

# ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS PERSPECTIVAS

## Organizadores

Érica Karine Alves de Lima  
Elaine Ferreira dos Santos Fernandes  
Geysivana Késsya Garcia Carvalho  
Erica Ianne da Silva Sousa  
José Rosa de Souza Farias  
Ketelly Estefane da Silva Alves  
Valdeci Bosco dos Santos  
Veruska do Nascimento Simões  
Victória Régia Alves Sales  
Ycaro Breno Alves de Almeida  
Aluska do Nascimento Simões Braga  
Diogenes de Moura Júnior

**VOLUME 3**

EDITORA  
OMNIS SCIENTIA



# ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS PERSPECTIVAS

## Organizadores

Érica Karine Alves de Lima  
Elaine Ferreira dos Santos Fernandes  
Geysivana Késsya Garcia Carvalho  
Erica Ianne da Silva Sousa  
José Rosa de Souza Farias  
Ketelly Estefane da Silva Alves  
Valdeci Bosco dos Santos  
Veruska do Nascimento Simões  
Victória Régia Alves Sales  
Ycaro Breno Alves de Almeida  
Aluska do Nascimento Simões Braga  
Diogenes de Moura Júnior

**VOLUME 3**

EDITORA  
OMNIS SCIENTIA



Editora Omnis Scientia

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS: NOVAS  
PERSPECTIVAS**

Volume 3

1ª Edição

TRIUNFO - PE

2023

**Editor-Chefe**

Me. Daniel Luís Viana Cruz

**Organizadores**

Érica Karine Alves de Lima

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes

Geysivana Késsya Garcia Carvalho

Erica Ianne da Silva Sousa

José Rosa de Souza Farias

Ketelly Estefane da Silva Alves

Valdeci Bosco dos Santos

Veruska do Nascimento Simões

Victória Régia Alves Sales

Ycaro Breno Alves de Almeida

Aluska do Nascimento Simões Braga

Diogenes de Moura Júnior

**Conselho Editorial**

Dr. Cássio Brancalone

Dr. Marcelo Luiz Bezerra da Silva

Dra. Pauliana Valéria Machado Galvão

Dr. Plínio Pereira Gomes Júnior

Dr. Walter Santos Evangelista Júnior

Dr. Wendel José Teles Pontes

**Editores de Área - Ciências da Saúde**

Dra. Camyla Rocha de Carvalho Guedine

Dra. Cristieli Sérgio de Menezes Oliveira

Dr. Leandro dos Santos

Dr. Hugo Barbosa do Nascimento

Dr. Marcio Luiz Lima Taga

Dra. Pauliana Valéria Machado Galvão

**Assistente Editorial**

Thialla Larangeira Amorim

## **Imagem de Capa**

Freepik

## **Edição de Arte**

Vileide Vitória Larangeira Amorim

## **Revisão**

Os autores



**Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons – Atribuição-  
NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.**

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

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

A532 Análise e desenvolvimento de materiais cerâmicos : novas perspectivas : volume 3 [recurso eletrônico] / organizadores Érica Karine Alves de Lima ... [et al.]. — 1. ed. — Triunfo : Omnis Scientia, 2023. Dados eletrônicos (pdf).

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-6036-166-9

DOI: 10.47094/978-65-6036-166-9

1. Material cerâmico. 2. Engenharia de materiais.  
3. Cerâmica (Tecnologia). I. Lima, Érica Karine Alves de.  
II. Título.

CDD23: 620.11

Bibliotecária: Priscila Pena Machado – CRB-7/6971

**Editora Omnis Scientia**

Triunfo – Pernambuco – Brasil

Telefone: +55 (87) 99656-3565

[editoraomnisscientia.com.br](http://editoraomnisscientia.com.br)

[contato@editoraomnisscientia.com.br](mailto:contato@editoraomnisscientia.com.br)



# PREFÁCIO

Historicamente, os cerâmicos são uns dos materiais mais antigos do mundo, em virtude do seu emprego desde a pré-história. São compostos inorgânicos formados por elementos metálicos e não metálicos, ligados através de ligações iônicas e/ou covalentes. As propriedades destes materiais são determinadas pelo tipo de ligação atômica, seu caráter amorfo ou cristalino, bem como pelos métodos de seu processamento. São caracterizados por apresentar propriedades tais como: resistência a altas temperaturas e a corrosão, dureza, são isolantes térmicos e elétricos.

Cerâmicas a base de argilas, como peças decorativas, louças de mesa e relacionadas com a construção civil (louças sanitárias, cimento, tijolos, revestimento de piso ou parede), são classificadas como cerâmicas tradicionais. São elaboradas a partir de materiais naturais (ou pouco beneficiadas), de pureza variável, e com pouca exigência de controle em seu processamento.

As cerâmicas avançadas ou cerâmicas de Engenharia são produzidas a partir de matérias primas sintéticas (óxidos, nitretos, carbetos e outros) ou beneficiadas industrialmente, com alto grau de pureza, e processamento controlado rigidamente. Estas cerâmicas são utilizadas em aplicações tecnológicas, estando presentes nas indústrias de componentes eletrônicos, de comunicação, automotiva, naval, aeroespacial, biomédica, e em muitas outras áreas industriais.

Tendo em vista a importância dos materiais cerâmicos ao promover um resultado significativo na sociedade, visto que estão presentes em diferentes aplicações indústrias, este livro apresenta diferentes pesquisas relacionadas a estudos originais e de revisões bibliográficas na abordagem dessa área da ciência e engenharia de materiais.

Os organizadores.

# SUMÁRIO

## **CAPÍTULO 1.....11**

### **ANÁLISE DO USO DO ESTRÔNCIO (Sr) COMO ÍON DOPANTE NA SÍNTESE DO BETA FOSFATO TRICÁLCICO ( $\beta$ -TCP): UM ESTUDO PROSPECTIVO**

José Rosa de Souza Farias

Victória Régia Alves Sales

Ycaro Breno Alves de Almeida

Geysivana Késsya Garcia Carvalho

Maysa Memória Martins

Erica Ianne da Silva Sousa

Veruska do Nascimento Simões

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes\_

Érica Karine Alves de Lima\_

Maria Elayne Rodrigues Alves

Valdeci Bosco dos Santos

Aluska do Nascimento Simões Braga

**DOI: 10.47094/978-65-6036-166-9/11-27**

## **CAPÍTULO 2.....28**

### **INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO NA OBTENÇÃO DE MULITA POR MEIO DA ROTA SOL-GEL**

José Rosa de Souza Farias

Geysivana Késsya Garcia Carvalho

Gabriel Lima Bastos

Erica Ianne da Silva Sousa

Ycaro Breno Alves de Almeida

Veruska do Nascimento Simões

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes\_

Ketelly Estefane da Silva Alves

Hitalo de Jesus Bezerra da Silva

Humberto Denys de Almeida Silva

Valdeci Bosco dos Santos

Aluska do Nascimento Simões Braga

**DOI: 10.47094/978-65-6036-166-9/28-36**

**CAPÍTULO 3.....37**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE RESÍDUOS INDUSTRIAL/AGROINDUSTRIAL NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA CIMENTÍCIA**

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes

Érica Karine Alves de Lima

Ketelly Estefane da Silva Alves

Maria Elayne Rodrigues Alves

Hitalo de Jesus Bezerra da Silva

José Rosa de Souza Farias

Naiara de Oliveira Sobrinho

Geysivana Késsya Garcia Carvalho

Maysa Memória Martins

Veruska do Nascimento Simões

Aluska do Nascimento Simões Braga

Valdeci Bosco dos Santos

**DOI: 10.47094/978-65-6036-166-9/37-47**

**CAPÍTULO 4.....48**

**ALFA FOSFATO TRICÁLCICO COMO BIOMATERIAL: UMA BREVE REVISÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES.**

Victória Régia Alves Sales

José Rosa de Souza Farias

Geysivana Késsya Garcia Carvalho

Erica Ianne da Silva Sousa

Gabriel Lima Bastos

Ycaro Breno Alves de Almeida

Diógenes de Moura Júnior

Veruska do Nascimento Simões

Pedro Afonso Amorim de Sousa

Thaynã Leite de Alencar

Valdeci Bosco dos Santos

Aluska do Nascimento Simões Braga

**DOI: 10.47094/978-65-6036-166-9/48-63**

## CAPÍTULO 4

### ALFA FOSFATO TRICÁLCICO COMO BIOMATERIAL: UMA BREVE REVISÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES.

**Victória Régia Alves Sales<sup>1</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/4380086092580232>

**José Rosa de Souza Farias<sup>2</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/9404467330103347>

**Geysivana Késsya Garcia Carvalho<sup>3</sup>;**

Christus Faculdade do Piauí (CHRISFAPI), Piripiri, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/0242153749540840>

**Erica Ianne da Silva Sousa<sup>4</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/4888137102478661>

**Gabriel Lima Bastos<sup>5</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<https://lattes.cnpq.br/2549357911573252>

**Ycaro Breno Alves de Almeida<sup>6</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/4070307554924095>

**Diógenes de Moura Júnior<sup>7</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/5791161214413731>

**Veruska do Nascimento Simões<sup>8</sup>;**

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

<http://lattes.cnpq.br/1149592827133122>

**Pedro Afonso Amorim de Sousa<sup>9</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/0245791983108999>

**Thaynã Leite de Alencar<sup>10</sup>;**

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/3866453455128642>

**Valdeci Bosco dos Santos<sup>11</sup>;**

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

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), Teresina, Piauí.

<http://lattes.cnpq.br/0011700686113389>

**Aluska do Nascimento Simões Braga<sup>12</sup>.**

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

<http://lattes.cnpq.br/2429557575387821>

**RESUMO:** Os biomateriais são amplamente estudados para regeneração óssea e implantes. O  $\alpha$ -TCP é destacado devido a suas propriedades, como solubilidade controlada e estabilidade térmica. No entanto, possui limitações na síntese de soluções aquosas. Estudos buscam melhorar suas propriedades e desempenho, com avanços promissores na integração entre implante e osso circundante. Estratégias de liberação controlada de fármacos que incorporam o  $\alpha$ -TCP em cimentos também são exploradas, fornecendo perspectivas positivas para sua utilização em engenharia tecidual, ortopedia e odontologia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alfa fosfato tricálcio. Revisão Bibliográfica. Biocerâmicas. Fosfatos de cálcio. Aplicações Biomédicas.

## **ALFA TRICALCIUM PHOSPHATE AS A BIOMATERIAL: A BRIEF REVIEW OF PROPERTIES AND APPLICATIONS**

**ABSTRACT:** Biomaterials are extensively studied for bone regeneration and implants. Alpha-TCP is highlighted due to its properties, such as controlled solubility and thermal stability. However, it has limitations in the synthesis of aqueous solutions. Studies aim to improve its properties and performance, with promising advances in the integration between the implant and the surrounding bone. Controlled drug release strategies incorporating alpha-TCP into cements are also being explored, providing positive prospects for its use in tissue engineering, orthopedics, and dentistry.

**KEY-WORDS:** Alpha tricalcium phosphate. Literature Review. Bioceramics. Calcium Phosphates. Biomedical Applications.

## INTRODUÇÃO

Em decorrência do aumento da expectativa de vida do homem, bem como, o bem-estar e saúde em geral, verificou-se nas últimas décadas, um progressivo interesse da sociedade científica no desenvolvimento de novos materiais sintéticos no intuito de se aperfeiçoar e/ou solucionar questões relacionadas às recuperações estruturais ósseas, enxertos, implantes, cirurgias ortopédicas, plásticas, buço-maxilofaciais e odontológicas (Volkmer e Santos, 2007).

Os materiais utilizados para tal finalidade são denominados biomateriais e devem apresentar a interação de muitas e complexas propriedades físicas, químicas e biológicas compatíveis aos tecidos vivos hospedeiros (Tabata, 2009). Assim, um biomaterial pode ser definido como qualquer material, natural ou artificial, que compreende o todo ou uma parte de uma estrutura viva ou um dispositivo biomédico que executa, acrescenta ou substitui uma função natural (Chim e Gosain, 2009; Park e Lakes, 2007).

O critério para a escolha de um biomaterial para uma determinada aplicação pode ser feito de acordo com a similaridade química ou física que o material apresenta em comparação com o tecido a ser substituído (Williams, 1987). Para isso há a necessidade do entendimento e do domínio, não apenas da preparação do biomaterial, mas também das respostas celulares que ele origina. Logo, um biomaterial tem como função principal, por exemplo, não só o preenchimento de um espaço vazio originado pela perda do tecido, como também promover resposta celular local adequada. Ademais, para que seja um biomaterial adequado, não se deve causar danos locais ou sistêmicos (tóxicos, carcinogênicos ou radioativos) e deve ser biocompatível (Rogerio et al., 2003).

Dessa forma, dentre os diversos biomateriais existentes, as biocerâmicas de fosfato de cálcio merecem lugar de destaque na área médica devido a uma série de características, tais como: ausência de toxicidade local, ausência de respostas a corpo estranho ou inflamações e habilidade em se ligar ao tecido hospedeiro. Esses fatores têm como explicação a natureza química destes materiais, isso porque eles são formados basicamente por íons cálcio e fosfato, que participam ativamente do equilíbrio iônico entre o fluido biológico e a cerâmica (Ratner, 2004; Junfeng e Xun, 2014).

Dentre os fosfatos de cálcio, o  $\alpha$ -fosfato tricálcico ( $\alpha$ -TCP), com fórmula química  $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , vem sendo amplamente utilizado devido às suas propriedades notáveis. O  $\alpha$ -TCP apresenta alta solubilidade em meios líquidos específicos, permitindo sua interação controlada com o ambiente circundante. Além disso, o  $\alpha$ -TCP é caracterizado por sua estabilidade mesmo em altas temperaturas, tornando-o adequado para aplicações em ambientes com condições térmicas desafiadoras. Essas propriedades do  $\alpha$ -TCP são essenciais no estudo e desenvolvimento de materiais biomédicos, bem como em aplicações relacionadas à regeneração óssea através de cimentos ósseos e e fixação de implantes ortopédicos, onde a estabilidade térmica e a solubilidade desempenham um papel fundamental (Tronco et al., 2022; Canul-Chuil et al., 2003; Burdyńska et al., 2013).

Diante do supramencionado, este trabalho tem por objetivo apresentar de forma clara e objetiva, uma breve revisão acerca do alfa fosfato tricálcio, evidenciando os principais conceitos, propriedades e as principais aplicações biomédicas.

## **REVISÃO DE LITERATURA**

### **FOSFATOS DE CÁLCIO**

Fosfatos de cálcio são compostos constituídos por três elementos químicos principais: cálcio, fósforo e oxigênio; e além destes o hidrogênio que também pode ser encontrado como constituinte do ânion. As diferenças nas proporções entre estes elementos e o fator de hidratação, provocam a existência de uma série de compostos, que podem ser classificados a partir do ânion fosfato presente como orto ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), meta ( $\text{PO}_3$ ), piro ( $\text{P}_2\text{O}_4^{4-}$ ) e poli  $[(\text{PO})_n]$ . Os ânions multivalentes são identificados pelo número de íons hidrogênio ligados como o mono-  $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ , di- ( $\text{CaHPO}_4$ ), tri-  $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$  e tetra- ( $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ) fosfato de cálcio, onde os prefixos-monoll, -dil, -tril e -tretall indicam o número de íons hidrogênio que foram substituídos pelo íon cálcio (Araujo, 2016). Os fosfatos de cálcio naturais ou sintéticos abrangem uma ampla família de materiais cerâmicos, e se destacam entre os biomateriais e biocerâmicas, pois são altamente biocompatíveis e em contato com os tecidos vivos sofrem dissolução, disponibilizando íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e hidrogeno fosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) para o meio (Dorozhkin, 2011).

Atualmente, os fosfatos de cálcio apresentam-se como os principais compostos estudados e empregados como biomateriais para a reposição e regeneração do tecido ósseo, pois apresentam como principais características: semelhança com a fase mineral de ossos; dentes e tecidos calcificados. Além disso, apresentam excelentes vantagens como a biocompatibilidade; bioatividade; ausência de toxicidade local ou sistêmica; ausência de resposta a corpo estranho ou inflamações; aparente habilidade em se ligar ao tecido hospedeiro; taxas de degradação variáveis e osteocondutividade (Epple et al., 2010; Masseli, 2018; Samavedi et., 2013).

Dessa forma, durante décadas a hidroxiapatita foi a única biocerâmica do sistema dos fosfatos de cálcio empregada como biomaterial para a reposição e regeneração óssea. Entretanto, o reconhecimento de suas limitações para o uso clínico, devido a sua lenta biodegradação, levou ao interesse crescente para a aplicação de outros fosfatos de cálcio, como o fosfato de cálcio amorfo (ACP) e os fosfatos tricálcicos (TCP). Assim, além da Hap, os fosfatos tricálcicos têm sido utilizados para fins de aplicação como biomateriais (Pavinato, 2012).

Devido ao seu comportamento biodegradável, o TCP nas formas alotrópicas  $\alpha$  e  $\beta$  tem se tornado objeto de interesse na área de biomateriais, sendo utilizado na ortopedia e odontologia como material de preenchimento de cavidades e defeitos ósseos e fixação

de tecidos moles (Gomes et al., 2012). Com fórmula química  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , os fosfatos tricálcio não são estáveis em solução aquosa ou em presença de umidade, o que leva um incremento das pesquisas sobre estes biomateriais, devido a facilidade de dissolução no meio biológico (Raymay e Zhang, 2004).

Segundo Bignon (2002) o TCP acima de  $800^\circ\text{C}$  apresenta-se sob três fases polimórficas: uma romboédrica estável até temperaturas próximas de  $1125^\circ\text{C}$  denominada de fase beta ( $\beta$  – TCP); uma fase monoclinica, estável na faixa de temperatura entre  $1125$  a  $1430^\circ\text{C}$  chamada de fase alfa ( $\alpha$  – TCP) e uma fase de alta temperatura (acima de  $1430^\circ\text{C}$ ) denominada de super alfa ou alfa' (super  $\alpha$  – TCP ou  $\alpha'$ –TCP).

Segundo Oliveira (2010), estas fases se decompõem conforme esquema representado na Figura 1 a seguir:

**Figura 1.** Esquema de decomposição dos fosfatos tricálcio (Oliveira, 2010).



Na formação do fosfato tricálcico a fase estável a baixa temperatura é o  $\beta$ -TCP, que a  $1125^\circ\text{C}$  se transforma em  $\alpha$ -TCP. Esta última fase é estável até  $1430^\circ\text{C}$ , quando se transforma em  $\alpha'$ -TCP estável até a temperatura de fusão. A transformação  $\beta$ -TCP em  $\alpha$ -TCP é lenta e reversível, o que exige, para a obtenção do  $\alpha$ -TCP de maior pureza, a utilização de tempos de patamar elevados a temperaturas superiores a  $1200^\circ\text{C}$  e resfriamento brusco asseguram a máxima conversão e preservação da fase  $\alpha$ -TCP à temperatura ambiente (Alves, 2005).

## FOSFATO TRICÁLCIO

Dentre os fosfatos de cálcio, o alfa fosfato tricálcio ( $\alpha$ -TCP), com fórmula química  $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , apresenta uma estrutura cristalina relacionada à do mineral glaserita ( $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ ), conforme descrito por Dickens e Brown (1972). Essa estrutura foi posteriormente estudada em detalhes por Mathew et al. (1977) e mais recentemente por Yashima e Sakai (2003). O  $\alpha$ -TCP cristaliza no sistema cristalino monoclinico e pertence ao grupo espacial  $\text{P2}_1/\text{a}$ .

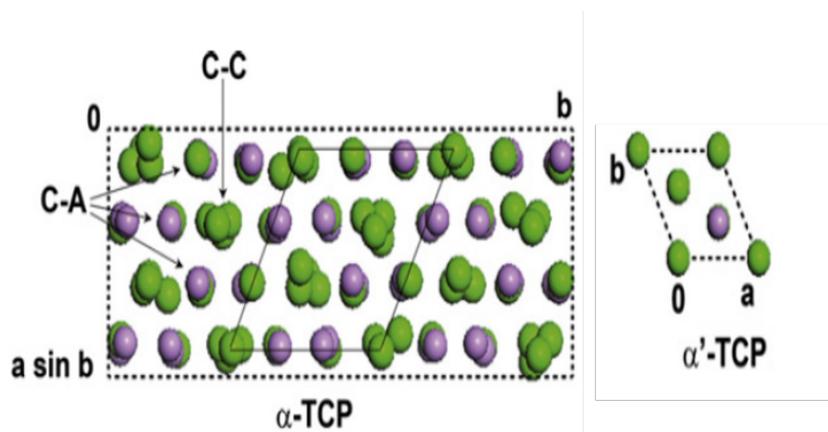
Os parâmetros da célula unitária ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ), o volume da célula ( $V$ ), o número de unidades de fórmula por célula ( $Z$ ), o volume por unidade de fórmula ( $V_0$ ), a densidade teórica ( $D_{\text{th}}$ ) e as projeções das células unitárias ao longo da direção  $[0\ 0\ 1]$  são exibidos na tabela 1, respectivamente, para o  $\alpha$ -TCP, assim como seu polimorfo  $\alpha'$ -TCP (Mathew et al. 1977; Yashima e Sakai, 2003).

**Tabela 1.** Dados estruturais do  $\alpha$ -TCP e seu polimorfo  $\alpha'$ -TCP (Yashima e Sakai, 2003).

Propriedade	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ polimorfo	
	$\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\alpha'\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
Simetria	Monoclínica	Hexagonal
Grupo de espaço	$P2_1/a$	$P6_3/mmc$
a (nm)	1,2859(2)	0,53507(8)
b (nm)	2,7354(2)	0,53507(8)
c (nm)	1,5222(3)	0,7684(1)
$\alpha$ (°)	90	90
$\beta$ (°)	126.35(1)	90
$\gamma$ (°)	90	120
Z	24	1
V (nm <sup>-3</sup> )	4,31(6)	0,19052(8)
V <sub>0</sub> (nm <sup>-3</sup> )	0,180(6)	0,19052(8)
D <sub>th</sub> (gcm <sup>-3</sup> )	2,866	2,702

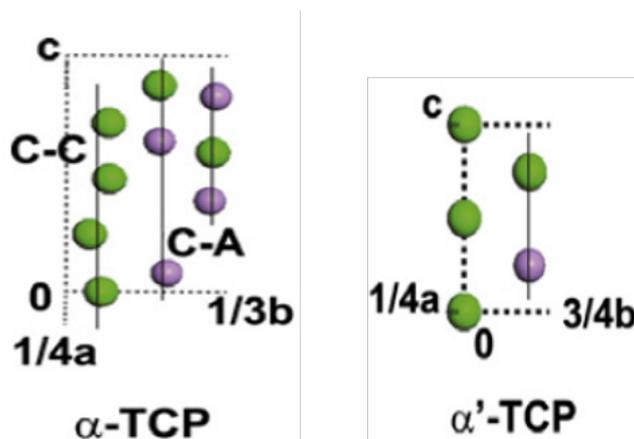
As células unitárias do  $\alpha$ -TCP e seus polimorfos são compostas por colunas de íons Ca e  $\text{PO}_4$  dispostas ao longo da direção [0 0 1]. No  $\alpha$ -TCP, existem dois tipos de colunas: C-C e C-A. A coluna C-C, representada nas Figuras 2 e 3, contém apenas cátions de Ca, enquanto a coluna C-A contém tanto cátions de Ca quanto ânions de  $\text{PO}_4$ . Cada coluna C-C é cercada por seis colunas C-A, e, por sua vez, cada coluna C-A é envolvida por seis colunas C-C e C-A alternadas. É importante ressaltar que as colunas C-C exibem uma distorção considerável em relação à linha reta, conforme mostrado na Figura 2 (Mathew et al. 1977).

**Figura 2.** Representação esquemática das projeções das células unitárias de  $\alpha$ -TCP e  $\alpha'$ -TCP ao longo da direção [0 0 1]. Átomos  $\text{Ca}^{2+}$  em verde e  $\text{P}^{5+}$  em roxo. Íons  $\text{O}^{2-}$  não foram representados para uma melhor clareza da estrutura. O losango de linha fina inscrito dentro da célula unitária de  $\alpha$ -TCP destaca uma célula relacionada à hidroxiapatita (Yashima e Sakai, 2003).



A Figura 2 apresenta um rombo delimitado por uma linha sólida fina dentro da célula unitária do  $\alpha$ -TCP, que se relaciona à célula da hidroxiapatita. Nessa estrutura, as colunas OH poderiam substituir as colunas C-C nos cantos da célula. Por analogia, as colunas  $\text{Ca-PO}_4$  na hidroxiapatita podem ser consideradas como colunas C-A “muito distorcidas”, sendo que cada coluna é cercada por três colunas C-A, assim como ocorre no  $\alpha$ -TCP, além de duas colunas C-C e uma coluna OH (Yashima e Sakai, 2003).

**Figura 3.** Projeções fracionárias das células unitárias de  $\alpha$ -TCP e  $\alpha'$ -TCP no plano bc, mostrando a disposição dos átomos constituintes em colunas orientadas ao longo da direção [0 0 1].



O  $\alpha$ -fosfato tricálcico ( $\alpha$ -TCP) apresenta propriedades notáveis, como seu alto grau de solubilidade em meios líquidos específicos. Essa característica permite que o  $\alpha$ -TCP se dissolva e interaja com o ambiente circundante de forma controlada (Elliot, 1994). Além disso, o  $\alpha$ -TCP apresenta uma favorável biodegradação, biocompatibilidade e osteocondutividade. A taxa de absorção desse material é mais elevada quando comparada com o  $\beta$ -TCP (Liu et al. 2015; Yamada et al. 2007).

Ademais, mesmo quando exposto a temperaturas elevadas, o  $\alpha$ -TCP mantém sua estabilidade, tornando-o adequado para aplicações em ambientes com condições térmicas desafiadoras. É importante ressaltar que como o  $\alpha$ -TCP é metaestável à temperatura ambiente, somente sendo estável entre 1115 e 1465°C (Safronova et al., 2011), não é possível realizar sua síntese por precipitação de soluções aquosas e, para sua obtenção, é necessária a realização de reações em estado sólido sob altas temperaturas à partir de precursores de cálcio e fósforo em relação Ca/P de aproximadamente 1,5 (Fathi et al., 2015).

Por consequência, este fosfato de cálcio pode ser obtido por reações em estado sólido em altas temperaturas a partir de composto(s) precursor(es) que contenham íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $(\text{PO}_4)^{3-}$  e uma relação Ca/P aproximadamente igual a 1,5 (Safronova et al., 2011). Desse modo, as duas metodologias mais empregadas para a síntese de  $\alpha$ -TCP são a transformação térmica da Hidroxiapatita deficiente em cálcio (CDHA, Ca/P $\approx$ 1,5), fosfato de

cálcio amorfo (ACP),  $\beta$ -fosfato tricálcico ( $\beta$ -TCP) previamente obtidos (Kitamura et al. 2004; Camiré et al. 2005) ou a reação de estado sólido de compostos precursores sólidos em altas temperaturas (Camiré et al. 2005; Motisuke et al. 2009).

Logo, essas propriedades do  $\alpha$ -TCP desempenham um papel essencial no estudo e desenvolvimento de materiais biomédicos, bem como em aplicações relacionadas à engenharia tecidual, onde a estabilidade térmica e solubilidade do  $\alpha$ -TCP são fatores cruciais a serem considerados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

**Tabela 2.** Metodologia utilizada no artigo.

Base de dados	Science Direct
Condições das buscas	2023-2017
Artigos encontrados	110
Trabalhos elegíveis	64

Este estudo teve como objetivo realizar uma busca bibliográfica na base de dados Science Direct, no período de 2017 a 2023, a fim de identificar estudos relevantes sobre o alfa fosfato tricálcio ( $\alpha$ -TCP) e suas aplicações biomédicas. A palavra-chave “alfa fosfato tricálcio” foi utilizada como critério de busca, e foram considerados apenas artigos científicos. Inicialmente, foram encontrados 110 artigos na busca. Em seguida, esses artigos foram avaliados com base em seu título, resumo e conteúdo completo, levando em consideração sua relevância para o tema proposto. Após essa análise, 64 artigos foram considerados elegíveis e selecionados para análise mais detalhada.

A partir dos artigos elegíveis, foram extraídas informações pertinentes sobre as vantagens, desvantagens, aplicações ao uso do  $\alpha$ -TCP como material biomédico. Essas informações foram utilizadas para embasar a discussão presente neste artigo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, o  $\alpha$ -TCP foi amplamente utilizado como um material de enxerto ósseo devido às suas propriedades biocompatibilidade e capacidade de promover a regeneração óssea. Essa aplicação teve nas décadas de 1970 e 1980, com o uso do  $\alpha$ -TCP como um substituto de enxerto para preencher defeitos ósseos (Mathew et al., 1977; Monma e Kanazawa, 1976; Nancollas, 1982).

Posteriormente, estudos foram conduzidos para explorar as propriedades bioativas do  $\alpha$ -TCP, demonstrando sua capacidade de interação com os tecidos vivos e estimular a formação de osso novo. Tal descoberta abriu caminho para uma ampla gama de aplicações

na área de biomateriais (McAndrew et al., 1988).

Neste sentido, todos os estudos relatados indicaram claramente o potencial do  $\alpha$ -TCP para ser utilizado em implantes dentários. O material mostrou-se adequado para preencher defeitos ósseos em procedimentos de implantes dentários, promovendo a integração do implante com o osso circundante (Higashi et al., 1998).

Nos últimos anos, foram diversas as aplicações de materiais que incorporam o  $\alpha$ -TCP em cimentos. O  $\alpha$ -TCP tem sido utilizado para a liberação controlada de fármacos desses cimentos (Schröter et al., 2020). Ele pode ser usado como uma matriz para incorporar substâncias ativas, permitindo sua liberação gradual no local de implantação. Isso é particularmente relevante em aplicações como tratamentos de regeneração óssea ou controle de infecções (Ginebra et al., 2006).

Existem várias maneiras de preparar o  $\alpha$ -TCP, podendo ser obtido através de diferentes métodos, como a manufatura aditiva (impressão 3D). Uma das principais vantagens dessa abordagem é a completa cura do material antes de sua utilização, o que garante propriedades mais controladas e evita reações adversas (Ben-nissan, 2014).

Nesse sentido, Chinellato, et al. (2020) investigaram a aplicação da tecnologia de Manufatura Aditiva assistida por fluxo de gás para melhorar as propriedades mecânicas de amostras de biocerâmica feitas de fosfato  $\alpha$ -tricálcio ( $\alpha$ -TCP). Foram impressos tablets e scaffolds usando pós com diferentes tamanhos de partícula, incluindo partículas abaixo de 25  $\mu\text{m}$  que não seriam adequadas para a impressão convencional de jato de ligante. O estudo concluiu que a estabilização do leito de pó por meio de um fluxo de gás é essencial para a impressão 3D de pós com tamanho inferior a 25  $\mu\text{m}$ , permitindo uma deposição uniforme e resultando em uma densidade significativamente maior das peças impressas. Essa abordagem também melhorou a resolução alcançável e influenciou positivamente a microporosidade residual após a sinterização das peças. No entanto, observou-se no estudo que a maior densidade do material promoveu a formação de trincas nas amostras após a sinterização, o que pode afetar negativamente as propriedades mecânicas. Apesar disso, os scaffolds impressos com pó fino e a deposição de pó assistida por fluxo de gás apresentaram o melhor desempenho sob compressão, mesmo com a presença de trincas. Logo, o estudo concluiu que a utilização da tecnologia de Manufatura Aditiva assistida por fluxo de gás mostrou-se promissora para melhorar as propriedades mecânicas de estruturas de biocerâmica impressas, oferecendo densidade aprimorada, resolução aumentada e eliminação da necessidade de suportes adicionais. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais para mitigar o problema das trincas e otimizar ainda mais as propriedades dos produtos finais.

Kolmas, et al. (2017) sintetizaram dois pós de fosfato alfa-tricálcio  $\alpha$ -TCP (1) e  $\alpha$ -TCP (2) usando rotas ligeiramente diferentes, com o objetivo de investigar a influência do método de preparação nas propriedades físico-químicas do  $\alpha$ -TCP. Eles compararam esses pós sintetizados com um  $\alpha$ -TCP comercialmente puro ( $\alpha$ TCP-st) para análise estrutural. Para

realizar a caracterização, foram utilizadas técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X em pó (PXRD). A estrutura química das amostras foi determinada por meio de métodos espectroscópicos, incluindo espectroscopia de infravermelho médio (FT-IR), espectroscopia Raman e ressonância magnética nuclear de estado sólido (ssNMR). A área de superfície específica dos pós sintetizados foi medida usando o método BET com adsorção de nitrogênio. Os estudos revelaram diferenças na morfologia das amostras. O  $\alpha$ -TCP (1) apresentou pequenos grãos que formavam aglomerados com tamanho abaixo de 2  $\mu\text{m}$ , enquanto o  $\alpha$ -TCP (2) tinha uma tendência a formar aglomerados compactos com microporos abaixo de 5  $\mu\text{m}$ . A área de superfície específica do  $\alpha$ -TCP (1) foi cerca de 5 vezes maior do que a do  $\alpha$ -TCP (2) e próxima à do material de referência. A análise de difração de raios X demonstrou que o  $\alpha$ -TCP (1) era significativamente menos cristalino em comparação com o  $\alpha$ -TCP (2), enquanto a cristalinidade do  $\alpha$ -TCP (2) era comparável à da amostra padrão. Os experimentos de FT-IR e ssNMR indicaram que o  $\alpha$ -TCP (1) não era homogêneo e continha, além de fosfato alfa-tricálcio, fosfato de cálcio amorfo (ACP). Os autores sugerem que o ACP pode ser encontrado no interior dos aglomerados e, portanto, não é convertido em uma forma altamente cristalina em temperaturas mais elevadas. Logo, o estudo demonstrou que diferentes formas de moagem e tratamento térmico influenciam fortemente as propriedades características do  $\alpha$ -TCP obtido, incluindo sua cristalinidade, relação molar Ca/P, composição de fase e área superficial específica.

Vásquez et al. (2017) exploraram um novo método de formação de espuma manual para cimentos de fosfato de cálcio. O objetivo foi superar a falta de porosidade aberta intrínseca nesses cimentos, o que normalmente diminui a taxa de reabsorção e o crescimento ósseo quando implantados *In vivo*. Para isso, foram utilizadas misturas de cimento  $\alpha$ -TCP com uma fase líquida espumosa contendo diferentes concentrações de hidrogenofosfato de sódio e um surfactante não iônico. A pasta de cimento foi preparada através da mistura manual em um sistema de duas seringas conectadas por um tubo. Duas proporções diferentes de líquido para pó (L/P) foram utilizadas para preparar a pasta de cimento. Os resultados mostraram que as amostras de cimento apresentaram macroporos abertos com diâmetros superiores a 100 $\mu\text{m}$ . Além disso, foi observado que as amostras preparadas com menor relação L/P apresentaram menor porosidade, macroporosidade e distribuição de tamanho de poros. O estudo também avaliou a coesão da pasta de cimento em soluções líquidas, adicionando 2% em peso de alginato de sódio à fase líquida. Os resultados indicaram que a concentração do surfactante não afetou o grau de transformação do  $\alpha$ -TCP em Hap (hidroxiapatita). Logo, o estudo concluiu que o método de formação de espuma manual permitiu a obtenção de amostras de cimento com macroporosidade aberta e tamanho médio dos poros superior a 150 $\mu\text{m}$ . Além disso, o estudo sugeriu que a macroestrutura final dos cimentos espumados pode ser controlada variando as concentrações de fosfato e surfactante na fase líquida, bem como a relação L/P utilizada no processo.

Safranova, et al. (2020) realizaram um estudo *in vitro* para investigar a biocompatibilidade de uma cerâmica bifásica de fosfato  $\alpha$ ,  $\beta$ -tricálcio, obtida pelo recozimento de uma pré-

forma compacta à base de  $\beta$ -fosfato tricálcio em pó. Os resultados mostraram que, dentro de um período de 10 a 30 dias, a adesão das células-tronco da polpa dentária primária na superfície da cerâmica bifásica de fosfato  $\alpha$ ,  $\beta$ -tricálcio foi suprimida. Essa diminuição no número de células na superfície da cerâmica pode estar relacionada tanto ao nível de pH ácido resultante da hidrólise da fase mais solúvel do  $\alpha$ -fosfato tricálcio quanto à mudança na natureza da superfície devido à formação e crescimento de cristais de hidroxiapatita. Os estudos *in vitro* de biocompatibilidade foram realizados com uma cerâmica bifásica de fosfato  $\alpha$ ,  $\beta$ -tricálcio que possuía um alto teor de  $\alpha$ - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (~65%). Essas cerâmicas apresentaram composição química semelhante ao componente inorgânico do tecido ósseo. No entanto, os resultados indicaram que, ao serem usadas *in vivo*, essas cerâmicas devem ser examinadas com cautela devido à supressão da atividade celular. Logo, foi concluído que entre as razões para a supressão da atividade celular durante o estudo de biocompatibilidade, destacam-se a acidificação no ambiente próximo à superfície das cerâmicas contendo  $\alpha$ -tricálcio fosfato e uma mudança na morfologia da superfície causada pela formação de um cristal de placacamada com arestas vivas.

Ademais, Schiroky, et al (2021) avaliaram a influência do alfa-tricálcio fosfato ( $\alpha$ -TCP) nas propriedades físico-químicas de uma resina adesiva experimental e investigou as propriedades imediatas e de longo prazo da dentina afetada por cárie (CAD) após a remoção seletiva e restauração com a resina adesiva contendo ou não o  $\alpha$ -TCP. Foram formulados adesivos experimentais com e sem  $\alpha$ -TCP e realizadas análises de amolecimento em solvente, cinética de polimerização e grau de conversão. Dentes humanos com cárie foram restaurados com os adesivos experimentais e submetidos a testes imediatos e de longo prazo, incluindo resistência de união à microtração, dureza da dentina e deposição mineral. Os resultados mostraram que a adição de  $\alpha$ -TCP não afetou as propriedades dos adesivos dentais, como amolecimento em solvente e grau de conversão. A dureza inicial da dentina restaurada com a resina adesiva contendo  $\alpha$ -TCP foi maior do que no grupo controle. Não houve diferenças significativas na resistência de união entre os grupos. Após três meses, a dureza da CAD aumentou na região próxima à interface adesiva em ambos os grupos, indicando maior deposição mineral. Logo, o estudo concluiu que a adição de  $\alpha$ -TCP não afetou negativamente as propriedades dos adesivos dentais e não alterou a deposição mineral nem a resistência de união da dentina restaurada.

Nie, et al. (2023) realizaram a preparação de um filme de polidopamina (PDA) através da autopolimerização de dopamina em cimento de fosfato  $\alpha$ -tricálcio ( $\alpha$ -TCP). Em seguida, partículas de prata (Ag) foram imobilizadas *in situ* na superfície do PDA por meio de um método de imersão. A presença de PDA e Ag na composição do cimento de fosfato  $\alpha$ -tricálcio ( $\alpha$ -TCP) modificado foi confirmada por meio de análise XPS (Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X). Os resultados obtidos demonstraram que, após a modificação do revestimento com PDA e partículas de Ag, houve um aumento na rugosidade e no ângulo de contato do cimento, passando de 36,4 nm para 120 nm e de 18,8° para 58,8°, respectivamente. Além disso, a capacidade de mineralização do cimento modificado

foi significativamente aprimorada, resultando na formação de uma camada densa de hidroxiapatita (Hap) com uma espessura de 3,04  $\mu\text{m}$ . Adicionalmente, o cimento modificado apresentou uma taxa antibacteriana superior a 99%. Com base nesses resultados, o estudo concluiu que o método utilizado permitiu obter um cimento com boas propriedades bioativas e antimicrobianas. O revestimento simples e eficiente de polidopamina com partículas de prata imobilizadas in situ foi depositado com sucesso no cimento  $\alpha$ -TCP, resultando em um cimento modificado com maior capacidade de mineralização, excelentes propriedades antimicrobianas e adequada biossegurança.

## CONCLUSÃO

Deste modo, frente aos estudos na literatura envolvendo o  $\alpha$ -TCP, pode-se afirmar que esse material possui uma ampla gama de aplicações potenciais. Suas vantagens incluem biocompatibilidade, biodegradabilidade, capacidade de promover a regeneração óssea e a versatilidade em diversas aplicações. Dessa maneira, o  $\alpha$ -TCP tem sido explorado como uma matriz para a liberação controlada de fármacos, tanto na regeneração óssea quanto no controle de infecções. Um aspecto importante é o uso do  $\alpha$ -TCP em cimentos ósseos, que desempenham um papel fundamental no preenchimento de defeitos ósseos, promoção da regeneração óssea e fixação de implantes ortopédicos, como a fixação de fraturas e reconstruções ósseas. No entanto, é importante ressaltar que o método de síntese do  $\alpha$ -TCP apresenta algumas desvantagens, como a impossibilidade de sua síntese por precipitação de soluções aquosas. Para obtê-lo, são necessárias reações em estado sólido sob altas temperaturas, a partir de precursores de cálcio e fósforo. Apesar dessas limitações, diversos estudos estão em andamento com o objetivo de aprimorar o  $\alpha$ -TCP, buscando superar essas dificuldades e melhorar suas propriedades e desempenho. Logo, os resultados dessas pesquisas têm sido promissores, demonstrando avanços significativos no desenvolvimento e aplicação do  $\alpha$ -TCP como um material biomédico versátil e eficaz. Dessa forma, há perspectivas positivas para o futuro, com o aprimoramento contínuo e ampla utilização do  $\alpha$ -TCP como biomaterial, reforçando seu papel essencial nas áreas de engenharia tecidual, ortopedia e odontologia

## DECLARAÇÃO DE INTERESSES

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

## REFERÊNCIAS

Araújo, R. C. **Hidroxiapatitas organofuncionalizadas como sistemas para biorremediação de corante aniônico**. 2016. 100f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

Alves, H. L. R. **Cimento de fosfato tricálcico: síntese e influência de aditivos na sua injetabilidade**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPG - Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, 2005.

Bignon, L. **Optimization de la structure poreuse d'implants en phosphate de calcium pour application de comblement osseux et relargage in situ d'un principe actif**. Tese de doutorado. Institut National de Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

Burdyńska, S. M.; Mróz, W.; Czechowska, J.; Siek, D.; Zima, A. A.; Ślósarczyk, A.; Załączny, R. **Bioactivity of cement type bone substitutes**. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, v. 61, n. 2, 2013.

Camiré, C. L.; Saint-Jean, S. J.; Hansen, S.; McCarthy, I.; Lidgren, L. **Hydration characteristics of  $\alpha$ -tricalcium phosphates: Comparison of preparation routes**. Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics, v. 3, n. 2, p. 106-111, 2005.

Canul-Chuil, A. ; Vargas-Coronado, R. ; Cauich-Rodríguez, J. V. ; Martínez-Richa, A. ; Fernandez, E. ; Nazhat, S. N. **Comparative study of bone cements prepared with either HA or  $\alpha$ -TCP and functionalized methacrylates**. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, v. 64, n. 1, p. 27-37, 2003.

Chim, H.; Gosain, A. K. **Biomaterials in craniofacial surgery: experimental studies and clinical application**. Journal of Craniofacial Surgery, vol. 20, p. 29-33, 2009.

Chinellato, F.; Wilbig, J.; Al-Sabbagh, D.; Colombo, P.; Günster, J. **Gas flow assisted powder deposition for enhanced flowability of fine powders: 3D printing of  $\alpha$ -tricalcium phosphate**. Open Ceramics, v. 1, p. 100003, 2020.

Dorozhkin, S. V. **Calcium orthophosphates - Occurrence, properties, biomineralization, pathological calcification and biomimetic applications**. Biomater. Vol.1. p. 121-164, 2011.

Epple, M.; Ganesan, K.; Heumann, R.; Klesing, J.; Kovtun, A.; Neumann, S. **Application of calcium phosphate nanoparticles in biomedicine**. Journal of Materials Chemistry. Vol. 20, pp 18-23, 2010.

Fathi, M. ; El Yacoubi, A. ; Massit, A. ; Idrissi, B. C. E. **Wet chemical method for preparing high purity  $\beta$  and  $\alpha$ -tricalcium phosphate crystalline powders**. Int J Sci Eng Res, v. 6, n. 6, p. 139-42, 2015.

Ginebra, M. P.; Traykova, T.; Planell, J. A. **Calcium phosphate cements as bone drug delivery systems: a review**. Journal of controlled release, v. 113, n. 2, p. 102-110, 2006.

Gomes, L. C.; Di Lello, B. C.; Campos, J. B.; Sampaio, M. **Síntese e caracterização de**

**fosfatos de cálcio a partir da casca de ovo de galinha.** Cerâmica, v. 58, n. 348, p. 448-452, 2012.

Higashi, S. ; Ohsumi, T. ; Ozumi, K. ; Kuroki, K. ; Inokuchi, Y. ; e Terashita, M. **Evaluation of cytotoxicity of calcium phosphate cement consisting of  $\alpha$ -tricalcium phosphate and dicalcium phosphate dihydrate.** Dental materials journal, v. 17, n. 3, p. 186-194, 1998.

Higashi, S. ; Nagaya, T. ; Nagata, M. ; Shigemitsu, T. ; Nakamura, N. ; Ohtsuki, C. **Crystal structure and stability of  $\alpha$ -tricalcium phosphate.** Journal of Solid State Chemistry, v. 179, n. 10, p. 3143-3150, 2006.

Hosokawa, R. ; Miyamoto, Y. ; Fujita, H. ; Noishiki, Y. ; Nakamura, T. ; Yamamoto, M.  **$\alpha$ -tricalcium phosphate cements modified by magnesium.** Biomaterials, v. 22, n. 19, p. 2633-2637, 2001.

Junfeng, H.; Xun, W. **Hydroxyapatite nanocrystals: colloidal chemistry, assembly and their biological applications.** Inorganic Chemistry Frontiers, vol. 1, p. 215-225, 2014.

Kikuta, K. ; Tsuchiya, A. ; Anada, T. ; Yoshikawa, H. ; Suzuki, O.  **$\beta$ -tricalcium phosphate controls the release of calcium ion and stimulates the proliferation and differentiation of osteoblastic MC3T3-E1 cells.** Journal of Biomedical Materials Research Part A, v. 89, n. 4, p. 864-872, 2009.

Kitamura, M. ; Ohtsuki, C. ; Iwasaki, H. ; Ogata, S. I. ; Tanihara, M. ; Miyazaki, T. **The controlled resorption of porous  $\alpha$ -tricalcium phosphate using a hydroxypropylcellulose coating.** Journal of Materials Science: Materials in Medicine, v. 15, p. 1153-1158, 2004.

Kolmas, J. ; Kaflak, A. ; Zima, A. ; Ślósarczyk, A. **Alpha-tricalcium phosphate synthesized by two different routes: Structural and spectroscopic characterization.** Ceramics international, v. 41, n. 4, p. 5727-5733, 2015.

Knowles, J. C.; Gibson, I. R.; Abrahams, I. **High temperature phase transitions in  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  measured by neutron diffraction.** In: Bioceramics: Volume 12. p. 341-344. 1999.

Liu, J. ; Zhao, L.; Ni, L. ; Qiao, C. ; Li, D. ; Sun, H.; Zhang, Z. **The effect of synthetic  $\alpha$ -tricalcium phosphate on osteogenic differentiation of rat bone mesenchymal stem cells.** American journal of translational research, v. 7, n. 9, p. 1588, 2015.

Masseli, M. R. **Produção do biocompósito cerâmica hidroxiapatita/alumina para aplicação biomédica.** 2018. 87f. (Dissertação) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

Mathew, M.; Schroeder, L. W.; Dickens, B.; Brown W. E. **The crystal structure of  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .** Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry, v. 33, n. 5, p. 1325-1333, 1977.

- McAndrew, M. P. ; Gorman, P. W. ; Lange, T. A. **Tricalcium phosphate as a bone graft substitute in trauma: preliminary report.** Journal of orthopaedic trauma, v. 2, n. 4, p. 333-339, 1988.
- Monma, H.; Kanazawa, T. **The hydration of  $\alpha$ -tricalcium phosphate.** Yogyo- Kyokai-Shi, v.84, p. 209-213, 1976.
- Motisuke, M. ; García Carrodegua, R. ; Zavaglia, C. A. **A comparative study between  $\alpha$ -TCP and Si- $\alpha$ -TCP calcium phosphate cement.** In: **Key Engineering Materials.** Trans Tech Publications Ltd. p. 201-204. 2009.
- Nancollas, G. H. **Biological mineralization and demineralization: report of the Dahlem Workshop on Biological Mineralization and Demineralization,** Berlin 1981. October 18, v. 23, p. 38, 1982.
- Oliveira, D. M. P. **Síntese e caracterização de pós de fosfato tricálcio- $\beta$  e de hidroxiapatita: elaboração de bifásicos HA/TCP- $\beta$  para aplicações como substituto ósseo.** Dissertação de mestrado. UDESC, PPG-CEM, 2010.
- Park, J.; Lakes, R. S. **Biomaterials – Na Introduction.** Springer, 3ª edição, p. 2, 2007.
- Pavinato, V. P. **Estudo da solubilidade de apatitas em meio de interesse biológico.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2012.
- Ratner, B. D.; Hoffman A. S.; Schoen F. J.; Lemons J. E. **Biomaterials science: a multidisciplinary endeavor.** Biomaterials science: an introduction to materials in medicine, Londres: Elsevier Academic Press, p. 1-9. 2004.
- Raymay, H. R. R.; Zhang, M. **Biphasic calcium phosphate nanocomposite porous scaffolds for load-bearing bone tissue engineering.** Biomaterials, v. 25, n. 21, p. 5171-5180, 2004.
- Rogero, S. O.; Malmong, E. S. M.; Lugão, A. B.; Ikeda, T. I.; Miyamaru, L.; Cruz, A. S. **Biocompatibility study of polymeric biomaterials,** Artificial Organs, 27, 5,424-427 (2003).
- Safronova, T. V.; Selezneva, I. I.; Tikhonova, S. A. ; Kiselev, A. S. ; Davydova, G. A. ; Shatalova, T. B. ; Rau, J. V. **Biocompatibility of biphasic  $\alpha$ ,  $\beta$ -tricalcium phosphate ceramics in vitro.** Bioactive materials, v. 5, n. 2, p. 423-427, 2020.
- Samavedi, S.; Whittington, A. R.; Goldstein, A. S. **Calcium phosphate ceramics in bone tissue engineering: A review of properties and their influence on behavior.** Acta Biomaterialia, v. 9, p. 8037– 8045, 2013.
- Shimizu, Y.; Tanihara, M.; Nakamura, T.; et al. **Development of a novel three-dimensional culture system for osteogenic cells: application to osteogenic differentiation and transplantation.** Journal of biomedical materials research, v. 44, n. 4, p. 406-417, 1999.

Silva, A. M.; Silva, G. A. **Fabricação de andamios poliméricos para engenharia de tecidos**. Química nova, v. 29, n. 1, p. 99-107, 2006.

Simon, J. H. B.; Farmer, J. B.; Pilcher, L. S. **The biocompatibility of porous alumina ceramics**. Journal of Biomedical Materials Research, v. 20, n. 3, p. 389-400, 1986.

Singh, R.; Singh, D. **Fabrication of three-dimensional biocompatible scaffold with improved cell-materials interactions for tissue engineering applications**. Journal of biomaterials applications, v. 29, n. 3, p. 425-435, 2014.

Stanford, C. M.; Keller, J. C.; Solursh, M. **Bone cell expression on titanium surfaces is altered by sterilization treatments**. Journal of biomedical materials research, v. 29, n. 8, p. 963-973, 1995.

Tampieri, A.; Celotti, G.; Landi, E.; et al. **Biologically inspired synthesis of bone-like composite: self-assembled collagen fibers/hydroxyapatite nanocrystals**. Journal of biomedical materials research, v. 61, n. 3, p. 408-412, 2002.

Tirino, P.; Aguirre, A.; Müller, F. A.; et al. **The effect of topographical surface features of TiO<sub>2</sub> blasted titanium implants on MG63 osteoblast-like cell adhesion**. Journal of biomedical materials research, v. 61, n. 2, p. 212-219, 2002.

Webster, T. J.; Ergun, C.; Doremus, R. H.; et al. **Enhanced functions of osteoblasts on nanophase ceramics**. Biomaterials, v. 21, n. 17, p. 1803-1810, 2000.

Xue, W.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S. **Polycaprolactone coated porous tricalcium phosphate scaffolds for controlled release of protein for tissue engineering**. Journal of materials science: materials in medicine, v. 20, n. 10, p. 2009-2015, 2009.

Yamada, M.; Shiota, M.; Yamashita, Y.; Ka-sugai, S. **Histological and histomorphometrical comparative study of the degradation and osteoconductive characteristics of alpha- and beta-tricalcium phosphate in block grafts**. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials; v. 82, p. 139-48, 2007.

Yang, W.; Yang, F.; Wang, Y.; et al. **Tricalcium phosphate-hyaluronic acid hybrid hydrogel for bone regeneration**. Journal of biomaterials science. Polymer edition, v. 22, n. 4-6, p. 469-482, 2011.

Yashima, M.; Sakai, A. **High-temperature neutron powder diffraction study of the structural phase transition between  $\alpha$  and  $\alpha'$  phases in tricalcium phosphate Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>**. Chemical Physics Letters, v. 372, n. 5-6, p. 779-783, 2003.

# Índice Remissivo

## A

Alfa fosfato tricálcio 49  
análise térmica (TG e ATD) 29  
Aplicações Biomédicas 49  
Argamassa 38, 41, 42, 47  
argamassa cimentícia 38, 39, 40, 41, 44

## B

beta fosfato tricálcico ( $\beta$ -TCP) 12, 13, 19, 21  
bioatividade 12, 13, 14, 51  
Biocerâmicas 12, 49  
biocompatibilidade 12, 13, 51, 54, 55, 57, 59  
biomaterial cerâmico 12

## C

calcinação 20, 29, 31, 32, 33  
Compressão 38  
concentração da solução 29, 33, 35

## D

difração de raios X (DRX) 29

## E

engenharia tecidual 22, 49, 55, 59  
estabilidade térmica 18, 30, 49, 50, 55  
estrôncio 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23

## F

fármacos 49, 56, 59  
Fibra de babaçu 38  
Fosfatos de cálcio 49, 51  
FT-fibra 38

## H

homogeneidade 16, 29, 30, 32

## I

implantes 49, 50, 56, 59

## M

método de síntese 23, 29, 59  
método sol-gel 29, 30, 35  
métodos químicos de síntese 29

Microscopia eletrônica de varredura 38

Mulita 29, 30

Mulita sintética 29

O

odontologia 22, 49, 51, 59

ortopedia 22, 49, 51, 59

P

pureza 7, 29, 30, 52

R

regeneração óssea 13, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 49, 50, 51, 55, 56, 59

resíduos 38, 39, 40, 44, 45, 46

Resistência 38

Revisão 12, 49

rota sol-gel 29

S

Síntese 29, 60, 62

Sol-Gel 25, 29, 30, 36

solubilidade 16, 19, 49, 50, 54, 55, 62

solução 17, 21, 29, 30, 31, 33, 35, 40, 52

solvente 16, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 58

sustentabilidade 38

T

temperatura 16, 20, 29, 30, 31, 33, 35, 52, 54

temperaturas de processamento 29

V

vidro 18, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47

Vidro reciclado 38



**editoraomnisscientia@gmail.com** 

**<https://editoraomnisscientia.com.br/>** 

**@editora\_omnis\_scientia** 

**<https://www.facebook.com/omnis.scientia.9>** 

**+55 (87) 9656-3565** 



[editoraomnisscientia@gmail.com](mailto:editoraomnisscientia@gmail.com) 

<https://editoraomnisscientia.com.br/> 

[@editora\\_omnis\\_scientia](https://www.instagram.com/editora_omnis_scientia) 

<https://www.facebook.com/omnis.scientia.9> 

+55 (87) 9656-3565 