



## **Bioimpressão 3D na reconstrução osteoarticular: estado da arte e perspectivas clínicas**

*3D Bioprinting in Osteoarticular Reconstruction: State of the Art and Clinical Perspectives*

*Bioimpresión 3D en la Reconstrucción Osteoarticular: Estado del Arte y Perspectivas Clínicas*



<https://doi.org/10.5281/zenodo.21366781>

**Loren Alves Castilho Pereira**

*Medicina*

*Universidade Anhanguera-UNIDERP, Brasil*

*e-mail: [lorenalvesvevo@gmail.com](mailto:lorenalvesvevo@gmail.com)*

- **Tipo de Estudo:** Revisão de Literatura
- **Recebido:** 11/05/2026
- **Aceito:** 25/06/2026
- **Publicado:** 14/07/2026



*This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), and a [LOCKSS](https://www.lockss.org/) system.*

### **RESUMO**

A bioimpressão tridimensional (3D bioprinting) tem emergido como uma das principais tecnologias da medicina regenerativa, permitindo a fabricação de tecidos biológicos personalizados por meio da deposição controlada de células, biomateriais e moléculas bioativas. O objetivo desta revisão foi analisar as evidências científicas sobre as aplicações da bioimpressão 3D na reconstrução osteoarticular, abordando seus avanços tecnológicos, aplicações clínicas, benefícios, limitações e perspectivas futuras. Foi realizada uma revisão integrativa da literatura mediante busca nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science, incluindo estudos publicados entre 2020 e 2026. Os estudos analisados demonstraram que a bioimpressão apresenta aplicações promissoras na regeneração óssea, reconstrução da cartilagem, tratamento de defeitos osteocondrais, engenharia de meniscos e



desenvolvimento de enxertos personalizados. Entre os principais benefícios destacam-se a elevada precisão anatômica, a personalização dos implantes, a melhora da integração tecidual e o potencial para otimizar os resultados cirúrgicos. Entretanto, desafios relacionados à vascularização, propriedades mecânicas dos biomateriais, padronização das biotintas, regulamentação e validação clínica ainda limitam sua ampla utilização. Conclui-se que a bioimpressão 3D possui elevado potencial para transformar a reconstrução osteoarticular, constituindo uma estratégia promissora para o futuro da ortopedia regenerativa e da medicina personalizada.

**Palavras-chave:** Bioimpressão 3D; Engenharia tecidual; Reconstrução osteoarticular; Medicina regenerativa; Ortopedia.

### **ABSTRACT**

*Three-dimensional (3D) bioprinting has emerged as one of the leading technologies in regenerative medicine, enabling the fabrication of personalized biological tissues through the controlled deposition of living cells, biomaterials, and bioactive molecules. This review aimed to analyze the scientific evidence regarding the applications of 3D bioprinting in osteoarticular reconstruction, focusing on technological advances, clinical applications, benefits, limitations, and future perspectives. An integrative literature review was conducted using PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science, including studies published between 2020 and 2026. The selected studies demonstrated promising applications in bone regeneration, cartilage reconstruction, osteochondral defect repair, meniscal tissue engineering, and the development of personalized grafts. The main advantages include high anatomical precision, implant customization, improved tissue integration, and the potential to optimize surgical outcomes. However, challenges related to tissue vascularization, mechanical properties of biomaterials, bioink standardization, regulatory issues, and clinical validation still limit widespread clinical implementation. In conclusion, 3D bioprinting has significant potential to transform osteoarticular reconstruction and represents a promising strategy for the future of regenerative orthopedics and personalized medicine.*

**Keywords:** 3D bioprinting; Tissue engineering; Osteoarticular reconstruction; Regenerative medicine; Orthopedics.

### **RESUMEN**

*La bioimpresión tridimensional (3D bioprinting) ha surgido como una de las principales tecnologías de la medicina regenerativa, permitiendo la fabricación de tejidos biológicos personalizados mediante la deposición controlada de células vivas, biomateriales y moléculas bioactivas. El objetivo de esta revisión fue analizar la evidencia científica sobre las aplicaciones de la bioimpresión 3D en la reconstrucción osteoarticular, abordando sus avances tecnológicos, aplicaciones clínicas, beneficios, limitaciones y perspectivas futuras. Se realizó una revisión integradora de la literatura mediante búsquedas en las bases de datos PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science, incluyendo estudios*



*publicados entre 2020 y 2026. Los estudios analizados demostraron aplicaciones prometedoras en la regeneración ósea, reconstrucción del cartílago, tratamiento de defectos osteocondrales, ingeniería de meniscos y desarrollo de injertos personalizados. Entre las principales ventajas destacan la elevada precisión anatómica, la personalización de los implantes, la mejora de la integración tisular y el potencial para optimizar los resultados quirúrgicos. Sin embargo, los desafíos relacionados con la vascularización de los tejidos, las propiedades mecánicas de los biomateriales, la estandarización de las biotintas, la regulación y la validación clínica aún limitan su aplicación a gran escala. Se concluye que la bioimpresión 3D posee un gran potencial para transformar la reconstrucción osteoarticular y constituye una estrategia prometedora para el futuro de la ortopedia regenerativa y la medicina personalizada.*

**Palabras clave:** Bioimpresión 3D; Ingeniería de tejidos; Reconstrucción osteoarticular; Medicina regenerativa; Ortopedia.

## 1. INTRODUÇÃO

As doenças e lesões do sistema osteoarticular representam uma das principais causas de incapacidade funcional e redução da qualidade de vida em todo o mundo. Fraturas complexas, defeitos ósseos segmentares, lesões osteocondrais, osteoartrite e doenças degenerativas da cartilagem continuam a desafiar a prática ortopédica, uma vez que os tratamentos convencionais, embora eficazes em muitos casos, apresentam limitações relacionadas à regeneração completa dos tecidos, integração biológica dos implantes, disponibilidade de enxertos e risco de complicações pós-operatórias. Nesse contexto, a medicina regenerativa tem impulsionado o desenvolvimento de novas estratégias terapêuticas voltadas à reconstrução funcional dos tecidos musculoesqueléticos<sup>1</sup>.

Entre essas inovações, a bioimpressão tridimensional (3D bioprinting) destaca-se como uma tecnologia emergente capaz de fabricar estruturas biológicas complexas por meio da deposição controlada de biotintas compostas por células vivas, biomateriais, fatores de crescimento e componentes da matriz extracelular. Diferentemente da impressão tridimensional convencional, utilizada principalmente para produção de modelos anatômicos e implantes personalizados, a bioimpressão busca reproduzir tecidos biologicamente ativos capazes de promover regeneração, vascularização e integração funcional após o implante. Essa abordagem amplia significativamente as possibilidades terapêuticas da engenharia tecidual aplicada à ortopedia<sup>2</sup>.

Os avanços recentes em biomateriais, bioengenharia, cultura celular, células-tronco, biomateriais inteligentes e biofabricação têm acelerado o desenvolvimento de construtos tridimensionais cada vez mais semelhantes aos tecidos humanos. A associação entre bioimpressão 3D,

modelagem computacional, inteligência artificial e técnicas avançadas de imagem permite o desenvolvimento de enxertos personalizados adaptados às características anatômicas e biomecânicas de cada paciente. Dessa forma, torna-se possível reconstruir defeitos ósseos e osteocondrais com maior precisão, favorecendo a regeneração tecidual e reduzindo as limitações observadas nos métodos reconstrutivos convencionais<sup>3</sup>.

Na ortopedia, a bioimpressão 3D tem demonstrado aplicações promissoras na regeneração óssea, reconstrução de cartilagem articular, reparo de meniscos, tratamento de defeitos osteocondrais, desenvolvimento de enxertos vascularizados e produção de modelos experimentais para pesquisa translacional. Além disso, a possibilidade de combinar diferentes tipos celulares, biomateriais bioativos e fatores osteogênicos permite reproduzir a arquitetura e a funcionalidade dos tecidos osteoarticulares com elevado grau de complexidade, aproximando essa tecnologia da prática clínica<sup>4</sup>.

Apesar do expressivo avanço científico observado nos últimos anos, a utilização rotineira da bioimpressão 3D na reconstrução osteoarticular ainda enfrenta desafios importantes. Questões relacionadas à escolha das biotintas, manutenção da viabilidade celular, vascularização dos tecidos bioimpressos, propriedades mecânicas dos construtos, escalabilidade da produção, regulamentação, custos e validação clínica permanecem como obstáculos para sua ampla implementação. Além disso, a necessidade de estudos clínicos bem delineados que demonstrem segurança, eficácia e durabilidade dos tecidos bioimpressos constitui etapa essencial para a incorporação dessa tecnologia na prática ortopédica<sup>5</sup>.

Diante desse cenário, esta revisão de literatura tem como objetivo analisar as evidências científicas disponíveis sobre a aplicação da bioimpressão 3D na reconstrução osteoarticular, abordando seus principais avanços tecnológicos, aplicações clínicas, benefícios, limitações e perspectivas futuras, destacando o potencial dessa tecnologia como ferramenta inovadora para a medicina regenerativa e a ortopedia personalizada.

## **2. METODOLOGIA**

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, realizada com o objetivo de reunir e analisar as evidências científicas disponíveis sobre a aplicação da bioimpressão tridimensional (3D bioprinting) na reconstrução osteoarticular.



A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science, utilizando descritores controlados dos *Medical Subject Headings* (MeSH) e palavras-chave relacionadas ao tema. Foram empregados os seguintes termos: "3D Bioprinting", "Bioprinting", "Bone Regeneration", "Cartilage Regeneration", "Osteochondral Defect", "Orthopedics" e "Musculoskeletal Tissue Engineering", combinados pelos operadores booleanos AND e OR.

Foram incluídos artigos científicos publicados entre 2020 e 2026, nos idiomas inglês, português e espanhol, disponíveis na íntegra, que abordassem a utilização da bioimpressão 3D na regeneração e reconstrução de tecidos osteoarticulares, incluindo osso, cartilagem e defeitos osteocondrais. Foram considerados estudos originais, revisões de literatura, revisões sistemáticas e metanálises.

Após a identificação dos estudos, foi realizada a leitura dos títulos e resumos para seleção das publicações potencialmente relevantes, seguida da leitura completa dos artigos elegíveis. Os estudos incluídos foram analisados quanto aos objetivos, delineamento metodológico, biomateriais utilizados, tipos celulares empregados, aplicações ortopédicas, principais resultados, limitações e perspectivas clínicas.

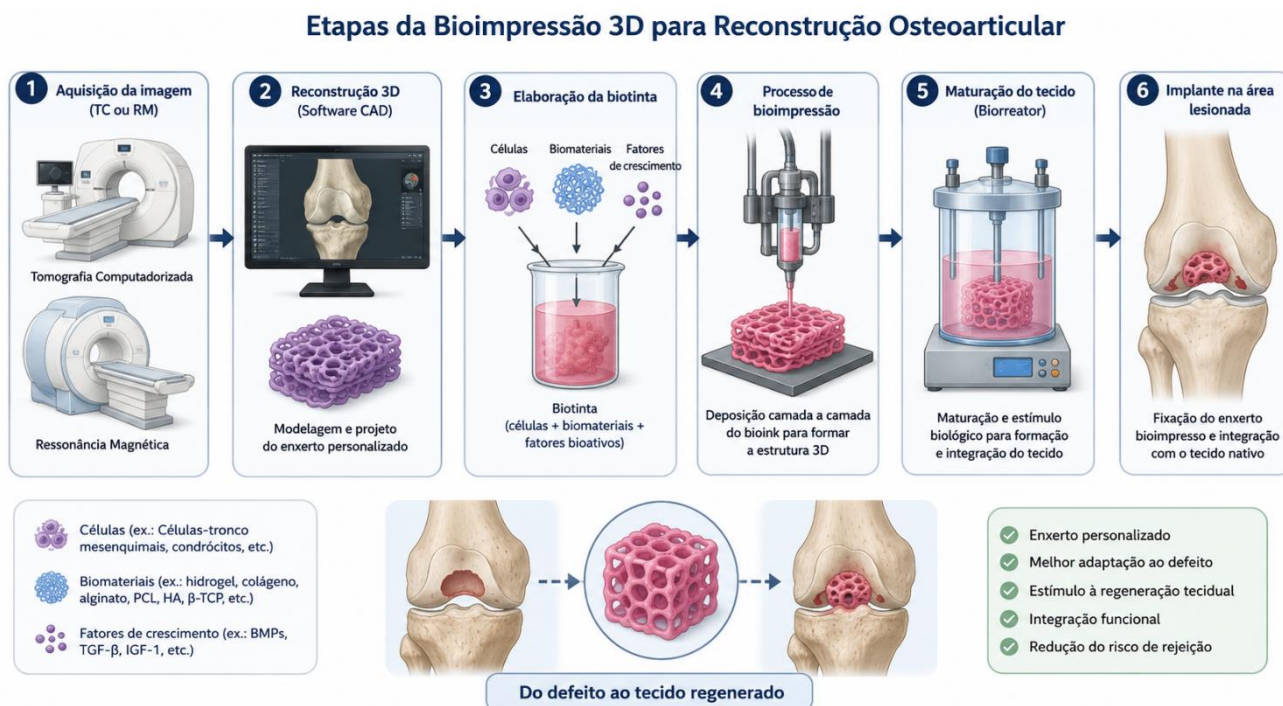
As informações extraídas foram organizadas em tabelas e analisadas de forma descritiva, possibilitando a comparação entre os estudos e a síntese das evidências relacionadas aos avanços tecnológicos, às aplicações clínicas, aos benefícios e às limitações da bioimpressão 3D na reconstrução osteoarticular.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise da literatura demonstra que a bioimpressão tridimensional consolidou-se como uma das principais tecnologias emergentes da engenharia tecidual aplicada à ortopedia, ampliando as possibilidades de reconstrução de tecidos musculoesqueléticos complexos. Diferentemente das técnicas convencionais de fabricação de implantes e enxertos, a bioimpressão permite a deposição controlada de biomateriais, células vivas e moléculas bioativas em arquiteturas tridimensionais capazes de reproduzir características estruturais e funcionais dos tecidos nativos. Essa abordagem tem favorecido o desenvolvimento de enxertos personalizados, adaptados às necessidades anatômicas e biomecânicas de cada paciente, aproximando a medicina regenerativa da prática clínica ortopédica<sup>6</sup> (Figura 1).



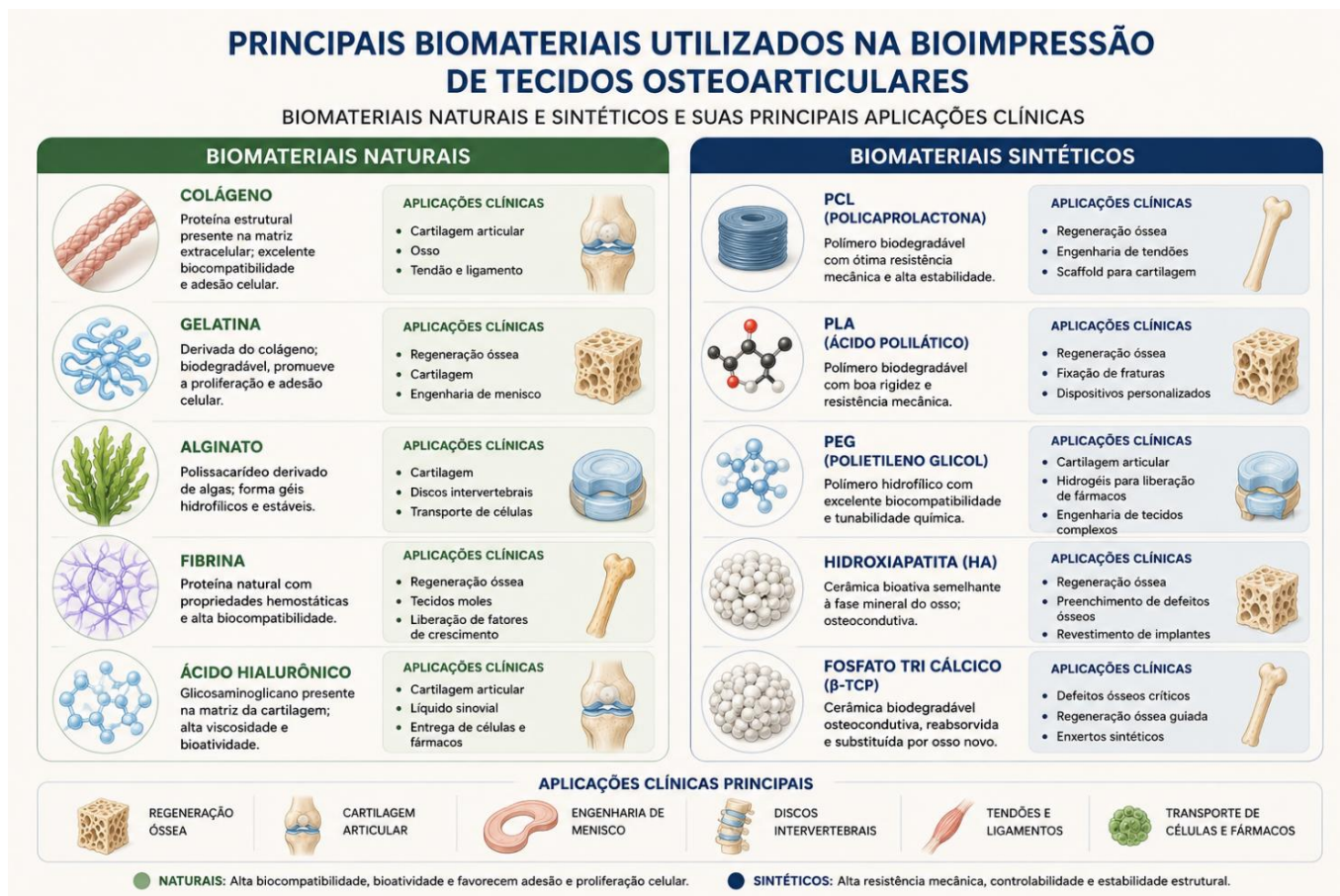
Figura 1. Fluxo geral da bioimpressão tridimensional aplicada à reconstrução osteoarticular.



Entre as aplicações mais investigadas destacam-se a regeneração óssea, reconstrução da cartilagem articular, tratamento de defeitos osteocondrais, engenharia de meniscos, discos intervertebrais, tendões e ligamentos. Os estudos demonstram que a bioimpressão possibilita a fabricação de estruturas altamente personalizadas, respeitando a geometria do defeito e favorecendo melhor adaptação ao leito receptor<sup>7</sup>.

A regeneração óssea constitui atualmente uma das áreas mais avançadas da bioimpressão ortopédica. Diversos biomateriais vêm sendo utilizados para produzir arcabouços tridimensionais capazes de favorecer adesão celular, proliferação, diferenciação osteoblástica e neoformação óssea. Entre os biomateriais mais empregados destacam-se hidroxiapatita, fosfato tricálcico, policaprolactona (PCL), ácido polilático (PLA), colágeno, gelatina, alginato e compósitos híbridos, que combinam propriedades mecânicas e elevada biocompatibilidade. A associação desses materiais com células-tronco mesenquimais e fatores osteoindutores tem proporcionado resultados promissores em modelos experimentais<sup>8</sup> (Figura 2).

**Figura 2.** Principais biomateriais utilizados na bioimpressão de tecidos osteoarticulares.



No campo da regeneração cartilaginosa, a bioimpressão tridimensional surge como alternativa promissora para o tratamento de lesões osteocondrais e osteoartrite. A limitada capacidade regenerativa da cartilagem hialina faz com que procedimentos convencionais frequentemente resultem na formação de fibrocartilagem, biomecanicamente inferior ao tecido original. A utilização de biotintas contendo condrócitos, células-tronco mesenquimais, hidrogéis e fatores condrogênicos permite a construção de tecidos com organização estrutural mais semelhante à cartilagem nativa, favorecendo melhor integração ao tecido receptor e potencial recuperação funcional da articulação<sup>9</sup>.

Além da regeneração de tecidos isolados, observa-se crescente interesse no desenvolvimento de construtos osteocondrais capazes de reproduzir simultaneamente os compartimentos ósseo e cartilaginoso. Esses modelos bicamada procuram mimetizar a complexa interface entre cartilagem e osso subcondral, permitindo respostas biológicas mais próximas das observadas fisiologicamente. Essa



estratégia representa importante avanço para o tratamento de defeitos articulares extensos, uma vez que considera não apenas a regeneração da cartilagem, mas também o restabelecimento da arquitetura osteocondral completa<sup>10</sup>.

Outro aspecto amplamente discutido refere-se às diferentes tecnologias de bioimpressão atualmente disponíveis. As técnicas baseadas em extrusão destacam-se pela simplicidade operacional e elevada capacidade de impressão de biomateriais viscosos, sendo as mais utilizadas na engenharia osteoarticular. Em contrapartida, métodos baseados em jato de tinta (*inkjet*), laser e estereolitografia oferecem maior resolução espacial e precisão na deposição celular, embora apresentem limitações relacionadas ao custo, velocidade de fabricação e seleção das biotintas. A escolha da tecnologia depende das propriedades mecânicas desejadas, da complexidade estrutural do tecido e da viabilidade celular durante o processo de impressão<sup>11</sup> (Figura 3).

**Figura 3.** Principais tecnologias de bioimpressão tridimensional utilizadas na ortopedia.

| <b>PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE BIOIMPRESSÃO 3D UTILIZADAS NA ORTOPEDIA</b><br>Comparação entre métodos de bioimpressão: princípios, características e aplicações clínicas                |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                        | EXTRUSÃO                                                                                                                                                                                                                                      | INKJET (JATO DE TINTA)                                                                                                                                                                                       | LASER-ASSISTIDA                                                                                                                                                                               | ESTEREOLITOGRAFIA (SLA/DLP)                                                                                                                                                                                                       |
| <b>PRINCÍPIO DO MÉTODO</b>                                                                                                                                                             | <br>Bioink é forçado através de um bico (pneumático ou mecânico) e depositado camada a camada.                                                                                                                                                | <br>Pequenas gotas de bioink são ejetadas através de um bico por pressão térmica ou piezoelétrica.                                                                                                           | <br>Um pulso de laser atinge uma camada doadora revestida com bioink, propulsando microgotas para o coletor abaixo.                                                                           | <br>Luz UV (laser ou projetor) polimeriza seletivamente a bioink fotossensível camada a camada.                                                                                                                                   |
| <b>RESOLUÇÃO DE IMPRESSÃO</b>                                                                                                                                                          | 100 – 500 µm                                                                                                                                                                                                                                  | 20 – 100 µm                                                                                                                                                                                                  | 10 – 50 µm                                                                                                                                                                                    | 25 – 100 µm                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>VIABILIDADE CELULAR</b>                                                                                                                                                             | ★★★★☆<br>Moderada a alta<br>(depende da pressão e do bico)                                                                                                                                                                                    | ★★★★☆<br>Moderada<br>(estresse térmico ou mecânico)                                                                                                                                                          | ★★★★☆<br>Alta<br>(sem contato direto)                                                                                                                                                         | ★★★★☆<br>Moderada a alta<br>(depende da luz e fotoiniciador)                                                                                                                                                                      |
| <b>VANTAGENS</b>                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Permite bioinks de alta viscosidade e alta densidade celular</li> <li>Equipamento relativamente simples e acessível</li> <li>Impressão de estruturas grandes e com boa resistência mecânica</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alta resolução</li> <li>Múltiplos materiais/células</li> <li>Processo rápido</li> <li>Baixo custo operacional</li> </ul>                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alta precisão e resolução</li> <li>Alta viabilidade celular</li> <li>Não requer bicos (não entope)</li> <li>Permite alta densidade celular</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Excelente resolução e precisão</li> <li>Superfície lisa e detalhes finos</li> <li>Processo rápido</li> <li>Estruturas complexas com alta fidelidade</li> </ul>                             |
| <b>LIMITAÇÕES</b>                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menor resolução</li> <li>Pode causar estresse de cisalhamento nas células</li> <li>Estruturas muito finas são difíceis de imprimir</li> </ul>                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Apenas bioinks de baixa viscosidade</li> <li>Baixa densidade celular</li> <li>Entupimento de bico</li> <li>Menor resistência mecânica dos construtos</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Equipamento caro e complexo</li> <li>Baixa taxa de deposição</li> <li>Requer camada doadora especial</li> </ul>                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Uso de bioinks fotossensíveis (citotoxicidade potencial)</li> <li>Penetração limitada da luz</li> <li>Limitação para espessuras maiores</li> </ul>                                         |
| <b>TIPOS DE BIOINK COMPATÍVEIS</b>                                                                                                                                                     | Hidrogéis naturais (alginato, colágeno, gelatina, fibrina), compostos, cerâmicas e polímeros                                                                                                                                                  | Hidrogéis de baixa viscosidade (alginato, colágeno, fibrina, células em suspensão)                                                                                                                           | Hidrogéis com camada doadora (alginato, colágeno, fibrina) com alta densidade celular                                                                                                         | Bioinks fotossensíveis (gelMA, PEGDA, colágeno modificado, resinas acrílicas biocompatíveis)                                                                                                                                      |
| <b>PRINCIPAIS APLICAÇÕES ORTOPÉDICAS</b>                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Regeneração óssea</li> <li>Defeitos ósseos críticos</li> <li>Cartilagem articular</li> <li>Menisco e disco intervertebral</li> <li>Engenharia de tecidos osteocondrais</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cartilagem articular</li> <li>Engenharia osteocondral</li> <li>Interfaces osteocondrais</li> <li>Impressão de gradientes de células/fatores de crescimento</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cartilagem articular</li> <li>Engenharia osteocondral</li> <li>Impressão de alta precisão de células</li> <li>Estudos de modelos de tecidos</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Guias e modelos anatômicos</li> <li>Scaffolds de alta precisão</li> <li>Ossos craniofaciais</li> <li>Pequenos enxertos estruturais</li> <li>Modelos para planejamento cirúrgico</li> </ul> |
| <b>LEGENDA – VIABILIDADE CELULAR</b><br>A escolha da tecnologia depende do tipo de tecido a ser regenerado, da resolução necessária, das propriedades da bioink e do objetivo clínico. |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |
| ★★★★★ Muito alta    ★★★★ Alta    ★★★ Moderada    ★★ Baixa    ★ Muito baixa                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |
| Todas as tecnologias continuam em desenvolvimento para aprimorar viabilidade celular, velocidade, resolução e aplicações clínicas.                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |





A utilização de células-tronco mesenquimais representa um dos principais avanços da bioimpressão aplicada à medicina regenerativa. Essas células apresentam elevada capacidade proliferativa e potencial de diferenciação em osteoblastos, condrócitos e outras linhagens do tecido musculoesquelético, favorecendo a regeneração simultânea de diferentes estruturas anatômicas. Além disso, seu efeito imunomodulador contribui para redução da resposta inflamatória e estimulação dos processos naturais de reparo tecidual<sup>12</sup>.

Paralelamente aos avanços celulares, o desenvolvimento de biotintas tornou-se um dos pilares da bioimpressão moderna. Uma biotinta ideal deve apresentar elevada biocompatibilidade, propriedades reológicas adequadas para impressão, estabilidade estrutural, resistência mecânica compatível com o tecido receptor e capacidade de manter elevada viabilidade celular durante e após o processo de fabricação. Atualmente, grande parte das pesquisas concentra-se na obtenção de biotintas híbridas capazes de combinar biomateriais naturais e sintéticos, buscando equilibrar propriedades biológicas e mecânicas<sup>13</sup>.

Apesar do expressivo avanço científico observado nos últimos anos, importantes limitações ainda dificultam a aplicação clínica rotineira da bioimpressão osteoarticular. Entre os principais desafios destacam-se a vascularização dos tecidos bioimpressos, especialmente em construtos de grande espessura, a manutenção da viabilidade celular durante longos períodos de cultura, a resistência mecânica dos biomateriais, a integração funcional com os tecidos hospedeiros e a escalabilidade da produção em condições compatíveis com a prática hospitalar. Esses fatores ainda restringem a maior parte das aplicações ao ambiente experimental e pré-clínico<sup>14</sup>.

Outro desafio relevante refere-se aos aspectos regulatórios e éticos envolvidos na utilização clínica dessa tecnologia. A produção de tecidos bioimpressos envolve células humanas, biomateriais, fatores biológicos e processos altamente complexos de fabricação, exigindo rigorosos critérios de controle de qualidade, biossegurança, rastreabilidade e padronização. Além disso, questões relacionadas aos custos de produção, acesso à tecnologia e capacitação profissional deverão ser enfrentadas para que a bioimpressão tridimensional seja incorporada de forma ampla aos sistemas de saúde<sup>15</sup>.

As perspectivas futuras apontam para uma integração cada vez maior entre bioimpressão tridimensional, inteligência artificial, modelagem computacional, biofabricação automatizada, edição gênica e medicina personalizada. Espera-se que o desenvolvimento de tecidos vascularizados,



biomateriais inteligentes, biorreatores mais eficientes e plataformas automatizadas de produção possibilite a fabricação de enxertos cada vez mais complexos e funcionalmente semelhantes aos tecidos humanos. Nesse cenário, a bioimpressão 3D tende a ocupar posição estratégica na ortopedia regenerativa, oferecendo novas possibilidades para o tratamento de doenças degenerativas, traumas complexos e grandes perdas osteoarticulares, com potencial para transformar significativamente a prática clínica nas próximas décadas.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A bioimpressão tridimensional representa um dos avanços mais promissores da medicina regenerativa aplicada à ortopedia, oferecendo novas perspectivas para a reconstrução de tecidos ósseos, cartilagosos e osteocondrais.

A capacidade de produzir estruturas tridimensionais personalizadas, associando biomateriais, células vivas e fatores bioativos, amplia significativamente as possibilidades terapêuticas para o tratamento de lesões complexas e doenças degenerativas do sistema musculoesquelético. As evidências disponíveis demonstram potencial para melhorar a integração tecidual, favorecer a regeneração funcional e contribuir para o desenvolvimento de estratégias terapêuticas cada vez mais individualizadas.

Apesar dos avanços observados, a aplicação clínica da bioimpressão 3D ainda enfrenta desafios relacionados à vascularização dos tecidos bioimpressos, resistência mecânica dos construtos, desenvolvimento de biotintas mais eficientes, padronização dos processos de fabricação, validação clínica e regulamentação.

Dessa forma, estudos experimentais e ensaios clínicos multicêntricos são essenciais para consolidar sua segurança, eficácia e custo-efetividade. Espera-se que a integração entre bioimpressão, inteligência artificial, biomateriais inteligentes e engenharia tecidual impulse a incorporação dessa tecnologia na prática ortopédica, tornando a reconstrução osteoarticular mais precisa, personalizada e biologicamente funcional.



## REFERÊNCIAS

1. Daly AC, Prendergast ME, Hughes AJ, Burdick JA. Bioprinting for the biologist. *Cell*. 2021;184(1):18-32. doi:10.1016/j.cell.2020.12.002.
2. Matai I, Kaur G, Seyedsalehi A, McClinton A, Laurencin CT. Progress in 3D bioprinting technology for tissue/organ regenerative engineering. *Biomaterials*. 2020;226:119536. doi:10.1016/j.biomaterials.2019.119536.
3. Donderwinkel I, van Hest JCM, Cameron NR. Bio-inks for 3D bioprinting: recent advances and future prospects. *Polym Chem*. 2022;13(1):24-42. doi:10.1039/D1PY01074J.
4. Groll J, Boland T, Blunk T, Burdick JA, Cho DW, Dalton PD, et al. Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field. *Biofabrication*. 2016;8(1):013001. doi:10.1088/1758-5090/8/1/013001.
5. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*. 2014;32(8):773-785. doi:10.1038/nbt.2958.
6. Matai I, Kaur G, Seyedsalehi A, McClinton A, Laurencin CT. Progress in 3D bioprinting technology for tissue/organ regenerative engineering. *Biomaterials*. 2020;226:119536. doi:10.1016/j.biomaterials.2019.119536.
7. Daly AC, Prendergast ME, Hughes AJ, Burdick JA. Bioprinting for the biologist. *Cell*. 2021;184(1):18-32. doi:10.1016/j.cell.2020.12.002.
8. Levato R, Jungst T, Scheuring RG, Blunk T, Groll J, Malda J. From shape to function: the next step in bioprinting. *Adv Mater*. 2020;32(12):e1906423. doi:10.1002/adma.201906423.
9. Heinrich MA, Liu W, Jimenez A, Yang J, Akpek A, Liu X, et al. 3D bioprinting: from benches to translational applications. *Small*. 2019;15(23):e1805510. doi:10.1002/smll.201805510.
10. Donderwinkel I, van Hest JCM, Cameron NR. Bio-inks for 3D bioprinting: recent advances and future prospects. *Polym Chem*. 2022;13(1):24-42. doi:10.1039/D1PY01074J.
11. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*. 2014;32(8):773-785. doi:10.1038/nbt.2958.
12. O'Brien FJ. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *Mater Today*. 2011;14(3):88-95. doi:10.1016/S1369-7021(11)70058-X.
13. Groll J, Boland T, Blunk T, Burdick JA, Cho DW, Dalton PD, et al. Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field. *Biofabrication*. 2016;8(1):013001.
14. Hospodiuk M, Dey M, Sosnoski D, Ozbolat IT. The bioink: a comprehensive review on bioprintable materials. *Biotechnol Adv*. 2017;35(2):217-239. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.12.006.
15. Ozbolat IT, Hospodiuk M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomaterials*. 2016;76:321-343. doi:10.1016/j.biomaterials.2015.10.076.