

ORGANIZADOR  
Nícolás Lara

# ENGENHARIA DE MATERIAIS

materializando o futuro

• São Paulo • 2022 •



Copyright © Pimenta Cultural, alguns direitos reservados.

Copyright do texto © 2022 os autores e as autoras.

Copyright da edição © 2022 Pimenta Cultural.

Esta obra é licenciada por uma Licença Creative Commons: Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional - (CC BY-NC-ND 4.0). Os termos desta licença estão disponíveis em: <<https://creativecommons.org/licenses/>>. Direitos para esta edição cedidos à Pimenta Cultural. O conteúdo publicado não representa a posição oficial da Pimenta Cultural.

## CONSELHO EDITORIAL CIENTÍFICO

### Doutores e Doutoradas

Adilson Cristiano Habowski

*Universidade La Salle, Brasil*

Adriana Flávia Neu

*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Adriana Regina Vettorazzi Schmitt

*Instituto Federal de Santa Catarina, Brasil*

Aguimario Pimentel Silva

*Instituto Federal de Alagoas, Brasil*

Alaim Passos Bispo

*Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil*

Alaim Souza Neto

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Alessandra Knoll

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Alessandra Regina Müller Germani

*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Aline Corso

*Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil*

Aline Wendpap Nunes de Siqueira

*Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil*

Ana Rosangela Colares Lavand

*Universidade Federal do Pará, Brasil*

André Gobbo

*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Andressa Wiebusch

*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Andreza Regina Lopes da Silva

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Angela Maria Farah

*Universidade de São Paulo, Brasil*

Anísio Batista Pereira

*Universidade Federal de Uberlândia, Brasil*

Antonio Edson Alves da Silva

*Universidade Estadual do Ceará, Brasil*

Antonio Henrique Coutelo de Moraes

*Universidade Federal de Rondonópolis, Brasil*

Arthur Vianna Ferreira

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*

Ary Albuquerque Cavalcanti Junior

*Universidade do Estado da Bahia, Brasil*

Asterlindo Bandeira de Oliveira Júnior

*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Bárbara Amaral da Silva

*Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil*

Bernadette Beber

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Bruna Carolina de Lima Siqueira dos Santos

*Universidade do Vale do Itajaí, Brasil*

Bruno Rafael Silva Nogueira Barbosa

*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Caio Cesar Portella Santos

*Instituto Municipal de Ensino Superior de São Manuel, Brasil*

Carla Wanessa do Amaral Caffagni

*Universidade de São Paulo, Brasil*

Carlos Adriano Martins

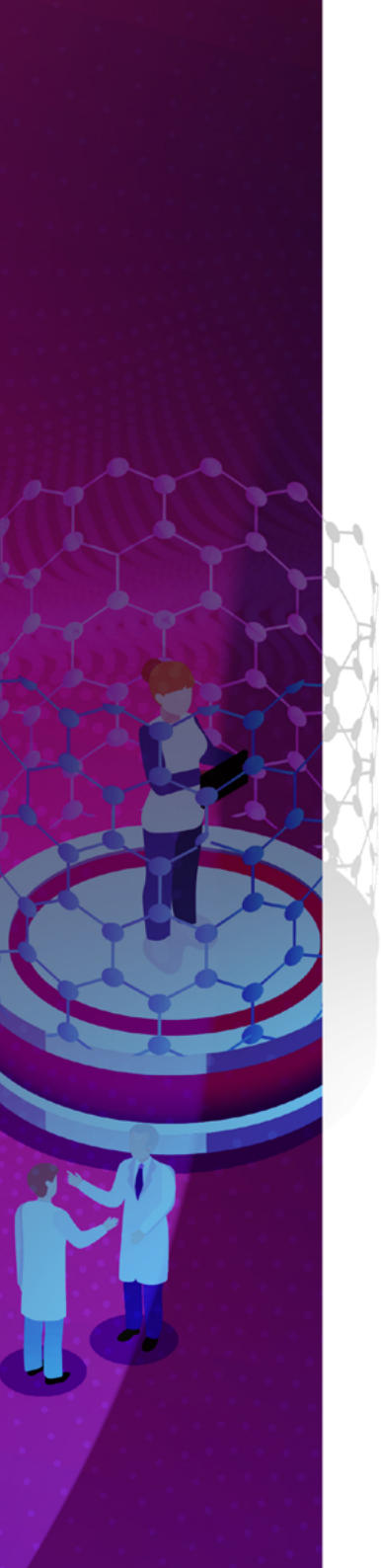
*Universidade Cruzeiro do Sul, Brasil*

Carlos Jordan Lapa Alves

*Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil*

Caroline Chioquetta Lorenset

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*



Cássio Michel dos Santos Camargo  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Faced, Brasil*

Christiano Martino Otero Avila  
*Universidade Federal de Pelotas, Brasil*

Cláudia Samuel Kessler  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*

Cristiane Silva Fontes  
*Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil*

Daniela Susana Segre Guertzenstein  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Daniele Cristine Rodrigues  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Dayse Centurion da Silva  
*Universidade Anhanguera, Brasil*

Dayse Sampaio Lopes Borges  
*Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil*

Diego Pizarro  
*Instituto Federal de Brasília, Brasil*

Dorama de Miranda Carvalho  
*Escola Superior de Propaganda e Marketing, Brasil*

Edson da Silva  
*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil*

Elena Maria Mallmann  
*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Eleonora das Neves Simões  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*

Eliane Silva Souza  
*Universidade do Estado da Bahia, Brasil*

Elvira Rodrigues de Santana  
*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Éverly Pegoraro  
*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil*

Fábio Santos de Andrade  
*Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil*

Fabricia Lopes Pinheiro  
*Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*

Felipe Henrique Monteiro Oliveira  
*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Fernando Vieira da Cruz  
*Universidade Estadual de Campinas, Brasil*

Gabriella Eldereti Machado  
*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Germano Ehlert Pollnow  
*Universidade Federal de Pelotas, Brasil*

Geymeesson Brito da Silva  
*Universidade Federal de Pernambuco, Brasil*

Giovanna Ofretorio de Oliveira Martin Franchi  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Handherson Leylton Costa Damasceno  
*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Hebert Elias Lobo Sosa  
*Universidad de Los Andes, Venezuela*

Helciclever Barros da Silva Sales  
*Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais  
Anísio Teixeira, Brasil*

Helena Azevedo Paulo de Almeida  
*Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil*

Hendy Barbosa Santos  
*Faculdade de Artes do Paraná, Brasil*

Humberto Costa  
*Universidade Federal do Paraná, Brasil*

Igor Alexandre Barcelos Graciano Borges  
*Universidade de Brasília, Brasil*

Inara Antunes Vieira Willerding  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Ivan Farias Barreto  
*Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil*

Jaziel Vasconcelos Dorneles  
*Universidade de Coimbra, Portugal*

Jean Carlos Gonçalves  
*Universidade Federal do Paraná, Brasil*

Jocimara Rodrigues de Sousa  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Joelson Alves Onofre  
*Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil*

Jónata Ferreira de Moura  
*Universidade São Francisco, Brasil*

Jorge Eschriqui Vieira Pinto  
*Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil*

Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho  
*Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil*

Juliana de Oliveira Vicentini  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Julierme Sebastião Moraes Souza  
*Universidade Federal de Uberlândia, Brasil*

Junior César Ferreira de Castro  
*Universidade Federal de Goiás, Brasil*

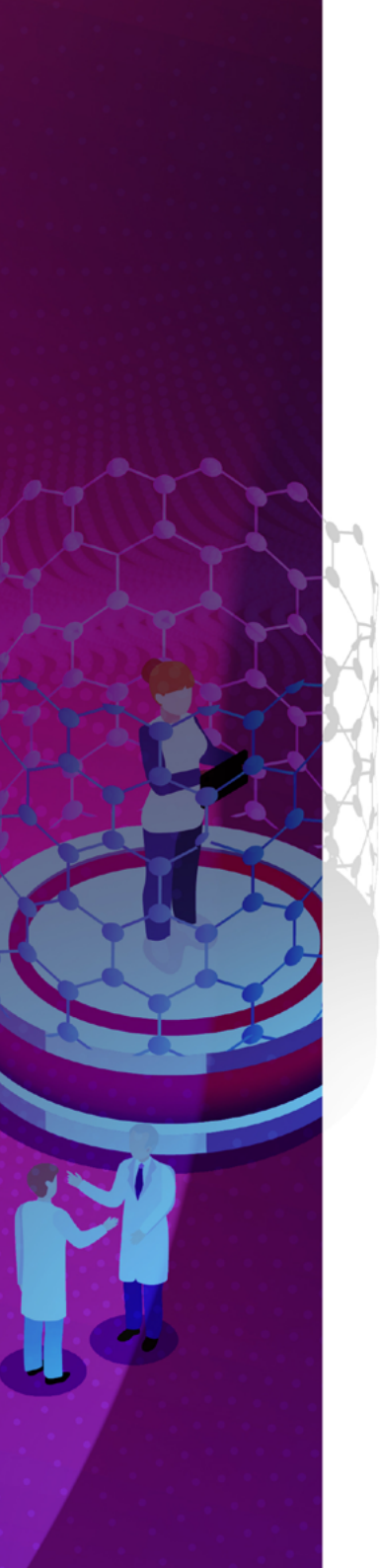
Katia Bruginski Mulik  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Laionel Vieira da Silva  
*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Leonardo Pinheiro Mozdzenski  
*Universidade Federal de Pernambuco, Brasil*

Lucila Romano Tragtenberg  
*Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil*

Lucimara Rett  
*Universidade Metodista de São Paulo, Brasil*





Manoel Augusto Polastreli Barbosa  
*Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil*

Marcelo Nicomedes dos Reis Silva Filho  
*Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil*

Marcio Bernardino Sirino  
*Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*

Marcos Pereira dos Santos  
*Universidad Internacional Iberoamericana del Mexico, México*

Marcos Uzel Pereira da Silva  
*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Maria Aparecida da Silva Santandel  
*Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil*

Maria Cristina Giorgi  
*Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Brasil*

Maria Edith Maroca de Avelar  
*Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil*

Marina Bezerra da Silva  
*Instituto Federal do Piauí, Brasil*

Michele Marcelo Silva Bortolai  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Mônica Tavares Orsini  
*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil*

Nara Oliveira Salles  
*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*

Neli Maria Mengalli  
*Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil*

Patricia Biegging  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Patricia Flavia Mota  
*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*

Raul Inácio Busarello  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Raymundo Carlos Machado Ferreira Filho  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*

Roberta Rodrigues Ponciano  
*Universidade Federal de Uberlândia, Brasil*

Robson Teles Gomes  
*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Rodiney Marcelo Braga dos Santos  
*Universidade Federal de Roraima, Brasil*

Rodrigo Amancio de Assis  
*Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil*

Rodrigo Sarruge Molina  
*Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil*

Rogério Rauber  
*Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil*

Rosane de Fatima Antunes Obregon  
*Universidade Federal do Maranhão, Brasil*

Samuel André Pompeo  
*Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil*

Sebastião Silva Soares  
*Universidade Federal do Tocantins, Brasil*

Silmar José Spinardi Franchi  
*Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil*

Simone Alves de Carvalho  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Simoni Urnau Bonfiglio  
*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Stela Maris Vaucher Farias  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*

Tadeu João Ribeiro Baptista  
*Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno  
*Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil*

Taiza da Silva Gama  
*Universidade de São Paulo, Brasil*

Tania Micheline Miorando  
*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Tarcisio Vanzin  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Tascieli Feltrin  
*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Tayson Ribeiro Teles  
*Universidade Federal do Acre, Brasil*

Thiago Barbosa Soares  
*Universidade Federal de São Carlos, Brasil*

Thiago Camargo Iwamoto  
*Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Brasil*

Thiago Medeiros Barros  
*Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil*

Tiago Mendes de Oliveira  
*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil*

Vanessa Elisabete Raue Rodrigues  
*Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil*

Vania Ribas Ulbricht  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

Wellington Furtado Ramos  
*Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil*

Wellton da Silva de Fatima  
*Instituto Federal de Alagoas, Brasil*

Yan Masetto Nicolai  
*Universidade Federal de São Carlos, Brasil*



## PARECERISTAS E REVISORES(AS) POR PARES

### Avaliadores e avaliadoras Ad-Hoc

Alessandra Figueiró Thornton

*Universidade Luterana do Brasil, Brasil*

Alexandre João Appio

*Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil*

Bianka de Abreu Severo

*Universidade Federal de Santa Maria, Brasil*

Carlos Eduardo Damian Leite

*Universidade de São Paulo, Brasil*

Catarina Prestes de Carvalho

*Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Brasil*

Eliiene Borges Leal

*Universidade Federal do Piauí, Brasil*

Elizabete de Paula Pacheco

*Universidade Federal de Uberlândia, Brasil*

Elton Simomukay

*Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil*

Francisco Geová Goveia Silva Júnior

*Universidade Potiguar, Brasil*

Indiamaris Pereira

*Universidade do Vale do Itajaí, Brasil*

Jacqueline de Castro Rimá

*Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Lucimar Romeu Fernandes

*Instituto Politécnico de Bragança, Brasil*

Marcos de Souza Machado

*Universidade Federal da Bahia, Brasil*

Michele de Oliveira Sampaio

*Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil*

Samara Castro da Silva

*Universidade de Caxias do Sul, Brasil*

Thais Karina Souza do Nascimento

*Instituto de Ciências das Artes, Brasil*

Viviane Gil da Silva Oliveira

*Universidade Federal do Amazonas, Brasil*

Weyber Rodrigues de Souza

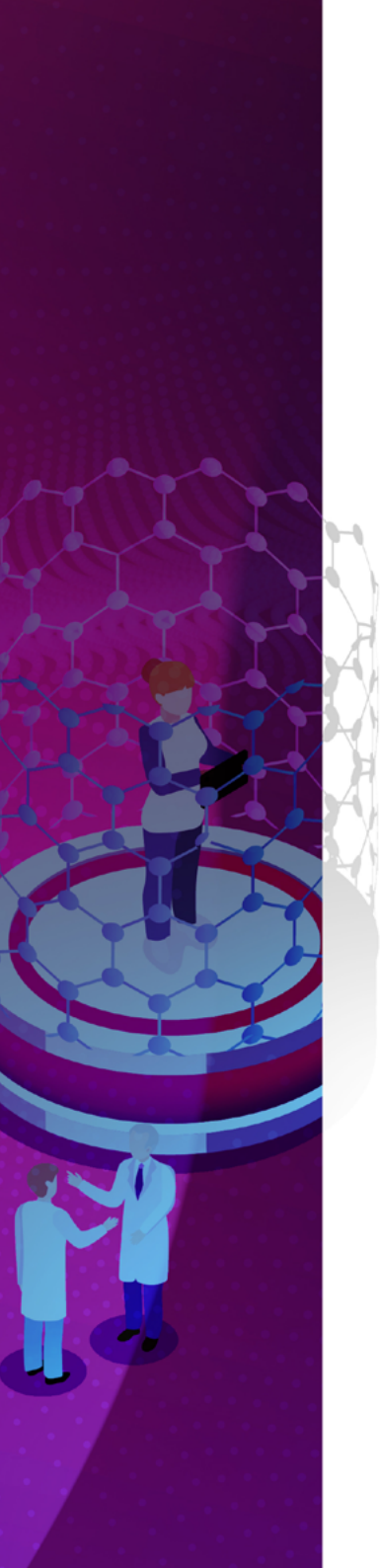
*Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Brasil*

William Roslindo Paranhos

*Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*

## PARECER E REVISÃO POR PARES

Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial da Pimenta Cultural, bem como revisados por pares, sendo indicados para a publicação.



Direção editorial	Patricia Bieging Raul Inácio Busarello
Editora executiva	Patricia Bieging
Coordenadora editorial	Landressa Rita Schiefelbein
Diretor de criação	Raul Inácio Busarello
Assistente de arte	Naiara Von Groll
Marketing digital	Lucas Andrius de Oliveira
Editoração eletrônica	Peter Valmorbida Potira Manoela de Moraes
Imagens da capa	Who Is Danny, Starline, Olenkastock, Macrovector - Freepik.com
Revisão	Os autores e as autoras
Organizador	Nícolas Lara

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia de materiais: materializando o futuro / Organizador  
Nícolas Lara. – São Paulo: Pimenta Cultural, 2022.

Livro em PDF

ISBN 978-65-5939-425-8

DOI 10.31560/pimentacultural/2022.94258

1. Engenharia de materiais. 2. Ciência. 3. Química. 4. Tecnologia.  
I. Lara, Nícolas (Organizador). II. Título.

CDD: 669

Índice para catálogo sistemático:

I. Engenharia de materiais

Janaina Ramos – Bibliotecária – CRB-8/9166

ISBN da versão impressa (brochura): 978-65-5939-424-1

**PIMENTA CULTURAL**

São Paulo · SP

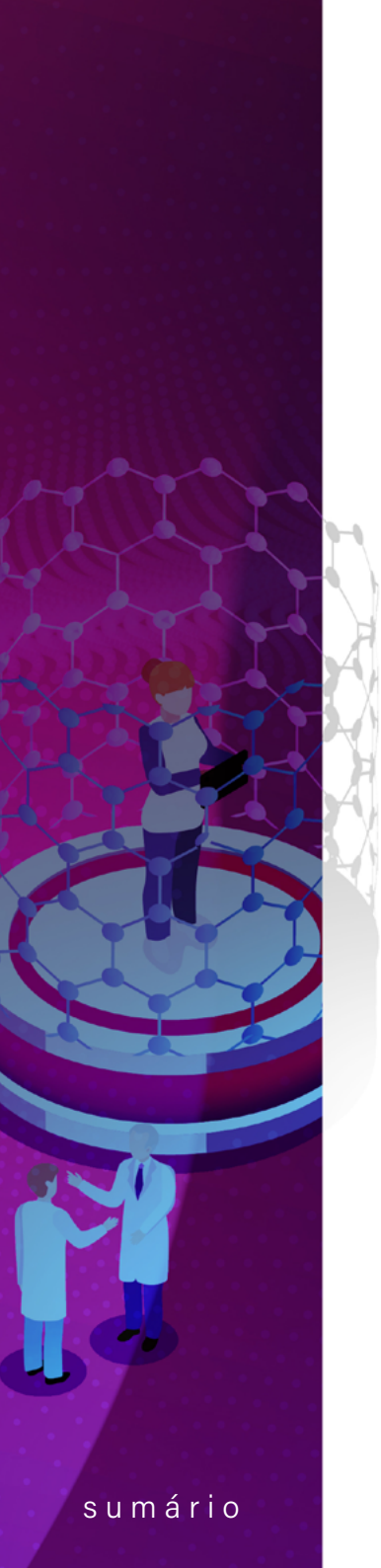
Telefone: +55 (11) 96766 2200

[livro@pimentacultural.com](mailto:livro@pimentacultural.com)

[www.pimentacultural.com](http://www.pimentacultural.com)

Nícolas Lara  
Maria Inês Basso Bernardi

## Hidroxiapatita decorada com nanopartículas de prata



**Resumo:** A hidroxiapatita é um material biocompatível, bioativo e osteocondutor, com grande potencial de aplicação em reparos ósseos, *scaffolds* para engenharia tecidual e revestimentos bioativos para implantes. No entanto, ela não possui atividade antibacteriana para prevenir infecções na área implantada, que podem levar a danos fisiológicos graves e a necessidade de procedimentos cirúrgicos de revisão. A adição de nanopartículas de prata em biomateriais tem sido feita com o objetivo de prevenir ou reduzir a formação de filme bacteriano, dada a sua excelente ação antimicrobiana. Neste capítulo, são apresentados alguns métodos de síntese de nanopartículas de prata, sua incorporação na hidroxiapatita e a vasta gama de aplicações destes nanocompósitos, que vai desde a área biomédica até a construção civil.

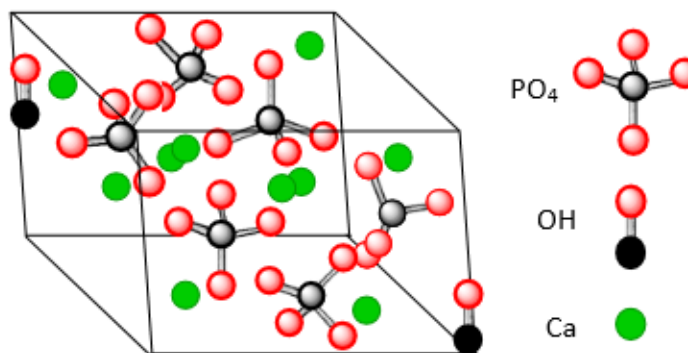
**Palavras-chave:** ação antibacteriana; biomateriais; engenharia tecidual óssea; implantes ortopédicos; nanopartículas metálicas.



## INTRODUÇÃO

A hidroxiapatita (HA,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) é o biomaterial à base de fosfato de cálcio mais promissor para aplicações em engenharia tecidual óssea, devido à sua composição e estrutura (Fig. 1) semelhante à fase mineral dos ossos (HENCH, 1998; VERRET *et al.*, 2005). Suas aplicações médicas incluem revestimentos de implantes ortopédicos (PAI *et al.*, 2020) e biocerâmicas de restauração (ZUBIETA-OTERO *et al.*, 2021) devido à sua biocompatibilidade, bioatividade e osteocondutividade. Além da área médica, a HA já encontra aplicação em compósitos de óxido metálico, como catalisador de alta eficiência (VELÁZQUEZ-HERRERA *et al.*, 2020; BEH *et al.*, 2020) e membranas de absorção de metais pesados (OULGUIDOUM, 2021).

Figura 1 – Estrutura cristalina da hidroxiapatita.



Fonte: Rujitanapanich, Kumpapan e Wanjanoi (2014).  
Disponível sob licença CC BY-NC-ND 3.0.

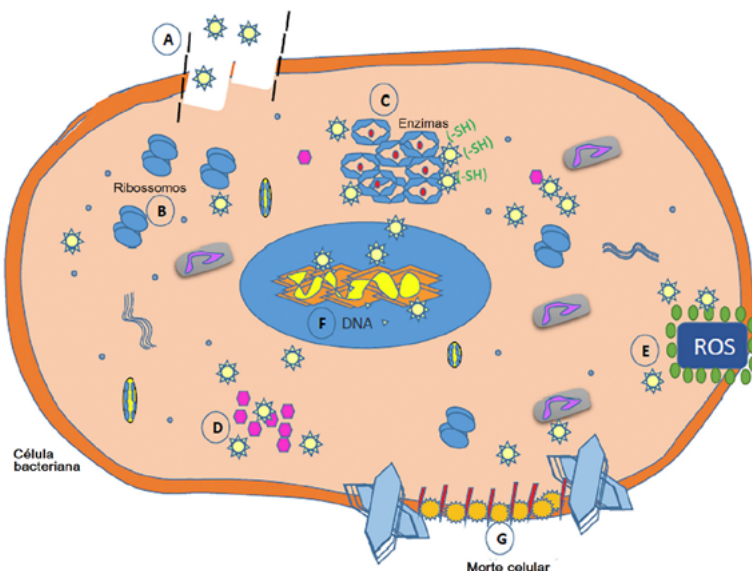
Um grande problema atual na área de implantes são as infecções pós-cirúrgicas decorrentes de biomateriais recém-implantados, uma vez que estes fornecem locais para potencial adesão bacteriana, causando dor intensa, perda de tecido ósseo e eventual necessidade de

cirurgias de revisão (HETRICK; SCHOENFISCH, 2006). A incorporação de nanopartículas metálicas antimicrobianas de cobre, zinco e prata em biomateriais tem tido resultados promissores. A prata tem sido o mais comum devido à sua atividade antibacteriana forte e não-seletiva (MOCANU *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2007; RAMESHBABU *et al.*, 2007). Além disso, sua reatividade é ainda mais eficiente quando utilizada em partículas nanométricas, devido à alta relação superfície-volume, que permite melhor contato com micro-organismos (MEYER *et al.*, 2007; XIU; MA; ALVAREZ, 2011).

## AÇÃO ANTIBACTERIANA DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA

As nanopartículas de prata (AgNP) exibem um efeito antibacteriano de amplo espectro em organismos gram-positivos e gram-negativos e em várias cepas resistentes à fármacos. De acordo com Jones e Hoek (2010), os modos de ação mais comuns são: a captação de íons livres, causando interrupção das moléculas de ATP e impedindo a replicação do DNA; a formação de espécies reativas de oxigênio e; dano direto da membrana celular por íons  $\text{Ag}^+$ . As AgNPs causam desnaturação e oxidam a parede celular de organismos gram-negativos, causando aumento da permeabilidade, resultando em lise celular (LARA *et al.*, 2010; SONDI; SALOPEK-SONDI, 2004). Também modificam o perfil de fosfotirosina de peptídeos, o que interrompe a transdução de sinal do organismo, impedindo sua multiplicação (SHRIVASTAVA *et al.*, 2009).

**Figura 2 - Mecanismo de ação antimicrobiana das nanopartículas de prata.**



Fonte: adaptado com permissão de Shrivastava *et al.* (2009). Copyright 2009 American Chemical Society.

A Figura 2 mostra as etapas do efeito antibacteriano das Ag-NPs: (A) difusão, absorção, acúmulo e dissolução das partículas na célula bacteriana, causando vazamento celular; (B) desnaturação dos ribossomos, inibindo a síntese proteica e a degradação da membrana plasmática; (C) interação enzimática, se ligando ao grupo tiol (-SH) nas enzimas respiratórias e as desativando; (D) interrupção da cadeia de transferência de elétrons, afetando as vias de sinalização; (E) dano mitocondrial, induzindo espécies de oxigênio reativo (ROS) que oxidam proteínas; (F) ligação ao DNA, impedindo sua replicação e multiplicação, causando apoptose; (G) formação de depressões e perfurações na membrana celular, levando à liberação de organelas e à morte celular (SHRIVASTAVA *et al.*, 2009).

## SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA

Um dos métodos de produção de AgNPs envolve uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), que é adicionada a uma solução de quitosana dissolvida em ácido acético a 1%, sob agitação à temperatura ambiente. Após 15 minutos, a mistura é transferida para uma cubeta e deixada em repouso para redução em banho-maria, entre 45 e 95 °C, por 6 a 12 horas (WEI; QIAN, 2008).

Outra rota (VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2022) utiliza o extrato da planta *Plumbago indica* para a síntese verde, devido ao seu alto teor de fenólicos (SINGH *et al.*, 2018). Sua parte aérea é removida, seca ao sol e pulverizada por moagem mecânica. O pó é suspenso em água bidestilada, agitado durante 2 h e filtrado em papel filtro Whatman nº 1. O extrato é misturado com solução aquosa de  $\text{AgNO}_3$ , seguido de redução assistida por micro-ondas (FATIMAH *et al.*, 2018; GARIBO *et al.*, 2020).

Ácido oleico também pode ser utilizado como estabilizador e hidrato de hidrazina como agente redutor do nitrato de prata (ZHOU *et al.*, 2020). O processo se inicia dissolvendo  $\text{AgNO}_3$  em água destilada. Enquanto isso, ácido oleico e hidrato de hidrazina são adicionados à água destilada em outro frasco. As duas soluções são misturadas com um agitador magnético por 4 h à temperatura ambiente. A morfologia das nanopartículas obtidas é esférica, com diâmetros variando de 1 a 16 nm,

## INCORPORAÇÃO DA PRATA NA HIDROXIAPATITA

A dopagem da HA com AgNPs pode ser feita por co-precipitação (VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2022). A mistura é feita a partir de CaO com razão atômica de  $\text{Ag}/(\text{Ag} + \text{Ca})$  de 0,2, dissolvida em água bidestilada e



continuamente agitada à temperatura ambiente. Dihidrogenofosfato de amônio ( $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ ) é adicionado à solução até que a razão atômica de  $(\text{Ca} + \text{Ag})/\text{P}$  seja 1,67. Após ser mantida à  $150^\circ\text{C}$  por uma noite, a pasta é seca a  $80^\circ\text{C}$  (ZHOU *et al.*, 2015; CIOBANU *et al.*, 2013).

Já pelo método de biorredução verde, é utilizada uma solução aquosa de  $\text{AgNO}_3$  como precursora. Inicialmente, pó de HA é suspenso em solução de  $\text{AgNO}_3$  e agitado magneticamente por 5 minutos. Em seguida, extrato da folha de curry (*Murraya koenigii*) é adicionado gota-a-gota à suspensão e deixado agitar durante a noite. Após a conclusão da reação, os produtos resultantes são coletados por centrifugação, filtração e finalmente secos à temperatura ambiente (BEE *et al.*, 2022).

## APLICAÇÕES

### Filmes antibacterianos para implantes metálicos

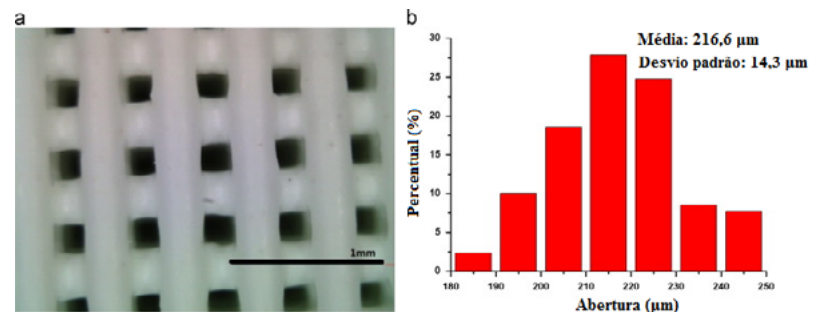
Filmes de HA dopada com AgNPs podem ser obtidos usando um filme de biovidro ( $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ ) como sacrifício em fluido corporal simulado (SBF) (TIAN *et al.*, 2016). Depois de embeber o biovidro em SBF por 12 h sob condições hidrotermais, nanobastões de HA alongados de aproximadamente  $1\ \mu\text{m}$  de comprimento e 40-80 nm de diâmetro são formados. Os nanobastões monocristalinos são orientados perpendicularmente às superfícies e compactados em camadas uniformes (CHEN *et al.*, 2014). Quando o tempo de reação hidrotérmica aumenta para 24 h, a HA consiste em cristais densos em forma de blocos de superfície lisa de 80-400 nm de largura, sobrepostos camada por camada. Nanopartículas de prata são então depositadas na HA por reação espelho (PARAKHONSKIY *et al.*, 2014).

Estes filmes mostram excelente atividade antimicrobiana contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* devido aos efeitos bactericidas das AgNPs, exibindo melhor biocompatibilidade, proliferação celular, fixação e osteoindutividade do que a liga Ti-6Al-4V não revestida (TIAN *et al.*, 2016).

## SCAFFOLDS PARA ENGENHARIA TECIDUAL ÓSSEA

*Scaffolds* de HA com tamanho de poros controláveis foram fabricados por Zhou *et al.* (2015) usando um sistema de extrusão com micro-seringas. Os *scaffolds* sinterizados são então imersos em hidrossol de reação de Ag para a dopagem. Eles exibiram uma boa atividade contra *Escherichia coli*, podendo prevenir infecções bacterianas associadas à restauração óssea.

Figura 3 – (a) Macromorfologia e (b) distribuição de tamanho dos poros no *scaffold*.



Fonte: adaptado com permissão de Zhou *et al.* (2015).  
Copyright 2016 Elsevier Ltd. and Techna Group S.r.l.

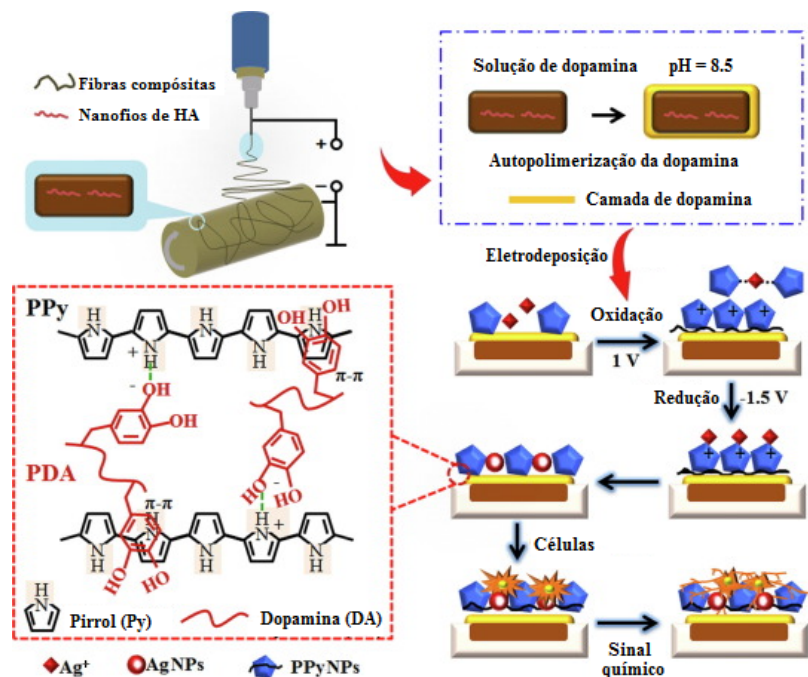
## NANOFIBRAS PARA RESINAS DENTÁRIAS

Ai *et al.* (2017) desenvolveram uma carga nanofibrosa de HA-AgNP para a preparação de uma resina antibacteriana de alto desempenho. Nanofios de HA foram produzidos via técnica hidrotérmica, seguida de modificação por dopamina, carregamento com AgNPs e mistura à resina de metacrilato de bisfenol A-Glicidilo (Bis-GMA) e dimetacrilato de etilenoglicol (TEGDMA) para obter compósitos curados. As resinas têm alta atividade antibacteriana e nenhuma citotoxicidade significativa em baixos teores de prata.

## NANOFIBRAS OSTEOINDUTIVAS PARA REPAROS ÓSSEOS

Liu *et al.* (2020) autopolimerizaram dopamina (DA) na superfície de fibras compósitas de nanofios de HA e poli(ácido láctico) (PLA) para formar uma membrana adesiva de poli(dopamina) (PDA) e AgNPs. A camada de revestimento foi construída sobre ela por coordenação e quelação de  $\text{Ag}^+$ , acionada eletroquimicamente através de mediação por poli(pirrol) (PPy). As nanopartículas foram distribuídas uniformemente nas fibras compósitas PLLA/HA/PDA/PPy/Ag (Fig. 4). As fibras apresentaram boa estabilidade fisiológica e 100% de taxa antibacteriana contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Além disso, promoveram nucleação e crescimento de apatita na superfície e boa citocompatibilidade com osteoblastos, indicando capacidade de induzir diferenciação osteogênica.

Figura 4 - Síntese de fibras osteoindutoras compósitas PLLA/HA/PDA/PPy/Ag.



Fonte: adaptado de Liu *et al.* (2020).  
Disponível sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

## CATÁLISE

Não é só na área biomédica que os compósitos HA-AgNP encontram aplicações. Hoang *et al.* (2020) imobilizaram nanopartículas de prata de forma altamente dispersa na superfície de HA sólida, por meio de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila da superfície e grupos carboxilato de íons citrato, permitindo uma função catalítica



efetiva na redução de 4-nitrofenol por borohidreto de sódio ( $\text{NaBH}_4$ ). A capacidade catalítica dos materiais aumentou com o teor de prata e a diminuição do tamanho das partículas.

O mecanismo proposto para esta redução catalítica é o seguinte: inicialmente,  $\text{BH}_4^-$  transfere hidretos para a superfície da prata. Enquanto isso, os íons 4-nitrofenolato são adsorvidos na superfície das AgNPs. Os elétrons gerados a partir dos hidretos são transferidos para os íons 4-nitrofenolato através das partículas. Os íons 4-nitrofenolato recebem elétrons e se transformam passo-a-passo em 4-nitrosofenol, 4-hidroxiaminofenol, imina 1,4-benzoquinona e são finalmente reduzidos a 4-aminofenol. Ao final do processo, ocorre a dessorção dos íons 4-nitrofenolato e a regeneração superficial das AgNPs, resultando em uma superfície livre para o próximo ciclo (HOANG *et al.*, 2020; BOA-TENG; BRAJTER-TOTH, 2012).

## AUTORREPARO DE TRINCAS EM PASTAS CIMENTÍCIAS

Simsek (2022) obteve pastas cimentícias com propriedades de autorreparo de trincas estreitas ao misturar nanocompósitos HA-AgNP em cimentos pozolânicos. A eficiência de recuperação das microfissuras foi de até 62 %, enquanto que com a adição somente de HA foi de apenas 25 %.

Esta propriedade cicatrizante está associada às ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas com grupos de íons  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{OH}^-$  carregados negativamente e ao desenvolvimento de portlandita, formada pela reação entre íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ . As nanopartículas preenchem lacunas com suas propriedades de tamanho nano e interações metal-ligante. As cargas que formam interações de íons metálicos com produtos

hidratados são uma das propriedades mais eficazes no mecanismo de autorreparo (ZHAI; NARKAR; AHN, 2020). As AgNPs em pastas de cimento migram para as fissuras, formando interações metal-íon e Ag-O, melhorando consideravelmente a capacidade cicatrizante. Além disso, formam uma barreira física entre os produtos hidratados, melhorando as propriedades mecânicas e a durabilidade das pastas (SIMSEK, 2022; ZHAI; NARKAR; AHN, 2020).

## CONCLUSÃO

Este capítulo mostrou que a dopagem da hidroxiapatita com nanopartículas de prata é um processo muito simples para criar um material altamente versátil, com aplicações que vão desde filmes antibacterianos para implantes até a regeneração de trincas em pastas cimentícias. A incorporação de partículas de outros metais ou nanomateriais de carbono na HA-AgNP e a formação de compósitos com polímeros naturais, como celulose, fibroína de seda, quitosana, amido e alginato são temas que têm muito potencial de estudo, tanto para as aplicações médicas quanto para as catalíticas.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos nº 2013/07296-2 e 2018/07517-2), CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo nº 405033/2018), PRO-NEX/FINEP e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Al, M. *et al.* Composite resin reinforced with silver nanoparticles-laden hydroxyapatite nanowires for dental application. **Dental Materials**, v. 33, n. 1, p. 12–22, jan. 2017.
- BEE, S.-L. *et al.* Green biosynthesis of hydroxyapatite-silver nanoparticle nanocomposite using aqueous Indian curry leaf (*Murraya koengii*) extract and its biological properties. **Materials Chemistry and Physics**, v. 277, p. 125455, fev. 2022.
- BEH, C. Y. *et al.* Morphological and optical properties of porous hydroxyapatite/cornstarch (HAp/Cs) composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 14267–14282, nov. 2020.
- BOATENG, A.; BRAJTER-TOTH, A. Nanomolar detection of p-nitrophenol via in situ generation of p-aminophenol at nanostructured microelectrodes. **The Analyst**, v. 137, n. 19, p. 4531, 2012.
- CHEN, W. *et al.* Antibacterial and osteogenic properties of silver-containing hydroxyapatite coatings produced using a sol gel process. **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, v. 82A, n. 4, p. 899–906, 15 set. 2007.
- CHEN, W. *et al.* Magnetic hydroxyapatite coatings with oriented nanorod arrays: hydrothermal synthesis, structure and biocompatibility. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 2, n. 12, p. 1653, 2014.
- CIOBANU, C. S. *et al.* Synthesis and Antimicrobial Activity of Silver-Doped Hydroxyapatite Nanoparticles. **BioMed Research International**, v. 2013, p. 916218, 2013.
- FATIMAH, I. *et al.* Microwave-synthesized hydroxyapatite from paddy field snail (*Pila ampullacea*) shell for adsorption of bichromate ion. **Sustainable Environment Research**, v. 28, n. 6, p. 462–471, nov. 2018.
- GARIBO, D. *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using *Lysiloma acapulcensis* exhibit high-antimicrobial activity. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 12805, 30 jul. 2020.
- HENCH, L. L. **Bioceramics**. *Journal of the American Ceramics Society*, v. 81, p. 1705–1728, 1998.
- HETRICK, E. M.; SCHOENFISCH, M. H. Reducing implant-related infections: active release strategies. **Chemical Society Reviews**, v. 35, n. 9, p. 780, 2006.

HOANG, T. T. T. L.; INSIN, N.; SUKPIROM, N. Catalytic activity of silver nanoparticles anchored on layered double hydroxides and hydroxyapatite. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 121, p. 108199, nov. 2020.

LARA, H. H. *et al.* PVP-coated silver nanoparticles block the transmission of cell-free and cell-associated HIV-1 in human cervical culture. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 8, n. 1, p. 15, 2010.

LIU, F. *et al.* Hydroxyapatite/silver electrospun fibers for anti-infection and osteoinduction. **Journal of Advanced Research**, v. 21, p. 91–102, jan. 2020.

MARAMBIO-JONES, C.; HOEK, E. M. V. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 12, n. 5, p. 1531–1551, 23 mar. 2010.

MEYER, J. N. *et al.* Intracellular uptake and associated toxicity of silver nanoparticles in *Caenorhabditis elegans*. **Aquatic Toxicology**, v. 100, n. 2, p. 140–150, out. 2010.

MOCANU, A. *et al.* Synthesis, characterization and antimicrobial effects of composites based on multi-substituted hydroxyapatite and silver nanoparticles. **Applied Surface Science**, v. 298, p. 225–235, abr. 2014.

OULGUIDOUM, A. *et al.* Mesoporous nanocrystalline sulfonated hydroxyapatites enhance heavy metal removal and antimicrobial activity. **Separation and Purification Technology**, v. 255, p. 117777, jan. 2021.

PAI, S. *et al.* A review on the synthesis of hydroxyapatite, its composites and adsorptive removal of pollutants from wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101574, dez. 2020.

PARAKHONSKIY, B. V. *et al.* Size controlled hydroxyapatite and calcium carbonate particles: Synthesis and their application as templates for SERS platform. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 118, p. 243–248, jun. 2014.

RAMESHBABU, N. *et al.* Antibacterial nanosized silver substituted hydroxyapatite: Synthesis and characterization. **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, v. 80A, n. 3, p. 581–591, 1 mar. 2007.

RUJITANAPANICH, S.; KUMPAPAN, P.; WANJANOI, P. Synthesis of Hydroxyapatite from Oyster Shell via Precipitation. **Energy Procedia**, v. 56, p. 112–117, 2014.

SHRIVASTAVA, S. *et al.* Characterization of Antiplatelet Properties of Silver Nanoparticles. **ACS Nano**, v. 3, n. 6, p. 1357–1364, 4 maio 2009.

ŞİMŞEK, B. Investigation of self-healing ability of hydroxyapatite blended cement paste modified with graphene oxide and silver nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 320, p. 126250, fev. 2022.



SINGH, K. *et al.* Biosynthesis of silver nanoparticles using *Plumbago auriculata* leaf and calyx extracts and evaluation of their antimicrobial activities. **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, v. 9, n. 3, p. 035004, 9 ago. 2018.

SONDI, I.; SALOPEK-SONDI, B. Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on *E. coli* as a model for Gram-negative bacteria. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 275, n. 1, p. 177–182, jul. 2004.

TIAN, B. *et al.* Fabrication of silver nanoparticle-doped hydroxyapatite coatings with oriented block arrays for enhancing bactericidal effect and osteoinductivity. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 61, p. 345–359, ago. 2016.

VELÁZQUEZ-HERRERA, F. D. *et al.* Towards highly efficient hydroxylapatite/hydroxyapatite composites as novel catalysts involved in eco-synthesis of chromene derivatives. **Applied Clay Science**, v. 198, p. 105833, nov. 2020.

VIJAYARAGHAVAN, P. *et al.* Preparation and antibacterial application of hydroxyapatite doped Silver nanoparticles derived from chicken bone. **Journal of King Saud University - Science**, v. 34, n. 2, p. 101749, fev. 2022.

WEI, D.; QIAN, W. Facile synthesis of Ag and Au nanoparticles utilizing chitosan as a mediator agent. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 62, n. 1, p. 136–142, mar. 2008.

XIU, Z.-M.; MA, J.; ALVAREZ, P. J. J. Differential Effect of Common Ligands and Molecular Oxygen on Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles versus Silver Ions. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 20, p. 9003–9008, 27 set. 2011.

ZAKHAROV, N. A. *et al.* Calcium Hydroxyapatite for Medical Applications. **Inorganic Materials**, v. 40, n. 6, p. 641–648, jun. 2004.

ZHAI, L.; NARKAR, A.; AHN, K. Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures. **Nano Today**, v. 30, p. 100826, fev. 2020.

ZHOU, K. *et al.* Preparation and characterization of nanosilver-doped porous hydroxyapatite scaffolds. **Ceramics International**, v. 41, n. 1, p. 1671–1676, jan. 2015.

ZHOU, Q. *et al.* Synthesis and characterization of silver nanoparticles-doped hydroxyapatite/alginate microparticles with promising cytocompatibility and antibacterial properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 585, p. 124081, jan. 2020.

ZUBIETA-OTERO, L. F. *et al.* Comparative study of physicochemical properties of bio-hydroxyapatite with commercial samples. **Materials Chemistry and Physics**, v. 259, p. 124201, fev. 2021.