



Desenvolvimento de biomateriais para próteses de substituição articular

Pablo Nunes Breder ¹, Helen de Sousa Vasconcelos ², Juan Lorenzo Socal Souza ³, Emanuel Henrique Vieira Mantesso ⁴, Letícia Soares Pereira ⁵, Brenda Soares Ribeiro ⁶



<https://doi.org/10.36557/2674-8169.2025v7n4p1107-1121>

Artigo recebido em 14 de Março e publicado em 24 de Abril de 2025

REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

O presente artigo oferece uma análise abrangente sobre os avanços no desenvolvimento de biomateriais para próteses de substituição articular, destacando seu potencial transformador no tratamento de patologias articulares. Tecnologias emergentes, como a bioimpressão 3D e os hidrogéis avançados, estão revolucionando a maneira como as articulações são substituídas, proporcionando soluções personalizadas que promovem uma melhor integração com o tecido biológico. Os resultados discutidos evidenciam que esses novos biomateriais não apenas oferecem maior durabilidade e biocompatibilidade, mas também reduzem complicações pós-operatórias, como rejeição e inflamação. Contudo, desafios como a necessidade de aprimorar a vascularização e otimizar a interface osso-cartilagem permanecem. A pesquisa contínua e os estudos pré-clínicos são fundamentais para superar esses obstáculos, garantindo que essas inovações sejam aplicadas de maneira segura e eficaz na prática clínica. Em conclusão, embora já existam desenvolvimentos promissores, a jornada para a plena implementação clínica dos biomateriais avançados continua, com a promessa de proporcionar tratamentos mais acessíveis e eficazes para pacientes com necessidades articulares.

Palavras-chave: Artroplastia, próteses, biomateriais

Development of biomaterials for joint replacement prostheses

ABSTRACT

This article provides a comprehensive review of advances in the development of biomaterials for joint replacement prostheses, highlighting their transformative potential in the treatment of joint pathologies. Emerging technologies such as 3D bioprinting and advanced hydrogels are revolutionizing the way joints are replaced, providing personalized solutions that promote better integration with biological tissue. The results discussed demonstrate that these new biomaterials not only offer greater durability and biocompatibility, but also reduce postoperative complications such as rejection and inflammation. However, challenges such as the need to improve vascularization and optimize the bone-cartilage interface remain. Continued research and preclinical studies are essential to overcome these obstacles, ensuring that these innovations are applied safely and effectively in clinical practice. In conclusion, although promising developments have already occurred, the journey towards full clinical implementation of advanced biomaterials continues, with the promise of providing more accessible and effective treatments for patients with joint needs.

Keywords: Arthroplasty, prosthetics, biomaterials

Instituição afiliada—Faculdade de Ciências Médicas e da Saúde de Juiz de Fora, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Universidade Federal de Santa Maria, Universidade de Cuiabá, Instituto Master de Ensino Presidente Antônio Carlos

Autor correspondente: Helen de Sousa Vasconcelos, helenvasconc@gmail.com

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



INTRODUÇÃO

As doenças articulares degenerativas, como a osteoartrite, e condições que exigem substituição articular, como fraturas graves ou artrite reumatoide, representam um dos maiores desafios para os sistemas de saúde global. Estima-se que mais de 300 milhões de pessoas em todo o mundo sofram com osteoartrite [1], uma condição que afeta principalmente indivíduos idosos e está diretamente associada ao envelhecimento populacional. Essas doenças comprometem significativamente a mobilidade, a capacidade funcional e a qualidade de vida dos pacientes, levando frequentemente à incapacidade física e ao aumento do uso de recursos médicos [2]. Nesse contexto, a artroplastia – procedimento cirúrgico que envolve a substituição de articulações danificadas por próteses – tem se consolidado como uma intervenção eficaz para restaurar a função motora, reduzir a dor e melhorar a qualidade de vida desses pacientes [3].

A evolução das técnicas cirúrgicas e o desenvolvimento de biomateriais têm sido fundamentais para o sucesso das artroplastias. No entanto, o desempenho das próteses articulares depende diretamente das propriedades dos biomateriais utilizados na sua fabricação. Tradicionalmente, materiais como titânio, aço inoxidável e polietileno de ultra-alta densidade têm sido amplamente empregados devido à sua biocompatibilidade, resistência mecânica e durabilidade [4]. Apesar disso, esses biomateriais apresentam limitações, como desgaste progressivo, liberação de partículas que podem induzir reações inflamatórias e necessidade de revisões cirúrgicas após um determinado período de uso [5].

Nos últimos anos, avanços tecnológicos têm impulsionado o desenvolvimento de novos biomateriais, como hidrogéis elásticos de alta resistência, compósitos bioativos e materiais impressos em 3D, que prometem superar as limitações dos biomateriais tradicionais [6]. Esses materiais emergentes apresentam características inovadoras, como maior resistência ao desgaste, menor taxa de liberação de partículas, maior biocompatibilidade e até mesmo propriedades regenerativas, como a capacidade de estimular a formação óssea ou cartilaginosa [7]. Além disso, o advento de tecnologias como a impressão 3D permitiu a criação de próteses personalizadas,

adaptadas às características anatômicas individuais dos pacientes, o que pode melhorar ainda mais os resultados clínicos [8].

METODOLOGIA

Visando avaliar a eficácia e segurança do uso de biomateriais no desenvolvimento de próteses para substituição articular, conduziu-se uma revisão sistemática, a qual abrangeu estudos realizados em centros hospitalares ou instituições acadêmicas, utilizando critérios rigorosos de inclusão e exclusão.

A busca foi realizada nas bases de dados PubMed e SciELO, com estratégias de pesquisa específicas para cada uma delas. Utilizou-se uma combinação de palavras-chave e termos MeSH para identificar artigos relevantes. As palavras-chave principais foram: “Próteses”, “Biomateriais”, “3D”, “Humanos”, “Ortopedia” e “Articulação”. As buscas foram refinadas para incluir apenas estudos realizados em humanos e que envolvessem pacientes com doenças articulares degenerativas (como osteoartrite) ou condições que exigem substituição articular (como fraturas graves ou artrite reumatoide).

Os estudos selecionados envolveram pacientes com condições que requerem substituição articular, além de biomateriais fabricados por diferentes técnicas, como impressão 3D e moldagem, com foco na área ortopédica. As próteses incluídas tinham a finalidade de substituir articulações humanas. Foram incluídos na revisão apenas os estudos que relataram pelo menos um dos desfechos de interesse, como resultados pós-operatórios e qualidade de vida. Além disso, os estudos precisavam ter sido publicados entre 2008 e 2022 e nos idiomas português, inglês ou espanhol.

A seleção dos artigos foi realizada no dia 11 de fevereiro de 2025 por um revisor independente, que analisou os títulos e resumos para identificar os estudos potencialmente elegíveis. Quaisquer divergências na seleção foram resolvidas por consenso. O processo de seleção seguiu as diretrizes do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantidade de artigos encontrados é 97 (de PubMed e SciELO). A princípio na primeira análise foram encontrados 29 artigos e selecionados assim 6 artigos com base nos títulos e resumos, usando os critérios de exclusão: pacientes com condições que contraindicam a substituição articular, biomateriais com finalidade voltada para áreas diferentes da ortopedia, como área de cosméticos e estética e Próteses com finalidade de substituir a articulação de animais, ou que não tenham finalidade ortopédica. Logo na segunda análise foram encontrados 68 artigos e selecionados 9 artigos com base nos títulos e resumos, usando os critérios de exclusão. A revisão busca fornecer uma visão abrangente e detalhada sobre o uso de biomateriais em próteses para substituição articular, com foco nas necessidades clínicas dos pacientes.

A análise dos seis artigos (Tabela 1) permitiu compreender o processo de desenvolvimento de biomateriais para próteses de substituição articular. Esse avanço representa um método inovador no tratamento cirúrgico de patologias que exigem a substituição de articulações, pois oferece uma abordagem terapêutica mais específica e direcionada. Além disso, os resultados, apesar de ainda desafiadores, acredita-se em uma significativa melhoria na qualidade de vida dos pacientes.

Tabela 1. Lista de artigos incluídos no estudo, em ordem cronológica

Autor	Ano	Desfecho
Xu J et al.	2022	A bioimpressão 3D mostra potencial na regeneração osteocondral, porém ainda enfrenta desafios na replicação da estrutura histológica e na otimização de biomateriais.
Chen Y et al.	2022	Avanços em técnicas de construção de cartilagem artificial, incluindo biomateriais e bioimpressão 3D, com potencial para aplicações clínicas, mas ainda enfrentando desafios para translação clínica.
Dai W et al.	2020	Hidrogéis avançados impressos em 3D apresentam potencial para regeneração osteocondral e da cartilagem, mas ainda enfrentam desafios na replicação das propriedades mecânicas e biológicas do tecido natural.
Trommer RM et al.	2017	A avaliação pré-clínica do desgaste em implantes de quadril usando simuladores é essencial para prever seu desempenho e segurança antes da aplicação clínica.
Pereira Hélder et al.	2012	A substituição parcial do menisco por scaffolds acelulares de colágeno ou poliuretano mostra-se promissora, mas há desafios quanto à estabilidade e fixação dos biomateriais; abordagens combinadas com células e fatores de crescimento podem trazer avanços
Turrer CL et al.	2008	O uso de implantes de compósito bioativo de biocerâmica em matriz polimérica demonstrou boa biocompatibilidade, ausência de reações inflamatórias e manutenção da projeção das partes moles, sugerindo seu potencial para reconstrução do complexo zigomático orbitário.

Uma publicação feita na revista Suíça *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* indica que a impressão 3D tem se destacado como uma tecnologia inovadora para a engenharia de tecidos, especialmente na regeneração da interface osso-cartilagem. O estudo revisado evidencia os avanços e desafios associados a essa abordagem, considerando os aspectos biológicos, mecânicos e de design das estruturas de suporte utilizadas. [10]

Os principais avanços mencionados incluem a capacidade de criação de estruturas personalizadas com gradientes biomiméticos que favorecem a diferenciação celular e a integração dos tecidos. Além disso, a combinação de materiais naturais e sintéticos tem permitido a obtenção de hidrogéis e biocerâmicas com propriedades mecânicas aprimoradas, favorecendo a estabilidade estrutural e a proliferação celular. [10]

Entretanto, alguns desafios ainda limitam a translação clínica desta tecnologia. A otimização das biotintas para garantir a viabilidade celular e a estabilidade mecânica das estruturas é um ponto crucial. Além disso, a reprodução fiel da complexa interface osso-cartilagem exige um controle preciso sobre os gradientes bioquímicos e mecânicos ao longo da estrutura impressa. [10]

Outro aspecto relevante discutido no estudo é a necessidade de melhorar a vascularização dos implantes, visto que a cartilagem possui baixa capacidade de regenerar-se espontaneamente devido à sua natureza avascular. A incorporação de fatores de crescimento e biomateriais bioativos tem sido uma estratégia promissora para superar essa limitação. [10]

A análise também sugere que a escolha de técnicas de impressão, como deposição por extrusão e litografia, influencia diretamente na qualidade das estruturas de suporte e na distribuição celular. A impressão 3D representa um avanço na medicina regenerativa, mas desafios relacionados à estabilidade mecânica, vascularização e controle da diferenciação celular ainda precisam ser superados. Pesquisas futuras devem se concentrar na elaboração de biomateriais inteligentes e no refinamento das técnicas de bioimpressão para viabilizar a aplicação clínica dessa tecnologia de forma segura e eficaz. [10]

Em outra publicação também realizada na revista *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, indica que a impressão 3D de hidrogéis elásticos e de alta resistência tem se destacado como uma abordagem promissora para a engenharia de tecidos osteocondrais e cartilagosos. A necessidade de materiais que reproduzam a complexa estrutura e propriedades mecânicas da cartilagem articular impulsionou o desenvolvimento de hidrogéis inovadores. A revisão abordou diferentes estratégias para o aprimoramento mecânico desses biomateriais, incluindo interações iônicas, interações supramoleculares, redes nanocompósitas e química covalente dinâmica. [12]

Os hidrogéis tradicionais apresentam fragilidade mecânica, o que limita sua aplicação na reparação de tecidos cartilagosos e osteocondrais. No entanto, avanços recentes demonstram que a incorporação de interações físicas e químicas dinâmicas podem melhorar significativamente suas propriedades mecânicas, tornando-os mais semelhantes ao tecido nativo. Em particular, a combinação de interações iônicas e ligações covalentes dinâmicas permitiu a criação de hidrogéis ultra-resistentes, capazes de suportar cargas mecânicas e promover a adesão celular. [12]

Outro aspecto relevante é a capacidade de impressão 3D desses hidrogéis. A tecnologia permite a fabricação de andaimes personalizáveis, que podem ser projetados para imitar as zonas estratificadas da cartilagem e sua interface com o osso subjacente.

A revisão destacou a importância das propriedades de escoamento e da capacidade de cura automática dos hidrogéis para garantir a viabilidade da impressão 3D e a funcionalidade dos biomateriais. [12]

Apesar dos avanços, também apresentam desafios que ainda precisam ser superados antes da translação clínica dessas tecnologias. A estabilidade a longo prazo, a integração eficiente com o tecido hospedeiro e a biocompatibilidade dos hidrogéis precisam ser cuidadosamente avaliadas. Ensaio pré-clínicos e estudos in vivo devem ser ampliados para validar a segurança e a eficácia desses biomateriais. [10]

Um estudo publicado na Revista Brasileira de Ortopedia (RBO) destacou a relevância da avaliação pré-clínica do desgaste em implantes de quadril, considerando que a longevidade e o desempenho clínico dessas próteses estão diretamente relacionados à tribologia e à biocompatibilidade dos materiais utilizados. A artroplastia total do quadril (ATQ) é um procedimento consolidado, mas a geração de partículas de desgaste pode levar a complicações como osteólise e necessidade de revisão cirúrgica. [14]

Os testes de simulação de desgaste são essenciais para prever o comportamento das próteses antes da aplicação clínica, permitindo a comparação entre diferentes combinações de materiais, como metal-polímero, cerâmica-polímero, metal-metal e cerâmica-cerâmica. Essas simulações replicam as condições fisiológicas de carga e movimento, proporcionando uma análise mais realista do desgaste esperado. [14]

No contexto internacional, a normatização dos testes, como a ISO 14242, busca padronizar os protocolos de avaliação de desgaste, garantindo reprodutibilidade e comparação entre estudos. No entanto, há desafios na aplicação desses métodos, incluindo diferenças nos equipamentos utilizados, variação nas condições de lubrificação e dificuldades na mensuração precisa da taxa de desgaste. [14]

O artigo também discute a necessidade de desenvolvimento de protocolos mais rigorosos, incluindo testes sob condições adversas, que simulam situações mais severas de uso, como cargas elevadas e posicionamento inadequado dos componentes. Tais testes são fundamentais para prever problemas clínicos como ruído anormal (“squeaking”) e carga na borda do implante. [14]

Segundo o artigo “Uso de implantes de compósito bioativo de biocerâmica em

matriz polimérica na reconstrução do complexo zigomático orbitário: novas perspectivas em biomateriais” a necessidade de enxertos ósseos autógenos ou biomateriais para restaurar o tecido ósseo é sempre um tópico de discussão . Atualmente, um dos principais materiais comercializados para este fim, é o polietileno poroso de alta densidade, registrado pela Medpor, e fabricado pela Porex, nos EUA, que apresenta desvantagens como o custo elevado, e complicações relacionadas a reações inflamatórias.[13]

Dessa forma, visando reduzir as infecções inflamatórias e sistêmicas, a biocompatibilidade vem sendo muito estudada, já que o conhecimento das propriedades particulares dos materiais e sua indicação em determinado local podem melhorar os fenômenos de biointegração. O uso de implantes de matriz polimérica e biocerâmica tem se mostrado favorável para este objetivo, o componente polimérico possui a capacidade de se moldar facilmente, o que permite fácil manuseio durante as cirurgias permitindo sua rápida adaptação, além do implante por fibroblastos que migram para o interior dos poros aumentando a integração do material. O componente cerâmico provoca deposição de hidroxiapatita carbonada na superfície do implante, favorecendo sua adesão a superfície receptora. Essa característica se mostrou vantajosa em relação ao padrão ouro, pois a diferença entre a composição celular se mostrou menos inflamatória no composto.[13]

No estudo realizado, os pacientes apresentaram edema, hiperemia, e dor no pós-operatório reduzindo em 15 a 30 dias de pós-operatório, sem qualquer intercorrência, apresentando uma evolução esperada. Os implantes de palpação estavam bem posicionados, não havendo nenhum caso de infecção.[13]

No entanto, ajustes são necessários para uma melhor adaptação com a superfície óssea, a capacidade técnica de esculpir e montar o implante, é chamada de trabalhabilidade e é essencial para um resultado positivo. Neste aspecto, implantes cerâmicos apresentam desvantagem, pois são rígidos e com pouca plasticidade, e mesmo feitos sob medida para cada caso, podem produzir rachaduras microscópicas devido a sua baixa tecnicidade, contribuindo para o insucesso deste tipo de implante. Já nos implantes com polímero poroso, a plasticidade é alta, mas apresentam menor resistência a carregamento mecânico, não devendo ser utilizados em área de esforço

contínuo. Os pacientes operados serão acompanhados por mais tempo, mas até o momento os resultados têm sido favoráveis para a continuação das etapas de investigação deste novo material.[13]

Na revisão sistemática “Regeneração do Menisco Humano por Engenharia de tecidos” publicada em 2012, existem poucos biomateriais em aplicação clínica atualmente com esta finalidade, diferentes opções têm sido testadas, mas muitas questões permanecem por responder, apesar de os ensaios pré-clínicos terem apresentado perspectivas promissoras. Materiais de colágeno e poliuretano já estão comercialmente disponíveis para a substituição parcial de meniscos, no entanto, existem muitas dúvidas com relação à estabilidade e a taxa de degradação. Outros estudos combinam estratégias de regeneração baseadas em abordagens acelulares e celulares, existindo divergências nos estudos clínicos e pré-clínicos. [15]

Para cumprir o objetivo de recuperação destes tecidos, são necessários muitos estudos, visando aplicar a tríade de Engenharia de Tecidos (matrizes, células, fatores de crescimento, ou substâncias bioativas) , ou mesmo questões mais complexas da Medicina Regenerativa. Foi testado um novo biomaterial, derivado de uma solução aquosa de elevada concentração de fibroína de seda, esta nova scaffold apresenta vantagens em comparação aos materiais existentes. A hipótese é que estes materiais processados como scaffolds combinados com células permitirão novas estratégias regenerativas, reduzindo preocupações atuais na prática clínica. A substituição por scaffolds acelulares, em pacientes com lesões de menisco irreparáveis vem se mostrando algo promissor, a maioria dos estudos pré-clínicos aponta vantagens para abordagens que relacionem os scaffolds com células de origem diversa e/ou fatores de crescimento. Contudo, existem preocupações relacionadas a fixação inicial e estabilidade dos biomateriais. [15]

Já o estudo “Avanços em Cartilagem Articular Artificial” afirma que métodos com e sem scaffolds(suportes) são utilizados para construir a cartilagem artificial, e aplicações clínicas demonstram eficácia na regeneração de cartilagem em articulações como a da boca e do joelho, mas as pesquisas continuam a avançar, buscando melhorias na biocompatibilidade e tratamentos efetivos. [11]

Foram analisados diferentes estudos , que utilizavam diversos tipos de

bioengenharia, como a descelularização, a liofilização, a eletrofiação, o bioprinting 3D e o método de scaffold. Os resultados obtidos foram que a combinação de células tronco com scaffolds mostrou-se promissora na regeneração, a liofilização, apesar de eficaz, pode aumentar os custos, e que são necessárias melhorias nas propriedades mecânicas dos scaffolds para o sucesso clínico.[11]

Os avanços tecnológicos, como a bioimpressão 3D e os hidrogéis de alta resistência, oferecem novas perspectivas para o tratamento de patologias articulares. No entanto, ainda existem desafios significativos, como a necessidade de melhorar a vascularização e a durabilidade dos implantes, além de otimizar a interface osso-cartilagem. A continuação das pesquisas e dos estudos pré-clínicos é fundamental para validar essas inovações e assegurar sua aplicação segura e eficaz na prática clínica.[11]

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A constante evolução dos biomateriais para próteses de substituição articular tem demonstrado um impacto significativo na melhoria das abordagens terapêuticas para patologias articulares degenerativas e outras condições que exigem intervenção cirúrgica. Tecnologias emergentes, como a bioimpressão 3D, hidrogéis reforçados e scaffolds inteligentes, oferecem perspectivas inovadoras para a substituição articular, promovendo maior personalização dos implantes, melhor integração tecidual e potencial regenerativo dos materiais.

Os estudos analisados evidenciam que a adoção de biomateriais avançados não apenas melhora a durabilidade e a biocompatibilidade das próteses, mas também reduz complicações pós-operatórias, como rejeição e processos inflamatórios associados a materiais convencionais. Além disso, a personalização de implantes por meio da engenharia de tecidos e das técnicas de fabricação aditivas tem se mostrado uma alternativa promissora para maximizar a funcionalidade e a longevidade dos dispositivos ortopédicos.

Apesar dos avanços notáveis, desafios persistem. A necessidade de melhorar a vascularização dos implantes, aumentar a resistência mecânica sem comprometer a biocompatibilidade e aprimorar a interface osso-cartilagem continua sendo um obstáculo para a aplicação clínica generalizada desses materiais. Além disso, a

viabilidade econômica e a acessibilidade dessas tecnologias precisam ser abordadas para poderem ser amplamente incorporadas na prática médica.

Dessa forma, pesquisas contínuas são essenciais para validar e aprimorar essas inovações, garantindo que os novos biomateriais ofereçam não apenas benefícios biomecânicos e funcionais, mas também segurança a longo prazo para os pacientes. Estudos clínicos mais amplos, investigações sobre o comportamento dos biomateriais no ambiente fisiológico e desenvolvimento de protocolos padronizados para avaliação de desempenho são passos fundamentais para consolidar o uso dessas tecnologias na medicina regenerativa.

Assim, embora já existam soluções inovadoras e promissoras, a jornada para a plena implementação clínica dos biomateriais avançados ainda requer refinamento técnico, validação científica e adaptação às necessidades individuais dos pacientes. Com a continuidade das pesquisas e o avanço das técnicas biomédicas, a substituição articular pode se tornar cada vez mais efetiva, segura e acessível, oferecendo melhor qualidade de vida para milhões de pessoas que necessitam dessas intervenções.

REFERÊNCIAS

1. World Health Organization (WHO). Musculoskeletal conditions. WHO; 2022 [citado 11 fev. 2025]. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>
2. Cross M, Smith E, Hoy D, et al. The global burden of hip and knee osteoarthritis: Estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Ann Rheum Dis.* 2014;73(7):1323–30. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2013-204763>
3. Kurtz S, Ong K, Lau E, et al. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *J Bone Joint Surg Am.* 2007;89(4):780–5. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.00222>
4. Turrer CL, Figueiredo ARP, Oréface RL, Maciel PE, Silveira MES, Gonçalves SP, et al. O uso de implantes de compósito bioativo de biocerâmica em matriz polimérica na

- reconstrução do complexo zigomático orbitário: novas perspectivas em biomateriais. *Arq Bras Oftalmol.* 2008;71(2):153–61. <https://doi.org/10.1590/S0004-27492008000200005>
5. Trommer RM, Maru MM. Importance of preclinical evaluation of wear in hip implant designs using simulator machines. *Rev Bras Ortop.* 2017;52(3):251–9. <https://doi.org/10.1016/j.rboe.2016.07.004>
 6. Dai W, Sun M, Leng X, Hu X, Ao Y. Recent progress in 3D printing of elastic and high-strength hydrogels for the treatment of osteochondral and cartilage diseases. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:604814. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.604814>
 7. Chen Y, Zhang C, Zhang S, Qi H, Zhang D, Li Y, Fang J. Novel advances in strategies and applications of artificial articular cartilage. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:987999. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.987999>
 8. Xu J, Ji J, Jiao J, Zheng L, Hong Q, Tang H, Zhang S, Qu X, Yue B. 3D printing for bone-cartilage interface regeneration. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:828921. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.828921>
 9. PubMed; SciELO. Base de dados científicos [Internet]. [citado 11 fev. 2025]. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> e <https://www.scielo.org/>
 10. Dai W, Sun M, Leng X, Hu X, Ao Y. Recent progress in 3D printing of elastic and high-strength hydrogels for the treatment of osteochondral and cartilage diseases. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020 Nov 27;8:604814. doi: 10.3389/fbioe.2020.604814. PMID: 33330436; PMCID: PMC7729093.
 11. Chen Y, Zhang C, Zhang S, Qi H, Zhang D, Li Y, Fang J. Novel advances in strategies and applications of artificial articular cartilage. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022 Aug 22;10:987999. doi: 10.3389/fbioe.2022.987999. PMID: 36072291; PMCID: PMC9441570.
 12. Xu J, Ji J, Jiao J, Zheng L, Hong Q, Tang H, Zhang S, Qu X, Yue B. 3D printing for bone-



- cartilage interface regeneration. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022 Feb 14;10:828921. doi: 10.3389/fbioe.2022.828921. PMID: 35237582; PMCID: PMC8882993.
13. Turrer CL, Figueiredo ARP, Oréfice RL, Maciel PE, Silveira MES, Gonçalves SP, et al. O uso de implantes de compósito bioativo de biocerâmica em matriz polimérica na reconstrução do complexo zigomático orbitário: novas perspectivas em biomateriais. *Arq Bras Oftalmol [Internet].* 2008 Mar;71(2):153–61. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0004-27492008000200005>
 14. Trommer RM, Maru MM. Importance of preclinical evaluation of wear in hip implant designs using simulator machines. *Rev Bras Ortop [Internet].* 2017 May;52(3):251–9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rboe.2016.07.004>
 15. Pereira H, Silva-Correia J, Frias AM, Oliveira JM, Montes JM, Reis RL, et al. Regeneração do menisco humano por engenharia de tecidos: nova abordagem celular e acelular. *Rev Port Ortop Traum [Internet].* 2012 Jun [citado 2025 fev 12];20(2):127–66. Disponível em: http://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1646-21222012000200002&lng=pt