensional de ± 5 mm. A análise da Tabela 2 revela que todos os traços avaliados ultrapassaram esse limite normativo, configurando não conformidade em relação aos requisitos dimensionais estabelecidos pela norma. É provável que a fragilidade das fôrmas de poliestireno expandido tenha influenciado o processo de moldagem dos tijolos de adobe, assim como variabilidades nos formatos. Portanto, em pesquisas futuras recomenda-se o emprego de outros materiais como as madeiras ou os metais, para garantir mais uniformidade nas dimensões dos tijolos.

CONCLUSÃO

O solo coletado na fábrica de materiais cerâmicos apresentou a densidade dos grãos e a plasticidade dentro dos valores esperados, confirmando sua viabilidade deste solo para a produção de tijolos de adobe. No entanto, a alta plasticidade do solo exigiu uma correção granulométrica para que o material atendesse aos requisitos da NBR 16814 (2020).

O resíduo têxtil utilizado, composto 100% de poliéster, demonstrou boa compatibilidade com a massa, podendo ser incorporado sem necessidade de tratamento prévio. Essa característica reforça sua potencialidade como alternativa sustentável, pois alia o reaproveitamento de resíduos industriais a um material de baixo custo e ampla disponibilidade.

Quanto à análise dimensional, os tijolos apresentaram reduções em altura, largura e comprimento em relação às formas originais, ficando fora dos limites estabelecidos pela NBR 16814 (2020). Isso evidencia a necessidade de ajustes no processo de moldagem e secagem, bem como dos materiais empregados para a fabricação das fôrmas.

Dessa forma, conclui-se que, embora a utilização de aparas têxteis nas diferentes proporções avaliadas se mostre viável para a incorporação em tijolos de adobe, são necessários ajustes nas etapas de produção. Recomenda-se ainda a realização de ensaios complementares de absorção e compressão, indispensáveis para a validação do desempenho mecânico e da durabilidade dos tijolos.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Os autores do artigo declaram que não possuem conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, política, acadêmica e pessoal.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. A. et al. **Extração de sílica residual proveniente da casca de arroz e aplicação na produção de argamassa**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 13, n. 2, p. 127-136, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814: Adobe - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

BARROSO, Kamila Oliveira; NOVATO, Fernanda Gabriela Cardoso Alves; FERREIRA, Raul. **Tijolos de adobe de solo-cimento com adição de resíduo de serragem de madeira**. E&S Engineering and Science, v. 12, n. 3, p. 1-13, 2023.

BASTOS, Fernanda Maria de Assis; ALMEIDA, Andreia Alves de. **O impacto da indústria da moda no meio ambiente e a fragilidade das leis regulamentadoras**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 10, n. 6, p. 2908-2921, 2024. DOI: 10.51891/rease.v10i6.14588.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos solos: teoria e aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

DNER. **DNER-ME 093: Solos - Determinação da densidade real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

LOPES, W. G. R.; DE ALEXANDRIA, S. S. **A Sustentabilidade de Construções com Terra**: O Uso do Adobe no Município de Cristino Castro, Piauí, Brasil. In: Seminário de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, 1; Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 4. Memórias TerraBrasil 2006... Ouro Preto, Brasil: UFMG/ PUC Minas/ UFOP/ CdT/ ESG / PROTERRA, 2006. p. 299-306.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 25 fev. 2025.

SANTOS, I. B. et al. **Adobe soil-lime bricks reinforced with kraft paper fibers**. International Journal of Materials Engineering, v. 8, p. 128-133, 2018. DOI: https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180805.07.

SOLER, R. J. L. R. et al. **Uso de resíduos plásticos para reforço de tijolos de adobe de**

solo-cimento. In: 4º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, CONRESOL, 2021, Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil, 2021.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adobe · 2, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 74

Agente quelante · 25, 32, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43

Agentes naturais · 32

Álcool · 5, 7, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 29

Aloe vera · 3, 4, 6, 7, 15

Análise dimensional · 63, 71

Aparelhos eletronicos · 32

Aplicações biomédicas · 2, 6, 28, 30, 32

Argamassas · 48, 53, 54, 56, 57, 60

Argamassas cimentícias · 48, 53, 54, 56, 60

B

Beta fosfato tricálcico (β-TCP) · 3, 5, 17, 19

Bioatividade · 2, 17

Biocerâmica · 3

Biocompatibilidade · 2, 3, 5, 6

C

Cimento · 2, 47, 49, 50, 52, 53, 54, 59, 72, 74

CO_2 · 47, 48, 49, 51, 59

Compressão · 48, 53, 54, 55, 56, 57, 63, 72

Construção · 2, 47, 49, 50, 57, 62, 64

Construção civil · 2, 48, 57, 62, 64

Construção sustentável · 48

$Cufe_2o_4$ · 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46

D

Desafios · 47, 49, 64

E

Emissão de CO_2 · 48

Energia · 2, 35, 43, 47

Estrutura · 2, 11, 18, 19, 28, 33, 34, 35, 37, 39, 41, 43, 51

F

Fábrica · 62, 65, 68, 69, 71

Ferrita de cobre ($cufe_2o_4$) · 32

Fibras de coco babaçu · 48, 51

Fibras naturais · 48, 50, 51, 58

I

Indústria · 47, 49, 64, 72

Indústrias · 62

Indústrias têxtil · 62

M

Materiais cerâmicos · 2, 62, 68, 69, 71

Material · 7, 8, 18, 19, 20, 23, 27, 28, 29, 35, 38, 39, 43, 45, 51, 60, 66, 69, 70, 71

Método · 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 21, 23, 30, 35, 36

Método Pechini · 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 21, 23, 30

N

Nanopartículas · 6, 32, 35, 36, 37, 39, 41, 42, 43

O

Osteocondutividade · 3, 5

P

Plasticidade · 63, 66, 69, 71, 72

Poliestireno · 63, 66, 71

Pureza · 2, 5, 10, 18, 19, 20, 35, 37

R

Reabsorção · 17, 19

Regeneração óssea · 3, 5, 6, 12, 17, 31

Remediação ambiental · 32

Resíduo têxtil · 63, 65, 70, 71

Resíduos sólidos · 49, 62, 64

S

Síntese · 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 27, 29, 32, 35, 36, 37, 41, 43

Síntese Verde · 4

Solventes · 6, 17, 20, 23, 24, 25, 29

T

Tapioca · 32, 33, 35, 36, 37, 42, 43, 44

Tempos de cura · 48

Tijolos · 50, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 74

B

B-TCP · 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 29



contato@editoraomnisscientia.com.br
https://editoraomnisscientia.com.br/
@editora_omnis_scientia
https://www.facebook.com/omnis.scientia.9
+55 87 99920-5762

EDITORA
OMNIS SCIENTIA

contato@editoraomnisscientia.com.br
https://editoraomnisscientia.com.br/
@editora_omnis_scientia
https://www.facebook.com/omnis.scientia.9
+55 87 99920-5762