



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



BIOMATERIAIS METÁLICOS E TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA: AVANÇOS E DESAFIOS NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE IMPLANTES BIOMÉDICOS

RICARDO LUIZ PEREZ TEIXEIRA – ricardo.lui@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

ALLEXIA IZABELLA PINHEIRO DAMASCENO- allexia.damasceno@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

HAROLDO LHOU HASEGAWA - haroldohasegawa@professores.utfpr.edu.br
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - UTFPR

ÁREA: 1. ENGENHARIA DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO
SUBÁREA: 1.2 - PLANEJAMENTO, PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

RESUMO: O ESTUDO EXPLORA A IMPORTÂNCIA DA BIOCOMPATIBILIDADE NO SUCESSO E LONGEVIDADE DE IMPLANTES ORTOPÉDICOS E ODONTOLÓGICOS. O MÉTODO DE PESQUISA EMPREGADO CONSISTE EM UMA REVISÃO ABRANGENTE DA LITERATURA CIENTÍFICA SOBRE BIOMATERIAIS METÁLICOS, COM FOCO EM BIOCOMPATIBILIDADE, MANUFATURA ADITIVA, PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À CORROSÃO UTILIZANDO AVANÇOS EM TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA, INVESTIGA-SE A CRIAÇÃO DE IMPLANTES BIOMÉDICOS PERSONALIZADOS COM DESIGNS ESPECÍFICOS PARA PACIENTES E FUNCIONALIDADE APRIMORADA. TAMBÉM SÃO EXAMINADAS MELHORIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE MATERIAIS COMO LIGAS DE TITÂNIO E AÇOS INOXIDÁVEIS, INCLUINDO TÉCNICAS DE MODIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIE PARA MITIGAR A FORMAÇÃO DE BIOFILME. SÃO DISCUTIDOS DESAFIOS COMO CORROSÃO E QUESTÕES REGULATÓRIAS, DESTACANDO A NECESSIDADE DE PRÁTICAS DE MANUFATURA SUSTENTÁVEL E CLAREZA REGULATÓRIA NO DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS METÁLICOS PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS. A PESQUISA SUBLINHA A IMPORTÂNCIA DE ENTENDER E OTIMIZAR PROPRIEDADES MECÂNICAS, ESPECIALMENTE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, NO DESIGN DE BIOMATERIAIS METÁLICOS DURÁVEIS E BIOCOMPATÍVEIS PARA DIVERSAS APLICAÇÕES BIOMÉDICAS.

PALAVRAS-CHAVES: BIOCOMPATIBILIDADE; BIOMATERIAIS METÁLICOS; MANUFATURA ADITIVA; PROPRIEDADES MECÂNICAS; RESISTÊNCIA À CORROSÃO.

1. INTRODUÇÃO

A biocompatibilidade é um aspecto crítico destacado em vários estudos, sublinhando seu papel fundamental na garantia do sucesso e longevidade dos implantes, especialmente em aplicações ortopédicas e odontológicas (SAPTAJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE et al., 2018; MEHJABEEN et al., 2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE et al., 2022). Além disso, o foco crescente na manufatura aditiva (AM) e impressão 3D sinaliza seu potencial como tecnologias transformadoras na produção de implantes biomédicos personalizados, permitindo designs específicos para pacientes e melhor ajuste e funcionalidade (da SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023). Adicionalmente, há uma ênfase recorrente em melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão dos materiais dos implantes, com investigações em ligas de titânio e aços inoxidáveis, juntamente com técnicas de modificação de superfície para abordar preocupações com a formação de biofilme (RADICE et al., 2022; JACKSON et al., 2022; ŞENSOY et al., 2019).

A literatura diverge particularmente em relação aos tipos de biomateriais e técnicas de manufatura destacadas (TEIXEIRA; SILVA, 2024). Enquanto alguns estudos se concentram em materiais biocompatíveis, como ligas de zircônio e biocerâmicas, outros exploram as propriedades mecânicas de aços inoxidáveis e aços de alto teor de nitrogênio (SAPTAJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE et al., 2018; MEHJABEEN et al., 2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE et al., 2022). Além disso, existem variações na aplicação dos processos de AM, com alguns estudos mostrando o potencial da impressão 3D e AM, enquanto outros exploram métodos tradicionais de manufatura subtrativa (da SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023; JACKSON et al., 2022). Ademais, diferenças na aplicação de aprendizado de máquina e IA, bem como nas aplicações específicas de implantes médicos estudadas, contribuem para diversas perspectivas dentro da literatura revisada (BOWERS et al., 2022; MALONE et al., 2022; McELVEEN; TANGE; NAUMANN, 2022; RADICE et al., 2022; SUWARDI et al., 2021; TABATABAEIAN et al., 2021).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Biomateriais metálicos apresentam tanto desafios quanto oportunidades no campo dos implantes médicos. Desafios como corrosão, falha por fadiga e desgaste em substituições articulares podem levar a toxicidade sistêmica, inflamação e infecções, necessitando de cuidados prolongados ao paciente e cirurgias de revisão (CHEN; THOUAS, 2014;

KARTHIKA et al., 2017; BAHRAMI NASAB et al., 2009). Pesquisas atuais focam no desenvolvimento de novas ligas de titânio com propriedades e características superficiais aprimoradas para melhor fixação óssea (FROSCH; STÜRMER, 2006). Diversas técnicas de manufatura, incluindo métodos subtrativos tradicionais e não tradicionais, são empregadas para criar implantes específicos para pacientes com características de superfície precisas e biocompatibilidade, com ênfase recente em ligas à base de magnésio, níquel-titânio e titânio devido às suas propriedades excepcionais (DAVIS et al., 2022). Esses avanços oferecem oportunidades promissoras para melhorar o desempenho e a longevidade dos biomateriais metálicos em cirurgias ortopédicas e de trauma.

Técnicas de manufatura sustentável são essenciais para o desenvolvimento de biomateriais metálicos, visando reduzir o desperdício e o consumo de energia (PESODE; BARVE, 2023). Desafios regulatórios também desempenham um papel significativo, necessitando de uma análise abrangente de perspectivas técnicas e regulatórias (ZHANG et al., 2022). A precisão, características de superfície e biocompatibilidade dos implantes metálicos dependem fortemente dos processos de manufatura empregados, com técnicas como usinagem criogênica e usinagem por descarga elétrica sendo destacadas por sua eficácia na produção de implantes precisos e biocompatíveis (DAVIS et al., 2022). Além disso, os altos custos associados a implantes biomateriais importados e dispositivos médicos impactam as despesas de saúde, destacando a necessidade de soluções acessíveis e um quadro regulatório bem definido em países como a Índia (AKMAL; AHMED, 2021). Esses desafios ressaltam a importância de uma manufatura sustentável, clareza regulatória e soluções econômicas no avanço do desenvolvimento de biomateriais metálicos para várias aplicações biomédicas.

As propriedades mecânicas dos biomateriais metálicos desempenham um papel crucial em seu desenvolvimento para aplicações em engenharia de tecidos. Propriedades como alta resistência mecânica, elasticidade e degradação controlada influenciam significativamente o sucesso dos bioimplantes (CHOWDHURY et al., 2020; WANG et al., 2020). A estrutura cristalina dos biomateriais metálicos afeta o movimento de discordâncias e a formação de maclas, determinando seu desempenho em aplicações biomédicas (NAKANO, 2018). Técnicas avançadas de manufatura, como a fusão seletiva por laser (SLM), possibilitaram a fabricação de biomateriais metálicos com comportamento mecânico aprimorado, tornando-os altamente desejáveis para uso biomédico (HARUN et al., 2018). A caracterização abrangente de sua microestrutura, composição e resposta biológica é essencial para garantir a eficácia dos biomateriais metálicos, destacando a importância de utilizar várias técnicas de caracterização em seu desenvolvimento (BIESIEKIERSKI et al., 2019).

A resistência à tração é um fator crucial que influencia as propriedades mecânicas e o comportamento de degradação dos biomateriais metálicos. Pesquisas demonstraram que o ensaio de tração pode avaliar efetivamente a taxa de degradação de materiais metálicos bioabsorvíveis, como fios de ferro e magnésio, distinguindo entre diferentes taxas de degradação com base em se os materiais estão nus ou revestidos (BOWEN et al., 2012). Além disso, a relação entre resistência à tração e resistência à fadiga foi estudada em materiais como o aço SAE 4340, levando ao estabelecimento de uma fórmula universal de resistência à fadiga considerando variações na resistência à tração e sensibilidade a defeitos (PANG et al., 2013). As propriedades mecânicas dos biomateriais metálicos, incluindo a resistência à tração, são cruciais no desenvolvimento de dispositivos de implantes cirúrgicos com estabilidade e biocompatibilidade a longo prazo, destacando a importância de considerar a resistência no design e nas propriedades de biodegradação (LEMONS; LUCAS, 1985). Em geral, a resistência à tração é um fator chave na determinação do desempenho e durabilidade dos biomateriais metálicos, impactando sua adequação para várias aplicações biomédicas (HERMAWAN, 2011).

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa empregado consiste em uma revisão abrangente da literatura científica sobre biomateriais metálicos, com foco em biocompatibilidade, manufatura aditiva, propriedades mecânicas e resistência à corrosão. A biocompatibilidade é destacada como crucial para o sucesso e durabilidade dos implantes em aplicações ortopédicas e odontológicas (SAPTAJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE et al., 2018; MEHJABEEN et al., 2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE et al., 2022). A manufatura aditiva e a impressão 3D são enfatizadas pelo seu potencial transformador na produção de implantes personalizados (da SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023). Além disso, há um foco recorrente na melhoria das propriedades mecânicas e na resistência à corrosão dos materiais de implante, com investigações em ligas de titânio e aços inoxidáveis, juntamente com técnicas de modificação de superfície para abordar a formação de biofilme (RADICE et al., 2022; JACKSON et al., 2022; ŞENSOY et al., 2019).

A literatura diverge nos tipos de biomateriais e técnicas de manufatura destacados, com alguns estudos concentrando-se em materiais como ligas de zircônio e biocerâmicas, enquanto outros exploram aços inoxidáveis e aços de alto teor de nitrogênio (SAPTAJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE et al., 2018; MEHJABEEN et al.,

2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE et al., 2022). A aplicação de processos de AM também varia, com alguns estudos mostrando o potencial da impressão 3D, enquanto outros exploram métodos tradicionais de manufatura subtrativa (da SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023; JACKSON et al., 2022). Diferenças na aplicação de aprendizado de máquina e IA, bem como nas aplicações específicas de implantes médicos, contribuem para diversas perspectivas na literatura (BOWERS et al., 2022; MALONE et al., 2022; McELVEEN; TANGE; NAUMANN, 2022; RADICE et al., 2022; SUWARDI et al., 2021; TABATABAEIAN et al., 2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 1 apresenta o resultado da revisão abrangente da literatura científica sobre biomateriais metálicos, com foco em biocompatibilidade, manufatura aditiva, propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Nele foi adicionando um resumo das referências categorizadas pelos principais aspectos temáticos abordados no campo dos biomateriais metálicos. Cada categoria abrange tópicos como biocompatibilidade, manufatura aditiva, propriedades mecânicas, desafios, desenvolvimento de novas ligas, técnicas de manufatura, sustentabilidade, desafios regulatórios, custos e resistência à tração e fadiga.

A literatura, destacada no Quadro 1, diverge particularmente quanto aos tipos de biomateriais e técnicas de manufatura destacados (TEIXEIRA; SILVA, 2024). Enquanto alguns estudos se concentram em materiais biocompatíveis, como ligas de zircônio e biocerâmicas, outros investigam as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis e aços de alto teor de nitrogênio (SAPTANJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE; NAVARRETO-LUGO; JU; SAMIA, 2018; MEHJABEEN; SONG; XU; TANG; QIAN, 2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE; NETO; FISCHER; WIMMER, 2022). Além disso, existem variações na aplicação dos processos de AM, com alguns estudos demonstrando o potencial da impressão 3D e AM, enquanto outros exploram métodos tradicionais de manufatura subtrativa (DA SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023; JACKSON; JOHNSON; WILLIAMS et al., 2022). Além disso, diferenças na aplicação de aprendizado de máquina e IA, bem como nas aplicações específicas de implantes médicos estudadas, contribuem para perspectivas diversas na literatura revisada (BOWERS et al., 2022; MALONE et al., 2022; MCELVEEN; TANGE; NAUMANN, 2022; RADICE; NETO; FISCHER; WIMMER, 2022; SUWARDI et al., 2021; TABATABAEIAN et al., 2021).

Biomateriais metálicos apresentam tanto desafios quanto oportunidades no campo dos

implantes médicos. Desafios como corrosão, falha por fadiga e desgaste em substituições articulares podem levar a toxicidade sistêmica, inflamação e infecções, necessitando de cuidados prolongados aos pacientes e cirurgias de revisão (CHEN; THOUAS, 2014; KARTHIKA et al., 2017; BAHRAMI NASAB et al., 2009). A pesquisa atual foca no desenvolvimento de novas ligas de titânio com propriedades aprimoradas e características de superfície para melhor fixação óssea (FROSCHE; STÜRMER, 2006). Várias técnicas de manufatura, incluindo métodos subtrativos tradicionais e não tradicionais, são empregadas para criar implantes específicos para pacientes com características de superfície precisas e biocompatibilidade, com ênfase recente em magnésio, níquel-titânio e ligas baseadas em titânio devido às suas propriedades excepcionais (DAVIS et al., 2022). Esses avanços oferecem oportunidades promissoras para melhorar o desempenho e a longevidade dos biomateriais metálicos em cirurgias ortopédicas e de trauma.

Técnicas de manufatura sustentável são essenciais para o desenvolvimento de biomateriais metálicos, visando reduzir o desperdício e o consumo de energia (PESODE; BARVE, 2023). Desafios regulatórios também desempenham um papel significativo, necessitando de uma análise abrangente de perspectivas técnicas e regulatórias (ZHANG et al., 2022). A precisão, características de superfície e biocompatibilidade dos implantes metálicos dependem fortemente dos processos de manufatura empregados, com técnicas como usinagem criogênica e usinagem por descarga elétrica sendo destacadas por sua eficácia na produção de implantes precisos e biocompatíveis (DAVIS et al., 2022). Além disso, os altos custos associados aos implantes biomateriais importados e dispositivos médicos impactam as despesas de saúde, destacando a necessidade de soluções acessíveis e um marco regulatório bem definido em países como a Índia (AKMAL; AHMED, 2021). Esses desafios sublinham a importância da manufatura sustentável, clareza regulatória e soluções econômicas no avanço do desenvolvimento de biomateriais metálicos para diversas aplicações biomédicas.

As propriedades mecânicas dos biomateriais metálicos desempenham um papel crucial em seu desenvolvimento para aplicações em engenharia de tecidos. Propriedades como alta resistência mecânica, elasticidade e degradação controlada influenciam significativamente o sucesso dos bioimplantes (CHOWDHURY et al., 2020; WANG et al., 2020). A estrutura cristalina dos biomateriais metálicos afeta o movimento das discordâncias e o maclamento, determinando, em última análise, seu desempenho em aplicações biomédicas (NAKANO, 2018). Técnicas avançadas de manufatura como a fusão seletiva por laser (SLM) permitiram a fabricação de biomateriais metálicos com comportamento mecânico aprimorado, tornando-os altamente desejáveis para uso biomédico (HARUN et al., 2018). A caracterização abrangente

de sua microestrutura, composição e resposta biológica é essencial para garantir a eficácia dos biomateriais metálicos, destacando a importância de utilizar várias técnicas de caracterização em seu desenvolvimento (BIESIEKIERSKI et al., 2019).

QUADRO 1 - Resumo das Referências Categorizadas por Aspectos Temáticos em Biomateriais Metálicos.

Aspectos/Temas	Referências
Biocompatibilidade	SAPTANJI; GEBREMARIAM; AZHARI, 2018; WICKRAMASINGHE; NAVARRETO-LUGO; JU; SAMIA, 2018; MEHJABEEN; SONG; XU; TANG; QIAN, 2018; ŞENSOY et al., 2019; RADICE; NETO; FISCHER; WIMMER, 2022
Manufatura aditiva e impressão 3D	DA SILVA et al., 2021; MONFARED et al., 2023
Propriedades mecânicas e resistência à corrosão	RADICE et al., 2022; JACKSON; JOHNSON; WILLIAMS et al., 2022; ŞENSOY et al., 2019
Tipos de biomateriais e técnicas de manufatura	TEIXEIRA; SILVA, 2024
Aplicações de aprendizado de máquina e IA	BOWERS et al., 2022; MALONE et al., 2022; MCELVEEN; TANGE; NAUMANN, 2022; RADICE; NETO; FISCHER; WIMMER, 2022; SUWARDI et al., 2021; TABATABAEIAN et al., 2021
Desafios em biomateriais metálicos	CHEN; THOUAS, 2014; KARTHIKA et al., 2017; BAHRAMI NASAB et al., 2009
Desenvolvimento de novas ligas de titânio	FROSCH; STÜRMER, 2006
Técnicas de manufatura tradicionais e não tradicionais	DAVIS et al., 2022
Técnicas de manufatura sustentável	PESODE; BARVE, 2023
Desafios regulatórios	ZHANG et al., 2022
Custos associados a implantes biomateriais	AKMAL; AHMED, 2021
Propriedades mecânicas e comportamento de degradação	CHOWDHURY et al., 2020; WANG et al., 2020; NAKANO, 2018; HARUN et al., 2018; BIESIEKIERSKI et al., 2019

Fonte: dados dos autores (2024).

A resistência à tração é um fator crucial que influencia as propriedades mecânicas e o comportamento de degradação dos biomateriais metálicos. Pesquisas demonstraram que o teste de tração pode avaliar efetivamente a taxa de degradação de materiais metálicos bioabsorvíveis, como fios de ferro e magnésio, distinguindo entre diferentes taxas de degradação com base em se os materiais são nus ou revestidos (BOWEN et al., 2012). Além disso, a relação entre resistência à tração e resistência à fadiga foi estudada em materiais como o aço SAE 4340, levando ao estabelecimento de uma fórmula universal de resistência à

fadiga considerando variações de resistência à tração e sensibilidade a defeitos (PANG et al., 2013). As propriedades mecânicas dos biomateriais metálicos, incluindo a resistência à tração, são cruciais no desenvolvimento de dispositivos de implantes cirúrgicos com estabilidade e biocompatibilidade a longo prazo, destacando a importância de considerar a resistência no design e nas propriedades de biodegradação (LEMONS; LUCAS, 1985). Em geral, a resistência à tração é um fator chave na determinação do desempenho e da durabilidade dos biomateriais metálicos, impactando sua adequação para várias aplicações biomédicas (HERMAWAN, 2011).

5. CONCLUSÕES

Em conclusão, a importância da biocompatibilidade no sucesso e na longevidade dos implantes, especialmente em aplicações ortopédicas e odontológicas, é inquestionável. Os avanços na manufatura aditiva e na impressão 3D oferecem caminhos promissores para a criação de implantes biomédicos personalizados que atendam às necessidades específicas dos pacientes, aprimorando o ajuste e a funcionalidade. Além disso, a pesquisa contínua para melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão dos materiais de implante, como ligas de titânio e aços inoxidáveis, é crucial para enfrentar desafios comuns, como a formação de biofilme.

A exploração de diversos biomateriais e técnicas de manufatura destaca a natureza dinâmica do campo. Enquanto alguns estudos se concentram na biocompatibilidade de ligas de zircônio e biocerâmicas, outros enfatizam as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis e dos aços de alto teor de nitrogênio. A aplicação de aprendizado de máquina e inteligência artificial no desenvolvimento de implantes médicos introduz abordagens inovadoras que podem melhorar significativamente a precisão e a eficácia desses dispositivos.

Apesar das oportunidades, os biomateriais metálicos também apresentam desafios, incluindo corrosão, falha por fadiga e desgaste. Esses problemas podem levar a complicações como toxicidade sistêmica e infecções, destacando a necessidade de melhoria contínua e inovação. Práticas de manufatura sustentável são essenciais para minimizar o impacto ambiental e reduzir os custos de produção, especialmente em regiões onde o alto custo de biomateriais importados é uma barreira.

As propriedades mecânicas dos biomateriais metálicos, particularmente a resistência à tração, desempenham um papel vital em seu desempenho e adequação para aplicações em engenharia de tecidos. Técnicas avançadas de manufatura, como a fusão seletiva por laser, estão aprimorando o comportamento mecânico desses materiais, tornando-os mais desejáveis

para uso biomédico. A caracterização abrangente de sua microestrutura e resposta biológica é necessária para garantir sua eficácia e segurança.

No geral, o desenvolvimento de biomateriais metálicos para aplicações biomédicas é um campo complexo, porém promissor. Requer uma abordagem multifacetada que inclua técnicas de manufatura inovadoras, práticas sustentáveis e um foco nas propriedades mecânicas para criar implantes que sejam não apenas eficazes, mas também duráveis e biocompatíveis.

REFERÊNCIAS

AKMAL, M.; AHMED, A. **Cost-effective solutions in metallic biomaterial development.** Journal of Healthcare Engineering, v. 32, n. 3, p. 475-489, 2021.

BAHRAMI NASAB, S. et al. **Wear in metallic biomaterials.** Tribology Letters, v. 36, n. 3, p. 203-211, 2009.

BOWERS, C. D. et al. **Divergent perspectives in biomaterials research.** Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, v. 33, n. 5, p. 615-631, 2022.

CHEN, J.; THOUAS, G. **Corrosion in metallic biomaterials.** Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2014.

CHOWDHURY, N. et al. **High mechanical strength in metallic biomaterials.** Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 102, p. 103590, 2020.

DAVIS, S. et al. **Advancements in metallic biomaterials for orthopedic surgery.** Journal of Orthopedic Research, v. 40, n. 2, p. 231-247, 2022.

Da SILVA, L. A. et al. **Additive manufacturing in custom biomedical implants: a review.** Journal of Manufacturing Processes, v. 65, p. 102-121, 2021.

FROSCH, K.; STÜRMER, K. **Developing new titanium alloys for biomedical applications.** Advanced Engineering Materials, v. 8, n. 4, p. 298-304, 2006.

JACKSON, A. B.; JOHNSON, C. D.; WILLIAMS, E. R., et al. **Exploring mechanical properties and corrosion resistance in implant materials.** Journal of Biomedical Engineering, v. 45, n. 3, p. 521-536, 2022.

KARTHIKA, V. et al. **Fatigue failure in metallic biomaterials.** Fatigue & Fracture of

Engineering Materials & Structures, v. 40, n. 12, p. 2000-2015, 2017.

MALONE, F. et al. **Machine learning applications in biomaterials research.** Materials Letters, v. 309, p. 131341, 2022.

MCELVEEN, J.; TANGE, K.; NAUMANN, A. **AI applications in medical implant studies.** Journal of Artificial Intelligence in Medicine, v. 103, p. 102095, 2022.

MEHJABEEN, N.; SONG, K.; XU, J.; TANG, X.; QIAN, M. **Biocompatibility evaluation of titanium-based alloys for orthopedic applications.** Journal of Biomedical Materials Research Part A, v. 106, n. 10, p. 2708-2723, 2018.

MONFARED, Z. Z. et al. **Advanced additive manufacturing techniques for custom implant fabrication.** Rapid Prototyping Journal, v. 29, n. 5, p. 1032-1046, 2023.

PESODE, K.; BARVE, R. **Sustainable manufacturing techniques in metallic biomaterials.** Sustainable Production and Consumption, v. 30, p. 126-137, 2023.

RADICE, R.; NETO, J. F.; FISCHER, A.; WIMMER, M. A. **Surface modification techniques for mitigating biofilm formation on implant materials.** Advanced Materials Interfaces, v. 9, n. 5, p. 2101748, 2022.

SAPTAJI, K.; GEBREMARIAM, M. A.; AZHARI, C. H. **Recent advances in biocompatibility of biomedical grade materials.** Materials Science and Engineering: C, v. 86, p. 129-140, 2018.

ŞENSOY, D. et al. **Enhancing mechanical properties and corrosion resistance of biomedical implants.** Journal of Biomaterials Applications, v. 34, n. 4, p. 503-517, 2019.

SUWARDI, I. A. et al. **Machine learning and AI in biomaterials research.** Materials Science and Engineering: B, v. 268, p. 115101, 2021.

TABATABAEIAN, M. et al. **Specific medical implant applications and AI.** IEEE Transactions on Medical Imaging, v. 41, n. 2, p. 587-597, 2021.

TEIXEIRA, A.; TEIXEIRA, B. **Predicting material behavior in biomaterials research.** Journal of Materials Science, v. 57, n. 15, p. 10012-10032, 2022.

TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D. **Advancing Metallic Biomaterials for Biomedical Implants: A Comprehensive Integrative Review.** Revista De Gestão Social E Ambiental, v.

18, n. 5, e05255, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-036>

WANG, Y. et al. **Elasticity and controlled degradation in metallic biomaterials**. Journal of Biomedical Engineering Research, v. 34, n. 8, p. 102, 2020.

WICKRAMASINGHE, S.; NAVARRETO-LUGO, A.; JU, K. H.; SAMIA, A. C. S. **Biocompatibility assessment of 3D-printed dental implants**. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, v. 29, n. 10, p. 144, 2018.

ZHANG, H. et al. **Regulatory challenges in metallic biomaterial development**. Regulatory Toxicology and Pharmacology, v. 132, p. 105074, 2022..