

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de **01/05/2027.**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS)

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

KARINE STEFANY COAN

**DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTOS BIOATIVOS, BIO-SELETIVOS E
RESISTENTES AO DESGASTE NA LIGA TI-6AL-4V PRODUZIDOS POR MAO
PARA APLICAÇÃO COMO IMPLANTES DE QUADRIL E JOELHO**

Sorocaba (SP)

2025

KARINE STEFANY COAN

**DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTOS BIOATIVOS, BIO-SELETIVOS E
RESISTENTES AO DESGASTE NA LIGA TI-6AL-4V PRODUZIDOS POR MAO
PARA APLICAÇÃO COMO IMPLANTES DE QUADRIL E JOELHO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Mestra em Ciência e Tecnologia de Materiais.

Área de Concentração: Biomateriais

Orientador: Prof. Dr. Diego Rafael Nespeque Corrêa.

Sorocaba (SP)

2025

C652d

Coan, Karine Stefany

Desenvolvimento de recobrimentos bioativos, bio-seletivos e resistentes ao desgaste na liga Ti-6Al-4V produzidos por MAO para aplicação como implantes de quadril e joelho / Karine Stefany Coan.

-- Sorocaba, 2025

60 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Diego Rafael Nespeque Corrêa

1. Materiais biomédicos. 2. Revestimentos. 3. Óxidos metálicos de transição. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTOS BIOATIVOS, BIO-SELETIVOS E RESISTENTES AO DESGASTE NA LIGA TI-6AL-4V PRODUZIDOS POR MAO PARA APLICAÇÃO COMO IMPLANTES DE QUADRIL E JOELHO

AUTORA: KARINE STEFANY COAN

ORIENTADOR: DIEGO RAFAEL NESPEQUE CORRÊA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência e Tecnologia de Materiais, área: Biomateriais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DIEGO RAFAEL NESPEQUE CORRÊA (Participação Virtual)
Departamento de Física e Meteorologia / Unesp - Faculdade de Ciências - Campus de Bauru

Prof. Dr. PEDRO AUGUSTO DE PAULA NASCENTE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Materiais / Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Prof. Dr. LUIZ GUSTAVO POSSATO (Participação Virtual)
Departamento de Química / Unesp - Faculdade de Ciências - Campus de Bauru

Sorocaba, 30 de abril de 2025

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha sincera e profunda gratidão a todos que fizeram parte da minha trajetória pessoal e profissional. Cada contribuição, incentivo e apoio recebido ao longo desse percurso foram fundamentais para a realização deste trabalho, promovendo meu crescimento e desenvolvimento. Dedico este estudo a todos que me inspiraram, ensinaram e desafiaram a ser uma versão melhor de mim mesma.

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja presença me fortaleceu nos momentos mais desafiadores, guiando meus passos em direção ao meu propósito e renovando minha determinação ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Samanta e Eduardo, por cada ensinamento que moldou quem sou hoje e por sempre me mostrarem, com exemplos e palavras, o valor da dedicação, da resiliência e da importância de lutar pelos nossos sonhos. Aos meus irmãos e avós, que tanto amo, minha profunda gratidão pelo carinho e apoio.

Ao meu namorado Philipe e aos meus amigos Beatriz, Gabriella, Pamela, Victória e Lucas pelas conversas que me acalmaram e incentivaram nos momentos difíceis, assim como pelos momentos felizes que me motivaram a seguir em frente nesse período.

Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Diego Rafael Nespeque Corrêa, minha sincera gratidão pela orientação fundamental. Seus ensinamentos e conselhos foram indispensáveis para que eu chegasse até aqui, sempre oferecendo apoio e direcionamento para as melhores decisões ao longo deste percurso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, pela oportunidade e por todo o suporte.

Às agências de fomento cujo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica no Brasil foram fundamentais para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e processos nº 88887.898681/2023-00 e nº 88887.976789/2024-00.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – processos nº 407251/2018-9 e nº 404020/2023-2.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2018/24931-7, Processo nº 2021/13921-3 e Processo nº 2024/03148-3.

Agradeço a todos do Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais, em especial ao Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini, por me receber, e aos colegas de trabalho e amigos, Mariana, Edriely, Beatriz, Luara, Fernanda, Jhuliane, Danilo, Vinicius e Pedro, por todo o apoio, colaboração, risadas e parceria nesta jornada.

A todos do Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) da UNESP – Campus Sorocaba, em especial aos professores Dra. Elidiane C. Rangel e Dr. Nilson C. da Cruz pelo apoio e colaboração nas medidas de perfilometria, molhabilidade, MEV/EDS e FTIR realizadas nesse trabalho.

Aos professores do Departamento de Química da UNESP – Campus Bauru, Dr. Fenelon M. L. Pontes e Dr. Luiz G. Possato, pelas medidas DRX e Raman realizadas neste trabalho.

Agradeço ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Brasileiro de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) pelos experimentos de XPS (Proposta #20241166) e TEM (Proposta #20233406).

Agradeço às contribuições com os testes biológicos feitos em parceria com a Itália, incluindo os colaboradores: Dra. Kátia Barbaro, do *Istituto Zooprofilattico Sperimentale Lazio e Toscana*; Dr. Marco Fosca e Dra. Julietta V. Rau, do *Istituto di Struttura della Materia*.

À Dra. Sofia A. Tsipas, do *Department of Materials Science and Engineering and Chemical Engineering* da *University Carlos III of Madrid*, em parceria com a Espanha, pelas valiosas contribuições nos testes de desgaste realizados em meu trabalho.

Assim, deixo minha imensa gratidão a todos.

COAN, K. S. **Desenvolvimento de recobrimentos bioativos, bio-seletivos e resistentes ao desgaste na liga Ti-6Al-4V produzidos por MAO para aplicação como implantes de quadril e joelho.** 2025. 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

RESUMO

A osteoartrite, agravada pelo envelhecimento e obesidade, tem aumentado a demanda por implantes ortopédicos mais duráveis e funcionais. A liga de titânio Ti-6Al-4V é amplamente utilizada para essas aplicações devido à sua excelente resistência mecânica, à corrosão e à biocompatibilidade. No entanto, o desgaste prolongado pode liberar íons de alumínio (Al) e vanádio (V), que são potencialmente tóxicos para o organismo. Este estudo teve como objetivo melhorar as propriedades da liga Ti-6Al-4V ELI através da aplicação de recobrimentos bioativos obtidos por Oxidação por Micro-Arco (*Micro-Arc Oxidation* – MAO), visando otimizar sua resistência ao desgaste e suas propriedades biológicas para implantes ortopédicos, como de Substituição Total de Quadril – *Total Hip Replacement* (THR) e Substituição Total de Joelho – *Total Knee Replacement* (TKR). Os recobrimentos foram obtidos utilizando eletrólitos contendo cálcio (Ca), fósforo (P) e óxidos de metais de transição (OMTs), como dióxido de titânio (TiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), trióxido de molibdênio (MoO₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e dióxido de manganês (MnO₂), variando suas concentrações. As amostras foram tratadas sob uma tensão de 300 volts por 90 segundos e caracterizadas por várias técnicas analíticas, incluindo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia Raman, Espectroscopia de Fotoelétrons por Raios X (XPS), Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), perfilometria e ensaios de microdureza Vickers. Os resultados indicaram que a adição dos OMTs influenciou positivamente a porosidade, a rugosidade e a composição química dos recobrimentos, promovendo melhorias na resistência ao desgaste e ação antimicrobiana contra diversos microrganismos, sem comprometer a viabilidade celular. A presença de TiO₂ e Ca e P nas camadas externas dos recobrimentos foi determinante para a biocompatibilidade, apresentando resultados satisfatórios em testes biológicos preliminares. Além disso, a estrutura porosa e a tendência hidrofílica dos recobrimentos contribuíram para uma interação mais eficiente com o meio biológico. Esses recobrimentos bioativos, enriquecidos com OMTs, mostraram-se promissores para aplicações em implantes ortopédicos, uma vez que combinaram a resistência ao desgaste com propriedades antimicrobianas e boa biocompatibilidade em relação ao substrato. A modificação estrutural e química proporcionada pela técnica MAO, especialmente com a adição de OMTs, pode oferecer uma alternativa eficaz para o desenvolvimento de implantes ortopédicos mais duráveis e funcionais, com o potencial de reduzir complicações pós-cirúrgicas e melhorar a longevidade dos dispositivos.

Palavras-chave: implantes ortopédicos; Ti-6Al-4V; Oxidação por Micro - Arco; recobrimento bioativo; resistência ao desgaste.

COAN, K. S. Development of bioactive, bio-selective, and wear-resistant coatings on Ti-6Al-4V alloy produced by MAO for application as hip and knee implants. 2025. 60 p. Master's Thesis (Master's degree in Materials Science and Technology) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2025.

ABSTRACT

Osteoarthritis, exacerbated by aging and obesity, has increased the demand for more durable and functional orthopedic implants. The Ti-6Al-4V titanium alloy is widely used for these applications due to its excellent mechanical strength, corrosion resistance, and biocompatibility. However, prolonged wear can release aluminum (Al) and vanadium (V) ions, which are potentially toxic to the body. This study aimed to enhance the properties of Ti-6Al-4V ELI alloy by applying bioactive coatings obtained through Micro-Arc Oxidation (MAO), thereby optimizing wear resistance and biological properties for orthopedic implants, such as Total Hip Replacement (THR) and Total Knee Replacement (TKR). The coatings were developed using electrolytes containing calcium (Ca), phosphorus (P), and transition metal oxides (TMOs), including titanium dioxide (TiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), molybdenum trioxide (MoO_3), iron oxide (Fe_2O_3), and manganese dioxide (MnO_2), with varying concentrations. The samples were treated at 300 volts for 90 seconds and characterized using multiple analytical techniques, including Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Raman Spectroscopy, X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), X-ray Diffraction (XRD), Transmission Electron Microscopy (TEM), profilometry, and Vickers microhardness testing. The results indicated that the addition of TMOs positively influenced the porosity, roughness, and chemical composition of the coatings, leading to improved wear resistance and antimicrobial activity against various microorganisms without compromising cell viability. The presence of TiO_2 , Ca, and P in the outer layers of the coatings was crucial for biocompatibility, yielding satisfactory outcomes in preliminary biological tests. Additionally, the porous structure and hydrophilic tendency of the coatings contributed to more effective interaction with the biological environment. These bioactive coatings, enriched with TMOs, proved promising for orthopedic implant applications by combining enhanced wear resistance with antimicrobial properties and superior biocompatibility compared to the substrate. The structural and chemical modifications achieved through the MAO technique, particularly with the addition of TMOs, present an effective alternative for developing more durable and functional orthopedic implants, with the potential to reduce post-surgical complications and improve implant longevity.

Keywords: orthopedic implants; Ti-6Al-4V; Micro-Arc Oxidation; bioactive coating; wear resistance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Biomateriais metálicos	8
1.1.1. Ligas biomédicas de titânio	10
1.2. Modificação de Superfície	12
1.2.1. Oxidação por Micro - Arco	12
1.2.2. Óxidos de metais de transição (OMTs)	16
2. OBJETIVOS	18
3. RESULTADOS	18
3.1. Capítulo 1 – Artigo	19
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS	54

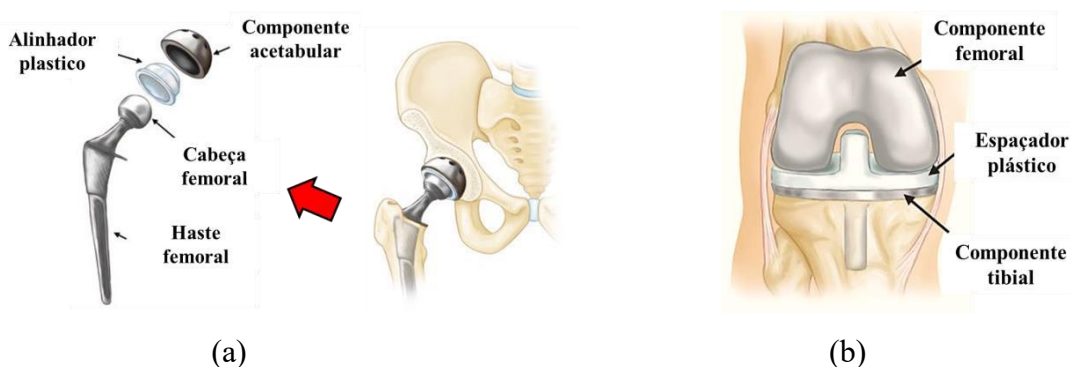
1. INTRODUÇÃO

1.1. Biomateriais metálicos

Biomateriais são definidos como materiais, simples ou compostos, naturais ou sintéticos, que são usados em união direta com sistemas biológicos do corpo humano, de forma temporária ou permanente, com o intuito de reparar, substituir ou aumentar tecidos, órgãos ou funções específicas do organismo (RATNER et al., 2020). A utilização dos biomateriais tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de tratamentos de traumas, enfermidades e doenças diversas na Medicina, garantindo uma melhora da qualidade de vida do paciente (AGRAWAL et al., 2023; RATNER et al., 2020).

Atualmente, os biomateriais abrangem toda a classe de materiais de Engenharia, como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos, com aplicações específicas no corpo humano de acordo com as suas propriedades (CHONG; NG; LEE, 2023; TODROS; TODESCO; BAGNO, 2021). Dentre as classes, os metais e suas ligas são amplamente empregados na área da ortopedia, devido a propriedades mecânicas favoráveis, são aplicados principalmente como substituição de articular como o THR e TKR, conforme ilustra a Figura (AL-SHALAWI et al., 2023; CHOI et al., 2023; CHONG; NG; LEE, 2023).

Figura 1 – Componentes dos implantes (a) THR e (b) TKR.



Fonte: Adaptado de AAOS (2022).

O implante THR (Figura 1 (a)), conecta a região do quadril com o fêmur pela pélvis, sendo composto por uma haste femoral com uma cabeça esférica, seguido por um alinhador polimérico que se liga ao acetábulo, sendo a haste e o acetábulo fabricados em liga metálica. Enquanto o TKR (Figura 1 (b)) faz a ligação da região do joelho, entre os ossos do fêmur e

tíbia, sendo composto por componentes femoral e tibial fabricados da liga metálica, separadas por um espaçador plástico (RIVIÈRE; VENDITTOLI, 2020). Entre os biomateriais metálicos comerciais mais utilizados para esses implantes, destacam-se ligas de aços inoxidáveis, como o 316L, ligas de cobalto-cromo (Co-Cr), e principalmente o titânio e suas ligas (titânio comercialmente puro e Ti-6Al-4V) (AL-SHALAWI et al., 2023; CHOI et al., 2023; CHONG; NG; LEE, 2023).

A demanda global por esses dispositivos tem crescido significativamente nos últimos anos, devido ao aumento de doenças degenerativas como a osteoartrite (OA), responsável por mais de 80% dos casos que levam à cirurgia de substituição articular em diversos países (ABDELAAL; RESTREPO; SHARKEY, 2020). O surgimento da doença está relacionado ao envelhecimento populacional e ao aumento da obesidade, fatores de risco para a OA, ocasionando falha na autorregeneração da cartilagem do paciente (LECOCQ et al., 2020; LOHMANDER et al., 2023; WALL et al., 2022).

Segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2023), há uma previsão que a população idosa (60 anos ou mais) no mundo alcance 12% até 2030 e 16% até 2050, com uma projeção de 1,4 bilhão de pessoas idosas vivendo em países de média e baixa renda até 2030. Além disso, segundo a relatório *World Obesity Atlas* (LOBSTEIN et al., 2023), 38% da população global está com sobrepeso ou obesa, com taxa de obesidade entre adultos nos Estados Unidos (EUA) projetada para atingir 78% em 2030, aumentando a demanda de procedimentos para substituição articular em 137% para THR e 601% para TKR, em comparação com as estatísticas de 2005 (KURTZ et al., 2007; ZHANG; CHEN, 2019).

Em casos severos de OA, tratamentos cirúrgicos são imprescindíveis para reduzir dor e melhorar as funções articulares do paciente, sendo essencial para melhorar a qualidade de vida do paciente (NAJIBI; MOKHTARI, 2023). Entretanto, diversos biomateriais metálicos utilizados em implantes THR e TKR podem apresentar limitações, levando a falhas ou deterioração após 12 a 15 anos de implantação, o que frequentemente exige cirurgias de revisão acompanhada de alguma complicação, que resulta em dor a longo prazo e altos custos de tratamento (NAJIBI; MOKHTARI, 2023; UNUNE; BROWN; REILLY, 2022). Diante desse desafio, a busca por biomateriais metálicos com maior durabilidade tem se intensificado, visando atender a requisitos fundamentais, como propriedades mecânicas adequadas, alta biocompatibilidade, resistência à corrosão e ao desgaste, além de promover uma osseointegração eficiente e ação antimicrobiana (ABD-ELAZIEM et al., 2024; MUKHTAR; DEY; KUNDAN, 2025).

O desenvolvimento de biomateriais com essas características é essencial para prolongar a vida útil dos implantes THR e TKR a fim de minimizar a necessidade de cirurgias de revisão, otimizar a recuperação e a funcionalidade biomecânica dos pacientes. Para isso, técnicas de modificação de superfície de biomateriais metálicos tem mostrado resultados satisfatórios, principalmente quando aplicadas ao Ti e suas ligas (MUKHTAR; DEY; KUNDAN, 2025; THANIGAIVEL et al., 2022; UNUNE; BROWN; REILLY, 2022).

1.1.1. Ligas biomédicas de titânio

O titânio (Ti) e suas ligas têm sido preferencialmente empregados para uso como implantes ortopédicos, em virtude da sua vantajosa combinação de elevada resistência mecânica, baixa densidade, flexibilidade, resistência à corrosão, biocompatibilidade e capacidade de osseointegração (SARRAF et al., 2022). Após a sua descoberta no século XVIII na forma mineral (FeTiO_3), e estabelecimento do processo Kroll no século XX, para a extração em larga escala do elemento na forma metálica, o Ti passou a ser adotado em diversas aplicações industriais, em especial na indústria aeronáutica e automobilística. Contudo, após a segunda guerra mundial, o metal passou a ser empregado em Medicina, e a partir da década de 70 foi aplicado na Odontologia (SOUZA et al., 2019; WANG et al., 2020).

O Ti é um elemento alotrópico que sofre transformação de fase a aproximadamente 883°C , passando da estrutura hexagonal compacta (HC) (fase α) para a cúbica de corpo centrado (CCC) (fase β). A proporção dessas fases pode ser ajustada por processamentos termomecânicos e pela adição de elementos de liga, como α -estabilizadores (Al, C, O, N) e β -estabilizadores (V, Fe, Mo, Ni, Cr, Mn, Co), possibilitando desenvolvimento de ligas com propriedades mecânicas ajustáveis para diversas aplicações, que são classificadas em três categorias principais, de acordo com sua microestrutura: α , ($\alpha + \beta$) e β (KOLLI; DEVARAJ, 2018; NAJAFIZADEH et al., 2024; PUSHP; DASHARATH; ARATI, 2022).

Além disso, o Ti e suas ligas apresentam alta reatividade com o oxigênio, resultando na formação espontânea de uma camada passiva nanométrica (4 - 6 nm) de TiO_2 amorfo, que promove resistência à corrosão em ambientes diversos e interações biológicas favoráveis, evitando deterioração e efeitos citotóxicos de íons metálicos (YARRAM et al., 2019; ZHANG; CHEN, 2019). Além de evitar a liberação de íons tóxicos que comprometem a biocompatibilidade, a camada de TiO_2 contém grupos hidroxila (OH^-) que são formados pelo

contato com o ar atmosférico, aumentando assim a molhabilidade da superfície quando em contato com ambiente biológico, favorecendo as interações entre implante e organismo.

Em soluções aquosas, como os fluidos corporais, esses grupos hidroxila se dissociam, gerando cargas elétricas na superfície do material. Em pH alcalino, podem surgir cargas negativas (O^-) e positivas (H^+), enquanto em pH ácido predominam cargas positivas (H_2^+). Esse fenômeno aumenta a molhabilidade da superfície e favorece a adsorção de proteínas, como as integrinas (HANAWA, 2019). Essa proteína regula a migração, diferenciação, proliferação e formação óssea dos osteoblastos, processos fundamentais para a osseointegração, definida como a formação de uma interface que liga o implante e o osso do paciente. (MAO et al., 2023; W. NICHOLSON, 2020).

Sendo assim, as propriedades mencionadas tornam Ti e suas ligas uma opção interessante na ortopedia. A liga Ti-6Al-4V, do tipo $\alpha + \beta$, destaca-se como a mais utilizada em dispositivos médicos, representando cerca de 95% das aplicações médicas e é principalmente aplicada em implantes THR e TKR na ortopedia. Inicialmente, desenvolvida para a indústria aeronáutica, é também conhecida como Ti-64 (ASTM F136-13, 2021) e possui uma versão com baixo teor de elementos intersticiais (ELI – *Extra Low Interstitial*), o Ti-64 ELI, também conhecido como Ti-CP grau 5 (CP – Comercialmente Puro), apresenta elevada resistência mecânica (860 MPa à tração e 795 MPa ao escoamento), excelente resistência à corrosão, baixa densidade (4,43 g/cm³) e um módulo de elasticidade de 110 GPa, inferior ao do aço 316L (193 GPa) e da liga Cr-Co-Mo (210-250 GPa) (DAVIS et al., 2022; MARIN; LANZUTTI, 2024; NAJAFIZADEH et al., 2024; PUSHPA; DASHARATH; ARATI, 2022).

Embora a liga Ti-6Al-4V, seja amplamente utilizada em substituições articulares devido a sua combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e capacidade de osseointegração, seu desempenho tribológico é limitado. Apesar de formar uma camada de óxido estável na superfície, a exposição ao ambiente biológico pode levar ao desgaste e à dissolução dessa camada devido à ação combinada de forças mecânicas e fluidos corporais. Esse processo pode resultar na liberação de íons de Al e V, que são tóxicos e estão associados a efeitos adversos, incluindo problemas neurológicos como a doença de Alzheimer (ABD - ELAZIEM et al., 2024; RONO et al., 2022).

Essas evidências têm incentivado a comunidade científica a investigar modificações de superfície da liga para proteger contra mecanismos de corrosão e desgaste, além de melhorar a biocompatibilidade, osseointegração e promover ação antimicrobiana, que são propriedades

essenciais para um bom desempenho ao longo prazo (ABD - ELAZIEM et al., 2024; MOGHADASI et al., 2022; WEI et al., 2023).

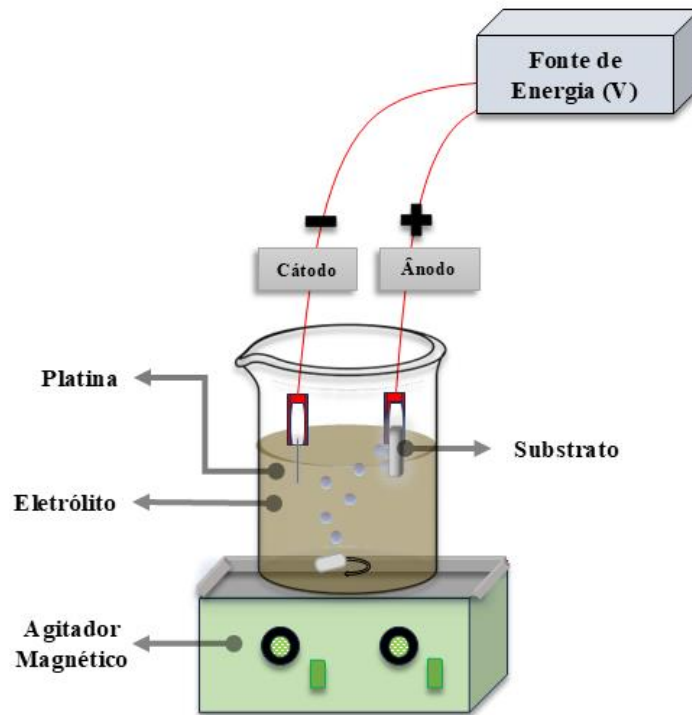
1.2. Modificação de Superfície

A modificação de superfície tem resultado em importantes contribuições para promover requisitos essenciais que aumentem a longividade de implantes ortopédicos, sem alterar características do volume. As técnicas de modificação e recobrimento da superfície são baseadas em aspectos físicos, químicos ou mecânicos, como exemplo, o sol-gel, deposição a plasma e jateamento. Neste cenário, as técnicas baseadas a plasma tem se destacado, em especial a técnica MAO que apresenta baixo custo e excelentes resultados quando aplicado ao Ti e suas ligas (DEVGAN; SIDHU, 2019; HAN et al., 2023; XU et al., 2022).

1.2.1. Oxidação por Micro - Arco

A MAO, é uma das técnicas mais utilizadas para modificar a superfície do Ti e suas ligas. No processo MAO ou oxidação eletrolítica por plasma (PEO – *Plasma Electrolytic Oxidation*), a amostra é imersa em um eletrólito e ligada a uma fonte de tensão em potencial anódico (+), enquanto um contraeletrodo é conectado ao potencial catódico (-) e imerso no eletrólito de forma a fechar o circuito, como apresentado pela Figura 2. Diferente da anodização convencional, que consiste em aplicar uma tensão a limites baixos (20 - 80 V), no MAO é aplicado uma alta tensão (superior à 120 V), gerando um revestimento mais espesso e duro (KASEEM et al., 2021).

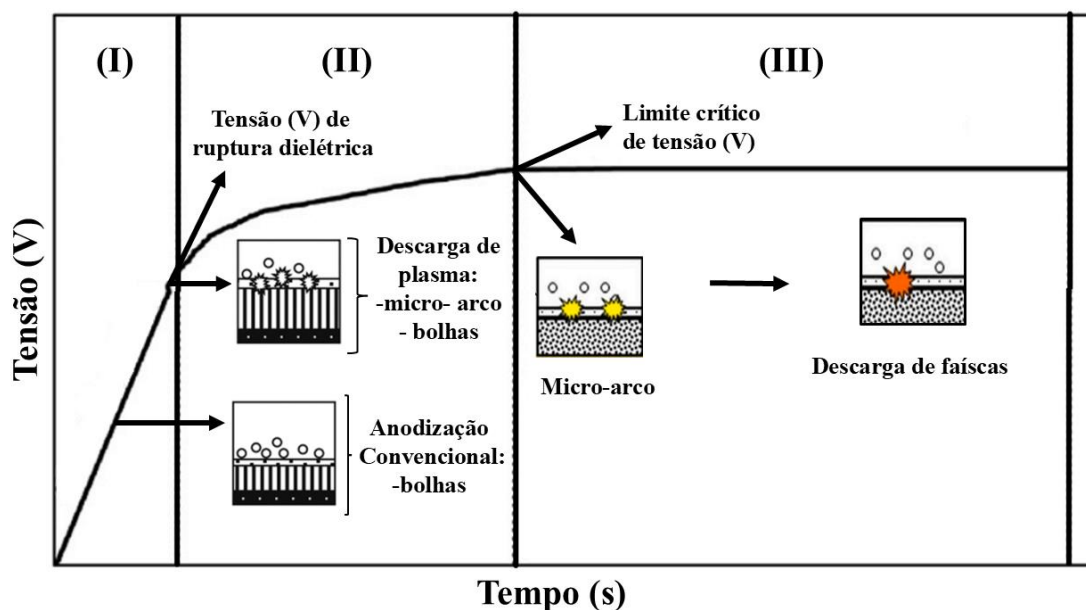
Figura 2 – Sistema de tratamento MAO.



Fonte: próprio autor.

O mecanismo de crescimento do revestimento durante o processo pode ser dividido em três estágios em função da curva tensão (V) $\times$ tempo (s), conforme mostra a Figura 3 (LI et al., 2023; MING et al., 2023; WANG et al., 2024). No primeiro estágio (I), com a aplicação de uma diferença de potencial (ddp) entre os eletrodos, a tensão aumenta linearmente, caracterizando a fase de oxidação anódica. Nessa etapa, ocorrem reações eletroquímicas que resultam na formação de uma camada de óxido de titânio a partir de íons de O^{2-} provenientes do eletrólito de acordo com as equações (1), (2), (3) e (4). A camada de óxido gerado possui uma camada interna com cavidades e uma camada externa amorfa, podendo apresentar fase cristalina anatase do TiO_2 (KASEEM et al., 2021; LI et al., 2023; MING et al., 2023).

Figura 3 – Curva tensão-tempo e os três estágios de formação da camada de óxido no processo MAO.



Fonte: adaptado de Li et al. (2023) e Wang et al. (2024).



À medida que a camada de óxido cresce e se torna mais densa, limita o transporte de íons para o substrato, funcionando como um isolante elétrico e contribuindo para o aumento da tensão. Quando certo limite de tensão é atingido, ocorre a ruptura dielétrica da camada de óxido formado, marcando a transição para o segundo estágio (II). Neste estágio, o plasma gerado pela ruptura dielétrica promove descargas elétricas de plasma (micro arcos) do substrato até a superfície. Após essa ruptura inicial do filme de óxido, bolhas de gases gerados a partir do eletrólito também podem sofrer ruptura, contribuindo para a formação de poros devido ao aumento de pressão e alta temperatura, promovendo novas descargas no plasma. As descargas elétricas provocam reações entre o eletrólito e a superfície do substrato, depositando espécies químicas na camada de óxido. A velocidade desse estágio pode variar de acordo com o tipo de eletrólito e o substrato utilizado (KASEEM et al., 2021; LI et al., 2023; MING et al., 2023).

Por fim, no terceiro estágio (III), a tensão atinge um limite crítico e se estabiliza, fazendo com que o micro arco se transforme em uma descarga de faísca. Nesse estágio, o aumento de temperatura ocasionado pelo plasma de alta energia começa a dissolver o titânio no eletrólito,

liberando íons (Ti^{4+}). Ao mesmo tempo, os elementos presentes no eletrólito migram para o ânodo, onde reagem com o Ti^{4+} para formar dióxido de titânio (TiO_2) e outros compostos. Portanto, possíveis espécies químicas presentes no eletrólito (íons ou moléculas) são incorporadas constantemente na superfície do material (LI et al., 2023; MING et al., 2023).

As superfícies tratadas por MAO tendem a apresentar um recobrimento óxido poroso, formadas por fases metaestáveis ou amorfas e enriquecidas com elementos do eletrólito, podendo variar suas propriedades superficiais de acordo a sua estrutura e composição química obtida. Como exemplo, Yu e colaboradores (YU et al., 2020) trataram a superfície da liga Ti-6Al-4V por MAO em eletrólito rico em íons presentes no corpo humano, como Ca, P, silício (Si), estrôncio (Sr), zinco (Zn), magnésio (Mg) e manganês (Mn). Os autores observaram uma típica formação porosa na superfície, que promoveu aumento significativo na proliferação, diferenciação e adesão de células osteoblásticas MC3T3-E1. Enquanto Santos e colaboradores (SANTOS et al., 2021) realizaram um tratamento similar na liga Ti-6Al-4V, em um eletrólito rico em Ca e P apenas. Os autores notaram uma melhora na resistência ao desgaste da superfície e citocompatibilidade com células mesenquimais, com capacidade para induzir respostas osteogênicas de diferenciação.

E mais recentemente, Nikoomanzari e colaboradores (NIKOOMANZARI et al., 2020) utilizaram a mesma técnica para a formação de revestimentos nanocompósitos de TiO_2 e dióxido de zircônio (ZrO_2) na superfície da liga Ti-6Al-4V. As nanopartículas (NPs) de ZrO_2 foram incorporadas com sucesso durante o tratamento, garantindo à superfície uma melhor resistência à corrosão, citocompatibilidade com fibroblastos de linhagem celular MG63, capacidade de formação de apatita e diminuição na liberação de íons de Al e V após 28 dias de incubação em solução SBF (*Simulated Body Fluid*).

Além disso, essa técnica tem demonstrado melhorias significativas na resistência ao desgaste e à corrosão da liga Ti-6Al-4V, especialmente com a adição de nanopartículas (NPs) de alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ao eletrólito. Em um estudo recente, Chen e colaboradores (CHEN; YUAN, 2023) investigaram o efeito da concentração dessas NPs na microestrutura e nas propriedades dos revestimento obtidos por MAO. Os resultados indicaram que os revestimentos formados apresentaram uma estrutura composta predominantemente por fases de TiO_2 (rutilo e anatase) e $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Observou-se que a adição de NPs de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ contribuiu para uma superfície do revestimento com propriedades mecânicas, física e químicas aprimoradas. O aumento na concentração das NPs resultou na diminuição da rugosidade, aumentando a resistência ao desgaste e na resistência à corrosão. Esses avanços ressaltam o potencial da MAO como uma

técnica promissora para a modificação de implantes de Ti-6Al-4V, tornando-os mais adequados para aplicações em ambientes biológicos, onde a longevidade do material é essencial. No entanto, poucos estudos investigaram o uso de elementos bioativos (Ca e P) em conjunto com óxidos de metais de transição no eletrólito para a modificação de superfície por MAO, embora esses óxidos já estejam sendo explorados na forma de nanopartículas (NPs) para aplicações biomédicas, demonstrando respostas biológicas interessantes.

1.2.2. Óxidos de metais de transição (OMTs)

OMTs são caracterizados por assumirem diversas formulações químicas, dependendo do estado de oxidação do metal. Na área biomédica, alguns óxidos já são convencionalmente usados na forma de NPs para terapia e diagnóstico de doenças, como o câncer. Na forma de revestimentos, alguns trabalhos têm apresentado resultados interessantes para uso em implantes, envolvendo aspectos de resistência ao desgaste e à corrosão, biocompatibilidade, osseointegração, bioatividade e ação antimicrobiana (FERNÁNDEZ-LIZÁRRAGA et al., 2022; PENG et al., 2022; SHABATINA et al., 2023). Porém, não há ainda estudos sistemáticos sobre o efeito conjunto destes óxidos nas propriedades biológicas de ligas biomédicas de Ti, em especial envolvendo OMTs. A seguir, um breve resumo das respostas biológicas de cada OMT de interesse para este trabalho é apresentado.

O TiO_2 é a forma mais estável de oxidação do Ti, com reconhecida biocompatibilidade com tecidos e células do corpo humano, e tendo as estruturas cristalinas anatase e rutilo sido mais comumente encontradas em revestimentos. Lingaraju e colaboradores (LINGARAJU et al., 2021) comprovaram também uma ação antimicrobiana de NPs de TiO_2 contra *Escherichia coli* (*E. Coli*), *Klebsiella Aerogenes* (*K. Aerogenes*), e *Staphylococcus Aureus* (*S. Aureus*), além de ação antifúngica contra *Candida Albicans* (*C. Albicans*). Além disso, os autores encontraram respostas favoráveis quanto à ação anticoagulante, trombogênica e hemolítica, além de citotoxicidade contra células cancerígenas de pulmão e mama. Em outro estudo, Zhang e colaboradores (ZHANG et al., 2024) investigam o tratamento MAO em ligas de magnésio AZ31B com a adição de NPs de TiO_2 ao processo, os autores obtiveram revestimentos com microestrutura mais densa, com diminuição na rugosidade melhorando a resistência ao desgaste, de caráter hidrofóbico, podendo contribuir para uma superfície antimicrobiana, além de apresentar uma resistência à corrosão significativamente melhorada.

A Al_2O_3 é a forma de óxido mais estável do Al, que diferentemente da polêmica citotoxicidade do metal, possui ampla utilização comercial como biomaterial cerâmico em odontologia. Denes e colaboradores (DENES et al., 2018) compilaram uma grande quantidade de trabalhos científicos dos últimos 40 anos, que revelaram a ausência de qualquer indício de citotoxicidade, alergia e genotoxicidade em testes *in vitro* e *in vivo* com alumina. Além disso, Gudkov e colaboradores (GUDKOV et al., 2022) também agruparam dezenas de trabalhos científicos atestando a ação antibacteriana e antifúngica da alumina na forma de NPs. Além disso, tratamentos de superfícies utilizando NPs de Al_2O_3 demonstram aumento na resistência ao desgaste, possuindo grande potencial para aplicação em implantes ortopédicos (CHEN; YUAN, 2023).

O Fe_2O_3 é um dos óxidos mais comuns do ferro, apresentando cor avermelhada e propriedades paramagnéticas, elevada estabilidade térmica e resistência mecânica, além de ser antioxidante. Dado as suas propriedades, a hematita já vem sendo comumente empregada na forma de NPs em aplicações biomédicas, como dispositivos nanocarregadores para sistemas *drug delivery*, engenharia de tecidos e curativos (ABOUELNAGA et al., 2024; POURMADADI et al., 2022). Em concentrações adequadas no organismo, a hematita tem indicado ausência de citotoxicidade e efetiva ação antimicrobiana contra *Bacillus Subtilis* (*B. Subtilis*), *S. Aureus*, *E. Coli* e *Klebsiella Pneumoniae* (*K. Pneumoniae*) (PALLELA et al., 2019). Além disso, Hoseini e colaboradores (HOSEINI; YARMAND; KOLAH, 2021) investigaram a incorporação de NPs de Fe_2O_3 pela técnica MAO, que resultou no aumento da taxa de crescimento do revestimento, promovendo a transformação anatase e rutilo, e reduzindo os defeitos inerentes. Essas mudanças levaram a um aumento significativo na resistência à corrosão dos revestimentos.

O MoO_3 possui uma boa estabilidade mecânica, tendo as formas hexagonal e ortorrômbica obtido destaque em aplicações envolvendo catalizadores. Esakkirajan e colaboradores (ESAKKIRAJAN et al., 2024) reportaram que NPs de MoO_3 possuem efetiva ação antimicrobiana contra *K. Pneumoniae* e *Pseudomonas. aeruginosa* (*P. Aeruginosa*). Enquanto Bozinovic e colaboradores (BOŽINOVIĆ et al., 2020) indicaram uma ausência de toxicidade e baixa ação inflamatória em células de queratinócitos humanas quando em contato com concentrações balanceadas de NPs de MoO_3 . Em outro estudo, Salim e Sadhasivam (SALIM; SADHASIVAM, 2023) sintetizaram nanopartículas de MoO_3 por síntese verde utilizando extrato de *Hemigraphis alternata*, que mostraram atividades antioxidantes e antimicrobianas contra patógenos de pele (*S. Aureus*, *P. Aeruginosa*, *Aspergillus Niger* (*A.*

Niger), *C. Albicans*). As nanopartículas foram biocompatíveis com células de fibroblastos e facilitaram a cicatrização de feridas, promovendo migração celular, indicando potencial aplicação em regeneração de tecidos.

O MnO_2 é reconhecido por sua ação catalítica, principalmente em reações envolvendo a redução do oxigênio, como em dispositivos de detecção de biomoléculas. Como o metal participa de importantes reações bioquímicas do corpo humano, estudos têm evidenciado sua biocompatibilidade no corpo humano para uma variedade de formas e concentração. Além disso, sua reatividade química tem demonstrado ser também efetiva para a prevenção de inflamações e o combate de microorganismos, como *S. Aureus* e *E. Coli*, além de atuar como tratamento contra o câncer (CHEN et al., 2020; SISAKHTNEZHAD; RAHIMI; MOHAMMADI, 2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A osteoartrite é uma das principais doenças degenerativas que afetam as articulações, sendo agravada pelo envelhecimento da população e pelo aumento da obesidade. Com o crescimento da expectativa de vida e a prevalência de fatores de risco, como a obesidade e sobrepeso, a necessidade de implantes ortopédicos mais duráveis tem se tornado cada vez mais evidente.

As ligas metálicas utilizadas nesses dispositivos, como a Ti-6Al-4V, devem apresentar excelente resistência mecânica, resistência à corrosão e ao desgaste, biocompatibilidade (capacidade de osseointegração e ação antimicrobiana), características fundamentais para garantir a longevidade dos implantes e minimizar complicações pós-cirúrgicas. A técnica MAO tem sido largamente empregado em ligas de Ti para aplicações biomédicas e possibilita atingir propriedades essenciais para aplicações em implantes ortopédicos (THR e TKR).

Com base nos resultados deste estudo, conclui-se que os recobrimentos enriquecidos com elementos bioativos (Ca e P) e OMTs, desenvolvidos por MAO na liga Ti-6Al-4V, apresentam grande potencial para aplicações em implantes ortopédicos, especialmente em THR e TKR. A formação de uma camada densa de TiO_2 , juntamente com a presença de Ca e P nas camadas externas, foi crucial para a biocompatibilidade dos recobrimentos, mostrando resultados preliminares promissores em adesão celular e mineralização óssea. A estrutura porosa e a tendência hidrofílica dos recobrimentos favoreceram a interação com o meio biológico. A adição de OMTs no eletrólito causou pequenas alterações estruturais e químicas, impactando positivamente as propriedades dos recobrimentos, como aumento na resistência ao desgaste, além de possuir potencial ação antimicrobiana contra diversos microrganismos, sem apresentar citotoxicidade durante o período de testes biológico.

Embora os resultados sejam promissores, ainda se faz necessário a realização de estudos adicionais sobre a bioatividade, o comportamento em fluidos biológicos simulados e testes de corrosão e tribocorrosão para validar definitivamente a viabilidade dos recobrimentos bioativos contendo OMTs como alternativa para melhorar a durabilidade e funcionalidade dos implantes ortopédicos.

REFERÊNCIAS

AAOS (American Academy of Orthopaedic Surgeons). **OrthoInf**. Disponível em: <<https://orthoinfo.aaos.org/>>. Acesso em 27/12/22.

ABD-ELAZIEM, W. et al. Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants Applications: A comprehensive review. **Materials & Design**, v. 241, n. 112850, p. 1-39, 2024.

ABDELAAL, M. S.; RESTREPO, C.; SHARKEY, P. F. Global Perspectives on Arthroplasty of Hip and Knee Joints. **Orthopedic Clinics of North America**, v. 51, n. 2, p. 169–176, 2020.

ABOUELNAGA, A. M. et al. Optimizing magnetic, dielectric, and antimicrobial performance in chitosan-PEG-Fe₂O₃@NiO nanomagnetic composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 260, n. 129545, p. 1-16, 2024.

AGRAWAL, R. et al. Biomaterial types, properties, medical applications, and other factors: a recent review. **Journal of Zhejiang University: Science A**, v. 24, n. 11, p. 1027–1042, 2023.

AL-SHALAWI, F. D. et al. Biomaterials as Implants in the Orthopedic Field for Regenerative Medicine: Metal versus Synthetic Polymers. **Polymers**, v. 15 (12), n. 2601, p. 1-31, 2023.

ASTM F136-13. **Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401)**. West Conshohocken (USA) ASTM International, p.1-4, 2021.

BOŽINOVIĆ, K. et al. In-vitro toxicity of molybdenum trioxide nanoparticles on human keratinocytes. **Toxicology**, v. 444, n.152564, p. 1-11, 2020.

CHEN, Y. et al. Biomedical application of manganese dioxide nanomaterials. **Nanotechnology**, v. 31 (20), n. 202001, p.1-14 2020.

CHEN, Y.; YUAN, M. Effect of α -Al₂O₃ Additive on the Surface Micro-Arc Oxidation Coating of Ti6Al4V Alloy. **Nanomaterials**, v. 13 (11), n. 1802, p. 1-12, 2023.

CHOI, S. R. et al. The Clinical Use of Osteobiologic and Metallic Biomaterials in Orthopedic Surgery: The Present and the Future. **Materials**, v. 16 (10), n. 3633, p. 1-19, 2023.

CHONG, E. T. J.; NG, J. W.; LEE, P.-C. Classification and Medical Applications of Biomaterials—A Mini Review. **BIO Integration**, v. 4, n. 2, p. 54-61, 2023.

DAVIS, R. et al. A comprehensive review on metallic implant biomaterials and their subtractive manufacturing. **J Advanced Int Manufacturing Technology**, v. 120, p. 1473-1530, 2022.

DENES, E. et al. Alumina Biocompatibility. **Journal of Long-Term Effects of Medical Implants**, v. 28, n. 1, p. 9–13, 2018.

DEVGAN, S.; SIDHU, S. S. Evolution of surface modification trends in bone related biomaterials: A review. **Materials Chemistry and Physics**, v. 233, p. 68–78, 2019.

ESAKKIRAJAN, M. et al. Environmentally sustainable synthesis of MoO₃ nanoparticles: Antibacterial efficacy and biocompatibility assessment. **Chemical Physics Impact**, v. 8, n. 100487, p. 1-7, 2024.

FERNÁNDEZ-LIZÁRRAGA, M. et al. Evaluation of the Biocompatibility and Osteogenic Properties of Metal Oxide Coatings Applied by Magnetron Sputtering as Potential Biofunctional Surface Modifications for Orthopedic Implants. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 10–13, 2022.

GUDKOV, S. V. et al. A Mini Review of Antibacterial Properties of Al₂O₃ Nanoparticles. **Nanomaterials**, v. 12 (15), n. 2635, p. 1-17, 2022.

HAN, X. et al. Surface modification techniques of titanium and titanium alloys for biomedical orthopaedics applications: A review. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 227, n. 113339, p. 1-17, 2023.

HANAWA, T. Titanium–Tissue Interface Reaction and Its Control With Surface Treatment. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 7, n. 170, p. 1–13, 2019.

HOSEINI, A.; YARMAND, B.; KOLAH, A. Inhibitory effects of hematite nanoparticles on corrosion protection function of TiO₂ coating prepared by plasma electrolytic oxidation. **Surface and Coatings Technology**, v. 409, n. 126938, p. 1-11, 2021.

KASEEM, M. et al. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. **Progress in Materials Science**, v. 117, n. 100735, p. 1-99, 2021.

KOLLI, R. P.; DEVARAJ, A. A Review of Metastable Beta Titanium Alloys. **Metals**, v. 8 (7), n. 506, p. 1-41, 2018.

KURTZ, S. et al. Projections of Primary and Revision Hip and Knee Arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. **The Journal of Bone & Joint Surgery**, v. 89, n. 4, p. 780–785, 2007.

LECOCQ, M. et al. Total Knee Arthroplasty with a Ti6Al4V/PEEK Prosthesis on an Osteoarthritis Rat Model: Behavioral and Neurophysiological Analysis. **Scientific Reports**, v. 10 (1), n. 5277, p. 1-15, 2020.

LI, G. et al. Review of micro-arc oxidation of titanium alloys: Mechanism, properties and applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 948, n. 169773, p. 1-26, 2023.

LINGARAJU, K. et al. Biocompatible fabrication of TiO₂ nanoparticles: Antimicrobial, anticoagulant, antiplatelet, direct hemolytic and cytotoxicity properties. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 127, n. 108505, p. 1-9, 2021.

LOHMANDER, L. S. et al. Bariatric surgery, osteoarthritis and arthroplasty of the hip and knee in Swedish Obese Subjects – up to 31 years follow-up of a controlled intervention study. **Osteoarthritis and Cartilage**, v. 31, n. 5, p. 636–646, 2023.

MAO, L. et al. The role of integrin family in bone metabolism and tumor bone metastasis. **Cell Death Discovery**, v. 9 , n. 119, p. 1-12, 2023.

MARIN, E.; LANZUTTI, A. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review. **Materials**, v. 17 (1), n. 114, p. 1- 42, 2024.

MING, X. et al. Micro-Arc Oxidation in Titanium and Its Alloys: Development and Potential of Implants. **Coatings**, v. 13 (12), n. 2064, p. 1-36, 2023.

MOGHADASI, K. et al. A review on biomedical implant materials and the effect of friction stir based techniques on their mechanical and tribological properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 17, p. 1054–1121, 2022.

MUKHTAR, Z.; DEY, A.; KUNDAN, N. Optimized surface engineering of Ti-6Al-4V: Comprehensive coating evaluation for biomedical applications. **Surfaces and Interfaces**, v. 56, n. 105735, p. 1-28, 2025.

NAJAFIZADEH, M. et al. Classification and applications of titanium and its alloys: A review. **Journal of Alloys and Compounds Communications**, v. 3, n. 100019, p. 1-11, 2024.

NAJIBI, A.; MOKHTARI, T. Functionally graded materials for knee and hip arthroplasty; an update on design, optimization, and manufacturing. **Composite Structures**, v. 322, n. 117350, p. 1-22, 2023.

NIKOOMANZARI, E. et al. Effect of ZrO₂ nanoparticles addition to PEO coatings on Ti–6Al–4V substrate: Microstructural analysis, corrosion behavior and antibacterial effect of coatings in Hank’s physiological solution. **Ceramics International**, v. 46, n. 9, p. 13114–13124, 2020.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. *Guia dos programas nacionais de cidades e comunidades amigas das pessoas idosas*. Washington, D.C.: OPAS, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37774/9789275727928>. Acesso em: 9 mar. 2025.

PALLELA, P. N. V. K. et al. Antibacterial efficacy of green synthesized α -Fe₂O₃ nanoparticles using *Sida cordifolia* plant extract. **Heliyon**, v. 5 (11), n. e02765, p.1-7, 2019.

PENG, Q. et al. Recent Advances in Transition-Metal Based Nanomaterials for Noninvasive Oncology Thermal Ablation and Imaging Diagnosis. **Frontiers in Chemistry**, v. 10, n. 899321, p. 1–12, 2022.

POURMADADI, M. et al. Role of Iron Oxide (Fe₂O₃) Nanocomposites in Advanced Biomedical Applications: A State-of-the-Art Review. **Nanomaterials**, v. 12, n. 21, p. 3873, 2022.

PUSHP, P.; DASHARATH, S. M.; ARATI, C. Classification and applications of titanium and its alloys. **Materials Today: Proceedings**, v. 54, p. 537–542, 2022.

RATNER, B. D. et al. **Introduction to Biomaterials Science: An Evolving, Multidisciplinary Endeavor**. 4 ed. Academic Press, 2020, p. 3-19. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128161371000015>> Acesso em: 22 mar. 2025.

RIVIÈRE, C.; VENDITTOLI, P.-A. (EDS.). **Personalized Hip and Knee Joint Replacement**. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 1-350. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-24243-5>>. Acesso em: 24 mar. 2025.

RONOH, K.; MWEMA, F.; DABEES, S.; SOBOLA, D. Advances in sustainable grinding of different types of the titanium biomaterials for medical applications: A review. **Biomedical Engineering Advances**, v. 4, n. 100047, p. 1-18, 2022.

SALIM, A.; SADHASIVAM, S. Biofabricated MoO₃ nanoparticles for biomedical applications: Antibacterial efficacy, hemocompatibility, and wound healing properties. **Nano and Medical Materials**, v. 3(1), n. 73, p. 1-25, 2023.

SANTOS, P. B. et al. Wear performance and osteogenic differentiation behavior of plasma electrolytic oxidation coatings on Ti-6Al-4V alloys: Potential application for bone tissue repairs. **Surface and Coatings Technology**, v. 417, n. 127179, p. 1-12, 2021.

SARRAF, M. et al. A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications. **Bio-Design and Manufacturing**, v. 5, n. 2, p. 371–395, 2022.

SHABATINA, T. I. et al. Metal and Metal Oxides Nanoparticles and Nanosystems in Anticancer and Antiviral Theragnostic Agents. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 1181, p. 1-31, 2023.

SISAKHTNEZHAD, S.; RAHIMI, M.; MOHAMMADI, S. Biomedical applications of MnO₂ nanomaterials as nanozyme-based theranostics. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 163, n. 114833, p. 1-17, 2023.

SOUZA, J. C. M. et al. Nano-scale modification of titanium implant surfaces to enhance osseointegration. **Acta Biomaterialia**, v. 94, p. 112–131, 2019.

THANIGAIVEL, S. et al. Insight on recent development in metallic biomaterials: Strategies involving synthesis, types and surface modification for advanced therapeutic and biomedical applications. **Biochemical Engineering Journal**, v. 187, n. 108522, p. 1-11, 2022.

TODROS, S.; TODESCO, M.; BAGNO, A. Biomaterials and their biomedical applications: From replacement to regeneration. **Processes**, v. 9 (11), n. 1949, p. 1-20, 2021.

UNUNE, D. R.; BROWN, G. R.; REILLY, G. C. Thermal based surface modification techniques for enhancing the corrosion and wear resistance of metallic implants: A review. **Vacuum**, v. 203, n. 111298, p. 1-19, 2022.

W. NICHOLSON, J. Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. **Prosthesis**, v. 2, n. 2, p. 100–116, 2020.

WALL, C. J. et al. A Prospective, Longitudinal Study of the Influence of Obesity on Total Knee Arthroplasty Revision Rate. **Journal of Bone and Joint Surgery**, v. 104, n. 15, p. 1386–1392, 2022.

WANG, Q. et al. Multi-Scale Surface Treatments of Titanium Implants for Rapid Osseointegration: A Review. **Nanomaterials**, v. 10 , n. 1244, p. 1-27, 2020.

WANG, Y. et al. A review of thermal control coatings prepared by micro-arc oxidation on light alloys. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 19, n. 100514, p. 1-17, 2024.

WEI, G. et al. An overview of surface modification, A way toward fabrication of nascent biomedical Ti–6Al–4V alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 5896–5921, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Ageing and health*. 2022. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>. Acesso em: 9 de mar. 2025.

XU, J. et al. Surface Modification of Biomedical Ti and Ti Alloys: A Review on Current Advances. **Materials**, v. 15, n. 1749, p. 1-29, 2022.

YARRAM, A. et al. Corrosion in Titanium dental implants –a review. **International Journal of Dental Materials**, v. 1, n. 3, p. 72–78, 2019.

YU, J. M. et al. Plasma electrolytic oxidation of Ti-6Al-4V alloy in electrolytes containing bone formation ions. **Applied Surface Science**, v. 513, n. 145776, p.1-10, 2020.

ZHANG, K. et al. Enhanced hydrophobic properties , wear and corrosion resistance of plasma electrolyte oxidation coatings on AZ31B magnesium alloys with addition of TiO₂ nanoparticles. **Ceramics International**, v. 34, p. 463-478, 2024.

ZHANG, L.; CHEN, L. A Review on Biomedical Titanium Alloys: Recent Progress and Prospect. **Advanced Engineering Materials**, v. 21, n. 1801215, p.1-29, 2019.