

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

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 (β -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 1

ANÁLISE DO USO DO ESTRÔNCIO (Sr) COMO ÍON DOPANTE NA SÍNTESE DO BETA FOSFATO TRICÁLCICO (β -TCP): UM ESTUDO PROSPECTIVO

José Rosa de Souza Farias¹;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

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

Victória Régia Alves Sales²;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

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

Ycaro Breno Alves de Almeida³;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

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

Geysivana Késsya Garcia Carvalho⁴;

Christus Faculdade do Piauí (CHRISFAPI), Piripiri, Piauí

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

Maysa Memória Martins⁵;

Christus Faculdade do Piauí (CHRISFAPI), Piripiri, Piauí

<http://lattes.cnpq.br/6769980781249691>

Erica Ianne da Silva Sousa⁶;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí

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

Veruska do Nascimento Simões⁷;

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

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

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes⁸;

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

<http://lattes.cnpq.br/3325233130338911>

Érica Karine Alves de Lima⁹;

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

<http://lattes.cnpq.br/8186490901865658>

Maria Elayne Rodrigues Alves¹⁰;

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

<http://lattes.cnpq.br/6730439235097176>

Valdeci Bosco dos Santos¹¹;

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 Braga¹².

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

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

RESUMO: O beta fosfato tricálcico (β -TCP) vem se destacando como um biomaterial cerâmico promissor por apresentar excelentes propriedades de biocompatibilidade e bioatividade. Baseado nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma breve revisão sobre o beta fosfato tricálcico (β -TCP) dopado com estrôncio, nos últimos oito anos, apresentando a quantidade de artigos publicados, os países que mais publicaram trabalhos, as principais aplicações, e os métodos de síntese.

PALAVRAS-CHAVE: Revisão. Biocerâmicas. Beta fosfato tricálcico.

ANALYSIS OF STRONTIUM (Sr) USE AS A DOPANT ION IN THE SYNTHESIS OF BETA TRICALCIUM PHOSPHATE (B-TCP): A PROSPECTIVE STUDY

ABSTRACT: Beta tricalcium phosphate (β -TCP) has been emerging as a promising ceramic biomaterial due to its excellent biocompatibility and bioactivity properties. In this context, this study aims to provide a brief review on strontium-doped beta tricalcium phosphate (β -TCP) in the last eight years, presenting the number of published articles, the countries that have published the most, the primary applications, and the synthesis methods.

KEY-WORDS: Review. Bioceramics. Beta Tricalcium Phosphate.

INTRODUÇÃO

A busca por materiais e métodos inovadores a fim de restaurar fragmentos do corpo humano, surge como algo inovador. Neste sentido, a ciência dos materiais, aliada às ciências biomédicas (medicina e biologia), tem contribuído para o desenvolvimento de biomateriais para reconstruir ou substituir tecidos danificados, onde tais materiais devem

ser biocompatíveis e conter propriedades mecânicas, bioquímicas e físicas específicas (Schatkoskiet et al., 2021; Jodati et al., 2020).

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). Uma importante classe dos biomateriais são as biocerâmicas também conhecidas como cerâmicas de alta tecnologia ou cerâmicas avançadas, que podem ser inertes ou não, projetadas para serem usadas como dispositivos médicos expostos a proteínas, células, tecidos, órgãos e sistemas de órgãos (Punj et al., 2021; Dorozhkin, 2018).

As biocerâmicas à base de fosfato de cálcio se sobressaem entre as demais, principalmente devido a sua semelhança química e cristalográfica com o osso humano. Como resultado, além de não serem tóxicas, são biocompatíveis, não são reconhecidas como materiais estranhos no corpo e o mais importante, exibem comportamento bioativo e se integram ao tecido vivo pelos mesmos processos ativos na remodelação de ossos saudáveis (Farias et al., 2020; Canillas et al., 2021).

De formulação química $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, o beta fosfato tricálcico (β -TCP), se destaca por conta de suas excelentes propriedades de biocompatibilidade, bioatividade in vivo, biorreabsoribilidade e osteocondutividade, liberando íons de cálcio e fosfato promovendo a osteogênese. Além disso, pode ser parcialmente reabsorvido entre 6 a 15 semanas após ser implantado no organismo, possuindo melhor osteoindutividade e degradabilidade do que a hidroxiapatita (HAp), bem conhecida e amplamente utilizada em várias aplicações médicas. (Chair et al., 2017; Wu et al., 2023).

Quando um íon é incorporado à estrutura de uma biocerâmica como o β -TCP, uma nova categoria de material é criada, onde inúmeras propriedades únicas que superam as desvantagens do material primitivo favorecem seu uso em diferentes aplicações biológicas. Neste sentido, o processo de dopagem pode melhorar as propriedades de manuseio, desempenho angiogênico e osteogênico, atividade antimicrobiana, entre outras propriedades. Dentre os íons mais utilizados como dopantes na estrutura cristalina do β -TCP, o estrôncio (Sr) desempenha um papel importante na formação e remodelação óssea, onde é utilizado para o tratamento de osteoporose, acelerando o processo de osteogênese e de mineralização (Schatkoski et al., 2021; Almeida et al., 2021).

O estrôncio (Sr) é um metal alcalino terroso considerado um elemento de dopagem eficaz e seguro cujo efeito na formação e remodelação óssea se torna mais perceptível e diferente ao longo do tempo dependendo da concentração aplicada (Neves et al., 2017). Tal oligoelemento está presente em quantidades significativas em tecidos calcificados, especialmente nas regiões de alto desempenho metabólico, o que tem gerado enorme procura para pesquisas em virtude do seu potencial para aplicações ortopédicas, uma vez que possui efeitos benéficos na formação e reabsorção óssea, promovendo a regeneração óssea e reduzindo a incidência de fraturas (Laskus e Kolmas, 2017).

A crescente evidência do efeito benéfico do estrôncio no osso justifica o crescente interesse pela sua adição em biocerâmicas e cimentos de fosfatos de cálcio tais como a hidroxiapatita e o beta fosfato tricálcico como também de vidros bioativos, visando melhorar a capacidade de bioatividade e a indução óssea de matérias-primas, de modo a alcançar o efeito benéfico do reparo de defeitos ósseos (Liu et al., 2020). Neste sentido, *in vitro*, é responsável por aumentar o número de células osteoblásticas e reduzir o número e a atividade das células osteoclásticas e *in vivo*, é responsável por melhorar a formação óssea (Boanini et al., 2010).

Vale ressaltar ainda que a adição de íons Sr^{2+} pode melhorar as propriedades mecânicas dos materiais e ter efeito antibacteriano e anti-inflamatório, todavia, deve-se atentar a quantidade de estrôncio incorporada em tecidos vivos, uma vez que baixas concentrações contribuem para a formação óssea adequada, enquanto que concentrações mais altas podem causar osteomalácia. Isto é, por um lado ele estimula a formação óssea, por outro, diminui sua reabsorção, o que é comprovado pela sua ação particular de modo duplo do elemento, causada por seu efeito estimulante na diferenciação osteoblástica e inibição simultânea da atividade osteoclástica (Tao et al., 2020).

Diante disto, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar os dados coletados nos últimos oito anos sobre o beta fosfato tricálcico dopado com estrôncio, apresentando a quantidade de artigos publicados, os países envolvidos nas publicações, as principais aplicações e os métodos de síntese utilizados, visando explorar a literatura acerca das pesquisas desenvolvidas até agora com essa importante biocerâmica.

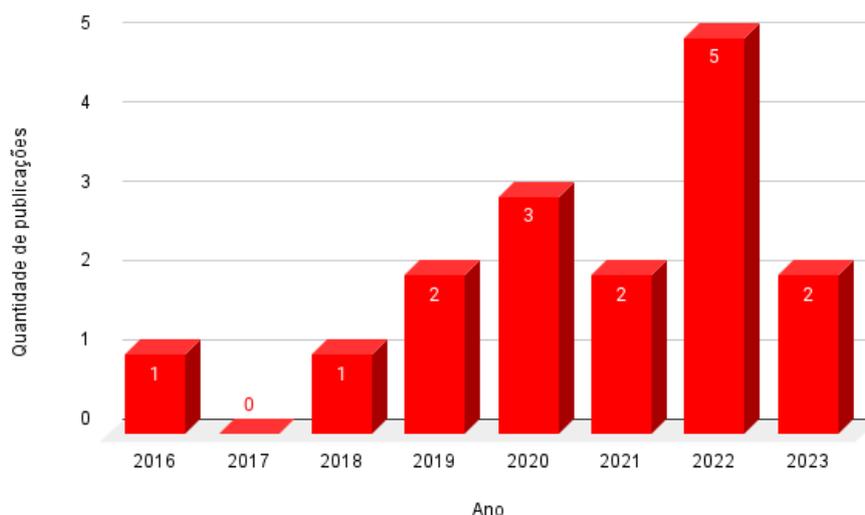
MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta de dados foi realizada por meio de busca eletrônica nas bases de dados Science Direct, Scopus e Web of Science. Os critérios de inclusão definidos foram: artigos de pesquisa publicados nos últimos 8 anos, isto é, de 2016 até os 6 primeiros meses do ano de 2023.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

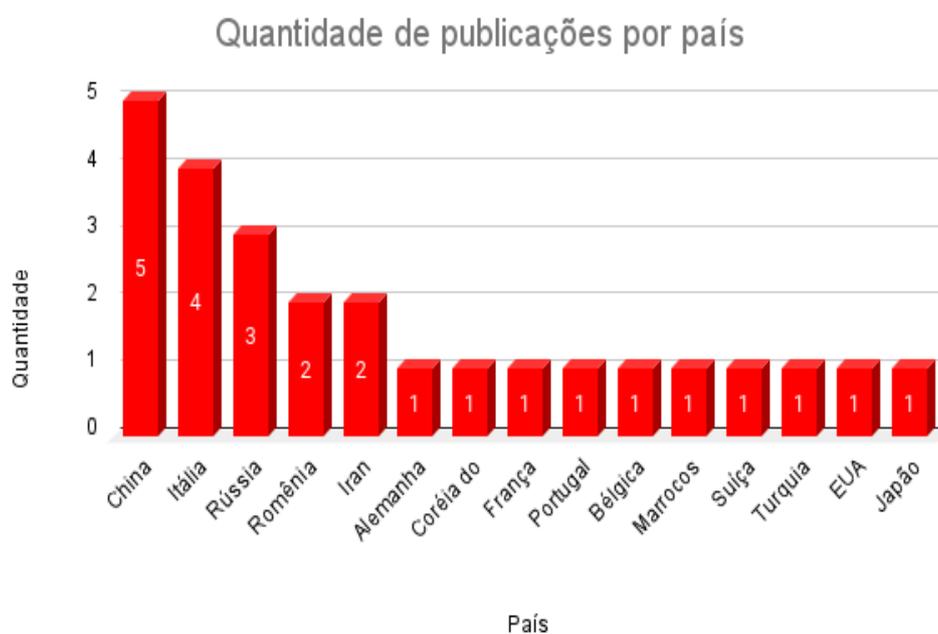
Obteve-se um total de 16 trabalhos publicados ao realizar-se as buscas. Percebeu-se que o número de publicações anual vem aumentando, onde 2022 com 5 artigos foi o ano com o maior número de artigos, representando 31,25% do total de publicações, o que enfatiza a importância e o crescente interesse dessa biocerâmica para a comunidade científica. A Figura 1 é um gráfico que apresenta a quantidade de publicações por ano, dos últimos 8 anos.

Figura 1. Número de artigos por ano.



Com referência aos países com publicações nos últimos oito anos obteve-se um total de 15 países distintos, onde a China com 5 artigos é o país que mais publicou nos últimos três anos, seguido da Itália e Rússia com 4 e 3 artigos, respectivamente. A Figura 2 é um gráfico que apresenta de maneira simplificada os principais países com as respectivas quantidades de publicações.

Figura 2. Quantidade de publicações por país.



MÉTODOS DE SÍNTESE

Basicamente, a síntese do β -TCP pode ser realizada pela conversão térmica de um precursor com razão molar Ca/P \approx 1,5 como a hidroxiapatita deficiente em cálcio (CDHA), ou o fosfato de cálcio amorfo (ACP), em uma faixa de temperatura que varia de 650 a 750 °C, ou por reação de estado sólido de uma mistura de precursores sólidos em altas temperaturas (Bohner et al., 2020). Entretanto, várias outras rotas de síntese podem ser utilizadas para a síntese do beta fosfato tricálcico, onde as características do material produzidos vão depender do tipo de síntese utilizada (Chaair et al., 2017).

A Tabela 1 apresenta os métodos de síntese utilizados relatados na literatura para fabricação do beta fosfato tricálcico. Vale ressaltar que apenas 9 do total de todos os artigos pesquisados descreveram os métodos de síntese utilizados, ou seja, 56,25% do total de artigos, o que indica que 43,75% dos artigos não relatam a rota de síntese descrita para fabricação de pós de β -TCP, ou ainda, muitos dos artigos utilizam amostras de β -TCP já prontas, provenientes de outros estudos anteriores.

Tabela 1. Métodos de síntese utilizados para fabricação dos pós de β -TCP

| MÉTODO DE SÍNTESE | QUANTIDADE DE ARTIGOS |
|-------------------------|-----------------------|
| PRECIPITAÇÃO QUÍMICA | 4 |
| REAÇÃO NO ESTADO SÓLIDO | 2 |
| ATIVAÇÃO MECANOQUÍMICA | 2 |
| MÉTODO HIDROTERMAL | 1 |

Analisando a tabela 1 percebe-se que foram descritos 4 rotas de síntese distintas para fabricação do β -TCP, onde a rota de síntese mais utilizada foi o método de precipitação química, correspondendo a 25% do total de artigos, seguido do método de reação no estado sólido e o método de ativação mecanoquímica, ambos correspondendo a 12,5% do total de artigos e por fim o método hidrotermal correspondendo a 6,25% do total.

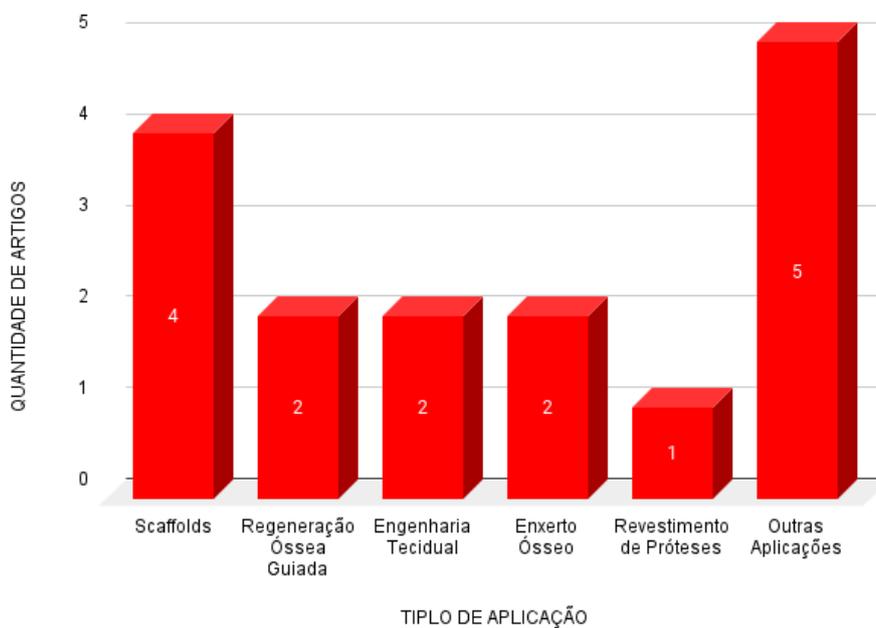
Chamada de precipitação em via úmida, química ou aquosa o método de precipitação química é o processo pelo qual uma substância solúvel é convertida para uma forma insolúvel ou por reação química ou por mudanças na composição do solvente para diminuir a solubilidade da substância nela contida apresentando a vantagem da facilidade no controle dos parâmetros do processo, obtenção de pós com partículas finas, elevada área superficial específica, homogeneidade química e uso de reagentes de baixo custo permitindo a obtenção de cerâmicas densas em temperaturas de sinterização inferiores às temperaturas necessárias para pós obtidos por outros métodos (Liang, 1997; Mazumder et al., 2019).

O método consiste na dissolução de um sólido em uma solução, ocorrendo a formação de espécies iônicas, em sequência as espécies iônicas formadas darão origem aos precursores quando forem novamente precipitadas na forma e quantidade ideal. Tal rota de síntese consiste em dois processos: nucleação (crescimento e formação do centro de nucleação) e o crescimento subsequente das partículas (Kakihana et al., 1998).

APLICAÇÕES

Dentre os 16 trabalhos analisados nos últimos 8 anos, 11 artigos visam aplicações no campo dos biomateriais, o que corresponde a 68,75% do total de artigos. Neste sentido, às áreas de aplicações dos biomateriais são: Scaffolds (4 artigos), Regeneração Óssea Guiada (2 artigos), Engenharia Tecidual (2 artigos), e enxertos ósseos (2 artigos) e revestimento de próteses (1 artigo), onde o principal tipo de aplicação é voltada para produção de scaffolds. Além disso, os 5 artigos restantes visam análise das propriedades finais após inserção do elemento de dopagem na estrutura cristalina do beta fosfato tricálcico, tais como propriedades antimicrobianas, propriedades de citocompatibilidade e propriedades estruturais, o que corresponde a 31,25% do total de artigos. A Figura 3 detalha as aplicações voltadas ao campo dos biomateriais.

Figura 3. Aplicações do β -TCP dopado com estrôncio



Scaffolds são estruturas tridimensionais que possuem arcabouço tridimensional poroso, propriedades bioativas e biodegradáveis, que promovem a proliferação celular, ou colonização de células, fornecendo um ambiente estável, servindo de molde para a

formação do novo tecido. As propriedades mecânicas e de degradação estão diretamente relacionadas com o material que compõe o scaffold. Dessa forma, as principais interações biológicas, como adesão entre proteínas e peptídeos, adesão celular, migração, proliferação e diferenciação, são funções primárias das propriedades de superfície do material em questão (Hutmacher et al., 2007; Liu e Ma, 2004; Oliveira et al., 2010).

A seguir estão apresentados todos os trabalhos encontrados nas bases de dados durante os últimos anos, desde 2016 até o presente ano.

Singh et al. (2016) estudaram a proliferação e a diferenciação de células-tronco mesenquimais humanas a partir de scaffolds de β -TCP combinados com (magnésio) Mg^{2+} ou Mg^{2+}/Sr^{2+} . Constatou-se que as células cultivadas diretamente em estruturas preparadas com β -TCP substituído apenas com Mg^{2+} foram capazes de suportar atividade de fosfatase alcalina, osteopontina e expressão de osteoprotegerina em comparação com todas as composições contendo Mg^{2+}/Sr^{2+} , e β -TCP puro. Desse modo, concluiu-se que a maior diferenciação observada foi devido à liberação de íons bioativos na microestrutura de superfície, onde a liberação desses íons oferece suporte à diferenciação aprimorada por meio da sinalização do fator de crescimento e da proteína morfogenética óssea, dependente do grupo de proteínas intracelulares.

Wang et al. (2018) sintetizaram nanopós de β -TCP codopados com íons estrôncio (Sr^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) variando a concentração dos dopantes de 0 a 4,8 mol%, onde a estrutura cristalina e as propriedades do beta fosfato tricálcico foram analisadas após a dopagem. O resultado da pesquisa mostrou que a fase β -TCP foi alcançada após o tratamento térmico acima de 800 °C, os parâmetros de rede do eixo a e do eixo c diminuíram gradualmente com o aumento do nível de co-substituição Sr^{2+}/Zn^{2+} na rede cristalina, além disso o estudo confirmou também que a dopagem melhorou significativamente a estabilidade térmica do β -TCP. Portanto, o material formado mostrou ser promissor em bioaplicações, porém não apresentou mineralização superior ao β -TCP puro.

Kazemi et al. (2019) analisaram o potencial osteogênico in vitro de diferentes scaffolds constituídos por β -TCP dopado com estrôncio (Sr-TCP) e vidro bioativo (BG), usando células-tronco mesenquimais derivadas da medula óssea de coelhos, onde a capacidade osteogênica dos scaffold foram avaliadas através da atividade da fosfatase alcalina, deposição mineral por coloração com vermelho de alizarina e experimentos de expressão gênica osteoblástica. Foram utilizadas as composições de Sr-TCP/BG: 100/0, 50/50, 75/25 e 25/75, onde a amostra Sr-TCP/BG: 50/50 apresentou a melhor capacidade de induzir e acelerar a osteodiferenciação de células-tronco mesenquimais. Portanto, este nanocompósito foi nomeado como o scaffold mais favorável para estudos in vivo. O estudo concluiu que as células-tronco mesenquimais formadas com os scaffolds não apenas forneceram uma resistência mecânica apropriada como substituto ósseo, mas também promoveram a regeneração óssea de maneira eficiente e rápida. Dessa maneira, tal scaffold pode ser considerado uma alternativa óssea apropriada para tratamentos de longo prazo.

Boanini et al. (2019) sintetizaram nanopartículas de β -TCP pelo método de reação de estado sólido na presença de quantidades crescentes de íons estrôncio e zinco, a fim de esclarecer as modificações estruturais induzidas pela substituição iônica. O estudo concluiu que o zinco pode substituir o cálcio na estrutura cristalina do β -TCP em até cerca de 10% induzindo uma redução dos parâmetros celulares, enquanto a substituição ocorre em até cerca de 80 at no caso do estrôncio, o que provoca um aumento linear das constantes de rede e uma ligeira modificação para uma estrutura mais simétrica. O refinamento Rietveld demonstra que o sítio Ca(5) octaédrico é o sítio de β -TCP preferido pelos íons de zinco. Os resultados de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) indicam que a substituição do zinco provoca um distúrbio na estrutura do β -TCP. Em desacordo com o comportamento do zinco, o estrôncio evita completamente o sítio Ca(5) mesmo em alta concentração, ao passo que exibe uma clara preferência pelo sítio Ca(4). As bandas de absorção infravermelha do β -TCP mostram uma mudança geral para números de onda mais baixos com o aumento do conteúdo de estrôncio. Neste sentido, tais resultados fornecem informações adicionais e mais detalhadas sobre a influência da substituição iônica na estrutura do β -TCP, o que é de particular interesse no caso do estrôncio e do zinco devido aos seus importantes papéis biológicos.

Kozelskaya et al. (2020) investigaram o efeito das substituições de estrôncio e magnésio na composição de pulverização catódica de β -TCP nas propriedades físico-químicas e na taxa de deposição em revestimentos de fosfato de cálcio. Observou-se que a presença de substituições de estrôncio no alvo β -TCP pulverizado leva a um aumento significativo na taxa de deposição de revestimentos de fosfato de cálcio, enquanto as substituições de magnésio reduzem ligeiramente. Tal diferença se deve à influência das substituições de magnésio e estrôncio na estrutura cristalina do pó de β -TCP. Cálculos teóricos indicam que as substituições de estrôncio levam a um aumento no volume da célula unitária, o que causa um aumento nas taxas de deposição de revestimentos de (Sr- β -TCP), enquanto que as substituições com magnésio levam a diminuição no volume da célula unitária o que leva a uma ligeira diminuição na taxa de deposição de revestimento de (Mg- β -TCP), também foi demonstrado um aumento na solubilidade dos revestimentos formados por pulverização catódica de alvos Sr- β -TCP e Mg/Sr- β -TCP.

Tohidnezhad et al. (2020) investigaram o potencial do uso de scaffolds de beta fosfato tricálcico (β -TCP) puros ou dopados com estrôncio, no processo de Regeneração óssea em fraturas no fêmur de camundongos, avaliando o processo de angiogênese, bem como possíveis inflamações no processo de cicatrização. O estudo concluiu que os scaffolds de β -TCP puro propiciaram a formação de grande porcentagem de tecido ósseo na consolidação da fratura, todavia, a adição de estrôncio aos scaffolds influenciou a resposta inflamatória em vários estágios do processo de cicatrização, podendo ter afetado a regeneração óssea. Dessa maneira, o estudo concluiu que um período de inflamação estendido causado pela adição de estrôncio acelera a formação de tecido ósseo, acelerando também o preenchimento da fratura, o que pode ajudar no tratamento de pacientes que sofrem de osteoporose.

Tao et al. (2020) analisaram se o uso do β -TCP dopado com estrôncio (Sr/ β -TCP) modificado com aspirina (Asp-Sr/ β -TCP) pode aumentar a eficácia do beta fosfato tricálcico no tratamento de defeitos ósseos osteoporóticos. Para isso células do tipo MC3T3-E1 foram co-cultivadas por meio de scaffolds contendo β -TCP, Sr/ β -TCP, Asp-Sr/ β -TCP e induzidas à osteogênese, onde a viabilidade celular, capacidade de mineralização foram observadas pelo ensaio de atividade metabólica celular, coloração Alizarin Red (ARS) e Western blotting (WB). Em seguida, os scaffolds foram implantados no modelo de defeito ósseo da epífise femoral de ratos ovariectomizados (OVX) por 8 semanas. O estudo concluiu que a mineralização celular e viabilidade do grupo Asp-Sr/ β -TCP é significativamente maior do que o grupo controle, a expressão de proteínas osteogênicas como ALP, OPN, RUNX-2, OC e COL-1 do grupo Asp-Sr/ β -TCP é significativamente maior do que o grupo controle. Além disso, imagens de raios-X e avaliações histológicas mostram que, o grupo Asp-Sr/ β -TCP apresentou o efeito mais forte na regeneração óssea e mineralização óssea, quando comparado com o grupo β -TCP e o grupo Sr/ β -TCP. Neste sentido, o estudo concluiu que a co-modificação de β -TCP por estrôncio e aspirina é um esquema para reparo rápido de defeitos condilares femorais, e esses efeitos podem ser alcançados pela inibição da inflamação local e promoção da atividade osteogênica.

Wang et al. (2021) sintetizaram Hidroxiapatita e β TCP com as seguintes concentrações de estrôncio: 1, 5 e 15 mol % através de precipitação química e calcinação em alta temperatura. Os resultados mostraram que com o aumento da concentração de Sr, primeiro houve uma redução de Hap, fenômeno esse ocasionado pela distorção da estrutura, porém, quando a concentração de Sr atingiu 15% a porcentagem de Hap começou a aumentar, esse último fator pode ser explicado devido a ocorrência da transformação de fase β -TCP para uma apatita deficiente em cálcio (Ca^{2+}). Portanto, o aumento nos parâmetros de rede e volume indicam que houve com sucesso a incorporação de Sr na estrutura cristalina de β -TCP e Hap, devido ao raio iônico do Sr^{2+} ser maior que o Ca^{2+} .

Sugimoto et al. (2021) estudaram o efeito do beta fosfato tricálcico dopado com estrôncio, silício e zinco, buscando melhorias nas propriedades osteoindutivas promovendo a osteogênese in vitro e in vivo. O β -TCP foi preparado na forma de discos usando suspensões de nanopartículas de estrôncio substituído com silicato apatita (SrSiP) ou estrôncio co-substituído com silicato e zinco (SrZnSiP). Foram utilizadas células mesenquimais da medula óssea (BMSCs) do osso fêmur de ratos que foram revestidos ou não de β -TCP dopado. Após cultura por 14 dias, observou-se a formação maior de RNA mensageiro (mRNA) em quase todos os genes osteogênicos e angiogênicos nos grupos SrZnSiP e SrSiP do que no grupo não revestido, sem citotoxicidade significativa induzida pelo revestimento de apatita in vitro. Além disso, in vivo, os grupos SrZnSiP e SrSiP apresentaram níveis osteogênicos significativamente maiores e os achados radiológicos e histopatológicos revelaram formação óssea abundante no grupo revestido por apatita, concluindo-se que esta técnica pode melhorar os resultados clínicos após cirurgia ortopédica usando substitutos de enxerto ósseo, como β -TCP.

Deyneko et al. (2022) sintetizaram beta fosfato tricálcico dopado com cobre (Cu), zinco (Zn), estrôncio (Sr) e manganês (Mn) por meio do método de reação em estado sólido, analisando a influência da dopagem na estrutura cristalina do β -TCP e sua influência na atividade antimicrobiana. Por meio da análise das composições químicas em correlação com as características estruturais da estrutura do β -TCP o estudo concluiu que a incorporação de íons Sr^{2+} juntamente com os íons metálicos divalentes permite estender a existência limite de uma solução sólida devido ao alargamento da célula unitária. Além disso, todas as fases sintetizadas apresentaram efeito antibacteriano, todavia, fosfatos com ocupação conjunta no sítio M5 apresentaram caráter seletivo contra microorganismos individuais, o que conclui que íons dopantes ativos devem estar localizados em diferentes sítios cristalinos para proporcionar maior atividade antimicrobiana.

Fadeeva et al. (2022) sintetizaram pós de beta fosfato tricálcico (β -TCP) dopados com diferentes concentrações de íons Sr^{2+} (0, 0,1 e 0,5) usando o método de ativação mecanoquímica onde foram analisadas as propriedades físico-químicas, a citocompatibilidade e o comportamento das amostras sob imersão em solução salina padrão. Após imersão das amostras em solução salina padrão por 21 dias, a análise das fases revelou a dissolução parcial da fase inicial β -TCP e alterações na microestrutura das amostras. Além disso, os resultados mostram que a introdução de íons Sr^{2+} no β -TCP melhorou a adesão celular, a proliferação e a citocompatibilidade das amostras preparadas. Deste modo, o estudo concluiu que os resultados obtidos fornecem uma base para aplicações de biocerâmicas dopadas com estrôncio em experimentos modelo in vivo.

Rau et al. (2022) investigaram as propriedades físico-químicas e biológicas in vitro do cimento ósseo de fosfato tricálcico dopado com estrôncio, com foco em investigações de curto e longo prazo. Para investigações de curto prazo, difração de raios X com energia dispersiva, espectroscopia de infravermelho e técnicas de espectroscopia no domínio do tempo em terahertz foram aplicadas. Para estudos de longo prazo resolvidos no tempo, foram realizados testes de difração angular dispersiva de raios X, microscopia eletrônica de varredura, testes mecânicos e comportamento em solução de Ringer. O estudo concluiu que as caracterizações de curto prazo forneceram informações sobre o mecanismo de endurecimento do cimento. Neste sentido, as amostras dopadas não eram mais detectáveis após 45 min do processo, durante este período de tempo foi detectado um aparecimento (após 10 min do início) e aumento constante de uma fase secundária de fosfato bicálcico di-hidratado. Além disso, o estudo concluiu que a resistência à compressão do cimento aumentou, os estudos da atividade metabólica não tiveram um efeito perceptível na viabilidade celular, não houve diferenças significativas entre os cimentos TCP e Sr-TCP, onde o método de contato direto confirmou que o número de células na superfície da amostra dopada foi maior do que na amostra pura e na amostra controle, o que conclui que o cimento desenvolvido é promissor para aplicações biomédicas para o tecido ósseo.

Kim et al. (2022) analisaram a influência da substituição de ferro e estrôncio em pós de β -TCP, correlacionando suas propriedades com o β -TCP puro. Para isso, as

mudanças estruturais o comportamento de degradação, as propriedades magnéticas e as propriedades de adesão celular foram estudadas através da imersão em meio de cultura. O estudo concluiu que a mudança estrutural indica que os parâmetros de rede do pó sintetizado gradualmente diminuem e aumentam de acordo com o tipo e número de íons de substituição. Todas as amostras substituídas por íons melhoraram as propriedades magnéticas em comparação com o β -TCP puro. A análise de degradação *in vitro* demonstrou que Fe e Sr promovem comportamento de degradação e comportamento de reabsorção na superfície do β -TCP, respectivamente. Portanto, as amostras co-substituídas tiveram um efeito sinérgico, apresentando comportamento simultâneo de degradação e reabsorção durante a imersão em meio de cultura. Além disso, a análise de adesão celular revelou que a substituição de Fe faz com que a amostra de β -TCP obtenha rugosidade superficial em escala de microm/microm e melhora significativamente a adesão celular e a capacidade de proliferação de β -TCP. Estes resultados sugerem que a co-substituição Fe/Sr para β -TCP pode desempenhar um papel significativo em aplicações biomédicas e pode ser considerado um material eficaz para aplicações de regeneração de tecido ósseo através do controle da degradação e capacidade de reabsorção.

Besleaga et al. (2022) sintetizaram scaffolds de cerâmicas bifásicas de fosfatos de cálcio (BCPs) puras e dopadas com Mg e Sr pela técnica de manufatura aditiva robocasting a partir de pós sintetizados hidrotermicamente, com o intuito de comparar de forma multiparamétrica, morfoestrutural e *in vitro* biológico scaffolds macroporosos de BCP não dopados, com dopagem simples (Sr) e dopagem dupla (Sr e Mg) para reparo e regeneração óssea em ortopedia, odontologia, cirurgias maxilofaciais e aplicações de engenharia tecidual. O estudo concluiu que todos os scaffolds foram altamente citocompatíveis em relação aos osteoblastos humanos, com ênfase nos BCP duplamente dopados com Sr e Mg, que provocaram desempenhos biológicos *in vitro* próximos a uma das superfícies padrão dedicadas para culturas de células. Desta maneira, tais materiais são fortes candidatos para aplicações como soluções futuras viáveis para reconstrução e substituição de tecidos ósseos, todavia, testes biológicos mais perspicazes, empregando experimentos de diferenciação celular juntamente com investigações de liberação de íons são necessários para completar a imagem de seu potencial biofuncional.

Somers et al. (2023) sintetizaram pós de β -TCP puros e dopados com magnésio (Mg), estrôncio (Sr), prata (Ag) e Cobre (Cu) pela técnica de precipitação aquosa com o intuito de imprimir scaffolds macroporosos via manufatura aditiva pelo processo Direct Ink Writing (DIW) e e comparar as propriedades mecânicas do β -TCP não dopado e dopado. Após sínteses bem-sucedidas de duas composições co-dopadas, Mg-Sr (2,0–2,0 mol%) e Mg-Sr-Ag-Cu (2,0-2,0-0,1-0,1mol%) caracterizações físico-químicas completas foram realizadas. As análises de Difração de Raios -X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho (IR) mostraram ausência de fases secundárias e boa incorporação de dopantes na estrutura do β -TCP. O processo DIW implementado permitiu imprimir scaffolds macroporosos com as pastas β -TCP dopadas ou não dopadas otimizadas. Além disso, foi utilizado o processo

de secagem osmótica permitindo otimizar o processo de secagem e obter peças de β -TCP com defeitos aparentes limitados. Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) das amostras mostraram uma redução de macroporos e microfissuras nos scaffolds usando pós β -TCP co-dopados em comparação com o não dopado. Além disso, melhor resistência à compressão e densidades foram observadas para andaimes β -TCP co-dopados com um aumento significativo em comparação com os dados da literatura. Neste sentido, tais resultados podem ajudar a otimizar o desenvolvimento de substitutos ósseos personalizados sob demanda com força suficiente para serem colocados em áreas de suporte de carga do corpo humano. Também foi demonstrado que o processo desenvolvido foi aplicado sucessivamente para produzir formas mais complexas como grânulos ósseos tetrápodes abrindo novas possibilidades para estudar a regeneração óssea com substitutos ósseos sintéticos.

Wu et al. (2023) sintetizaram nanopartículas de β -TCP dopadas com estrôncio (Sr) sintetizadas pelo método químico úmido, avaliando a composição e evolução das fases, os parâmetros da célula unitária e a morfologia das amostras antes e depois de sinterizadas. O estudo concluiu que o precursor hidroxiapatita deficiente em cálcio (CDHA) foi totalmente convertido em β -TCP após ser sinterizado a 850 °C por 2 h. O grau de aglomeração de CDHA foi reduzido e o tamanho de partícula de β -TCP correspondente tornou-se menor. A composição das fases mostrou que as impurezas de hidroxiapatita e beta pirofosfato de cálcio (β -CPP) no β -TCP mudaram com o aumento da concentração de dopagem Sr^{2+} . Além disso, a impureza do β -CPP no β -TCP revelou uma descontinuidade na razão molar $\text{Sr}/(\text{Sr} + \text{Ca})$. Neste sentido, o estudo concluiu que a composição e a morfologia do β -TCP dopado com diferentes concentrações de Sr^{2+} foram esclarecidas, o que poderia fornecer um suporte para a regulação precisa do Sr-TCP. Além do mais, o mecanismo de transição de fase pode oferecer uma nova visão sobre a preparação de β -TCP dopado com outros elementos usando o método químico úmido.

CONCLUSÃO

Nos últimos 8 anos, foi crescente o número de pesquisas científicas relacionadas ao beta fosfato tricálcico dopado com estrôncio. Os resultados apresentados com o mapeamento tecnológico revelaram que há um total de 16 artigos científicos sobre β -TCP indexados nas bases de periódicos. Analisando os países envolvidos nas publicações constatou-se que a China é o país que mais possui artigos científicos publicados na área, somando 5 publicações. A maior parte das aplicações é voltada para o campo dos biomateriais, principalmente para o desenvolvimento de scaffolds, onde o principal método de síntese é o método de precipitação química.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

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

REFERÊNCIAS

Almeida, C. M.; Ribeiro, J. S.; Meereis, C. T. W.; Ogliari, A. O.; Noremberg, B. S.; Ogliari, F. A.; Michelon, D.; Lund, R. G. β -TCP nanoparticles doped with antimicrobial agents as an orthodontic adhesive component. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 110, p.102896, 2021.

Besleaga, C.; Nan, B.; Popa, A. C.; Balescu, L. M.; Nedelcu, L.; Neto, A. N.; Pasuk, L.; Leonat, L.; Popescu-Pelin, G.; Ferreira, J. M. F.; Stan, G. E. **Sr and Mg Doped Bi-Phasic Calcium Phosphate Macroporous Bone Graft Substitutes Fabricated by Robocasting: A Structural and Cytocompatibility Assessment**. *Journal of Functional Biomaterials*, vol. 13, 2022.

Boanini, E.; Panzavolta, S.; Rubini, K.; Gandolfi, M.; Bigi, A. **Effect of strontium and gelatin on the reactivity of α -tricalcium phosphate**. *Acta Biomaterialia*, v. 6, n. 3, p. 936-942, 2010.

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

Bohner, M.; Santoni, B. L. G.; Döbelin, N. **β -tricalcium phosphate for bone substitution: Synthesis and properties**. *Acta Biomaterialia*, vol.113, p.23-41, 2020.

Canillas, M.; Aza, A. H.; Rodríguez, M. A. **Calcium Phosphates in Biomedical Engineering**. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, v. 3, p. 595-600, 2021.

Chair, H.; Labjar, H.; Britel, O. **Synthesis of β -tricalcium phosphate**. *Morphologie*, v. 101, n. 334, p.120-124, 2017.

Chim, H.; Gosain, A. K. **Biomaterials in craniofacial surgery: experimental studies and clinical application**. *Journal of Craniofacial Surgery*, Vol. 20, n. 1, p. 29-33, 2009.

Deyneko, D. V.; Fadeeva, I. N.; Borovikova, E. Y.; Dzhevakov.; Slukin.; Zheng, Y.; Xia, D.; Lazoryak, B. I.; Rau, J. V. **Antimicrobial properties of co-doped tricalcium phosphates $\text{Ca}_3\text{-}2\text{x}(\text{M}'\text{M}'')\text{x}(\text{PO}_4)_2$ (M = Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} and Sr^{2+})**. *Ceramics International*, vol. 48, n. 20, p. 29770-29781, 2022.

Dorozhkin, S. V. **Calcium Orthophosphate (CaPO_4) Scaffolds for Bone Tissue Engineering Applications**. *Journal of Biotechnology and Biomedical Science*, v. 1, n. 3, p. 25-93, 2018.

Fadeeva, I. V.; Deyneko, D. V.; Forysenkova, A. A.; Morozov, V. A.; Akhmedova, S. A.; Kirsanova, V. A.; Sviridova, I. K.; Sergeeva, N. S.; Rodionov, S. A.; Udyanskaya, I. L.; Antoniac, I. V.; Rau, J. V. **Strontium Substituted β -Tricalcium Phosphate Ceramics: Physicochemical Properties and Cytocompatibility.** *Molecules*, vol. 27, n. 18, 2022.

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.

Hutmacher, D. W.; Schantz, J. T.; Lam, C. X. F.; Tan, K. G.; Lim, T. C. **State of the art and future directions of scaffold-based bone engineering from a biomaterials perspective.** *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, vol.1, n°4, p.245-260, 2007.

Jodati, H.; Yilmaz, B.; Evis, Z. **A review of bioceramic porous scaffolds for hard tissue applications: Effects of structural features.** *Ceramics International*, v. 46, n. 10, parte B, p. 15725-15739, 2020.

Kakihana, M.; Okubo, T.; Arima, M.; Nakamura, Y.; Yashima, M.; Yoshimura, M. **Polymerized complex route to the synthesis of pure SrTiO₃ at reduced temperatures: implication for formation of Sr-Ti heterometallic citric acid complex.** *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, v. 12, 1998..

Kazemi, M.; Dehghan, M. M.; Azami, M. **Biological evaluation of porous nanocomposite scaffolds based on strontium substituted β -TCP and bioactive glass: An in vitro and in vivo study.** *Materials Science and Engineering: C*, vol. 105, 2019.

Kim, S. M.; Yoo, K. H.; Kim, H.; Kim, Yong-II, Yoon, S. Y. **Simultaneous Substitution of Fe and Sr in Beta-Tricalcium Phosphate: Synthesis, Structural, Magnetic, Degradation, and Cell Adhesion Properties.** *Materials*, vol. 5, n.13, 2022.

Kozelskaya, A.I.; Kulkova, S. E.; Fedotkin, A. Y.; Bolbasov, E. N.; Zhukov, Y. M.; Stipniece, L.; Bakulin, A. V.; Useinov, A. S.; Shesterikov, E. V.; Locs, J.; Tverdokhlebov, S. I. **Radio frequency magnetron sputtering of Sr- and Mg-substituted β tricalcium phosphate: Analysis of the physicochemical properties and deposition rate of coatings.** *Applied Surface Science*, vol.509, p.144763, 2020.

Laskus, A.; Kolmas, J. **Ionic Substitutions in Non-Apatitic Calcium Phosphates.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 18, n. 12, 2017.

Liang, L. **Filtration and Separation.** In: **Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal.** FREEMAN, H Ed. McGraw-Hill, 2ed., 1997.

Liu, X; Ma, P. X. **Polymeric Scaffolds for Bone Tissue Engineering.** *Ann. Biomed. Eng*, vol. 32, p.477-486, 2004.

Liu, W. C.; Hu, C. C.; Tseng, Y. Y.; Sakthivel, R.; Fan, K. S.; Wang, A. N.; Chung, R. J. **Study**

on strontium doped tricalcium silicate synthesized through sol-gel process. Materials Science and Engineering: C, v. 108, 2020.

Mazumder, S.; Nayak, A. K.; Ara, T. J.; Hasnain, M. S. **Hydroxyapatite composites for dentistry. Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry.** 2019, Pages 123-143.

Neves, N., Linhares, D., Costa, G., Ribeiro, C.; Barbosa, M. **In vivo and clinical application of strontium-enriched biomaterials for bone regeneration: a systematic review.** Bone & Joint Research, v.6, p.366-375, 2017.

Oliveira, L. S. A. F.; Oliveira, C. S.; Machado, A. P. L.; Rosa, F. P. **Biomateriais com aplicação na regeneração óssea – método de análise e perspectivas futuras.** Revista de Ciências Médicas e Biológicas, vol. 9, p.37-44, 2010.

Punj, S.; Singh, J.; Singh, K. **Ceramic biomaterials: Properties, state of the art and future prospectives.** Ceramics International, v.47, p.28059-28074, 2021.

Rau, J. V.; Fadeeva, I. V.; Forysenkova, A. A.; Davydova, G. A.; Fosca, M.; Filippov, Y. Y.; Antoniac, I. V.; Antoniac, A.; D'Arco, A.; Di Fabricio, M.; Petrarca, M.; Lupi, S.; Yankova, V. G.; Putlayev, V. I.; Cristea, M. B. **Strontium Substituted Tricalcium Phosphate Bone Cement: Short and Long-Term Time-Resolved Studies and In Vitro Properties.** Advanced Materials Interfaces, 2022.

Schatkoski, V. M.; Montanheiro, T. L. A.; Menezes, B. R. C.; Pereira, R. M.; Rodrigues, K. F.; Ribas, R. G.; Silva, D. M.; Thim, G. P. **Current advances concerning the most cited metal ions doped bioceramics and silicate-based bioactive glasses for bone tissue engineering.** Ceramics International, v.47, p.2999-3012, 2021.

Singh, S. S.; Roy, A.; Lee, B.; Kumta, P. N. **Study of hMSC proliferation and differentiation on Mg and Mg–Sr containing biphasic β -tricalcium phosphate and amorphous calcium phosphate ceramics.** Materials Science and Engineering C. vol.64, p.219- 228, 2016.

Somers, N.; Jean, F.; Lasgorceix, M.; Preux, N.; Delmotte, C.; Boilet, L.; Petit, F.; Leriche, A. **Fabrication of doped β -tricalcium phosphate bioceramics by Direct Ink Writing for bone repair applications.** Journal of the European Ceramic Society, vol. 43, n. 2, p. 629-638, 2023.

Sugimoto, H.; Inagaki, Y.; Furukawa, A.; Kira, T.; Kawasaki, S.; Uchihara, Y.; Akahane, M.; Tanaka, Y. **Silicate/zinc-substituted strontium apatite coating improves the osteoinductive properties of β -tricalcium phosphate bone graft substitute.** BMC Musculoskeletal Disorders, vol.22, n°673, 2021.

Tao, Z. S.; Zhou, W. S.; Xu, H. G.; Yang, M. **Aspirin modified strontium-doped β -tricalcium phosphate can accelerate the healing of femoral metaphyseal defects in ovariectomized rats.** Biomedicine & Pharmacotherapy, v. 132, 2020.

Tohidnezhad, M.; Kubo, Y.; Lichte, P.; Heigl, T.; Roch, D.; Pour, N. B.; Bergmann, C.; Sönmez, T. T.; Hock, J. V. P.; Fragoulis, A.; Gremse, F.; Rosenhain, S.; Slowik, A.; Bienert, M.; Kweider, N.; Wruck, C. J.; Jahr, H.; Hildebrand, F.; Pape, H. C.; Neuß, S.; Fischer, H.; Pufe, T. **Effects of Strontium-Doped -Tricalcium Scaffold on Longitudinal Nuclear Factor- Kappa Beta and Vascular Endothelial Growth Factor Receptor-2 Promoter Activities during Healing in a Murine Critical-Size Bone Defect Model.** International Journal of Molecular Sciences, vol. 21, n°3208, 2020.

Wang, J.; Qian, J.; Xu, W.; Wang, Y.; Hou, G.; Sun, T.; Luo, L. **Effects of Sr²⁺/Zn²⁺ co-substitution on crystal structure and properties of nano-βtricalcium phosphate.** Ceramics International, vol.44, n°6, 6096–6103, 2018.

Wang, M; Ge, X; Cui, Z; Wu, S; Zhu, S; Liang, Y; Li, Z; Lu, W. **Influences of strontium on the phase composition and lattice structure of biphasic calcium phosphate.** Ceramics International. 2021.

Wu, Y.; Zhang, S.; Sun, L.; Lu, Y.; Jiang, Y.; Xiao, G. **Strontium doping stimulates the phase composition and evolution of β-tricalcium phosphate prepared by wet chemical method.** Journal of Solid State Chemistry, v.318, 2023.

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 (β -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 

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

@editora_omnis_scientia 

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

+55 (87) 9656-3565 