

ORGANIZADOR
Nícolas 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 Doutoras

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
Antônio Henrique Coutelo de Moraes
Universidade Federal de Rondonópolis, Brasil
Arthur Vianna Ferreira
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Ary Albuquerque Cavalcanti Júnior
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
Bernadétte Beber
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
Bruna Carolina de Lima Siqueira dos Santos
Universidade do Vale do Itajá, 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 Chioqueta Lorenset
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

ENGENHARIA DE MATERIAIS



- 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
- Fabrícia 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 Ehler 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 Leyltton 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
- Iara Antunes Vieira Willelding
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 Morais Souza
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
- Junior César Ferreira de Castro
Universidade Federal de Goiás, Brasil
- Katia Bruginski Mulik
Universidade de São Paulo, Brasil
- Laiomel Vieira da Silva
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
- Leonardo Pinheiro Mozdzenski
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
- Lucília Romano Tragtenberg
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil
- Lucimara Rett
Universidade Metodista de São Paulo, Brasil

ENGENHARIA DE MATERIAIS



- 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 Santadel
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 Biegling
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 Fátima 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
- Taíza 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 Fátima
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
Elisiene Borges Leal
Universidade Federal do Piauí, Brasil
Elizabeth 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.



ENGENHARIA DE MATERIAIS

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

www.pimentacultural.com



Nícolas Lara
Maria Inês Basso Bernardi

Hidroxiapatita decorada com nanopartículas de prata



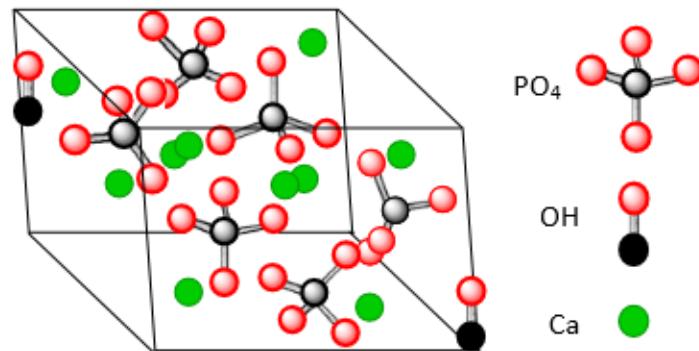
Resumo: A hidroxiapatita é um material biocompatível, bioativo e osteoconduor, com grande potencial de aplicação em reparos ósseos, scaffolds para engenharia tecidual e revestimentos bioativos para implantes. No entanto, ela não possui atividade antibacteriana para prevenir infecções na área implantada, 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 nanocompósito, 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

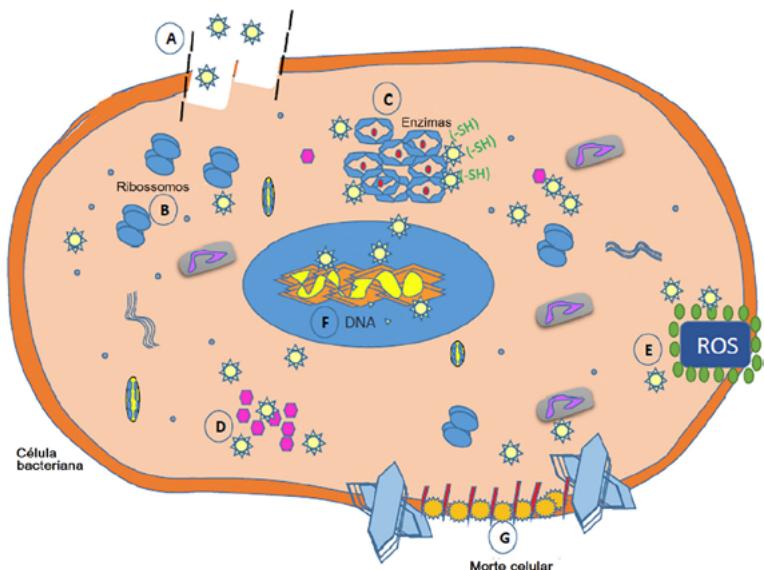


cirurgias de revisão (HETRICK; SCHOENFISCH, 2006). A incorporação de nanopartículas metálicas antimicrobianas de cobre, zinco e prata em biomateriais tem tido resultados promissores. A prata tem sido o mais comum devido à sua atividade antibacteriana forte e não-seletiva (MOCANU *et al.*, 2014; CHEN *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 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 (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 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 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 °C por uma noite, a pasta é seca a 80 °C (ZHOU *et al.*, 2015; CIOBANU *et al.*, 2013).

Já pelo método de biorredução verde, é utilizada uma solução aquosa de AgNO_3 como precursora. Inicialmente, pó de HA é suspenso em solução de 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 μm 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).

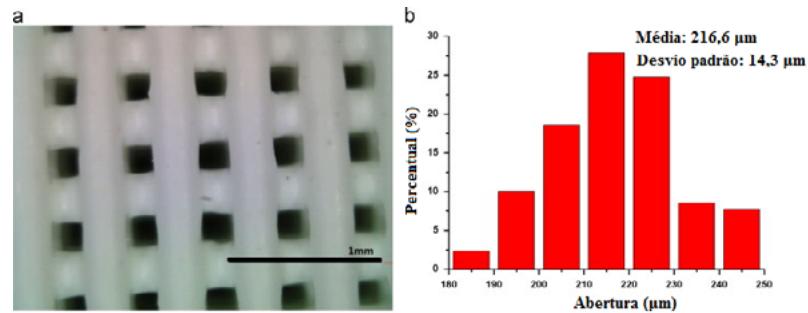


Estes filmes mostram excelente atividade antimicrobiana contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* devido aos efeitos bactericidas das AgNPs, exibindo melhor biocompatibilidade, proliferação celular, fixação e osteoindutividade do que a liga Ti-6Al-4V não revestida (TIAN *et al.*, 2016).

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

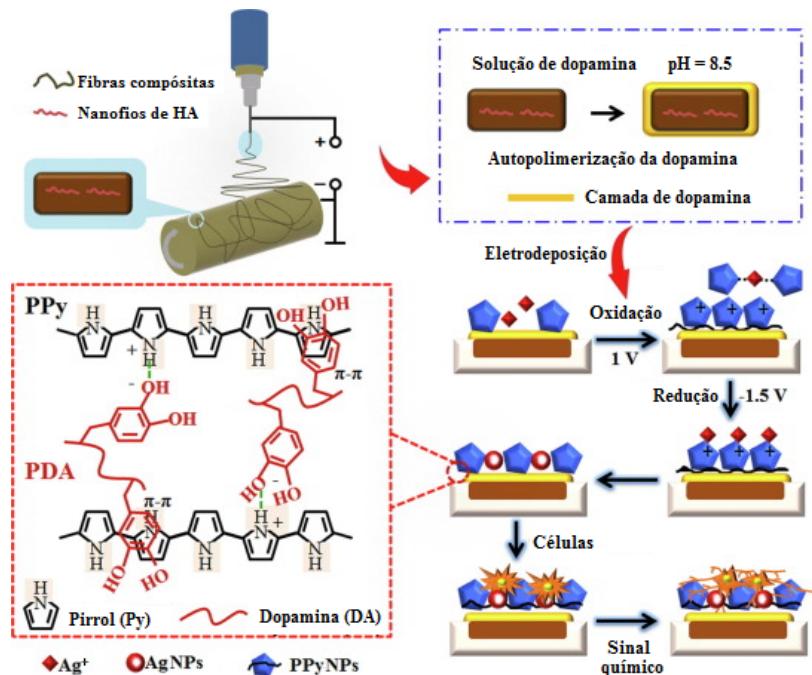
Ai *et al.* (2017) desenvolveram uma carga nanofibrosa de HA-AgNP para a preparação de uma resina antibacteriana de alto desempenho. Nanofios de HA foram produzidos via técnica hidrotérmica, seguida de modificação por dopamina, carregamento com AgNPs e mistura à resina de metacrilato de bisfenol A-Glicidilo (Bis-GMA) e di-metacrilato 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 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



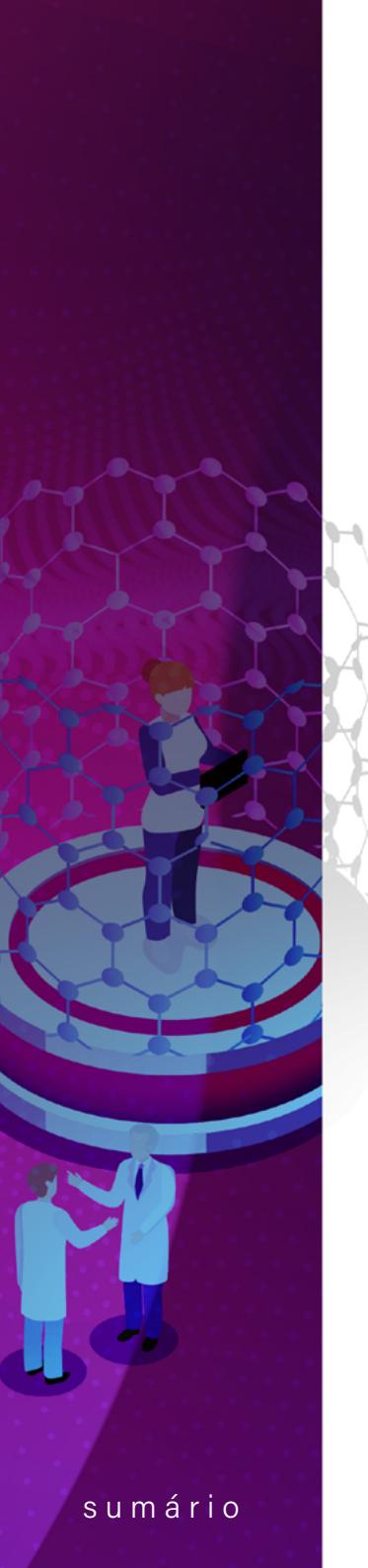
efetiva na redução de 4-nitrofenol por borohidreto de sódio (NaBH^4). A capacidade catalítica dos materiais aumentou com o teor de prata e a diminuição do tamanho das partículas.

O mecanismo proposto para esta redução catalítica é o seguinte: inicialmente, 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-aminoenol. 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; BOATENG; 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 PO^{43-} e OH^- carregados negativamente e ao desenvolvimento de portlandita, formada pela reação entre íons Ca^{2+} e 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 nº405033/2018), PRO-NEX/FINEP e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AI, 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 koenigii*) 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 Americam 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 hydroxalcite/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.