



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

JOÃO VICTOR SIPRIANO DOS SANTOS

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA PEDRA CARIRI CINZA COMO
PRECURSOR GEOLÓGICO NA MECANOSSÍNTESE DE HIDROXIAPATITA**

JUAZEIRO DO NORTE

2026

JOÃO VICTOR SIPRIANO DOS SANTOS

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA PEDRA CARIRI CINZA COMO
PRECURSOR GEOLÓGICO NA MECANOSSÍNTESE DE HIDROXIAPATITA**

Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Cariri.

Orientadora: Profa. Dra. Laédna Souto Neiva

JUAZEIRO DO NORTE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

S237a Santos, João Victor Sipriano dos.

Aproveitamento de resíduos da pedra cariri cinza como precursor geológico na mecanossíntese de hidroxiapatita / João Victor Sipriano dos Santos. – Juazeiro do Norte, CE : Universidade Federal do Cariri (UFCA), 2026.

47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, 2026.

Orientação: Profa. Dra. Laédna Souto Neiva.

1. Engenharia de Materiais. 2. Pedra Cariri - Resíduos. 3. Mecanossíntese.
4. Biocerâmicas. 5. Hidroxiapatita. I. Neiva, Laédna Souto (orient.). II. Universidade Federal do Cariri. III. Título.

CDD 620.118

JOÃO VICTOR SIPRIANO DOS SANTOS

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA PEDRA CARIRI CINZA COMO
PRECURSOR GEOLÓGICO NA MECANOSSÍNTESE DE HIDROXIAPATITA**

Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Cariri.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Laédna Souto Neiva (Orientadora)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Profa. Dra. Maria Isabel Brasileiro Rodrigues
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Técnico Dr. Leandro Marques Correia
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

JUAZEIRO DO NORTE, 17 DE MARÇO DE 2026

À minha família, que mesmo distante no espaço, permaneceu próxima em essência, sustentando-me com confiança, apoio e incentivo nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe, meu pai, meus avós, minha irmã e a todos os meus familiares que depositaram todo amor e confiança em mim, esperando em retorno apenas minha felicidade e a construção de um futuro repleto de oportunidades e realizações.

Agradeço à professora Laédna, a quem tenho como inspiração profissional e como amiga. Sou grato por ter contado com seu apoio nos momentos difíceis e por uma orientação que transcendeu a pesquisa e a vida acadêmica. Obrigado por confiar em mim e, acima de tudo, por me ensinar a enxergar o meu próprio potencial.

Expresso minha gratidão aos amigos que a vida acadêmica me trouxe: Najla, minha alma gêmea, Wdson e Natasha. Pessoas admiráveis que me acompanharam de perto e cuja amizade pretendo cultivar para sempre. Vocês foram essenciais para tornar essa trajetória mais leve e feliz.

Aos meus amigos e família da 'Guilda', minha gratidão por seguirem ao meu lado mesmo após o ensino médio. Embora tenhamos trilhado caminhos diferentes, agradeço por estarem sempre presentes, apoiando e ajudando no que fosse necessário.

Agradeço também a meus parceiros de pesquisa e ao técnico de laboratório Daniel, os quais contribuíram para execução desse trabalho, vocês foram essenciais para esta realização.

Aos membros da banca examinadora, expresso minha gratidão pela disponibilidade, pelo tempo dedicado à leitura deste trabalho e pelas valiosas contribuições e sugestões, que certamente enriquecerão esta pesquisa.

A todos os servidores e professores do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCA, agradeço por terem contribuído diretamente para a minha formação e por todo o suporte oferecido ao longo desta graduação.

“Os sonhos das pessoas não têm fim!”

- Marshall D. Teach (One Piece).

RESUMO

A atividade de mineração da Pedra Cariri, rocha sedimentar do tipo calcário laminado e de composição majoritária em carbonato de cálcio (CaCO_3), constitui um importante pilar de sustentação para a economia do estado do Ceará, em especial para a microrregião do Cariri, exercendo pujante influência na geração de empregos e renda, principalmente em se tratando da população que vive nas adjacências dos locais de lavra deste minério. Todavia, as atividades de exploração das jazidas da Pedra Cariri para fins comerciais constituem a causa da produção de um elevado volume, com efeitos continuamente cumulativos, de resíduos rochosos inertes que são descartados, sem critérios, no meio ambiente provocando problemas ambientais como degradação da paisagem de zonas urbanas, aumento das zonas de erosão, poluição e assoreamento de rios e mananciais. Tendo como base esta linha de entendimento constitui-se de extrema relevância o desenvolvimento de soluções viáveis que se apresentem com medidas de mitigação para esta problemática ambiental sem, em nenhuma hipótese, comprometer ou reduzir a exploração do minério já mencionada. Dito isto, este trabalho tem como objetivo a produção da biocerâmica hidroxiapatita a partir dos resíduos rochosos da Pedra Cariri cinza via técnica da mecanossíntese e a investigação da influência exercida pelo tratamento térmico de calcinação em diferentes temperaturas sobre as características estruturais e físicas do material obtido. O processo de mecanossíntese foi executado em um moinho de bolas, tipo periquito, no qual foi adicionado o resíduo da Pedra Cariri cinza e Fosfato de Cálcio Anidro em ciclos de moagem com duração total de 70 horas. O produto da síntese foi calcinado nas temperaturas de 800°C e 1100°C e submetido as seguintes técnicas de caracterização: Fluorescência de raio-X (FRX), Difração de raio-X (DRX), Microscópico eletrônica de varredura (MEV). De acordo com os resultados ficou constatado que é viável o emprego do resíduo da Pedra Cariri cinza como precursor para a síntese do biomaterial em questão, embora tenha apresentando uma microestrutura não monofásica, indicando a presença de um cimento ósseo importante no auxílio da osteo condução da HAp. Além disso, a técnica se mostrou de grande eficiência na produção da biocerâmica desejada mesmo sem a necessidade de aplicação de um tratamento térmico de calcinação posterior; por sua vez, o material submetido a calcinação apresentou aumento significativo no grau de cristalinidade tamanho de partículas, condizente com os resultados apresentados na literatura.

Palavras-chave: Pedra Cariri, mecanossíntese, biocerâmica, hidroxiapatita, caracterização estrutural.

ABSTRACT

The mining of Pedra Cariri, a sedimentary rock classified as laminated limestone and composed primarily of calcium carbonate (CaCO_3) is a vital economic pillar for the state of Ceará, particularly the Cariri micro-region. It plays a significant role in generating jobs and income, especially for populations living near the extraction sites. However, commercial exploitation of these deposits generates large volumes of inert rock waste with continuously cumulative effects that is indiscriminately discarded into the environment. This leads to environmental issues such as the degradation of urban landscapes, increased erosion, and the pollution and siltation of rivers and water sources. Given this context, it is crucial to develop viable solutions that serve as mitigation measures for this environmental problem without, under any circumstances, compromising or reducing the aforementioned mineral extraction. Accordingly, this study aims to produce hydroxyapatite bioceramic from gray Pedra Cariri rock waste using the mechanosynthesis technique and to investigate how calcination heat treatment at different temperatures influences the structural and physical characteristics of the resulting material. The mechanosynthesis process was carried out in a planetary ball mill, where gray Pedra Cariri waste and anhydrous calcium phosphate were processed over grinding cycles totaling 70 hours. The synthesis product was calcined at 800°C and 1100°C and subjected to the following characterization techniques: X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The results demonstrated the feasibility of using gray Cariri stone waste as a precursor for synthesizing the biomaterial in question; although the material exhibited a non-monophasic microstructure, this indicated the presence of a bone cement phase that aids the osteoconductivity of the hydroxyapatite (HAp). Furthermore, the technique proved highly efficient in producing the desired bioceramic without requiring a subsequent calcination heat treatment; meanwhile, the material subjected to calcination showed a significant increase in crystallinity and particle size, consistent with findings reported in the literature.

KEYWORDS: Cariri Stone; mechanosynthesis; bioceramic; hydroxyapatite; structural characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figuras 1 e 2 – Amontoados de resíduos da Pedra Cariri em Nova Olinda-CE, proveniente dos processos de extração	16
Figura 3 – Disposição de resíduos do calcário laminado, Nova Olinda, Ceará.....	20
Figura 4 – Infográfico representativo dos métodos de síntese possíveis para obtenção da hidroxiapatita.....	22
Figura 5 – Fluxograma representativo da metodologia empregada na pesquisa	26
Figura 6 – Esquema ilustrativo da lei de Bragg	30
Figura 7 – Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese não calcinada.....	32
Figura 8 – Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese calcinada a 800°C	33
Figura 9 – Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese calcinada a 1100°C.....	33
Figura 10 – Perfil gráfico do padrão de difração de raios X de uma amostra de hidroxiapatita monofásica publicada na literatura.....	34
Figura 11 – Micrografias da amostra de hidroxiapatita não calcinada nos alcances de (a) 500x e (b) 1000x.	37
Figura 12 – Micrografias da amostra de hidroxiapatita calcinada a 800°C nos alcances de (C) 500x e (D) 1000x.	37
Figura 13 – Micrografias da amostra de hidroxiapatita calcinada a 1100°C nos alcances de (E) 500x e (F) 1000x.....	37
Figura 14 – Micrografias da hidroxiapatita referência da literatura sintetizada via mecanossíntese.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Análise composição química por FRX das amostras de hidroxiapatita	35
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX	Difração de raios X
Fch	Brushita ou fosfato de cálcio hidratado
FRX	Fluorescência de raios X
HAp	Hidroxiapatita
LCM	Laboratório de Caracterização de Materiais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Mnt	Monetita
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Resíduos sólidos	17
3.2 Pedra Cariri	18
3.3 Hidroxiapatita	20
3.4 Métodos de síntese da hidroxiapatita	21
3.4.1 Síntese de HAp pelo método Sol-Gel	22
3.4.2 Síntese de HAp pelo método hidrotérmico	23
3.4.3 - Síntese de HAp por mecanossíntese	23
3.4.4 Síntese de HAp por precipitação	24
4 OBJETIVOS	24
4.1 Objetivo Geral	24
4.2 Objetivos Específicos	25
5 METODOLOGIA	25
5.1 Coleta e Beneficiamento do Material Rochoso Bruto	26
5.2 Procedimento de Moagem a Seco	27
5.3 Calcinação do Produto da Moagem	28
5.4 Caracterizações do material obtido na síntese	29
5.4.1- Difração de raios X (DRX)	29
5.4.2 Fluorescência de raios X (FRX)	30
5.4.3 Análise Térmica: Termogravimetria (TG)	30
5.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	31
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 Difração de raios X (DRX)	31
6.2 Fluorescência de raios X (FRX) e análise Termogravimétrica (TG)	35
6.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)	36
7 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração, principalmente extração e beneficiamento de rochas, gera uma enorme quantidade de resíduos sólidos, de todos os tamanhos, que são descartados, muitas vezes de forma consciente, indevida e direta, no meio ambiente, ocasionando diversos problemas tanto para a natureza quanto a sociedade. A micro região do cariri cearense se destaca pela elevada exploração do minério conhecido comercialmente como Pedra Cariri, vastamente empregado na construção civil para revestimento de pisos e paredes; trata-se, portanto, de um material rochoso de origem sedimentar de idade cretácea e composição majoritariamente calcária podendo ser encontrado em toda a chapada do Araripe. Contudo, apesar de sua grande abundância e de fácil extração, seus processos de exploração simples e rústicos corroboram para uma exorbitante quantidade de resíduos, estimado em 2,4 milhões de toneladas acumulados ao longo de 30 anos, que são descartados sem critério nenhum no meio ambiente gerando entulhos e poluição ambiental. A reutilização de resíduos sólidos de rochas calcárias laminadas ocorre em diferentes seguimentos industriais, em especial na área dos biomateriais que demandam insumos constituídos por carbonato de cálcio (CaCO_3), mineral majoritário da composição mineralógica do minério em questão, salvo discretos casos de impurezas que não chegam a 2% da composição total (Rodrigues, 2018; Neiva *et al.*, 2020).

Biomateriais podem ser compreendidos como aqueles selecionados minuciosamente a partir de suas propriedades biológicas, físicas, químicas e mecânicas com a finalidade de interagir com sistemas biológicos, seja para avaliar, tratar, aumentar ou substituir um tecido, órgão ou funcionalidade do corpo. Nesse contexto, as biocerâmicas vem ganhando cada vez mais relevância dentre os biomateriais, principalmente em razão de suas excelentes propriedades de biocompatibilidade, bioatividade e osteocondução, sendo utilizadas vastamente em aplicações odontológicas e ortopédicas. A exemplo, a biocerâmica hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) que é um dos principais minerais pertencente à família dos ortofosfato de cálcio, fundamentais no desenvolvimento dos dentes e ossos de seres vivos vertebrados, amplamente utilizado em aplicações biomédicas pelo fato de possuir propriedades ímpares de osteocondução, bioatividade, biocompatibilidade e estabilidade térmica, ou até na área da estética agindo como um bioestimulador de colágeno (Souza, 2023; Troczynski *et al.*, 2024).

Diversos métodos de síntese são relatados na literatura, apresentando precursores tanto de origens naturais, como no caso das fontes biológicas e geológicas, quanto sintéticas. Dentre os métodos de síntese, destaca-se a técnica de preparação de pós por mecanossíntese, a qual

produz reações químicas através da energia mecânica produzidas pelas colisões no interior de um moinho, apresentando como principais vantagens baixas temperaturas de processamento, simplicidade de operação, custo relativamente baixo e obtenção de material de tamanho nanométrico (Kareem *et al.*, 2024; Nasiri-Tabrizi., Yeong., 2024).

Portanto, no presente trabalho foi investigado por meio de técnicas de caracterização estrutural, o potencial de aplicação dos resíduos da Pedra Cariri, de coloração cinza, como insumo geológico para a produção da hidroxiapatita por mecanossíntese, assim como a influência das diferentes temperaturas de calcinação variadas em 800°C e 1100°C sobre as propriedades físicas e estruturais do material obtido nas sínteses.

2 JUSTIFICATIVA

Os resíduos sólidos são um dos maiores problemas ambientais do mundo na atualidade, resultado de uma ideologia de vida baseada na produção sem planejamento e impulsionada pelo consumo exagerado de uma sociedade que não para de crescer e se concentrar nos centros urbanos. Tal concentração, quando não acompanhada da implantação de medidas de gestão eficientes, contribui para o agravamento de uma das principais características das atividades humanas: a produção e o acúmulo do lixo propriamente dito (MARQUES, 2012). Após a geração dos resíduos sólidos os mesmos requerem tratamento adequado de forma a alterarem o mínimo possível o meio ambiente e todos os elementos que compõem este último; dando continuidade a este raciocínio percebe-se que este cuidado não se aplica ao caso da atividade de lavra da Pedra Cariri que gera e descarta, no meio ambiente, toneladas de resíduos sólidos que crescem exponencial e anualmente. Nas imagens ilustradas nas Figuras 1 e 2 observam-se exemplos da forma de descarte dos resíduos sólidos oriundos das atividades de exploração da Pedra Cariri, registradas no município de Nova Olinda, ao Sul do estado do Ceará:

Figura 1 - Amontoados de resíduos da Pedra Cariri em Nova Olinda-CE, proveniente dos processos de extração.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 2 - Amontoados de resíduos da Pedra Cariri em Nova Olinda-CE, proveniente dos processos de extração.



Fonte: Os autores, 2025.

Vale destacar que o acúmulo de amontoados destes resíduos sólidos se espalha desde a área exata de realização do trabalho de mineração até as adjacências de zonas urbanas e rodoviárias da mesma região que envolve diferentes municípios, sendo os mais afetados com este problema de poluição ambiental específico Nova Olinda e Santana do Cariri. Deu-se início ao estudo do problema de acúmulo dos resíduos sólidos gerados como rejeito das atividades de mineração e lavra da Pedra Cariri com as seguintes perguntas de partida: (i) quais impactos têm sido causados pelos amontoados continuamente crescentes de resíduos de Pedra Cariri na região

Sul do estado do Ceará? (ii) quais têm sido as medidas de políticas públicas ou privadas praticadas em relação à destinação desses resíduos? A resposta obtida para a primeira pergunta não foi nada animadora uma vez que ficou constatado que o descarte destes resíduos acontece sem critérios no meio ambiente por não terem um destino definido e mais adequado; o impacto disso é a poluição e obstrução do meio ambiente e de áreas públicas. Após a pesquisa ficou constatado que a resposta para a segunda pergunta é a seguinte: por enquanto não há medidas de gestão implantadas no sentido de coibir ou controlar esse descarte feito de forma indiscriminada no meio ambiente. A verdade é que pouco tem sido feito no que tange o desenvolvimento de providências concretas de encaminhamento ambientalmente correto para estes resíduos.

Segundo a literatura consultada, as atividades relacionadas à exploração e mineração deste material rochoso são responsáveis por empregar 70% dos moradores dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri (IBGE, 2017, BEZERRA, 2013 e IPECE, 2014). Alinhada a todas estas informações a importância da execução deste trabalho fica justificada por sua relevância acadêmica, preenchendo as lacunas da literatura sobre a temática abordada neste estudo, uma vez que a mesma é reconhecidamente escassa no que tange referências que apresentem aplicações reais e viáveis para resíduos sólidos poluentes do meio ambiente, sobretudo, em se tratando dos resíduos rochosos provenientes das atividades de mineração da Pedra Cariri. Além disto, é importante destacar a relevância econômica e social de um trabalho como este que visa, antes de tudo, agregar valor aos resíduos rochosos, objeto de estudo deste trabalho, e, como consequência, otimizar a qualidade de vida das comunidades envolvidas diretamente com a extração destes minérios ou com a coleta dos resíduos gerados a partir de suas explorações. Mostra-se ainda digno de registro a relevância de um trabalho como este no que se refere à preservação do meio ambiente, uma vez que o mesmo visa imprimir um caráter minimamente sustentável às atividades de lavra da Pedra Cariri, mostrando que é possível que se estabeleça uma aplicação para este tipo de resíduo que poderá, a partir dos resultados deste trabalho, deixar de ser considerado um entulho poluidor do meio ambiente para ser considerado um insumo com potencial para subsidiar pesquisas científicas destinadas ao desenvolvimento de um biomaterial inorgânico importante que pode favorecer diretamente os segmentos industriais voltados ao abastecimento das necessidades das áreas médicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos sólidos

O aumento populacional e os novos padrões de vida diretamente ligados às inovações tecnológicas, corroboram com crescimento da geração de resíduos sólidos nas últimas décadas, pois a busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias adjunto a obsolescência programada, resulta em grandes quantidades de resíduos, os quais quando descartados de forma inapropriada gera poluição ambiental, afetando o solo, a água e o ar, tornando-se de suma importância a discussão a respeito dessa problemática.

O Brasil está entre as dez maiores nações produtoras de resíduos sólidos, ocupando o quarto lugar no ranking mundial, evidenciando a necessidade da aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, conferida pela lei nº 12.305/10, que define de forma conjunta, a responsabilidade para destinação dos resíduos sólidos produzidos, sendo responsáveis, fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes. Além disso, a lei também certifica que os fabricantes devem por obrigação revir os resíduos sólidos produzidos, a fim de serem reaproveitados instigando a sustentabilidade através da logística reversa, que implica no movimento do material de consumo voltando a origem da produção (MOTA *et al.*, 2009; NANDA, BERRUTI, 2020; BRASIL, 2010).

Desta forma, a aplicação de um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos que possibilite a recuperação de recursos úteis e a conscientização da sociedade sobre a responsabilidade compartilhada é de extrema importância tanto a indústria quanto o meio ambiente (MAKAROVA *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2021). Ademais, a PNRS condena o uso de lixões, os quais recebem resíduos de várias fontes sem nenhum tipo de tratamento prévio viabilizando a poluição ambiental e riscos à saúde humana, e certifica os aterros sanitários como destino final, onde são aplicados métodos e técnicas sanitárias no intuito de combater danos à saúde pública e ambiental.

Entretanto com o aumento da produção de resíduos, os aterros estão ficando cada vez mais lotados, carecendo o desenvolvimento de mecanismos a fim de reduzir o acúmulo, logo, a conversão de resíduos em energia e sua reutilização, extraíndo materiais que retornam a linhagem da produção, mostra-se bastante eficaz, uma vez que pode advir em recurso para questões como emissão de gases de efeito estufa e a busca por energias renováveis, ou ainda, reduzindo o consumo de matéria prima, estando alinhado com uma das vertentes da quarta revolução industrial, que defende a formação de sistemas tecnológicos e ecologicamente corretos (MMA, 2022).

3.2 Pedra Cariri

Calcário laminado ou comumente denominado Pedra Cariri, é uma rocha sedimentar de idade cretácea, alusivo a formação do Crato, Grupo Santana, Bacia do Araripe, constituída substancialmente por carbonato de cálcio e óxido de magnésio, a qual tem como principal característica a presença de lâminas com espessura milimétrica de carbonato de cálcio, além de granulação fina, cores bege e grafite (DEL LAMA, 2021; TEXEIRA *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2014.). A Pedra Cariri pode ser encontrada em toda a região da chapada do Araripe, entretanto, suas principais jazidas minerais encontram-se nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, onde sua exploração é a principal atividade extrativa e econômica da região, gerando emprego e movimentando diretamente a economia local e estadual, uma vez que 15% da produção de pedras do estado provém dessa atividade. Suas aplicações são voltadas principalmente para construção civil, sendo utilizada em revestimentos de paredes, calçadas, terraços, bordas de piscinas, dentre outros (MOURA; MATTOS, 2021).

Além disso, a Pedra Cariri também é conhecida mundialmente por seu conteúdo fossilífero, exemplares de peixes, insetos, plantas e pterossauros, tornam a região um dos mais importantes depósitos de fósseis cráticos do mundo. Contudo, seus processos de extração simples e rudimentares, alinhado a falta de equipamentos e ferramentas por conta das empresas de exploração, resulta em um baixo aproveitamento de matéria-prima e geração de grandes quantidades de resíduos sólidos, ocasionado em aproximadamente 70% da produção, sendo que maior parte surge em decorrência da quebra do material, que por se tratar de uma rocha sedimentar, apresenta falhas de origem natural em sua estrutura que afetam negativamente as propriedades mecânica do material, a Figura 1, referente a uma exploradora no município de Nova Olinda evidencia o fato relatado, sendo perceptível na imagem, entulhamento de resíduos fraturados, estima-se que ao longo de 30 anos acumulam-se cerca de 2,4 milhões de toneladas de rejeitos (PEREIRA, 2021). A Figura 5 apresenta a ilustração de pilhas de resíduos acumulados nas adjacências das jazidas:

Figura 3 - Disposição de resíduos do calcário laminado, Nova Olinda, Ceará.



Fonte: autoria própria, (2026).

Diversos são os impactos ao meio ambiente causado pela extração, desmatamento de áreas de vegetação, impermeabilização do solo, destruição de fósseis, afugentamento da fauna nativa, comprometimento de águas superficiais e a grande geração de resíduos, são problemáticas que podem ser mitigadas com auxílio de Políticas de gerenciamento de resíduos sólidos, em destaque a política reversa, uma vez que os rejeitos da pedra cariri possui altas possibilidades de aplicações, tais como insumo para fabricação de cimento, fonte de calcita com alto grau de pureza, fonte de cálcio para ração animal, artesanato, entre outras possibilidades de pesquisa (RODRIGUES *et al.*, 2018).

3.3 Hidroxiapatita

A hidroxiapatita faz parte de uma renomada classe de biomateriais, os fosfatos de cálcio, onde cada família pode ser definida através de sua razão molar Ca/P e que em princípio pertencem ao grupo das apatitas, apresentando como fórmula geral, $\text{Me}_{10}(\text{XO}_4)_6\text{Y}_2$, na qual (Me) configura um cátion divalente, a exemplo Ca^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+} , et al, (XO_4) representa um tetraedro aniônico, em sua maioria trivalente como o (PO_4) , e por fim (Y_2) um ânion monovalente, tais como F^- , OH^- , Cl^- , em alguns casos podem apresentar ânions bivalentes, além disso possui estrutura cristalina de sistema hexagonal, onde um conjunto de grupos tetraédricos de (PO_4) é compartilhado por uma coluna que delimita dois canais não conectados (GOMES *et al.*, 2019).

A biocerâmica hidroxiapatita é o principal formador mineral natural da fase inorgânica dos ossos e dentes, caracterizando de 30% a 70% de sua massa, basicamente composto de cálcio e fósforo, é o fator elemental responsável pela dureza e resistência, com fórmula

estequiométrica $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ e razão $\text{Ca/P} = 1,67$, é portadora de características extremamente úteis e essenciais no campo da saúde, tais como biocompatibilidade, osteocondução e bioatividade, que permitem a reposição da massa óssea em próteses e implantes e o suporte para efeitos prolongados de drogas anticancerígenas, consequentemente sem causar toxicidade local, inflamação ou resposta a corpo estranho, devido ao fato de ser termodinamicamente estável em seu estado cristalino no fluido corporal, outra característica relevante é o fato de que quando diluído, torna-se um bioestimulador de colágeno, sendo oportuno para procedimentos estéticos, em específico atuando como um preenchedor semi-permanente (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

No campo da gestão ambiental, apresenta-se como uma auspiciosa solução no tratamento da poluição do ar, água e solo de forma sustentável, segura e limpa, consequente de sua estrutura peculiar e possuir características químicas notáveis como adsorção, ajuste ácido-base, alta permissividade de troca iônica e boa estabilidade térmica (IBRAHIM *et al.*, 2020), outro benefício é fato de que a HAp pode ser sintetizada a partir de insumos biológicos, tais como conchas marinhas, rochas minerais, ossos de animais, dentre outros, garantindo a sustentabilidade e a recuperação de recursos, sendo positivo a economia e ao meio ambiente. Sua ocorrência natural é considerada rara, apresentando estrutura similar a fluorapatita com OH^- ocupando os sítios do F^- (COSTA *et al.*, 2009), podendo ser encontrada em rochas ígneas e metamórficas, especialmente em calcários cristalinos, além de ossos e fontes aquáticas. Contudo, a HAp natural não é estequiométrica e apresenta deficiência de cálcio ou de fósforo, sendo menos eficaz na promoção da regeneração óssea, uma vez que sua proporção estequiométrica difere de $\text{Ca/P} = 1,67$ (PU'AD *et al.*, 2019).

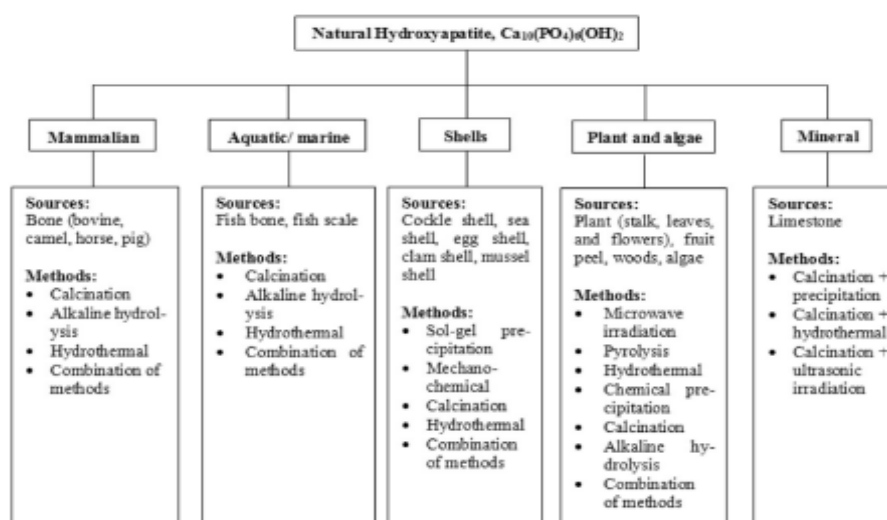
3.4 Métodos de síntese da hidroxiapatita

Os tipos de métodos, reagentes e variáveis adotadas na síntese da HAp, influenciam diretamente no produto final, resultando em materiais com diversas propriedades e características diferentes, logo dependendo da aplicação, características importantes devem ser priorizadas, tais como biocompatibilidade e bioatividade, que são necessárias e de extrema importância para aplicações biomédicas, ambas sofrem influência direta ligadas a morfologia da estrutura, tamanho e dispersão de partículas, que por sua vez são obtidas de acordo com os métodos e parâmetros utilizados.

Diversas são as técnicas utilizadas para síntese, que apesar da grande variedade podem ser agrupadas em 6 conjuntos de métodos: métodos secos, envolvem estado sólido e reações

mecanoquímicas, não necessitando o uso de um solvente, sendo amplamente utilizado para produção em grande escala de pós; métodos úmidos, baseiam-se em uso de produtos químicos de baixa temperatura, precipitação, coprecipitação, sol-gel e hidrólise, possuem características similares ao tecido ósseo e dentário; hidrotermais, uso de soluções aquosas de alta temperatura e tensão, hidrotérmica, emulsão e microemulsão; alta temperatura, métodos como combustão e pirólise; fontes biogênicas, extraído de casca de ovos, espinha de peixes, ossos bovinos etc.; por fim, a combinação de métodos (GOMES *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2009). Corroborando com o que foi dito, PU'AD *et al.*, (2019) disponibilizaram em seus estudos, um esquema inteirando fontes e os métodos de síntese possível para HAp a partir de fontes naturais, conforme apresentado na Figura 6:

Figura 4 - Infográfico representativo dos métodos de síntese possíveis para obtenção da hidroxiapatita.



Fonte: PU'AD *et al.*, (2019).

3.4.1 Síntese de HAp pelo método Sol-Gel

BALAMURUGAN *et al.*, (2006) sintetizaram pó de hidroxiapatita de fase pura em seu experimento através do método sol-gel, utilizando fosfito de trietilo e nitrato de cálcio como precursores de fósforo e cálcio, o sol de fosfito de trietilo foi diluído em etanol anidro e adicionado água em pequena quantidade posteriormente para hidrólise, a mistura foi selada em um copo de vidro após a adição do solvente e levado a agitação, após o fosfito ser completamente hidrolisado, uma quantidade estequiométrica de nitrato de cálcio 3M dissolvido em etanol anidro foi adicionado gota a gota no sol de fosfito hidrolisado e levado a agitação

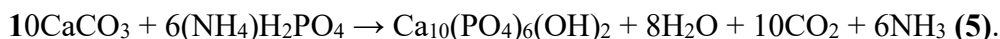
novamente, a solução obtida foi envelhecida a temperatura ambiente por 16h e em seguida posto secagem, os solventes foram removidos a 60°C, obtendo-se um líquido viscoso, que foi posto a secagem a 60°C novamente, resultando em um gel branco, que foi moído com almofariz e pilão, por fim, calcinados em diferentes temperaturas, de 300°C a 900°C. Os resultados mostraram que o pó calcinado a 900°C indicou a presença da fase pura de hidroxiapatita com razão Ca/P = 1,67.

3.4.2 Síntese de HAp pelo método hidrotérmico

RHEE (2002) sintetizou o pó de HAp através da reação em estado sólido do pirofosfato de cálcio ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) e do carbonato de cálcio (CaCO_3). Para o experimento, o pirofosfato de cálcio foi preparado pelo tratamento térmico do fosfato dicálcio di-hidratado a 1000°C por 3h e peneirado em malha de 60 (250 mm). A proporção de pirofosfato de cálcio carbonato de cálcio foi de 3:4, também foi utilizado água e acetona, as quais foram divididas em amostras, sendo que a proporção de massa e água/acetona, foi respectivamente de 23,2530g e 155g. As moagens foram realizadas por 2, 4, 6 e 8h, com velocidade 170 rpm em um frasco de polietileno de alta densidade (500 mL) usando bolas de zircônia, após a moagem a pasta foi seca completamente em forno a 150°C por 24h, então tratado termicamente a 1100 °C por 1h. Os resultados da caracterização mostraram que apenas o pó moído em água apresentou a fase única da hidroxiapatita.

3.4.3 - Síntese de HAp por mecanossíntese

SILVA *et al.*, (2003) utilizaram a técnica de liga mecânica para síntese de hidroxiapatita a partir de cinco procedimentos experimentais com óxidos comerciais diferentes, ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Vetec, 99%), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Vetec, 97% com 3% de CaCO_3), CaHPO_4 (Aldrich, 99%), P_2O_5 (Vetec, 99%), CaCO_3 (Aldrich, 99%) e $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ (Vetec, 98%)), além de hidroxiapatita comercial (HA-COM, Vetec, 98%) (HA-COM) a fim de comparação para com os resultados obtidos. Em todos os procedimentos, os materiais foram moídos em um moinho planetário Fritsch Pulverisette 6 com proporcionalidade estequiométrica, cada procedimento foi representado com as seguintes reações: $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + x\text{H}_2\text{O}$ **(1)**; $6\text{CaHPO}_4 + 4\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ **(2)**; $10\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{P}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 9\text{H}_2\text{O}$ **(3)**; $4\text{CaCO}_3 + 6\text{CaHPO}_4 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{CO}_2$ **(4)** e



Para moagem foi utilizado frascos de aço inoxidável selados e bolas sob ar, com velocidade de 370 rpm durante 30 min de passos de fresagem com 10 min de pausa. A liga mecânica foi realizada por 60 h de moagem em todos os procedimentos, os pós moídos foram analisados por difração de raio x, infravermelho e espectroscopia de espalhamento de Raman e foi observado a presença de hidroxiapatita com diferentes graus de cristalinidade, sendo que o experimento (4) foi o que obteve menor tamanho de partícula 22 nm, e os experimentos (1) e (3) resultou no maior tamanho de partícula, ambos com 39 nm. Também foi constatado que no experimento (5), o qual foi utilizado $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (Vetec, 98%) não houve a síntese da HAp, pois foi visto que o nível de amorfização aumentou junto com tempo de moagem e após os 60 min, o material se apresentou completamente amorfo. Os resultados do estudo mostram o método de liga mecânica com uma via oportuna para a produção da HAp, uma vez que foi possível a síntese de nanopartículas.

3.4.4 Síntese de HAp por precipitação

JAMARUN *et al.*, (2015), utilizaram calcário para síntese da hidroxiapatita pelo método de precipitação, durante o experimento foi observado diferentes temperaturas a fim de determinar as melhores condições para formação de nanopartículas de HAp. Na síntese, o calcário foi calcinado por 5 horas a 90 °C, ocorrendo a transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO), em seguida foi dissolvido 5,6g de CaO em 100 mL de HNO_3 2,0 M e após ser filtrado, adicionou 0,6M de hidróxido de diamônio fosfato $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ lentamente enquanto foi agitado durante uma hora a 60°C, 70 °C, 80 °C e 90 °C com pH = 11, adicionou hidróxido de amônia (NH_4OH) para ajuste do pH, o precipitado foi lavado e seco a 110°C, moído em pó e depois calcinado a 800°C por 2 h. Os resultados obtidos mostram que foi possível a síntese da hidroxiapatita e que quando utilizado 90°C, há formação de nanopartículas e grande área superficial.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Investigar o potencial de aplicação dos resíduos gerados nas atividades de lavra da Pedra Cariri, de coloração cinza, como matéria-prima precursora do mineral cálcio para a síntese da

biocerâmica hidroxiapatita via técnica de mecanossíntese (moagem) a seco. Para que o objetivo geral possa ser alcançado satisfatoriamente, os objetivos secundários, descritos a seguir, foram estabelecidos.

4.2 Objetivos Específicos

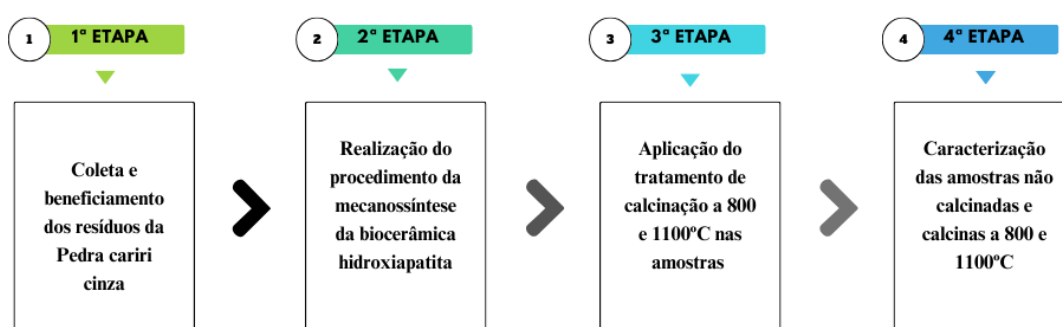
- Elaborar uma metodologia de execução viável tecnicamente cujos resultados ofereçam uma contribuição em favor do cumprimento de metas nacionais de redução e gestão de resíduos sólidos em áreas urbanas, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei Nº 12.305/10;
- Coletar resíduos da Pedra Cariri Cinza diretamente de um dos pontos de exploração do minério Pedra Cariri;
- Promover a síntese/preparação do material biocerâmico hidroxiapatita por meio da mistura física de precursores, a seco, via técnica de síntese mecânica ou mecanossíntese.
- Avaliar a influência exercida pelas diferentes temperaturas de calcinação, sobre o material obtido como produto da moagem e o potencial de aplicação dos resíduos como precursor de cálcio na síntese.

5 METODOLOGIA

A execução da metodologia estabelecida para esta proposta de trabalho está dividida em 4 (quatro) etapas distintas, como descrito a seguir. Resumidamente, a primeira etapa (4.1) foi destinada à coleta in loco seguida por procedimentos de beneficiamento dos resíduos brutos de Pedra Cariri de coloração cinza. Neste contexto, deve-se entender por procedimentos de beneficiamento as atividades de moagem dos resíduos brutos, em moinho do tipo martelo, e submissão do produto dos ciclos de moagem ao processo de peneiramento manual em malha ABNT 200 mesh, abertura de 74 μm , a fim de se obter o material precursor geológico em uma granulometria que favoreça a produção de uma biocerâmica o mais próximo possível de uma granulometria nanométrica. A segunda etapa (4.2) deste trabalho foi dedicada à realização dos procedimentos de síntese do material biocerâmico hidroxiapatita, por meio da mistura de

reagentes via técnica mecânica de moagem a seco. A terceira etapa (4.3) foi destinada à realização da aplicação do tratamento térmico de calcinação nas temperaturas de 800°C e 1100°C sobre as amostras do material obtido na mecanossíntese. Por fim, na quarta e última etapa (4.4), as amostras submetidas ao tratamento de calcinação e uma amostra não calcinada do material biocerâmico obtido foram sujeitas as técnicas de caracterizações estruturais e físicas a fim de avaliar a aptidão do potencial de aplicação dos resíduos da Pedra Cariri cinza como insumo geológico para a síntese do material biocerâmico hidroxiapatita e todas as influências geradas pela aplicação do tratamento térmico de calcinação. A Figura 3 apresenta um fluxograma representativo da metodologia estabelecida para a execução deste trabalho.

Figura 5 – Fluxograma representativo da metodologia empregada na pesquisa



Fonte: autoria própria, (2026).

5.1 Coleta e Beneficiamento do Material Rochoso Bruto

A etapa inicial desta metodologia foi composta pela coleta in loco do material rochoso bruto seguida pelos procedimentos de beneficiamento. Os materiais utilizados para a condução desta primeira etapa são compostos por amostras do resíduo do calcário sedimentar laminar comercialmente conhecido como Pedra Cariri proveniente do município de Nova Olinda, localizado na microrregião do Cariri cearense. As amostras dos resíduos de Pedra Cariri foram, portanto, coletadas diretamente de um dos pontos de exploração e lavra deste minério. Ressalte-se que se entende por lavra a atividade extrativista de exploração e beneficiamento de um determinado minério. Na ocasião, foram coletados 10 quilogramas de resíduo da lavra da Pedra Cariri de coloração cinza.

Após a coleta, as amostras dos resíduos de Pedra Cariri, de coloração cinza, foram submetidas a processos de beneficiamento constituídos pela britagem semi manual, moagem em moinho com rotor de martelos e peneiramento das amostras dos resíduos. O objetivo dos processos de beneficiamento foi transformar em pó as amostras coletadas do material rochoso, a ser analisado. Estas atividades de beneficiamento inicial foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Centro de Ciências e Tecnologia Universidade Federal do Cariri. No moinho com rotor de martelos o material rochoso foi triturado por impactos sequenciais. Duas peças internas do moinho, martelos e placas de impactos garantem os impactos e a fricção necessária para a trituração da carga em questão.

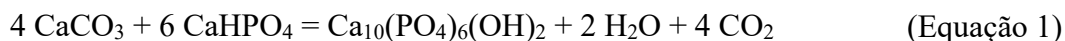
O moinho com rotor de martelos é o tipo de moinho ideal para a moagem de minérios de média dureza. O tempo de duração do processamento da carga é que vai determinar a granulometria do produto da moagem. A quantidade de material a ser moída em cada ciclo de moagem será determinada no momento de realização do procedimento; pois, não existe uma regra geral sobre a quantidade ótima de produto a moer e sim indicações gerais. Após a moagem, o produto da descarga do moinho foi submetido a um processo de peneiramento de forma a ser transformado em pó. Esse produto foi então passado em peneira de malha 200 mesh (abertura de 74 μm), pertencente ao Laboratório de Materiais Cerâmicos.

5.2 Procedimento de Moagem a Seco

A segunda etapa (4.2) desta metodologia foi dedicada à realização da síntese ou preparação do material biocerâmico hidroxiapatita, obtido na forma de pó, via técnica de moagem a seco também conhecida pelas terminologias de síntese mecânica, reação em estado sólido, síntese mecanoquímica ou mecanossíntese. Esta técnica de síntese mecânica consiste na mistura física de precursores, respectivamente em quantidades estequiométricas alinhadas ao que se deseja obter, sob a ação vigorosa da alta energia promovida pelos impactos mecânicos entre os corpos moedores e os precursores em processamento com a significativa vantagem operacional do controle do tamanho das partículas obtidas em função do tempo e/ou rotação da moagem.

Neste caso, em específico, o material de interesse foi a biocerâmica hidroxiapatita cuja composição tem como fórmula estrutural geral o fosfato de cálcio - $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Segundo a literatura, uma expressiva vantagem do método da síntese mecânica a seco é a alta eficiência do mesmo para promover a produção de materiais cerâmicos, na forma de pó, com total controle do tamanho médio das partículas obtidas, com a mesma facilidade de obtenção tanto para

quantidades de bancada de laboratório quanto para quantidades comerciais (Matyja *et al.*, 2023; Cheng *et al.*, 2023; Vasconcelos, Pimenta e Sombra, 2001). O procedimento experimental de síntese do material biocerâmico hidroxiapatita, via método mecânico a seco, obedecerá à reação apresentada na Equação 1.



Para a obtenção da estrutura $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, de acordo com o esquema reacional estabelecido para esta proposta e apresentado na Equação 4.2, foram necessários dois reagentes, são eles: CaCO_3 e CaHPO_4 . Neste trabalho, o precursor carbonato de cálcio - CaCO_3 foi o próprio resíduo gerado durante as atividades de lavra da Pedra Cariri, cuja concentração de CaCO_3 em sua composição ultrapassa 90%. O segundo precursor utilizado para a síntese foi o fosfato de cálcio anidro (CaHPO_4) P.A. do fabricante *Synth*. A metodologia experimental da síntese mecânica apresentada neste trabalho teve como referência as metodologias exitosas de preparação de hidroxiapatita relatadas por Silva *et al.*, 2002 e Dinda *et al.*, 2020.

O procedimento da síntese mecânica foi realizado em um moinho de bolas excêntrico duplo, tipo periquito, da marca MATOLI, modelo 070M008, pertencente ao Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Cariri. O método de síntese mecânica, em estado sólido, empregado neste trabalho, foi investigado como técnica de síntese alternativa ao tradicional método de síntese da hidroxiapatita via rota úmida. Após o procedimento da moagem, o produto obtido foi calcinado sob diferentes temperaturas, a saber: 800 e 1100°C. Para SADAT-SHOJAI *et al.*, 2013, a calcinação do produto da moagem em elevadas temperaturas favorece a formação da fase desejada com elevado grau de cristalinidade.

5.3 Calcinação do Produto da Moagem

O material obtido como produto do procedimento de moagem foi submetido a um tratamento térmico de calcinação para eliminação da matéria orgânica inerente ao precursor rochoso, de natureza calcária – resíduo de Pedra Cariri, bem como da umidade que também se forma como produto residual do processo reacional apresentado na Equação 4.2. Para além das eliminações mencionadas, o processo de calcinação favorece a formação do modelo estrutural iônico do material cerâmico desejado; ligando, de forma iônica, cátions e ânions nas proporções previamente estabelecida por cálculos estequiométricos.

Neste trabalho, o produto da moagem foi submetido a calcinação sob dois valores de temperatura distintos, a saber: 800 e 1.100 °C a fim de permitir a avaliação da influência da temperatura de calcinação sobre as características físicas e estruturais das amostras de hidroxiapatita sintetizadas. Cada tratamento térmico de calcinação mencionado durou 2hrs.

5.4 Caracterizações do material obtido na síntese

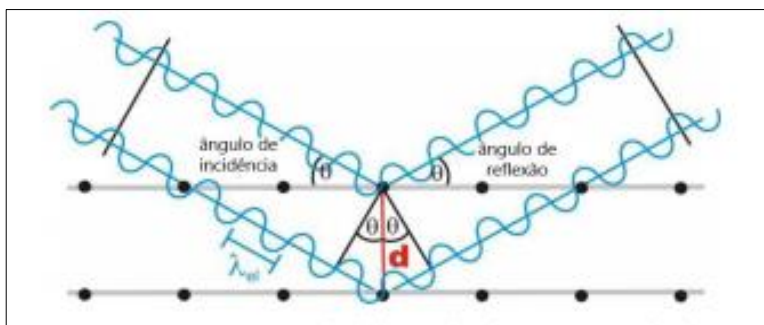
A quarta etapa (4.4) foi dedicada à apresentação das funcionalidades e realização das caracterizações estruturais e físicas das amostras dos materiais supostamente com potencial biocerâmico conhecido por hidroxiapatita, cujas estruturas devem se mostrar à base de fosfato de cálcio, constituídos majoritariamente pela fase $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, obtidos como produto da técnica de mecanossíntese executada na etapa anterior.

Neste contexto, as amostras dos materiais sintetizados na etapa anterior, via técnica da mecanossíntese, foram caracterizados por difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), Termogravimetria (TG) e microscopia de varredura eletrônica (MEV). O objetivo destas caracterizações foi comparar as características estruturais e físicas dos materiais sintetizados com os resultados divulgados na literatura atribuídos ao material biocerâmico hidroxiapatita sintetizado a partir de diferentes técnicas de síntese bem como a partir de diferentes precursores, ora de natureza orgânica, ora de natureza inorgânica mineral e ora de natureza inorgânica de origem industrial, isto é, precursores P.A.

5.4.1- Difração de raios X (DRX)

DA SILVA (2020) descreve a difração de raios X como uma técnica não destrutiva na caracterização de materiais cristalinos que fornece informações estruturais sobre estrutura, fases, orientação dos cristais, tamanho de cristal, tensão, grau de cristalinidade e defeitos do cristal. A técnica baseia-se na interferência construtiva entre raios X monocromáticos em um material cristalino e que satisfazem a lei de Bragg, a qual relaciona comprimento de onda com ângulo de difração e espaçamento do retículo cristalino, de acordo com a Equação 1, e representada na Figura 4 a seguir:

Figura 6 – Esquema ilustrativo da lei de Bragg



$$n \lambda = 2d(hkl)\sin\theta \text{ (Equação 4.1)}$$

Fonte: DA SILVA, (2020).

Amostras do material biocerâmico obtido na síntese foram coletadas aleatoriamente e submetidas à caracterização estrutural por difração de raios X. As análises foram realizadas em um difratômetro da marca *Panalytical*, modelo *Empyrean*, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais – LCM, da Universidade Federal do Cariri - UFCA. O objetivo dessa análise foi identificar a(s) fase(es) que formam as estruturas das amostras do material biocerâmico produzido, a fim da comprovação da presença da hidroxiapatita.

5.4.2 Fluorescência de raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra. Nessa técnica uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X) provoca a excitação dos átomos da substância que se pretende analisar (Beckhoff *et al.*, 2006).

A determinação da composição química das amostras do material biocerâmico, produto das mecanossíntese, foi realizada por meio da técnica de fluorescência de raios x - FRX. Para isso foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva da marca *Panalytical*, modelo Série *Epsilon* 1. O referido espectrômetro pertence ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri.

5.4.3 Análise Térmica: Termogravimetria (TG)

A análise térmica diferencial consiste em medir a diferença de temperatura entre uma amostra e uma referência (material termicamente inerte) em função do tempo ou da

temperatura, quando submetidos a uma variação programada da temperatura, com atmosfera controlada (Lopes, 2011). O objetivo desta técnica é aferir a vulnerabilidade de perda de massa de um material em função do aquecimento experimentado. A análise de termogravimetria foi realizada em um analisador termogravimétrico da marca *TA instruments* e modelo SDT 2960, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri.

5.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5nm são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1nm (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

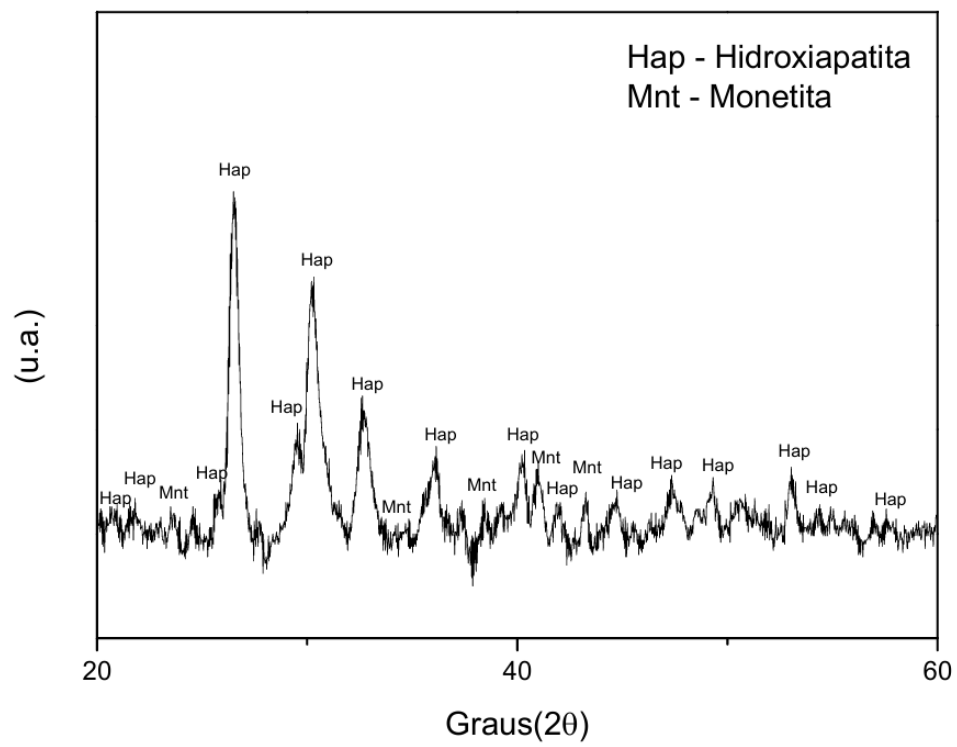
Características referentes à morfologia das partículas unitárias bem como dos seus aglomerados que compõem as amostras do material biocerâmico obtido na síntese, em forma de pó, foram obtidas por meio da técnica MEV. Esta análise foi realizada a partir da utilização de um microscópio eletrônico de varredura do fabricante TESCAN, modelo veg3, operado a 20 kV, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Cariri.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Difração de raios X (DRX)

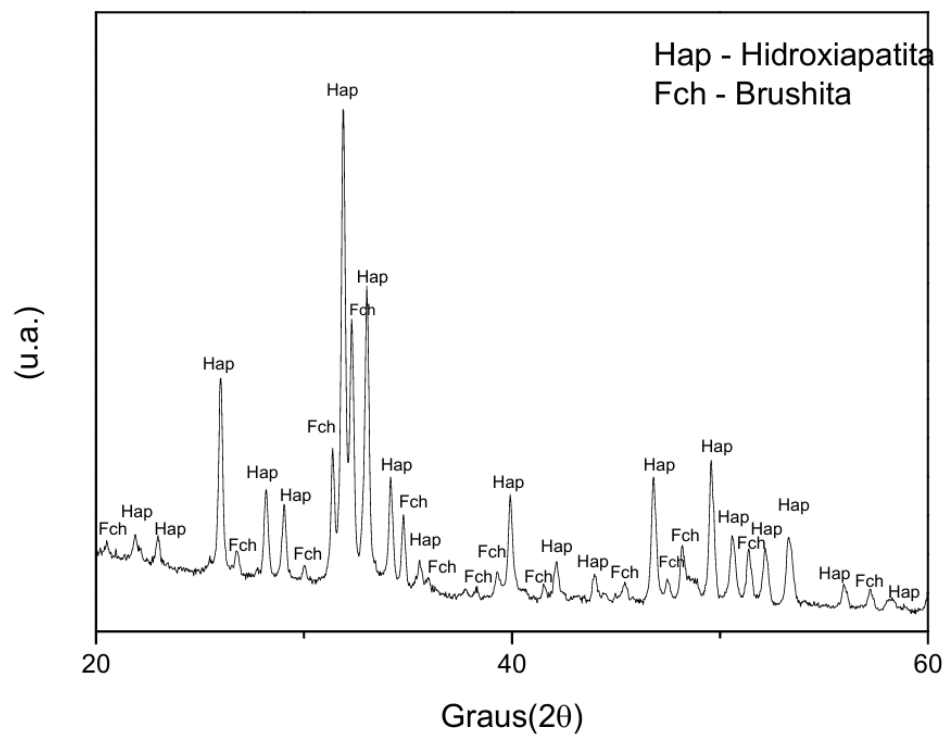
Estão apresentados nas Figuras 7, 8 e 9 os resultados da caracterização de identificação microestrutural, obtida por meio da técnica de difratometria de (DRX), para as amostras que são produto das mecanossínteses realizadas neste trabalho, não calcinada e calcinadas nas temperaturas de 800 e 1100°C, respectivamente.

Figura 7 – Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese não calcinada.



Fonte: autoria própria, (2026).

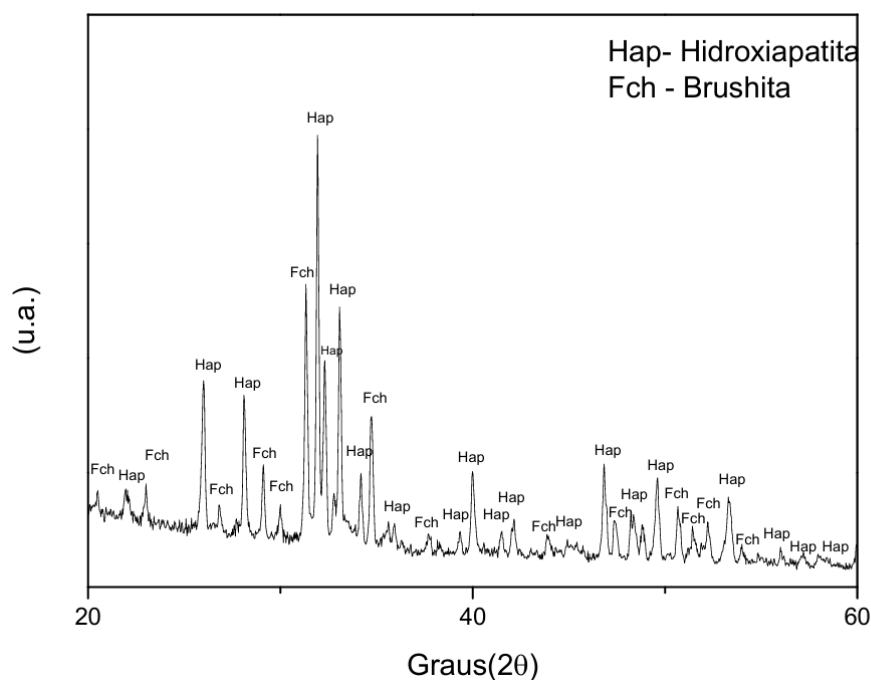
Figura 8 - Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese calcinada a



800°C.

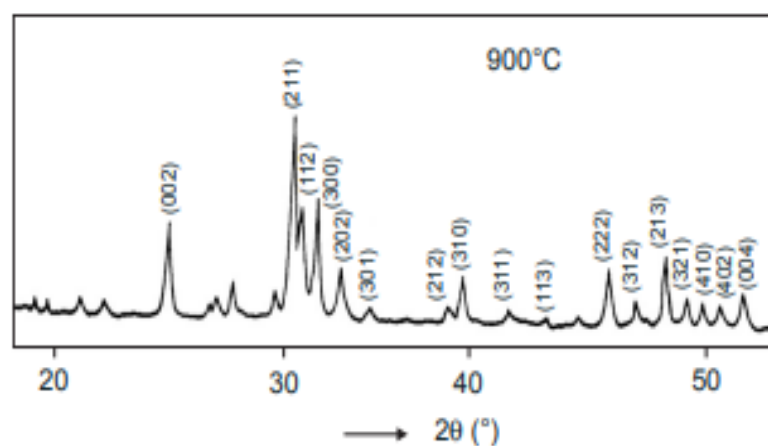
Fonte: autoria própria, (2026).

Figura 9 - Perfil gráfico do padrão de difração de raios X da amostra do produto da mecanossíntese calcinada a 1100°C.



Fonte: autoria própria, (2026).

Figura 10 - Perfil gráfico do padrão de difração de raios X de uma amostra de hidroxiapatita monofásica publicada na literatura.



Fonte: Balamurugan, (2006).

A técnica de DRX é essencial para obtenção de informações cruciais a respeito das fases e estrutura presentes no material de interesse, nesse sentido, ao comparar os padrões de difratometria da Figura 7 referente a amostra do produto da moagem não calcinada, com o perfil

apresentado nas Figuras 8 e 9 referente às amostras, do produto da moagem calcinada a 800 e 1100°C, é perceptível o notório aumento da cristalinidade, uma vez que os picos de difração tornam-se mais nítidos após a aplicação do referido tratamento térmico, estando em concordância e com alto grau de similaridade com os resultados apresentados na literatura (Balamurugan, 2006).

O software *X'Pert HighScore Plus* da *Malvern Panalytical* utilizando como biblioteca de dados o COD OCT 2014, que contém mais de 290.000 padrões de referência foi utilizado para identificações das fases obtidas nas amostras sintetizadas neste trabalho. Foi constatado que tanto a amostra não calcinada (Figura 7) quanto as calcinadas (Figuras 8 e 9) apresentaram picos característicos do material hidroxiapatita, em torno de $2\theta = 31,8$, quando comparado ao padrão de referência da literatura (Figura 10). As amostras calcinadas apresentaram picos mais agudos e nítidos, sendo mais evidente na amostra tratada a 1100°C quando comparada a amostra tratada a 800°C, ambas exibiram padrões de cristalinidade mais próximos ao da referência (Figura 6.1.4). Contudo, mesmo sem a aplicação de um tratamento térmico de calcinação a amostra não calcinada (Figura 7), ainda sim, apresentou picos característicos da biocerâmica hidroxiapatita, embora menos cristalino quando também comparado a referência da literatura utilizada nesse trabalho (Figura 10). Os resultados da difratometria de raios X da amostra não calcinada destaca ainda para mais a eficiência na aplicação da técnica de mecanossíntese, via rota a seco, utilizada nesta pesquisa para produção da biocerâmica hidroxiapatita a partir dos resíduos rochosos da Pera Cariri cinza, sem torna-se necessário rigorosamente a aplicação de um tratamento térmico de calcinação após a síntese do material biocerâmico. No entanto, em aplicações onde o grau de cristalinidade seja crucial em seu desempenho, convém considerar o emprego de um tratamento térmico de calcinação (SADAT-SHOJAI *et al.*, 2013).

Ademais, ainda comparando o resultado da amostras obtidas na moagem com o material de referência é possível notar as presenças de fases secundárias, onde na amostra não calcinada ficou constatado o fosfato bicálcico anidro ou monetita, identificadas pelos picos com a sigla “Mnt” no difratograma representando na Figura 10, sendo essa uma forma anidra da brushita cuja fórmula estrutural é dada por $[\text{CaHPO}_4]$ e possui maior capacidade de bioabsorvência quando comparada a brushita, que apesar de ser menos solúvel pode sofrer conversão gradual em hidroxiapatita, sendo esta última citada menos solúvel no ambiente fisiológico, confirmando a redução da taxa de absorção (UENO, KANDA, KAWAI, 2025; MATOS *et al.*, 2025). Já nas amostras calcinadas, em ambos foi evidenciado a presença da fase do fosfato de cálcio hidratado ou brushita, identificado pelos picos com a sigla “Fch” nos difratogramas representados nas Figuras 8 e 9, uma biocerâmica amplamente utilizada em aplicações biomédicas como cimento

ósseo, de fórmula estrutural $[\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ ou $[\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ e que apresenta características químicas e estruturais similares aos formadores das fases inorgânica dos ossos de mamíferos (CAMARGO *et al.*, 2007; ISSA *et al.*, 2022).

6.2 Fluorescência de raios X (FRX) e análise Termogravimétrica (TG)

Estão apresentadas na Tabela a seguir, os resultados da composição química referente a aplicação da técnica de espectrometria por fluorescência raios x (FRX) nas amostras não calcinada e calcinadas a 800 e 1100°C, respectivamente.

Tabela 1- Análise composição química por FRX das amostras de hidroxiapatita

Óxidos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	outros	P.F	Total
Hap_NC	1,023	2,210	27,279	0,155	0,132	48,514	0,142	0,545	0,4	19,6	100
Hap_800	0,951	2,568	27,018	0,193	0,183	48,669	0,137	0,492	0,372	-	100
Hap_1000	1,279	2,763	34,098	0,194	0,165	60,642	0,177	0,682	-	-	100

Fonte: autoria própria, (2026).

Ao utilizar a técnica de fluorescência de raio X foi possível observar que a composição das amostras do produto da mecanossíntese, tanto a que não foi submetida ao tratamento térmico de calcinação (Hap_NC) quanto as calcinadas a 800 e 1100°C (Hap_800 e Hap_1100) apresentaram como constituintes, de forma expressivamente majoritária, os óxidos de interesse para a biocerâmica hidroxiapatita, sendo estes o P₂O₅ e o CaO, podendo ser explicada pela elevada temperatura de calcinação. Também foi possível notar nas amostras, embora sutil, a presença de algumas impurezas tais como Al₂O₂, SiO₂, Cl, K₂O, MnO e Fe₂O₃; estas impurezas são justificadas pelo fato de já estarem presentes na constituição da Pedra Cariri, uma vez que esta é encontrada na crosta terrestre estando, naturalmente, sujeita à presença de elementos minerais próprios da formação geológica da localidade geográfica das jazidas deste minério. Dentre as amostras analisadas, a calcinada a 1100°C (Hap_1100) apresentou o menor percentual das impurezas observadas, podendo ser explicado pela alta temperatura de calcinação que pode favorecer a eliminação mais eficiente de parte dos contaminantes.

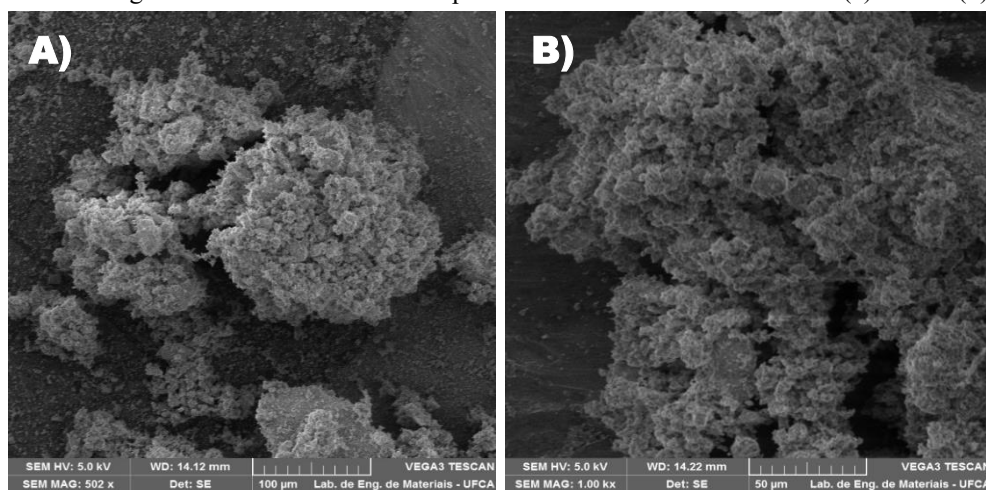
Comparando a composição das três amostras foi observado que a perda ao fogo, foi igual a 19,6% para a amostra não calcinada e nula para as amostras calcinadas, resultando numa

maior porcentagem dos óxidos de interesse nas amostras submetidas ao tratamento térmico, isso pode ser justificado pelo fato que durante o processo de calcinação há a decomposição de algumas substâncias orgânicas e/ou voláteis que antes contribuíam para a massa total da amostra não calcinada. Sendo assim, fica implícita uma necessidade de se purificar previamente este material rochoso antes de empregá-lo como precursor de cálcio em uma reação química a fim de se obter uma biocerâmica hidroxiapatita o mais livre possível desses contaminantes.

6.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

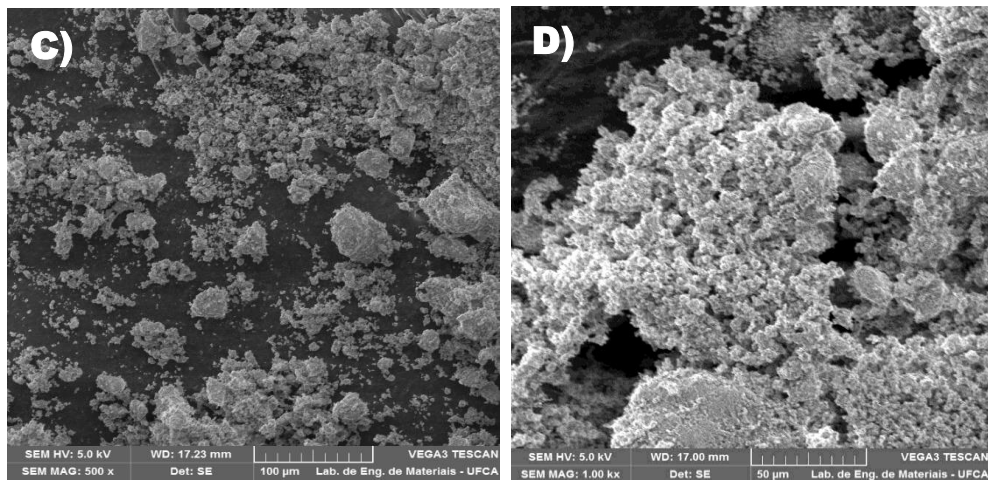
As imagens a seguir apresentam as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras dos produtos das mecanossínteses realizadas neste trabalho, não calcinada (Figura 11) e calcinadas a 800 e 1100°C (Figuras 12 e 13), respectivamente, em comparativo com a referência (Figura 14).

Figura 11 - Micrografias da amostra de hidroxiapatita não calcinada nos alcances de (a) 500x e (b) 1000x.



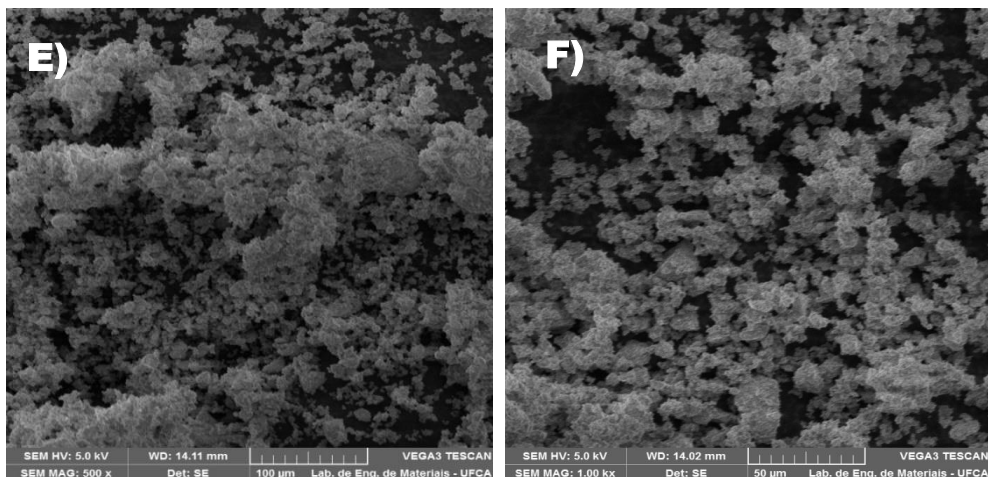
Fonte: autoria própria, (2026).

Figura 12 - Micrografias da amostra de hidroxiapatita calcinada a 800°C nos alcances de (C) 500x e (D) 1000x.



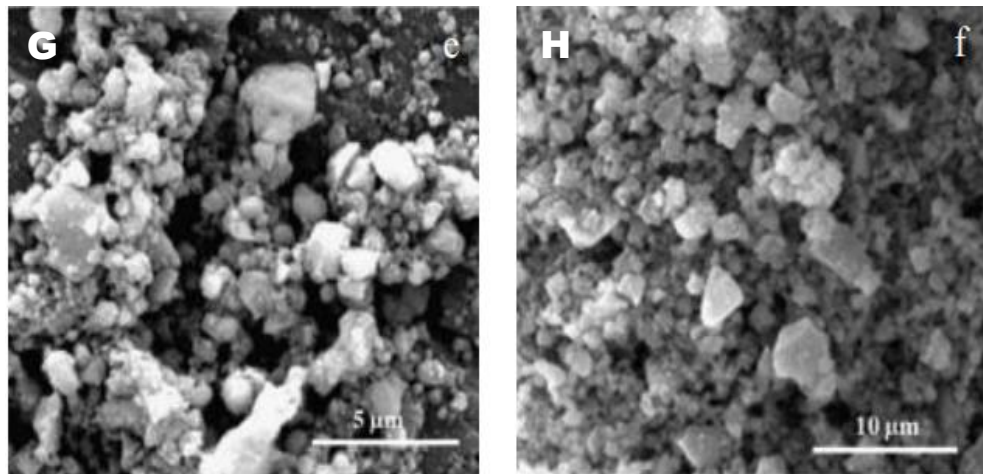
Fonte: autoria própria, (2026).

Figura 13 - Micrografias da amostra de hidroxiapatita calcinada a 1100°C nos alcances de (E) 500x e (F) 1000x.



Fonte: autoria própria, (2026).

Figura 14 - Micrografias da hidroxiapatita referência da literatura sintetizada via mecanossíntese.



Fonte: Mandal *et al.*, (2014).

As Figuras 11, 12 e 13 expõem informações morfológicas a respeito das amostras não calcinada e calcinadas a 800 e 1100°C, respectivamente, ampliadas em 500x e 1000x. Tanto na amostra não calcinada quanto nas amostras submetidas ao tratamento térmico de calcinação foi possível notar a presença de grãos finos e aglomerados de partículas; contudo, a amostra não submetida à calcinação apresentou maiores tamanhos de aglomerados e espaçamentos menor entre as partículas, isso pode ser explicado pela presença de substâncias orgânicas na amostra, muito provavelmente oriundas dos resíduos da rocha sedimentar calcária utilizada como precursor. As outras duas amostras que foram submetidas ao tratamento térmico de calcinação não apresentaram essa peculiaridade de suposta presença de matéria orgânica remanescente. A partir das micrografias obtidas por MEV foram determinados os valores do tamanho médio de partículas unitárias nas amostras dos materiais biocerâmicos sintetizados neste trabalho. A referida determinação do tamanho médio de partículas constituintes das amostras sintetizadas foi feita através do *software ImageJ*, no qual relacionando os tamanhos de partículas, as amostras calcinadas a 800 e 1100°C apresentaram os maiores valores de tamanho médio de partículas, sendo estes valores, respectivamente, iguais a 623 nm e 898 nm, a explicação para a diferença percebida nestes valores pode ser explicada com base no crescimento das partículas por agrupamento seguido de coalescência favorecido pela alta temperatura durante o tratamento de calcinação a 1100°C, que, conseqüentemente, induz a diminuição da área superficial do material constituinte da amostra. Já na amostra não calcinada o tamanho médio de partículas foi relativamente menor, em torno de 352 nm, condizente com os resultados apresentados na literatura.

Por fim, ao se comparar as micrografias das amostras sintetizadas neste trabalho com a apresentada na literatura (Figura 14) referente a uma amostra de hidroxiapatita sintetizada por mecanossíntese (Mandal *et al.*, 2014), em ambos os trabalhos foi possível notar as semelhanças nas características morfológicas das partículas obtidas; inclusive, com expressiva similaridade nas capacidades de aglomeração das partículas unitárias.

7 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram-se promissores indicando que foi possível produzir a biocerâmica de interesse, a hidroxiapatita, utilizando-se os resíduos rochosos da Pedra Cariri de coloração cinza como precursor geológico, por meio da técnica de preparação de pós cerâmicos conhecido por mecanossíntese.

Além disso, o referido método de síntese mostrou-se eficiente para produzir a hidroxiapatita, não monofásica, mesmo sem a necessidade de aplicação do tratamento de calcinação. Todavia, as amostras deste material biocerâmico sintetizadas sob os tratamentos de calcinação em 800 e 1100°C se mostraram com características microestruturais mais refinadas no que se refere a um grau maior de cristalinidade bem como a maior prevalência da fase de interesse. Além da hidroxiapatita, a difratometria de raios x (DRX) detectou a presença da monetita e da brushita nas amostras sintetizadas sem e com calcinação, respectivamente.

A fluorescência de raios X (FRX), por sua vez, comprovou a presença dos óxidos de interesse em concentrações de alta prevalência nas amostras sintetizadas neste trabalho; todavia, a amostra que experimentou o tratamento de calcinação 1100°C apresentou teores mais elevados dos óxidos característicos da biocerâmica hidroxiapatita, evidenciando o caráter de purificação que a calcinação exerce sobre o material. Esta análise ainda constatou pequenas quantidades de impurezas em ambas as amostras, o que já era esperado devido a um dos precursores utilizado na mecanossíntese ser de origem geológica.

Já a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou a obtenção de uma morfologia de partículas unitárias de aspecto fino, com evidente propensão a um forte estado de aglomeração, tanto na amostra não calcinada quanto nas calcinadas; sendo a não calcinada a que apresentou menor espaçamento entre as partículas e maiores tamanhos de aglomerados. Essa diferença nas morfologias destas amostras se dá, provavelmente, por influência do tratamento térmico aplicado.

Dessa forma, os resíduos da Pedra Cariri, de coloração cinza, apresentaram-se como uma auspiciosa solução econômica e sustentavelmente viável para aplicação como precursor do mineral cálcio na síntese da biocerâmica hidroxiapatita, via técnica de mecanossíntese. Sendo esta pesquisa de valor ímpar para o auxílio na redução dos impactos ao meio ambiente dos resíduos gerados pelos processos de extração deste calcário laminado nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri no interior do Ceará, bem como para otimizar a produção científica e acadêmica no que abrange o estudo da síntese de um material biomédico importante como a hidroxiapatita a partir de precursores de fonte geológica.

REFERÊNCIAS

- Aguilar, M.S., Di Lello, B.C., Queiroz, F., Campos, N.C., & Campos, J.B. (2014). Síntese de hidroxiapatita com o uso de carbonato de cálcio de origem biológica como precursor. Publicado nos anais: **21º CBECIMAT**, Brasil.
- Azis, Y., Jamarun, N., Arief, S., & Nur, H. (2015). Facile synthesis of hydroxyapatite particles from cockle shells (*Anadara granosa*) by hydrothermal method. **Oriental Journal of Chemistry**, v. 31, n. 2, p. 1-7.
- Balamurugan, A., Michael, J., Faure, J., Hicham Benhayoune, L., Sockalingum, G., Banchet, V., Bouthors, S. (2006). Synthesis and structural analysis of sol-gel derived stoichiometric monophasic hydroxyapatite. **Ceramics-Silikaty**50, v.1, p. 27-31.
- Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política nacional de resíduos sólidos. Congresso nacional. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acessado em 14 de dezembro de 2022.

Da Silva, R. F. (2020). A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82.

Del Lama, E. A. (2021). Patrimônio em pedra. **Instituto de Geociências, São Paulo**.

De Melo Costa, A. C., De Lima, M. G., De Almeida Lima, L. H. M., Cordeiro, V. V., De Souto Viana, K. M., De Souza, C. V., & De Lira, L.H. (2009). 4. Hidroxiapatita: Obtenção, caracterização e aplicações. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v. 4, n. 3, p. 29-38.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G. (2007). Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. **EdiPUCRS**, Porto Alegre.

IBRAHIM, M., Labaki, M., Giraudon, J. M., & Lamonier, J. F. (2020). (2020). Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review. **Journal of hazardous materials**, v. 383, p. 121139.

IBRAHIM, J.; SUMAILA, A. Mechanosynthesis, Characterization, And Antimicrobial Evaluation of Cadmium (Ii), Nickel (Ii), Iron (Iii), And Chromium (Iii) Chelates Formed with Paracetamol and Aspirin. **International Journal of Formal Education**, v. 3, n. 8, p. 116-136, 2024.

Gomes, D. S., Santos, A.M.C., Neves, G.A., Menezes, R.R. (2019.). A brief review on hydroxyapatite production and use in biomedicine. **Cerâmica**, v. 65, p. 282-302.
Jamarun, N., Azharman, Z., Arief, S., Sari, T. P., Asril, A., & Elfina, S. (2015). Effect of temperature on synthesis of hydroxyapatite from limestone. **Rasayan J. Chem**, v. 8, n. 1, p. 133-137.

Kareem, R. O., Bulut, N., & Kaygili, O. (2024). Hydroxyapatite biomaterials: A comprehensive review of their properties, structures, medical applications, and fabrication methods. *J. Chem. Rev.*, 6(1), 1-26.

Makarova, I., Shubenkova, K., Buyvol, P., Shepelev, V., & Gritsenko, A. (2021). The role of reverse logistics in the transition to a circular economy: case study of automotive spare parts logistics. **FME Transactions**, v. 49, n. 1, p. 173-185.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2022). PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília – DF. Disponível em: <https://sinir.gov.br/>. Acessado em 30 de janeiro de 2026.

Mondal, S., Mondal, B., Dey, A., & Mukhopadhyay, S. S. (2012). Studies on processing and characterization of hydroxyapatite biomaterials from different bio wastes. **Journal of M & Materials Characterization & Engineering**, v. 11, n. 1, p. 55-67.

Mota, J. C., De Almeida, M. M., De Alencar, V. C., & Curi, W. F. (2009). Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. **Águas Subterrâneas**.

Nanda, S., Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 1433-1456.

Nasiri-Tabrizi, B., & Yeong, C. H. (2024). Mechanosynthesis of substituted hydroxyapatite bone grafts: A systematic review. *Materials Today Communications*, 108610.

Neiva, L. S., Lima, P. H. P., de Alencar Lira, M. C., Barbosa, F. N. F., & Brasileiro, M. I. (2020). Resíduo rochoso aplicado como carga de incorporação em gesso destinado à construção civil: um estudo sobre propriedades mecânicas. *Brazilian Journal of Business*, 2(1), 35-50.

Pereira, T. C. S., Fernandes, G. A. (2015). ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA OBTENÇÃO DE HIDROXIAPATITA PARA FINS BIOMÉDICOS. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 3, p. 2409-2414.

RHEE, S.H. (2002). Synthesis of hydroxyapatite via mechanochemical treatment. *Biomaterials*, v. 23, n. 4, p. 1147-1152.

Rodrigues, G.G. (2018). Exploração e beneficiamento da pedra cariri nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri-CE. **TCC, UFERSA-curso de bacharelado em ciência e tecnologia. Disponível em:** <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4402>

Santos, M. H., Oliveira, M. D., Souza, L. P. D. F., Mansur, H. S., & Vasconcelos, W. L., (2004). Synthesis control and characterization of hydroxyapatite prepared by wet precipitation process. *Materials Research*, v. 7, p. 625-630.

Silva, C. C., Pinheiro, A. G., Miranda, M. A. R., Góes, J. C., & Sombra, A. S. B. (2003). Structural properties of hydroxyapatite obtained by mechanosynthesis. *Solid state sciences*, 5(4), 553-558.

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J., & NIEMAN, T.A. (1998.). Principles of instrumental analysis 5th edition. **Saunders College Pub. Co**, Philadelphia.

SOUZA, M. O. A. J. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BLOCOS DE GESSO

ECOLÓGICOS DOSADOS COM RESÍDUOS DE CALCÁRIO LAMINADO. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB. 2020.

SOUZA, Augusto Monteiro de. Hidroxiapatita modificada: estudos biológicos para avaliação da biossegurança e das propriedades osteogênicas. 2023.

Surana, P., Dhull, K. S., Arya, A., Samreen, S., Rajan, M., & Parihar, A. S. (2024). Bio-ceramics application in Dentistry. *Bioinformation*, 20(2), 136-139.

Trocinski, A. P., de Castro, F. V., dos Santos, E. L., & Silva, G. M. M. R. (2024). O USO DA HIDROXIAPATITA DE CÁLCIO COMO BIOESTIMULADOR DE COLÁGENO NA BIOMEDICINA ESTÉTICA: UMA REVISÃO DE LITERATURA. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, 6(5), 1289-1312.

Pu'ad, N. M., Koshy, P., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Lee, T. C (2019). Syntheses of hydroxyapatite from natural sources. *Heliyon*, v. 5, n. 5, p. e01588.

Teixeira, M. C., Mendonça Filho, J. G., De Oliveira, A. D., & Assine, M. L. (2017).

Faciologia orgânica da Formação Romualdo (Grupo Santana, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe): caracterização da matéria orgânica sedimentar e interpretação paleoambiental. **Geologia USP. Série Científica**, v. 17, n. 4, p. 19-44.

Zucolotto, T. E., Gerônimo, R. M. P., Silva, P. I. J., Da Costa. L. C. S. (2023). Use of biomaterials in general and orthopedic surgery. **Brazilian Journal of Health Review**, Curitiba, v. 6, n. 6, p. 31285-31293.

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

 Documento assinado digitalmente
LAEDNA SOUTO NEIVA
Data: 04/08/2026 21:31:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data e local da assinatura eletrônica