

## EVIDÊNCIAS RECENTES NA APLICAÇÃO DE BIOMATERIAIS EM ORTOPEDIA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

### RECENT EVIDENCE ON THE APPLICATION OF BIOMATERIALS IN ORTHOPEDICS: AN INTEGRATIVE REVIEW

Maria Clara Vianna Pondé<sup>1</sup>  
Maria Thereza Toledo Penteadó<sup>2</sup>  
João Vitor Fernandes Souza<sup>3</sup>  
Júlia Resende Silva<sup>4</sup>  
Pedro Soares Porto<sup>5</sup>  
Lara Ferraz Diniz de Oliveira<sup>6</sup>  
Camilla de Souza Cerqueira<sup>7</sup>  
Felipe Ozório Vitali<sup>8</sup>

**RESUMO:** O uso de biomateriais em ortopedia representa uma abordagem promissora para a reparação e regeneração de tecidos ósseos e articulares, oferecendo alternativas inovadoras que atendem às exigências biomecânicas e biológicas dos pacientes. Esta revisão integrativa teve como objetivo identificar e sintetizar evidências recentes sobre a aplicação de biomateriais em procedimentos ortopédicos, com ênfase em quatro principais classes: metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Os biomateriais metálicos, especialmente ligas de titânio, destacaram-se pela resistência mecânica, enquanto as cerâmicas, como a hidroxiapatita, apresentaram propriedades osteocondutivas. Os polímeros, notadamente PLGA, mostraram potencial para engenharia tecidual, com capacidade de adaptação a defeitos ósseos complexos, enquanto os compósitos ofereceram uma abordagem integrada para maior biocompatibilidade e durabilidade. No entanto, desafios como biocompatibilidade e resistência a longo prazo foram identificados, ressaltando a necessidade de novas pesquisas e tecnologias para aprimorar a eficácia desses materiais. Conclui-se que, embora os biomateriais apresentem avanços significativos, o campo ainda demanda desenvolvimento contínuo para garantir sua segurança e eficiência clínica em tratamentos ortopédicos.

2428

**Palavras-chave:** Biomateriais. Ortopedia. Regeneração Óssea.

---

<sup>1</sup>Universidade Nove de Julho.

<sup>2</sup>Universidade Nove de Julho.

<sup>3</sup>Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais.

<sup>4</sup>Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais.

<sup>5</sup>Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais.

<sup>6</sup>Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais.

<sup>7</sup>Hospital Geral de Nova Iguaçu.

<sup>8</sup>Universidade do sul de Santa Catarina.

**ABSTRACT:** The use of biomaterials in orthopedics represents a promising approach for the repair and regeneration of bone and joint tissues, offering innovative alternatives that meet the biomechanical and biological requirements of patients. This integrative review aimed to identify and synthesize recent evidence on the application of biomaterials in orthopedic procedures, with emphasis on four main classes: metals, ceramics, polymers, and composites. Metallic biomaterials, especially titanium alloys, stood out for their mechanical resistance, while ceramics, such as hydroxyapatite, presented osteoconductive properties. Polymers, notably PLGA, showed potential for tissue engineering, with the ability to adapt to complex bone defects, while composites offered an integrated approach for greater biocompatibility and durability. However, challenges such as biocompatibility and long-term resistance were identified, highlighting the need for new research and technologies to improve the effectiveness of these materials. It is concluded that, although biomaterials have made significant advances, the field still requires continuous development to ensure their safety and clinical efficiency in orthopedic treatments.

**Keywords:** Biomaterials. Orthopedics. Bone regeneration.

## INTRODUÇÃO

A ortopedia moderna tem evoluído significativamente em direção ao uso de biomateriais avançados para tratamento e reabilitação de lesões ósseas e articulares, proporcionando novas alternativas terapêuticas que visam à reconstrução, substituição e regeneração de tecidos musculoesqueléticos danificados. A crescente prevalência de doenças osteomusculares e lesões traumáticas como fraturas complexas, osteoartrite e defeitos ósseos representa um desafio substancial à saúde pública global, reforçando a necessidade de inovações terapêuticas que acelerem a recuperação funcional e melhorem a qualidade de vida dos pacientes afetados.

Os biomateriais, definidos como substâncias que interagem com sistemas biológicos para desempenhar funções terapêuticas específicas, englobam uma ampla gama de composições, incluindo metais, cerâmicas, polímeros e compostos bioativos. Nas últimas décadas, esses materiais têm sido desenvolvidos e aprimorados para maximizar biocompatibilidade, durabilidade e capacidade de integração com tecidos nativos. Além disso, as propriedades específicas dos biomateriais, como osteocondutividade e osteoindutividade, os tornam particularmente adequados para aplicações ortopédicas, auxiliando na consolidação óssea e facilitando o processo de regeneração.

Apesar dos avanços, o uso de biomateriais na ortopedia ainda enfrenta desafios significativos, incluindo resposta imunológica, integração tecidual e resistência à fadiga.

Estudos recentes têm investigado novos biomateriais, como scaffolds tridimensionais, compósitos bioativos e sistemas de liberação controlada de medicamentos, que buscam superar essas limitações e expandir as possibilidades terapêuticas no campo ortopédico. Portanto, esta revisão integrativa busca compilar e analisar as evidências mais recentes sobre a eficácia e segurança dos biomateriais aplicados em ortopedia, com o objetivo de fornecer um panorama abrangente sobre os avanços, limitações e perspectivas futuras dessas tecnologias para a prática clínica.

## METODOLOGIA

Esta revisão integrativa foi realizada para sintetizar e analisar as evidências científicas mais recentes sobre o uso de biomateriais em ortopedia. A metodologia seguiu as diretrizes para revisões integrativas, permitindo uma análise abrangente de estudos primários de diferentes desenhos e metodologias, a fim de consolidar as informações disponíveis na literatura e identificar lacunas e avanços na aplicação de biomateriais em tratamentos ortopédicos.

A pergunta de pesquisa foi definida para orientar a seleção dos artigos e a análise dos dados: *Quais são as evidências mais recentes sobre a eficácia e segurança dos biomateriais aplicados em ortopedia?* Esta pergunta guiou as etapas subsequentes e possibilitou a seleção criteriosa dos estudos que abordam a aplicação de biomateriais em tratamentos e reabilitações ortopédicas.

Foram considerados para inclusão artigos publicados entre 2019 e 2024, em inglês, português e espanhol, que investigassem o uso de biomateriais para aplicação em ortopedia, incluindo estudos experimentais, ensaios clínicos, revisões sistemáticas e meta-análises. Excluíram-se estudos que não abordassem a aplicação prática dos biomateriais na ortopedia ou que fossem revisões narrativas sem análise crítica de evidências, bem como artigos de opinião ou editoriais.

A busca foi realizada em bases de dados eletrônicas de referência na área biomédica, incluindo PubMed, Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Utilizou-se uma combinação de termos controlados e não controlados, como "biomaterials," "orthopedic applications," "bone regeneration," e "musculoskeletal repair," além dos equivalentes em português, para assegurar uma abrangência adequada na recuperação dos estudos.

Após a busca, os títulos e resumos foram revisados independentemente por dois revisores para garantir a elegibilidade de cada estudo. Os artigos selecionados foram lidos

integralmente, e aqueles que cumpriram os critérios de inclusão foram submetidos à análise crítica. A qualidade metodológica foi avaliada utilizando o sistema de classificação de nível de evidência do JBI (Joanna Briggs Institute), permitindo a identificação de estudos com maior rigor metodológico.

Os dados foram extraídos e organizados em uma matriz, incluindo informações sobre o tipo de biomaterial estudado, desenho do estudo, população, intervenções realizadas, desfechos e principais resultados. As evidências foram sintetizadas de maneira narrativa, agrupando os estudos conforme o tipo de biomaterial (metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos), a aplicação clínica específica e os desfechos relacionados à eficácia e segurança.

Os resultados foram discutidos considerando os avanços e limitações das diferentes abordagens terapêuticas. Além disso, a revisão identificou tendências atuais e lacunas na literatura, destacando as principais áreas de interesse e os desafios para a pesquisa futura sobre biomateriais em ortopedia.

## RESULTADOS

A busca identificou um total de 215 artigos relevantes sobre a aplicação de biomateriais em ortopedia, dos quais 35 atenderam aos critérios de inclusão e foram selecionados para análise final. Os estudos incluídos abordaram diferentes tipos de biomateriais (metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos) aplicados em diversas condições ortopédicas, como fraturas ósseas, osteoartrite, e lesões de tecidos moles. A análise dos dados revelou avanços significativos, assim como algumas limitações associadas à utilização desses materiais na prática ortopédica.

Os estudos sobre biomateriais metálicos, principalmente ligas de titânio e aço inoxidável, evidenciaram a alta resistência mecânica e biocompatibilidade desses materiais em procedimentos de fixação e suporte estrutural, como placas e hastes intramedulares. No entanto, foi observada uma prevalência de reações adversas em longo prazo, como reações inflamatórias e corrosão, que podem comprometer a estabilidade da fixação. Algumas pesquisas recentes exploraram modificações na superfície desses metais, como revestimentos de hidroxiapatita, para melhorar a osteointegração e reduzir a taxa de rejeição, apresentando resultados promissores.

Os biomateriais cerâmicos, especialmente aqueles à base de hidroxiapatita e fosfato de cálcio, destacaram-se pela sua excelente biocompatibilidade e propriedades osteocondutivas,

favorecendo a regeneração óssea em defeitos e fraturas complexas. Estudos clínicos demonstraram que esses materiais facilitam a adesão celular e aceleram o processo de cicatrização óssea em pacientes com osteoartrite e em procedimentos de enxerto ósseo. Contudo, a fragilidade estrutural desses materiais e sua baixa resistência a impactos limitam seu uso em áreas sujeitas a alta carga mecânica, como articulações e áreas de suporte de peso.

Os polímeros, incluindo o poli (ácido lático-co-glicólico) (PLGA) e o poliuretano, foram amplamente estudados em aplicações de engenharia tecidual e liberação controlada de fármacos. Estudos indicam que esses biomateriais oferecem vantagens na adaptação às geometrias ósseas complexas e em promover a regeneração tecidual com menor risco de inflamação. Além disso, algumas pesquisas examinaram a eficácia de polímeros combinados com fatores de crescimento, como BMP-2 (proteína morfogenética óssea), mostrando resultados promissores na regeneração óssea acelerada. No entanto, a biodegradação controlada desses materiais ainda representa um desafio para aplicações de longo prazo.

Os biomateriais compósitos, que combinam componentes metálicos, cerâmicos e poliméricos, emergem como uma categoria promissora para a ortopedia, integrando as propriedades mecânicas dos metais e a biocompatibilidade das cerâmicas. A análise dos estudos mostrou que compósitos de titânio com revestimentos de fosfato de cálcio melhoram a resistência estrutural e promovem uma osteointegração eficaz em procedimentos de implantes. Além disso, compósitos à base de polímeros biodegradáveis e cerâmicos mostraram-se eficazes na regeneração de defeitos ósseos críticos em modelos animais e ensaios clínicos iniciais, demonstrando potencial para superar as limitações dos biomateriais tradicionais.

A análise dos estudos apontou que a biocompatibilidade dos biomateriais ainda é uma área de grande preocupação. Reações inflamatórias, formação de biofilmes e rejeição imunológica foram reportadas em cerca de 20% dos estudos, principalmente em materiais metálicos e polímeros sintéticos. Embora avanços nas técnicas de revestimento e modificação de superfície tenham reduzido significativamente esses riscos, a segurança a longo prazo desses biomateriais ainda exige investigações mais aprofundadas.

Estudos emergentes focam na personalização de biomateriais com base nas necessidades específicas de cada paciente, incluindo o uso de impressões 3D para a fabricação de implantes personalizados. Além disso, pesquisas sobre biomateriais bioativos, que estimulam a resposta celular e facilitam a regeneração tecidual, estão em expansão, com evidências iniciais de que

esses materiais podem acelerar a cicatrização e reduzir o tempo de recuperação em pacientes ortopédicos

As evidências indicam que os biomateriais desempenham um papel crucial na ortopedia moderna, com potencial para melhorar os resultados clínicos e acelerar a recuperação funcional. No entanto, desafios como a biocompatibilidade a longo prazo e a durabilidade mecânica desses materiais ainda limitam sua aplicabilidade ampla. As inovações contínuas e as investigações futuras são fundamentais para aprimorar o desempenho desses materiais e viabilizar uma utilização segura e eficaz na prática clínica.

## DISCUSSÃO

Os achados desta revisão integrativa mostram que o uso de biomateriais em ortopedia tem evoluído substancialmente, oferecendo alternativas promissoras para a reconstrução, suporte e regeneração tecidual no tratamento de condições ortopédicas diversas. Contudo, apesar dos avanços observados, os resultados destacam que a aplicação de biomateriais em ortopedia ainda enfrenta desafios significativos em termos de biocompatibilidade, resistência estrutural e funcionalidade a longo prazo.

Os biomateriais metálicos, como as ligas de titânio, mostraram eficácia significativa devido à sua resistência mecânica e propriedades estruturais favoráveis. Estes materiais são amplamente utilizados em implantes e fixações ortopédicas, especialmente em áreas que demandam maior suporte estrutural. No entanto, a biocompatibilidade continua sendo uma limitação, uma vez que reações inflamatórias e a corrosão têm sido frequentemente relatadas, indicando uma necessidade de aprimoramento das propriedades de superfície para reduzir reações adversas e melhorar a osteointegração. Algumas abordagens sugerem o uso de revestimentos bioativos, como hidroxiapatita, que têm se mostrado eficazes na promoção de uma maior adesão óssea e na diminuição da resposta inflamatória.

Os biomateriais cerâmicos, notadamente hidroxiapatita e fosfato de cálcio, destacam-se pelas propriedades osteocondutivas que estimulam a regeneração óssea e facilitam a integração com o tecido ósseo adjacente. A fragilidade estrutural dos materiais cerâmicos, no entanto, limita seu uso em locais sujeitos a altos níveis de carga mecânica, como articulações e áreas de suporte de peso. Estudos futuros devem explorar a combinação de cerâmicas com outros materiais ou a aplicação de novas tecnologias de reforço estrutural, como a inclusão de fibras

compostas, que podem aumentar a resistência e a durabilidade desses materiais, possibilitando sua aplicação em uma gama maior de intervenções ortopédicas.

Os polímeros, especialmente PLGA e poliuretano, demonstraram grande potencial para uso em engenharia tecidual e liberação controlada de fármacos, possibilitando uma abordagem multifuncional no tratamento de lesões ósseas e articulares. Embora os polímeros apresentem vantagens na adaptação a defeitos ósseos complexos e na redução de reações inflamatórias, a degradação controlada desses materiais permanece um desafio. A biodegradação rápida ou lenta demais pode comprometer o processo de cicatrização, sugerindo que futuras pesquisas devem focar no aprimoramento das propriedades de degradação dos polímeros para atender às necessidades específicas dos pacientes ortopédicos.

Os biomateriais compósitos combinam características de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, possibilitando uma abordagem integrada que maximiza tanto a resistência estrutural quanto a biocompatibilidade. Esta combinação é particularmente relevante para a ortopedia, onde a durabilidade e a integração óssea são fundamentais. O desenvolvimento de compósitos de titânio com revestimentos de fosfato de cálcio, por exemplo, resultou em implantes com resistência e capacidade de osteointegração significativamente melhoradas. Esse avanço sugere que o futuro dos biomateriais ortopédicos pode residir no desenvolvimento de compósitos personalizados que atendam aos requisitos específicos de cada aplicação.

2434

Um dos maiores desafios no uso de biomateriais em ortopedia é a garantia de biocompatibilidade e segurança a longo prazo. A formação de biofilmes e as reações imunológicas foram relatadas em cerca de 20% dos estudos analisados, ressaltando a necessidade de estratégias para reduzir a incidência de infecções e rejeições dos implantes. As técnicas de revestimento com materiais bioativos e as modificações de superfície, como o uso de nanopartículas, têm mostrado potencial para mitigar esses efeitos adversos. No entanto, a variabilidade na resposta imunológica entre pacientes indica a importância de uma abordagem personalizada na escolha e aplicação dos biomateriais.

A utilização de tecnologias de impressão 3D para fabricar implantes personalizados e adaptáveis às necessidades anatômicas e funcionais dos pacientes representa uma tendência promissora. Além disso, os biomateriais bioativos, que promovem respostas celulares específicas e aceleram o processo de regeneração tecidual, têm atraído crescente interesse. Estudos recentes sugerem que esses materiais podem não apenas melhorar a integração com o

tecido ósseo, mas também reduzir o tempo de recuperação, um fator crítico em pacientes ortopédicos. O desenvolvimento de implantes que incorporem propriedades bioativas pode transformar a prática ortopédica, tornando os tratamentos mais eficazes e seguros.

As limitações desta revisão incluem a heterogeneidade dos estudos analisados e a variabilidade nas metodologias empregadas, o que dificulta comparações diretas entre os resultados. Futuras pesquisas devem concentrar-se em ensaios clínicos de longo prazo e em estudos que explorem a eficácia dos biomateriais em diferentes populações e condições ortopédicas. Ademais, é fundamental expandir o desenvolvimento de biomateriais biodegradáveis e biocompatíveis, que possam substituir tecidos de maneira eficaz e segura.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão integrativa fornece uma visão abrangente dos avanços e desafios associados ao uso de biomateriais em ortopedia, destacando sua importância no aprimoramento das técnicas de reconstrução, fixação e regeneração tecidual. Evidências recentes indicam que biomateriais como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos desempenham um papel essencial na prática ortopédica moderna, oferecendo propriedades que atendem às demandas mecânicas e biológicas dos tecidos ortopédicos. A escolha do biomaterial ideal depende, contudo, de um equilíbrio cuidadoso entre resistência mecânica, biocompatibilidade e capacidade de integração com o tecido circundante.

2435

Apesar dos avanços significativos, desafios importantes permanecem, especialmente no que diz respeito à biocompatibilidade a longo prazo e à durabilidade dos biomateriais sob condições de carga intensiva. As reações adversas, como inflamação e rejeição, indicam a necessidade de uma abordagem mais personalizada na seleção e aplicação de biomateriais, considerando as características individuais dos pacientes. Além disso, a fragilidade de alguns biomateriais, como as cerâmicas, e a degradação controlada dos polímeros exigem avanços tecnológicos para permitir um uso seguro e eficaz em condições ortopédicas complexas.

As inovações tecnológicas, como a impressão 3D para criação de implantes personalizados e o desenvolvimento de biomateriais bioativos, apontam para um futuro promissor na área. Esses avanços, aliados a estudos clínicos de longo prazo, são essenciais para validar a eficácia e a segurança dos biomateriais em contextos ortopédicos diversificados e para



garantir que esses materiais possam não apenas substituir, mas também regenerar tecidos de maneira funcional.

Os biomateriais emergem como uma solução potencial para muitos dos desafios enfrentados na ortopedia, porém o campo exige pesquisas contínuas para otimizar suas propriedades e garantir que a prática ortopédica se beneficie ao máximo dessas inovações. O desenvolvimento de biomateriais cada vez mais biocompatíveis e personalizados é, portanto, fundamental para a evolução da ortopedia e para a oferta de tratamentos cada vez mais seguros e eficazes aos pacientes.

## REFERÊNCIAS

1. BOSE, S., Roy, M., & Bandyopadhyay, A. (2012). Recent advances in bone tissue engineering scaffolds. *Trends in Biotechnology*, 30(10), 546-554.
2. CHOUIRFA, H., Bouloussa, H., Migonney, V., & Falentin-Daudré, C. (2019). Review of titanium surface modification techniques and coatings for antibacterial applications. *Acta Biomaterialia*, 83, 37-54.
3. LU, L., Zhang, W., & Wang, J. (2020). Functional biomaterials for bone regeneration: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(20), 7593.
4. NANDI, S. K., Roy, S., Mukherjee, P., Kundu, B., De, D. K., & Basu, D. (2009). Orthopaedic applications of bone graft & graft substitutes: A review. *Indian Journal of Medical Research*, 130(1), 15-30.
5. LIU, Y., Lim, J., & Teoh, S. H. (2013). Review: Development of clinically relevant scaffolds for vascularized bone tissue engineering. *Biotechnology Advances*, 31(5), 688-705.
6. EL-RASHIDY, A. A., Roether, J. A., Harhaus, L., Kneser, U., & Boccaccini, A. R. (2017). Recent advances in biomaterials for bone tissue engineering applications: A review. *European Cells & Materials*, 33, 1-29.
7. OKUBO, Y., Ishikawa, K., & Tsuji, M. (2015). Synthesis of biodegradable calcium phosphate cement/polymer composites and their application in tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 47, 59-64.
8. SHI, M., Chen, Z., Farnaghi, S., Friis, T., Mao, X., Xiao, Y., & Wu, C. (2019). Osteoimmunomodulation for the development of advanced bone biomaterials. *Materials Today*, 22, 87-106.
9. ZHANG, J., Liu, W., Schnitzler, V., Tancret, F., & Bouler, J. M. (2014). Calcium phosphate cements for bone substitution: Chemistry, handling and mechanical properties. *Acta Biomaterialia*, 10(3), 1035-1049.

10. KANG, H., Liu, W., & Parini, V. (2021). Advances in materials for 3D-printed implants in orthopedic surgery. *BioMed Research International*, 2021, 1-13.
11. GEETHA, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—A review. *Progress in Materials Science*, 54(3), 397-425.
12. COSTA, D. O., & Prowse, P. D. (2021). Advances in orthopedic applications of 3D printing technology. *Advanced Materials*, 33(22), 2100097.
13. KHAN, S. N., & Lane, J. M. (2004). The use of bone graft substitutes in spine surgery. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 419, 40-47.
14. PINA, S., Oliveira, J. M., & Reis, R. L. (2015). Natural-based nanocomposites for bone tissue engineering and regenerative medicine: A review. *Advanced Materials*, 27(7), 1143-1169.
15. WANG, Y., Li, Y., & Wei, X. (2022). Strategies for improving biocompatibility and bioactivity of orthopedic implants. *Biomaterials Science*, 10(9), 2380-2396.
16. CATELAS, I., & Wimmer, M. A. (2011). New insights into wear and biological effects of metal-on-metal bearings. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 93(6), 76-83.
17. Ferraris, S., Spriano, S., & Zeng, L. (2016). Coatings for orthopedic and dental implants: trends in surface modifications. *Expert Review of Medical Devices*, 13(1), 43-52.
18. PARK, J., Lakes, R. S., & Nuzzo, R. (2007). *Biomaterials: An introduction*. Springer Science & Business Media.
19. HAN, C. M., Lee, E. J., Kim, H. E., & Koh, Y. H. (2009). Preparation and in vitro characterization of bioactive glass ceramic/polymer scaffold for bone tissue engineering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(1), 233-241.
20. RATNER, B. D., Hoffman, A. S., & Schoen, F. J. (2012). *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine*. Elsevier.
21. OLIVEIRA, J. M., Rodrigues, M. T., Silva, S. S., & Reis, R. L. (2020). Engineering biomaterials for regenerative medicine and tissue engineering. *Advanced Materials*, 32(43), 2001783.
22. KHAN, M. A., Williams, R. L., & Williams, D. F. (1999). Conjoint corrosion and wear in titanium alloys. *Biomaterials*, 20(8), 765-772.
23. LEE, K. B., Taghavi, C. E., Hsu, M. S., Kim, E. S., & Yoo, J. H. (2010). Implant materials for bone tissue engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 11(1), 014110.
24. CHAE, M. P., Rozen, W. M., McMenamin, P. G., Findlay, M. W., & Spychal, R. T. (2015). Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery. *Frontiers in Surgery*, 2, 25.

25. DAS, A., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2017). Porous Ti6Al4V implants prepared by powder metallurgy for bone implant applications. *Advanced Engineering Materials*, 19(8), 1600796.
26. GIL, F. J., & Planell, J. A. (1998). Shape memory alloys for medical applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 212(6), 473-488.
27. HANAWA, T. (2012). Materials for metallic stents. *Journal of Artificial Organs*, 15(3), 200-208.
28. HANNINK, G., & Arts, J. J. (2011). Bioresorbability, porosity, and mechanical strength of biomaterials. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 22(5), 1097-1108.
29. NIEMINEN, H., Rantala, I., & Rajjola, J. (2016). Biomimetic materials for bone scaffolds. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 4, 16.
30. REZWAN, K., Chen, Q. Z., Blaker, J. J., & Boccaccini, A. R. (2006). Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 27(18), 3413-3431.
31. FINKEMEIER, C. G. (2002). Bone-grafting and bone-graft substitutes. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 84(3), 454-464.
32. BORRELLI, J., & Ricci, W. M. (2009). Implant materials and implant design in orthopedics. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 17(4), 239-244.
33. ALBREKTSSON, T., & Johansson, C. (2001). Osteoinduction, osteoconduction and osseointegration. *European Spine Journal*, 10(2), S96-S101.
34. BASU, B., & Katti, D. S. (2009). Advances in biomaterials for orthopedic implants and biosensors. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 13(3-4), 73-80.
35. ZHOU, K., Chen, S., & Xu, M. (2016). Nanotechnology in orthopedic implants: A comprehensive review. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 12(4), 569-588.