

INFLUÊNCIA DA ROTA DE SÍNTESE NAS PROPRIEDADES DA HIDROXIAPATITA: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS PECHINI E PRECIPITAÇÃO QUÍMICA

José Rosa de Souza Farias¹, João Sammy Nery de Souza¹, Veruska do Nascimento Simões², Aluska do Nascimento Simões Braga², Valdeci Bosco dos Santos³

¹Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados (LIMAV), Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, PI, Brasil

²Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabsMaC), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB, Brasil

³Depto de Engenharia de Materiais, UFPI, Teresina - PI, Brasil.

Resumo: A hidroxiapatita (HAp) é amplamente utilizada em biomateriais por compor a fase mineral dos ossos e dentes. Neste trabalho, HAp foi sintetizada pelos métodos Pechini e precipitação química, visando avaliar a influência da rota de síntese nas propriedades da hidroxiapatita. As amostras foram caracterizadas por DRX e TGA. Os resultados indicaram formação de HAp em ambas as rotas, com diferenças na cristalinidade e no comportamento térmico, evidenciando a influência do método de síntese nas propriedades do material.

Palavras-chave: hidroxiapatita; propriedades; síntese

INTRODUÇÃO

A melhoria da qualidade de vida está diretamente associada ao desenvolvimento de novos materiais, os quais têm desempenhado papel fundamental na evolução das sociedades desde os primórdios da história (Samadi *et al.*, 2025). O termo “novos materiais” não se refere apenas àqueles recentemente desenvolvidos, mas também a materiais tradicionais que foram modificados ou obtidos por meio de novas tecnologias. Essas inovações permitem a incorporação de propriedades diferenciadas, ampliando significativamente suas áreas de aplicação. Nesse contexto, destacam-se os materiais cerâmicos, que apresentam características como baixa densidade, baixa condutividade térmica, elevada resistência à corrosão e à abrasão, além da capacidade de suportar altas temperaturas sem deformação (Farias *et al.*, 2020). Em função dessas propriedades, sua aplicação tem crescido de forma expressiva em diversas áreas do conhecimento, impulsionada pelos avanços científicos e tecnológicos na ciência e engenharia de materiais nas últimas décadas.

Dentre as diversas aplicações das cerâmicas, destacam-se os biomateriais, definidos como materiais utilizados em dispositivos implantáveis com a finalidade de substituir ou reparar tecidos ou órgãos

danificados (Kilpadi *et al.*, 2001). Nesse grupo, a hidroxiapatita (HAp, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) merece destaque por ser uma fase mineral de fosfato de cálcio naturalmente presente em ossos e dentes. Trata-se de um material biocerâmico, amplamente utilizado em aplicações médicas, especialmente na regeneração óssea, devido à sua elevada biocompatibilidade, bioatividade e semelhança química com o tecido ósseo (Mondal *et al.*, 2023).

A relação molar Ca/P, situada entre 1,5 e 2,0, torna a hidroxiapatita particularmente adequada para aplicações odontológicas e ortopédicas, especialmente na forma de revestimentos biocerâmicos (Zhou *et al.*, 2011). Além de sua relevância biomédica, a hidroxiapatita apresenta aplicações em outras áreas, atuando como trocador iônico (Yang *et al.*, 2025), sistema de liberação controlada de fármacos, (Omiyale, 2025), catalisador (Campisi *et al.*, 2025) e material adsorvente na remoção de metais pesados e contaminantes ambientais (Cescon *et al.*, 2025). A ampla gama de aplicações da hidroxiapatita tem estimulado o desenvolvimento de diferentes métodos de síntese, capazes de produzir materiais com propriedades específicas. Nesse sentido, a escolha da rota sintética é um fator determinante nas características finais do material, influenciando aspectos como composição química, morfologia,



cristalinidade e estabilidade térmica (Etinosa *et al.*, 2024; Rial *et al.*, 2021).

Diversos métodos têm sido descritos na literatura para a síntese de hidroxiapatita, incluindo precipitação química (Kareem e Eyiler, 2024), métodos hidrotermais (Kawsar *et al.*, 2025), sol-gel (Edahwati *et al.*, 2023), método Pechini (Omori *et al.*, 2014) e reação em estado sólido (Taghipour *et al.*, 2022). Dentre esses, o método dos precursores poliméricos (Pechini), inserido na rota sol-gel, destaca-se por permitir um controle rigoroso da estequiometria e elevada homogeneidade química. Proposto originalmente por Pechini (Pechini, 1967), esse método baseia-se em uma rota química via úmida, que não requer condições severas de processamento, como alto vácuo ou temperaturas extremamente elevadas. Além disso, o método Pechini favorece a obtenção de pós com elevada pureza e microestrutura refinada, devido à mistura em nível molecular dos íons cálcio e fósforo. Essa característica resulta, geralmente, em materiais com tamanho de cristalito na faixa submicrométrica a nanométrica, o que contribui para melhorar a reatividade e a estabilidade da interface entre o material sintético e o tecido biológico (Santos *et al.*, 2005).

Em contrapartida, o método de precipitação química é uma das rotas mais tradicionais e amplamente utilizadas para a síntese de hidroxiapatita, devido à sua simplicidade, baixo custo e facilidade de execução (Kareem e Eyiler, 2024). Esse método baseia-se na reação entre fontes solúveis de cálcio e fósforo em meio aquoso, sob condições controladas de pH, temperatura e concentração, resultando na formação de precipitados de fosfatos de cálcio (Nikolenko *et al.*, 2020). A precipitação química permite a obtenção de hidroxiapatita com elevada cristalinidade, embora o controle da estequiometria e da homogeneidade química possa ser mais limitado quando comparado a métodos como o Pechini.

Além disso, parâmetros como taxa de adição dos reagentes, agitação, envelhecimento da solução e condições de secagem e calcinação influenciam diretamente as propriedades finais do material, como tamanho de partícula, morfologia e composição de fases (Salimi *et al.*, 2013). Dessa forma, apesar de sua praticidade, o método de precipitação química pode levar à formação de fases secundárias, dependendo das condições empregadas. Diante disso, a escolha da rota de síntese torna-se um fator crucial para a obtenção de hidroxiapatita com propriedades adequadas às diferentes aplicações, especialmente na área de biomateriais, onde características como cristalinidade, pureza de fase e estabilidade térmica são determinantes.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo sintetizar hidroxiapatita pelos métodos dos

precursores poliméricos (Pechini) e de precipitação química, avaliando comparativamente a influência dessas rotas nas propriedades estruturais e térmicas dos materiais obtidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a síntese da HAp pelo método Pechini foram utilizados: água destilada, ácido cítrico monohidratado (AC), etileno glicol (EG), nitrato de cálcio, fosfato de amônio dibásico e hidróxido de amônio. Inicialmente, 100 mL de água deionizada foram aquecidos a 70 °C sob agitação constante. O pH da solução foi ajustado para 10 mediante adição de hidróxido de amônio. Em seguida, adicionou-se o ácido cítrico, seguido dos precursores nitrato de cálcio e fosfato de amônio dibásico, adotando-se uma razão molar ácido cítrico/cátions metálicos de 4:1. Após completa homogeneização, o etileno glicol foi incorporado à solução na proporção AC/EG de 60/40. A temperatura do sistema foi então elevada e mantida entre 100 e 120 °C para promover as reações de poliesterificação e a formação do gel polimérico. O gel obtido foi submetido à pirólise a 400 °C por 1 hora, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, visando à remoção da matéria orgânica. O material resultante foi desaglomerado em almofariz e pistilo, peneirado em malha ABNT nº 200 (0,074 mm) e, posteriormente, calcinado a 900 °C por 2 horas, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, para a obtenção da fase desejada de hidroxiapatita. A amostra foi denominada HAp1.

Para a síntese da HAp pelo método de precipitação química foram utilizados: hidróxido de cálcio e o fosfato de amônio dibásico como precursores. Para a obtenção de 2 g de HAp, 1,4750 g de Ca(OH)_2 foram dissolvidos em 50 mL de água destilada. Separadamente, preparou-se uma solução contendo 1,5775 g de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ em 50 mL de água destilada. As soluções foram então misturadas e mantidas sob agitação magnética por 4 horas à temperatura de 25 °C. Após essa etapa, a suspensão foi mantida em repouso por 12 horas para maturação do precipitado. Em seguida, o material foi submetido à centrifugação e lavado com água destilada por três ciclos consecutivos, cada um consistindo na redispersão do precipitado e nova centrifugação, visando à remoção de impurezas residuais. Por fim, o material obtido foi seco em estufa a 100 °C por 24 horas, resultando na formação da hidroxiapatita. A amostra foi denominada HAp2.

Os materiais foram analisados por difração de raios-X realizada em um difratômetro da marca Bruker, modelo D8 ADVANCE, operando com radiação $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). O software X'pert Panalytical High Score Plus e os banco de dados COD (Crystallography Open Database) e JCPDF (Joint

Committee on Powder Diffraction Standards) foram usados para identificar as fases. 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. (1) :

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

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 cristalinidade foi determinada pela razão

entre a área integrada referente à fase cristalina e a área total utilizando a Eq. (2) :

$$X_c(\%) = \frac{\text{Área Cristalina}}{\text{Área Total}} * 100 \quad (2)$$

As amostras foram caracterizadas também por análise termogravimétrica e diferencial (TG/DTG) realizadas no aparelho DTG-60 Series da Shimadzu, utilizando aproximadamente 5 mg de amostra, com razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100,0 mL min⁻¹ em porta amostra de platina na faixa de temperatura de 25 a 1000 °C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1(a) e 1(b) ilustram os difratogramas de raios X das amostras HAp1 (a) e HAp2 (b) sintetizadas pelo método Pechini e precipitação química, respectivamente.

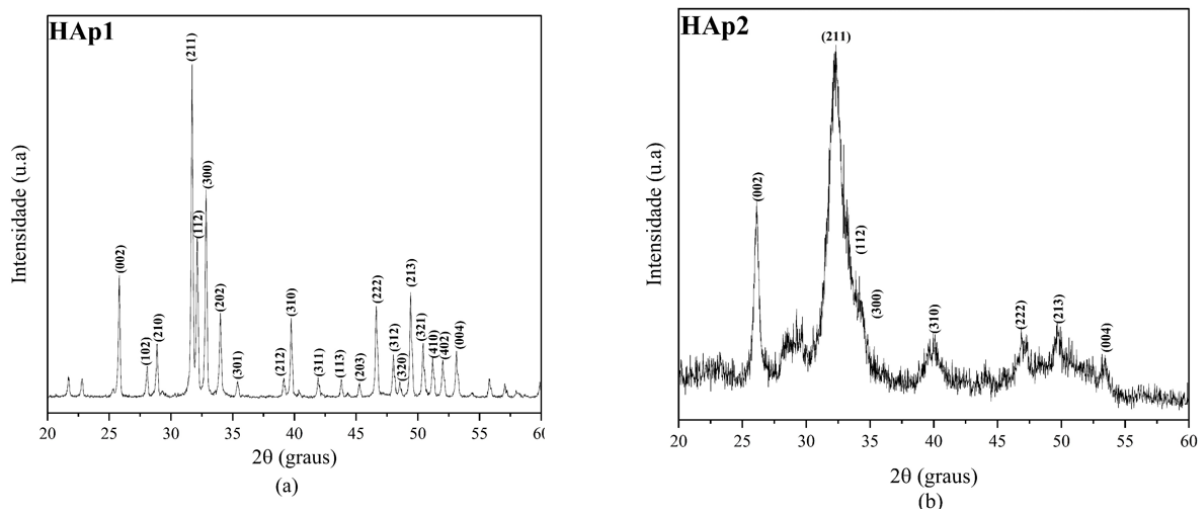


Figura 1. Difratogramas de raios X das amostras HAp1 (a) e HAp2 (b) sintetizadas pelo método Pechini e precipitação química, respectivamente.

Analisando os difratogramas percebe-se que em ambas as amostras foram identificados os principais planos cristalográficos característicos da HAp, evidenciando a formação da fase apatítica. Os picos observados em aproximadamente $2\theta = 26^\circ$ (002), 32° (211), 33° (112), 34° (300), 40° (310), 46° (222), 49° (213) e 54° (004) estão de acordo com os padrões cristalográficos reportados nas fichas JCPDF 01-089-6438, JCPDF 01-086-0740 e COD 96-901-3628, confirmando a obtenção da HAp em ambas as rotas sintéticas.

Entretanto, diferenças significativas podem ser observadas entre os perfis difratométricos das amostras, evidenciando a influência direta da rota de

síntese nas propriedades estruturais do material. A amostra HAp1, sintetizada pelo método Pechini, apresentou picos de difração mais estreitos, intensos e bem definidos, indicando elevado grau de cristalinidade e maior organização estrutural (Pramono *et al.*, 2022). Além disso, não foram observadas fases secundárias associadas a fosfatos de cálcio, sugerindo a obtenção de hidroxiapatita monofásica. O tamanho médio de cristalito calculado para essa amostra foi de 64,7 nm, enquanto o grau de cristalinidade foi de 90,7%, confirmando a elevada ordem estrutural do material obtido. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada homogeneidade química promovida pelo método

Pechini, decorrente da mistura em nível molecular dos íons cálcio e fósforo durante a formação da resina polimérica (Omori *et al.*, 2014). Adicionalmente, o controle do pH da solução e a etapa de calcinação a 900 °C favoreceram a estabilização da fase hidroxiapatita e o crescimento cristalino, contribuindo para a elevada cristalinidade observada (Carvalho *et al.*, 2020).

Por outro lado, a amostra HAp2, obtida por precipitação química, apresentou picos mais alargados e de menor intensidade relativa, indicando menor cristalinidade quando comparada à HAp1. Esse comportamento é característico de materiais nanocristalinos e está associado ao reduzido tamanho médio de cristalito de 18,61 nm calculado pela equação de Scherrer (Scherrer, 1918). O grau de cristalinidade calculado para essa amostra foi de 63,54%, evidenciando uma organização estrutural significativa, porém inferior à observada para a amostra sintetizada pelo método Pechini. A maior

largura dos picos também pode estar relacionada à presença de regiões amorfas e à menor ordem cristalina, características frequentemente observadas em hidroxiapatitas obtidas por precipitação química em baixas temperaturas.

Dessa forma, os resultados de DRX demonstraram que ambas as rotas foram eficazes na obtenção da fase hidroxiapatita; contudo, o método Pechini favoreceu a formação de materiais com maior cristalinidade e pureza de fase, enquanto a precipitação química resultou em uma hidroxiapatita nanométrica com menor organização estrutural. Esses resultados evidenciam que a rota de síntese exerce influência direta nas propriedades cristalográficas da hidroxiapatita, podendo impactar seu desempenho em aplicações biomédicas.

As Figuras 2(a) e 2(b) ilustram as curvas de TG e DTG das amostras HAp1 (a) e HAp2 (b) sintetizadas pelo método Pechini e precipitação química, respectivamente.

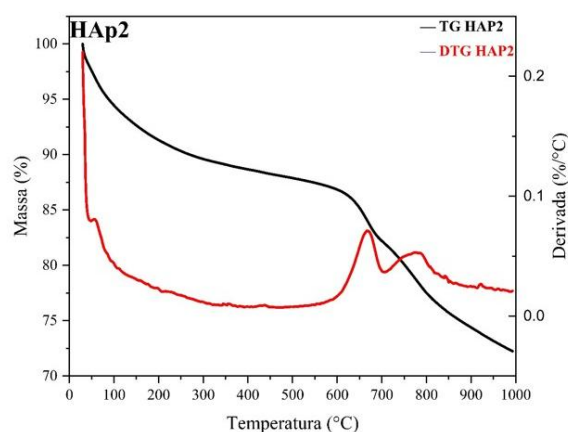
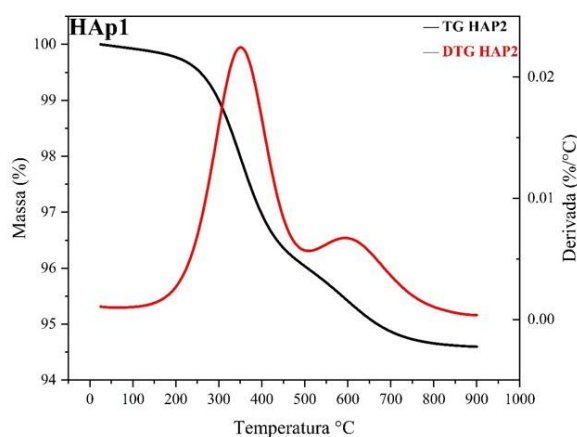


Figura 2. Curvas de TG e DTG das amostras HAp1 (a) e HAp2 (b) sintetizadas pelo método Pechini e precipitação química, respectivamente.

As análises evidenciam diferenças significativas no comportamento térmico das amostras, demonstrando a influência da rota de síntese na estabilidade térmica e na composição superficial dos materiais obtidos. Ambas as amostras apresentaram 3 eventos de degradação térmica.

A amostra HAp1, sintetizada pelo método Pechini, apresentou o primeiro evento térmico entre 25 °C e 200 °C, onde 1,9% da massa foi degradada. Este evento foi referente à remoção de água adsorvida fisicamente e à desidratação superficial do material. Essa etapa está relacionada à eliminação de

moléculas de água fracamente ligadas à superfície dos nanocristais de hidroxiapatita (Karampour *et al.*, 2022; Jagadale *et al.*, 2016).

O segundo evento, observado entre 200 °C e 550 °C, onde 2,3% da massa foi degradada é atribuído à decomposição de resíduos orgânicos provenientes dos reagentes utilizados no método Pechini, especialmente ácido cítrico e etilenoglicol (Farias *et al.*, 2020). Esse comportamento confirma a presença residual de matéria orgânica remanescente da rota polimérica, mesmo após a etapa de pirólise.

Já o terceiro e último evento observado entre 550 °C e 800 °C onde 1,2% da massa foi degradada é associada à oxidação do carbono residual e à



descarbonatação parcial da amostra. (Farias *et al.*, 2020). Apesar desses eventos, a baixa variação total de massa evidencia a eficiência do tratamento térmico empregado e a elevada estabilidade estrutural da HAp1.

Por outro lado, a amostra HAp2, sintetizada pelo método de precipitação química, apresentou maior perda de massa total e comportamento térmico mais acentuado em comparação à HAp1. O primeiro evento de degradação iniciou em aproximadamente 30 °C, com uma perda de massa de 4,8%. Esse evento está relacionado à eliminação de água adsorvida à superfície da hidroxiapatita, característica comum em materiais obtidos por precipitação em meio aquoso (Karampour *et al.*, 2022).

O segundo evento térmico ocorreu entre 85 °C e 670 °C, apresentando perda de massa de aproximadamente 12,77%, sendo atribuído principalmente às reações de desidroxilação da hidroxiapatita (Babakhani; Peighambardoust; Olad, 2024). Esse comportamento indica a remoção

gradual de grupos hidroxila presentes na estrutura cristalina da HAp. O terceiro evento, observado entre 720 °C e 780 °C, com perda de massa de 6,28%, foi associado à decomposição de grupos carbonato incorporados ao material durante a síntese (Ahmed *et al.*, 2022).

Comparativamente, os resultados de TG/DTG demonstram que a hidroxiapatita sintetizada pelo método Pechini apresentou maior estabilidade térmica e menor perda de massa, associadas à elevada cristalinidade e pureza estrutural observadas nos resultados de DRX. Em contrapartida, a HAp obtida por precipitação química apresentou maior quantidade de água adsorvida, grupos hidroxila e carbonatos residuais, refletindo sua menor organização cristalina e maior área superficial decorrente do reduzido tamanho de cristalito. Dessa forma, as análises térmicas confirmam que a rota de síntese influencia diretamente a estabilidade térmica e as características estruturais da hidroxiapatita obtida.

Amostra	Temperatura Máxima de Decomposição Térmica (°C)			Variação da Massa (%)			
	1°	2°	3°	1°	2°	3°	Total
HAp1	100	360	610	1,87	2,31	1,22	5,40
HAp2	60	670	780	4,80	12,80	6,28	23,88

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que ambas as rotas de síntese foram eficazes na obtenção da fase hidroxiapatita, conforme confirmado pelas análises de difração de raios X. Entretanto, diferenças significativas foram observadas nas propriedades estruturais e térmicas dos materiais sintetizados pelos métodos Pechini e precipitação química.

A hidroxiapatita obtida pelo método Pechini apresentou elevada cristalinidade (90,7%), maior tamanho médio de cristalito (64,7 nm) e ausência de fases secundárias, evidenciando elevada pureza e organização estrutural. Além disso, a análise termogravimétrica revelou baixa perda de massa e maior estabilidade térmica, associadas à eficiência do tratamento térmico empregado e à elevada homogeneidade química promovida pela rota polimérica.

Por outro lado, a hidroxiapatita sintetizada por precipitação química apresentou menor cristalinidade (63,54%) e menor tamanho médio de cristalito (18,61 nm), caracterizando um material nanocristalino. As análises térmicas indicaram maior perda de massa, associada à presença de água adsorvida, reações de desidroxilação e decomposição de grupos carbonato incorporados ao material durante a síntese.

De forma geral, os resultados evidenciaram que a rota de síntese exerce influência direta nas propriedades cristalográficas e térmicas da hidroxiapatita. O método Pechini favoreceu a obtenção de materiais mais cristalinos e termicamente estáveis, enquanto a precipitação química possibilitou a formação de hidroxiapatita nanométrica com menor organização estrutural.

REFERÊNCIAS



Ahmed, L. O.; Bulut, N.; Kebiroglu, H.; Alkhedher, M.; Ates, T.; Koytepe, S.; Ates, B.; Kaygili, O.; El Din, E. M. T. Effects of Yttrium Doping on Erbium-Based Hydroxyapatites: Theoretical and Experimental Study. **Materials**, v. 15, n. 7211, 2022.

Babakhani, A.; Peighambaroust, S. J.; Olad, A. Fabrication of magnetic nanocomposite scaffolds based on polyvinyl alcohol-chitosan containing hydroxyapatite and clay modified with graphene oxide: Evaluation of their properties for bone tissue engineering applications. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v.150, n. 106263, 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.

Campisi, S.; Galloni, M. G.; Gervasini, A. Unlocking Catalytic Efficiency: How Preparation Strategies and Copper Loading Enhance Hydroxyapatite Catalysts for NH₃ Oxidation. **Catalysts**, vol. 15, n. 4, 2025.

Cescon, M.; Chiefa, F.; Chenet, T.; Mancinelli, M.; Stevanin, C.; Martucci, A.; Pasti, L. Hydroxyapatite-Based Adsorbent Materials from Aquaculture Waste for Remediation of Metal-Contaminated Waters: Investigation of Cadmium Removal. **Clean Technologies**, vol. 7, n. 2, 2025.

Edahwati, L.; Sutiyo, S.; Ikaputri, A.; Fuadzi, M. N. Application Of The Sol-Gel Hydroxapatite Synthesis Method From Green Clam Shell. **International Journal of Science, Technology & Management**, vol. 4, n. 4, 2023.

Etinosa, P. O.; Osuchukwu, O. A.; Anisiji, E. O.; Lawal, M. Y.; Mohammed, S. A.; Ibitoye, O. I.; Oni, P. G.; Aderibigbe, V. D.; Aina, T.; Oyebo, D.; Nwigbo, S. C. In-depth review of synthesis of hydroxyapatite biomaterials from natural resources and chemical reagents for biomedical applications. **Arabian Journal of chemistry**, vol. 17, n. 12, 2024.

Farias, J. R. S.; Carvalho, G. K. G.; Braga, A. N. S. Cerâmicas de fosfatos de cálcio bifásicas: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n.2, p.54-70, 2020.

Karampour, H.; Parsa, M. A.; Moghadam, A. H.; Pourhasan, B.; Ashiri, R. Facile solution-based synthesis of impurity-free hydroxyapatite

nanocrystals at ambient conditions. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 16, p. 656-674, 2022.

Kawsar, M.; Hossain, M. S.; Bahadur, N. M.; Islam, D.; Ahmed, S. Crystalline structure modification of hydroxyapatite via a hydrothermal method using different modifiers. **Materials Advances**, n.12, p.3889-3902, 2025.

Kareem, Z.; Eyler, E. Synthesis of hydroxyapatite from eggshells via wet chemical precipitation: a review. **RSC Advances**, v. 14, n.30 , p.21439-21452, 2024.

Kilpadi, K.L.; Chang, P.L.; Bellis, S.L. Hydroxylapatite binds more serum proteins, purified integrins, and osteoblast precursor cells than titanium or steel. **Journal of Biomedical Materials Research**, p. 258–267, 2001.

Mondal, S.; Park, S.; Choi, J.; Vu, T. T. H.; Doan, V. H. M.; Vo, T. T.; Lee, B.; Oh, J. Hydroxyapatite: A journey from biomaterials to advanced functional materials. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol. 321, n. 103013, 2023.

Nikolenko, M. V.; Vasylenko, K. V.; Myrhorodska, V. D.; Kostyniuk, A.; Likozar, B. Synthesis of Calcium Orthophosphates by Chemical Precipitation in Aqueous Solutions: The Effect of the Acidity, Ca/P Molar Ratio, and Temperature on the Phase Composition and Solubility of Precipitates. **Processes**, vol. 8, n. 9, 2020.

Omiyale, O. Towards Transformative Healthcare Applications: Biomimetic Hydroxyapatite Systems for Controlled Drug Delivery. **Chemistry Proceedings**, vol. 18, n. 1, 2025.

Omori, Y.; Okada, M.; Takeda, S.; Matsumoto, N. Fabrication of dispersible calcium phosphate nanocrystals via a modified Pechini method under non-stoichiometric conditions. **Materials Science and Engineering: C**, v. 42, p.562-568, 2014.

Pramono, A.; Timuda, G. E.; Rifai, G. P. A.; Khaerudini, D. S. Synthesis of Spinel-Hydroxyapatite Composite Utilizing Bovine Bone and Beverage Can. **Crystals**, v. 12, n. 96, 2022.

Pechini, M. P., Method of preparing lead and alkaline earth titanates and niobates and coating method using the same to form a capacitor, **U.S. Patent** 3.330.697, 1967



Rial, R.; González-Durruthy, M.; Liu, Z.; Ruso, J. M. Advanced Materials Based on Nanosized Hydroxyapatite. **Molecules**, vol. 26, n. 11, 2021.

Salimi, M. N.; Bridson, R. H.; Grover, L.; Leeke, G. A. Effect of Processing Conditions on the Formation of Hydroxyapatite Nanoparticles. **Powder Technology**, v. 218, p. 109–118, 2013.

Samadi, S.; Jaymand, M.; Rahimpour, F. Bioinspired electroconductive and antibacterial nanocomposite hydrogel composed of hyaluronic acid, aniline tetramer and clay as a scaffold for bone tissue engineering application. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2025.

Santos, M. L.; Florentino, A. O.; Saeki, M. J.; Aparecida, A. H.; FOOK, M. V. L.; Guastaldi, A. C. Síntese de hidroxiapatita pelo método sol-gel utilizando precursores alternativos: nitrato de cálcio e ácido fosfórico. **Eclética Química**, v.30, p. 29-35, 2005.

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

Taghipour, P.; Zolfagharpour, F.; Daneshvar, H. Synthesis of hydroxyapatite through solid-state reaction method and study of its thermoluminescence dosimetric properties against gamma rays. **Radiation Physics and Engineering**, vol. 3, n. 2, p. 7-10, 2022.

Yang, K.; Li, C.; Liu, X.; Zhu, Y.; Du, X.; Zhao, J.; Zhang, Y.; Yu, Q.; Hu, M.; Huang, L.; Zhang, Z. Ion-exchange engineering of amorphous MnO₂/bio-hydroxyapatite catalyst enables low-temperature toluene abatement with H₂O and SO₂ resistance. **Separation and Purification Technology**, vol. 379, 2025.

Zhou, H.; Lee, J. Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering. **Acta Biomaterialia**, v.7, p. 2769–2781, 2011.