

# Uso de Materiais Poliméricos na Engenharia Biomédica: Propriedades, Aplicações e Desafios

Luiz Felipe Spinola Silva  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0002-1645-1111

Stephan Costa Barros  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0001-9376-7689

Felipe Picão de Melo  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0002-1645-1113

Heitor Pereira Nunes Fernandes Cunha  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0009-0001-0081-3568

Lucas Martins Primo  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0002-1645-1115

Gabriella Lelis Silva  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0002-1645-1116

**Abstract**— The materials science and technology has become a large field of interest in biomedical engineering for the usability of different materials in biomedical applications. Different classes of materials provide different properties and features for different requirements, however, the polymer class represent the largest class as far as medicine is concerned. Polymeric materials have a wide range of unique properties making them useful in these types of applications, such as hard and soft tissue replacements, drug delivery and cardiovascular devices. Thence, countless papers are published each month detailing each property and application. This paper purpose is to present an introductory approach to the use of polymers in biomedical engineering, explaining its main properties, applications and challenges in the area.

**Keywords** — *Material Science, Polymers, Biomedical Engineering.*

## I. INTRODUÇÃO

A área de ciência e tecnologia dos materiais tornou-se uma grande área de estudo e interesse da engenharia biomédica para o uso de diferentes materiais nas mais variadas aplicações em saúde. Esta área interessa-se e tem como um dos principais núcleos o estudo da ciência dos materiais pela interação de um material e suas características mecânicas, elétricas, ópticas, químicas e térmicas com um sistema biológico [1].

Classes de materiais distintas proporcionam diferentes propriedades e características para diversas necessidades, contudo, a classe de materiais poliméricos representa a maior classe no que se refere ao uso biomédico [2]. Polímeros tem uma ampla faixa de propriedades únicas, tornando-os úteis nestes tipos de aplicações, como substituição de tecidos duros e moles, *drug delivery* (entrega de medicamentos, do inglês) e dispositivos cardiovasculares [2]. Por este motivo, inúmeros artigos são publicados a cada mês detalhando diferentes propriedades e aplicações de variadas classes de materiais.

Dessa forma, este artigo tem como proposta apresentar, de maneira introdutória, os princípios do uso de polímeros em engenharia biomédica, explicando suas características principais, aplicabilidades e desafios na área, condensando os principais aspectos a serem estudados para aqueles que se

interessam a iniciar estudos nesta área.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, A síntese pretendida foi dividida em quatro aspectos:

- Introdução ao material - Destinado a descrever as características principais, composição e processos de fabricação mais comuns de polímeros.
- Propriedades relevantes para a Engenharia Biomédica - Destinado a descrever as propriedades físicas, mecânicas e químicas que tornam o material ideal para uso biomédico.
- Aplicações Práticas - Focado em exemplificar aplicações do material na área biomédica.
- Desafios - Destinado a apontar os principais desafios enfrentados na utilização do material

A extração das informações foram retiradas a partir dos capítulos referentes a polímeros da quarta edição do livro *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, publicada pela renomada editora Elsevier em 2020. Este livro, que possui mais de 1600 páginas e 200 colaboradores ao redor do mundo [3], compreende o texto único mais completo de todos os aspectos de ciência dos biomateriais, amplamente adotado em salas de aula e considerado recurso de referência por milhares de profissionais da área de biomateriais. Outrossim, este livro conta com as novas atualizações e avanços relevantes em pesquisa da área, como engenharia regenerativa, bioimpressão 3D e outros. [4], cobrindo o passado, presente e futuro da área de biomateriais, de suas aplicações e de seus próximos desafios. Além disso, para as seções de aplicações práticas e desafios, foi realizado uma revisão do estado da arte

### A. Estrutura da revisão do escopo

Para a revisão do estado da arte, foi realizada uma pesquisa avançada a partir das bases de dados *Scopus* e

*PubMed*, conforme mostra a Tabela 1. Além disso, filtrou-se todos os resultados baseado nos critérios de inclusão e exclusão.

TABLE 1. Pesquisa avançada para cada Banco de Dados

Base de Dados	Pesquisa Avançada
<i>PubMed</i>	("POLYMER" OR "POLYMERIC MATERIAL" OR "POLYMER MATERIALS") AND ("BIOMEDICAL ENGINEERING" OR "BIOMEDICAL") AND ("PROPERTY" OR "PROPERTIES") AND ("APPLICATION" OR "APPLICATIONS" OR "USAGE")
<i>Scopus</i>	TITLE-ABS-KEY ((("POLYMER" OR "POLYMERIC MATERIAL" OR "POLYMER MATERIALS") AND ("BIOMEDICAL ENGINEERING" OR "BIOMEDICAL") AND ("PROPERTY" OR "PROPERTIES") AND ("USAGE" OR "APPLICATION" OR "APPLICATIONS") AND ("CHALLENGE" OR "CHALLENGES") ) AND PUBYEAR > 2022 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re") ) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO(EXACTKEYWORD , "Biomedical Applications") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Polymer") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Polymers") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Tissue Engineering") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Review") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biocompatibility") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Human") ) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI"))

A Tabela 1 representa os termos de pesquisa avançada, que consiste na combinação de palavras-chave pelo intermédio de operadores booleanos AND e OR. Para o caso da pesquisa avançada na base de dados Scopus, a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão por filtros na base de dados é traduzida e adicionada a frase da pesquisa avançada.

A Tabela 2 representa os critérios de exclusão e inclusão das publicações identificadas.

TABLE 2. Critérios de inclusão e exclusão

Critério de Inclusão	Critérios de Exclusão
1. Publicado entre 2022 e 2022	1. Artigos focados em outras classes de materiais (compósitos, metais, cerâmicas)
2. Publicação em língua inglesa	2. Não apresenta uma visão geral sobre uma propriedade, aplicação ou desafio
3. Deve estar presente no escopo da pesquisa	3. Focada em um aspecto mais específico de uma técnica ou utilização
4. O artigo deve ser de acesso livre ou disponível pelo portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior)	4. Deve estar relacionado com aplicações em engenharia biomédica

Os artigos resultantes da pesquisa avançada foram agrupados e suas informações foram salvas em arquivos .ris para o janelamento dos artigos pelos critérios explicados na Tabela 2 na plataforma *Rayyan*, amplamente utilizada para o auxílio em detectar duplicatas, verificação do cumprimento dos critérios em revisões literárias.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### A. Revisão do Escopo

Após definir a estrutura de revisão do escopo, iniciou-se o processo de revisão em si. No total, foram identificados 64 publicações nos bancos de dados da Springer Nature, Web of Science (WoS) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), sendo que 8 publicações foram selecionadas para síntese qualitativa, conforme Figura 1.

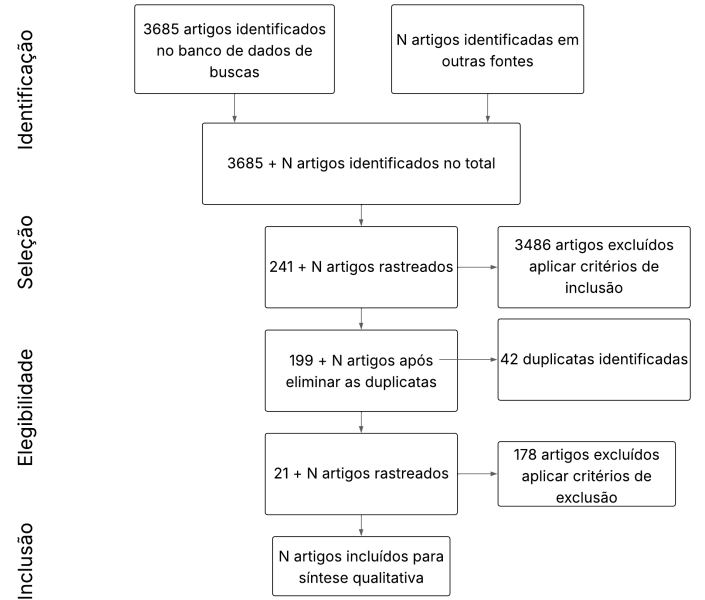


Fig. 1. Diagrama de Fluxo da Revisão do Escopo

A Tabela apresenta todas as publicações selecionadas para análise, bem com o banco de dados em que foi encontrada, além de sua referência neste trabalho. Artigos oriundos de outras fontes são denominadas

TABLE 3. Publicações do escopo final

Título	Banco de dados	Referência
<i>State-of-the-Art Advances and Current Applications of Gel-Based Membranes</i>	Scopus	[5]
<i>The Development of Eco-Friendly Biopolymers for Use in Tissue Engineering and Drug Delivery</i>	Scopus	[6]
<i>Biomedical applications of stimuli-responsive "smart" interpenetrating polymer network hydrogels</i>	Scopus	[7]
<i>Shape Memory Hydrogels for Biomedical Applications</i>	PubMed	[8]
<i>Recent Progress in 3D Printing of Polymer Materials as Soft Actuators and Robots</i>	Pubmed	[9]
<i>Polymer-based hydrogels applied in drug delivery</i>	Outro	[10]
<i>Advanced 3d printing of biomaterials for biofabrication: strategies and applications</i>	Outro	[11]

A partir de todo este processo de seleção e leitura dos artigos elegíveis, foi notável três aplicações expoentes para o uso de polímeros para a engenharia biomédica, são eles: Engenharia Tecidual; *Drug Delivery* e Fabricação de

Hidrogéis. Cada uma dessas aplicações será explicada ao longo desta seção, especialmente na subseção de aplicações práticas.

## B. Introdução ao Material

Os polímeros representam uma das classes de materiais mais versáteis e amplamente utilizados na engenharia moderna, especialmente na área biomédica. Trata-se de substâncias formadas por macromoléculas compostas por unidades estruturais repetitivas denominadas meros, conectadas por ligações covalentes. Essa estrutura fundamental confere aos polímeros uma vasta gama de propriedades físicas, químicas e mecânicas, as quais podem ser ajustadas conforme a necessidade da aplicação, tornando-os candidatos ideais para diversas utilizações no campo da saúde.

A maior parte dos polímeros empregados na engenharia biomédica é de origem orgânica, derivados principalmente de hidrocarbonetos, podendo ser classificados em duas categorias principais quanto à sua origem: polímeros naturais, como o colágeno, a celulose e o ácido hialurônico; e polímeros sintéticos, como o polietileno (PE), o polimetilmetacrilato (PMMA), o polidimetilsiloxano (PDMS) e o polietilenotereftalato (PET). Os polímeros naturais têm como vantagem a biocompatibilidade intrínseca, enquanto os sintéticos oferecem maior controle sobre as propriedades mecânicas e químicas, além de apresentarem estabilidade térmica e reprodutibilidade em larga escala. A Figura 2 demonstra o número de diferentes fontes naturais de biopolímeros

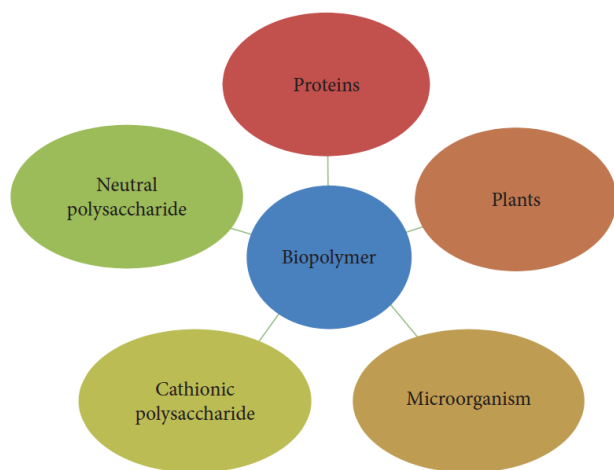


Fig. 2. Diagrama de fontes de biopolímeros. Fonte:Mahmud et al. [6]

O processo de obtenção dos polímeros envolve principalmente duas rotas de síntese: a polimerização por adição e a por condensação. Na polimerização por adição, os monômeros contendo ligações duplas ou triplas são adicionados sequencialmente a uma cadeia crescente, sem a formação de subprodutos. Este processo é característico de materiais como o polietileno, o polipropileno e o PVC. Já na polimerização por condensação, dois monômeros com grupos funcionais diferentes reagem entre si, geralmente com liberação de uma pequena molécula como água ou metanol.

Exemplos clássicos dessa rota incluem o náilon e o PET. Avanços recentes em técnicas de polimerização controlada, como o RAFT, ATRP e NMP, têm permitido a obtenção de polímeros com massa molar bem definida e arquitetura personalizada, ampliando ainda mais o escopo de aplicações biomédicas.

Do ponto de vista da conformação e do processamento, os polímeros podem ser moldados por métodos como extrusão, injeção, sopro, moldagem por compressão, entre outros. A escolha do processo depende da viscosidade do polímero fundido, da sua sensibilidade térmica e da complexidade geométrica da peça final. Polímeros termoplásticos, por exemplo, podem ser aquecidos e moldados repetidas vezes, enquanto os termofixos endurecem irreversivelmente após a reticulação, exigindo moldagem antes da cura.

Diante dessa ampla variedade de características estruturais e de processamento, os polímeros tornaram-se materiais estratégicos na engenharia biomédica. Sua versatilidade estrutural permite a modulação precisa de propriedades como rigidez, elasticidade, permeabilidade, bioatividade e degradação controlada — atributos fundamentais no desenvolvimento de dispositivos médicos, próteses, enxertos, suturas, sistemas de liberação de fármacos e scaffolds para engenharia tecidual.

## C. Propriedades Relevantes Para a Engenharia Biomédica.

Propriedades, em suma, correspondem em aspectos da matéria, sendo propriedades físicas aspectos observáveis e mensuráveis sem que sua composição química seja alterada, ao contrário de propriedades químicas, as quais a composição química deve ser alterada para que sejam observadas e medidas [12]. São, ainda, separáveis em propriedades extensivas, cuja propriedade varia de acordo com a quantidade de matéria medida (massa e volume são exemplos destas propriedades) e propriedades intensivas, as quais independem da quantidade de matéria mensurada, como a densidade [12].

O artigo de Farrukh e colaboradores apontam que hidrogéis especiais com memória de forma podem ser manufaturados e programados para responderem de maneiras desejáveis a estímulos térmicos, químicos, ópticos, mecânicos e elétricos, para que sua estrutura deforme por conta destes estímulos e retornem ao formato original [8]. No geral, estas propriedades afetam qual das aplicações um hidrogel específico é mais recomendado, como função de atuadores [9], sensores, materiais antibacterianos a agentes farmacológicos [7]. Para *drug delivery*, as propriedades de hidrofília e hidrofobia e adesão a nível molecular são extremamente relevantes para que o fármaco seja capaz de transitar sobre o meio intersticial e aderirem a célula-alvo [10].

Por sua vez, para a questão de engenharia tecidual, polímeros específicos ou combinações destes polímeros com comportamentos ou estruturas específicas (isolantes, semicondutores e condutores térmicos e elétricos, hidrogéis e elastômeros) devem ser escolhidas como arcabouços para tecidos com propriedades similares, conforme apontado pelo

artigo de Mahmud e colaboradores [6]. A Figura 2 demonstra esta relação.

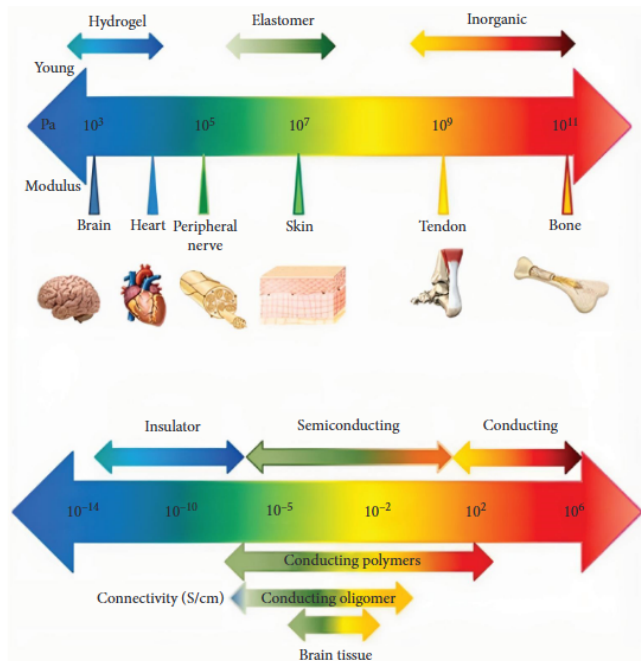


Fig. 3. Comparação do comportamento de tecidos em função do tipo de material [6]

#### D. Desafios

Apesar das inúmeras vantagens que os materiais poliméricos oferecem à engenharia biomédica — como versatilidade de propriedades físico-químicas, baixo custo de produção e fácil processabilidade —, sua aplicação clínica e industrial ainda enfrenta uma série de desafios significativos que precisam ser superados para maximizar seu potencial.

#### 3.4.1 Biocompatibilidade e resposta imune

Um dos maiores desafios no uso de polímeros como biomateriais é garantir sua **biocompatibilidade** a longo prazo. Muitos polímeros sintéticos, mesmo os considerados inertes, podem induzir respostas inflamatórias crônicas, fibrose ou reações imunes adversas ao interagir com tecidos biológicos. Além disso, resíduos de monômeros ou aditivos utilizados no processamento podem levar à toxicidade celular ou tecidual [11?, 12].

#### 3.4.2 Degradação e bioabsorção controlada

A **degradação controlada** é essencial para aplicações temporárias, como andaimes para engenharia de tecidos ou sistemas de entrega de fármacos. No entanto, o controle preciso da taxa de degradação continua sendo um desafio. A degradação prematura pode comprometer a integridade estrutural do dispositivo, enquanto uma degradação tardia pode acarretar acúmulo de resíduos no organismo e reações inflamatórias [11, 12].

#### 3.4.3 Processamento e reprodutibilidade

Embora os polímeros sejam relativamente fáceis de processar, a reprodutibilidade das propriedades finais pode ser afetada por variáveis como temperatura, umidade, ou até mesmo lotes diferentes de materiais. A introdução de técnicas como a impressão 3D, manufatura camada por camada, *eletrospinning*, polimerização induzida por radiação ultravioleta e *crosslink* induzido trouxe novas oportunidades, mas também complexificou o controle de parâmetros de fabricação, especialmente em escalas clínicas [5, 9, 11? ]. A Figura 2 ilustra quais são esses avanços dos métodos de processamento mais recentes.

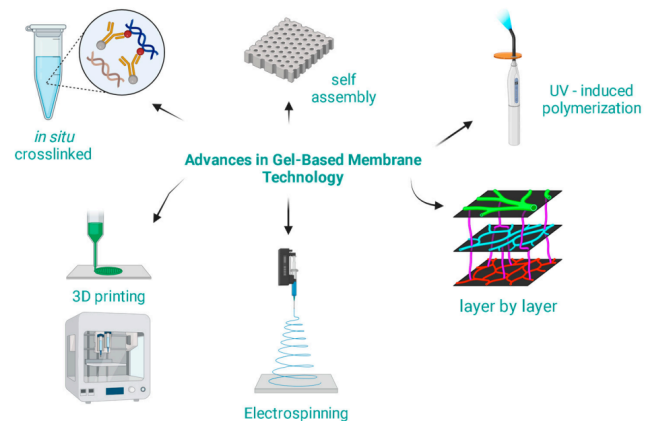


Fig. 4. Fonte: Ungureanu et al. [5]

#### 3.4.4 Integração com tecidos vivos

A **integração funcional com tecidos biológicos** — seja para sensores, próteses ou substitutos teciduais — exige propriedades como adesão celular seletiva, condução elétrica (para tecidos neurais ou musculares), ou bioatividade. Ajustar essas propriedades mantendo a estabilidade mecânica e química do polímero é um desafio contínuo na área [? ].

#### 3.4.5 Normas regulatórias e validação clínica

Mesmo com o avanço das pesquisas, muitos materiais promissores esbarram nas barreiras regulatórias, como exigências rigorosas para aprovação pela FDA ou ANVISA. Além disso, a falta de padronização nos estudos pré-clínicos dificulta a tradução dos resultados laboratoriais para aplicações comerciais ou clínicas [12? ].

#### 3.4.6 Sustentabilidade e impacto ambiental

Com o aumento da demanda por dispositivos médicos descartáveis e produtos de uso único, **a sustentabilidade dos polímeros biomédicos** também se tornou um tópico emergente. A maioria dos polímeros sintéticos não é biodegradável ou é derivada de fontes não renováveis, o que representa um problema ambiental, especialmente em países com gestão deficiente de resíduos hospitalares.

Os avanços recentes na ciência dos biomateriais revelam que os polímeros, graças à sua grande versatilidade estrutural e funcional, vêm assumindo um papel central em três frentes estratégicas da engenharia biomédica: (i) engenharia tecidual e medicina regenerativa; (ii) sistemas de liberação controlada de fármacos (drug delivery); e (iii) hidrogéis funcionais, membranas gel-base e dispositivos para soft-robotics. A seguir, descrevem-se as bases científicas e as inovações tecnológicas que caracterizam cada uma dessas frentes, reforçando-se o vínculo com os artigos selecionados na revisão do escopo.

### 3.5.1 Engenharia Tecidual e Medicina Regenerativa

Scaffolds tridimensionais produzidos a partir de polímeros naturais (p. ex., colágeno, quitosana, alginato) e sintéticos biodegradáveis (PLA/PLGA, PCL, PU, PEG) possibilitam mimetizar a microarquitetura e as propriedades mecânicas de tecidos nativos, favorecendo a adesão, proliferação e diferenciação celular [6]. A incorporação de biopolímeros “eco-friendly” — obtidos de fontes renováveis e processados por rotas de baixa toxicidade — responde à crescente demanda por dispositivos sustentáveis, reduzindo a geração de resíduos e riscos de toxicidade residual [6].

A bioimpressão 3D ampliou substancialmente o repertório de geometrias e gradientes de rigidez possíveis para esses andaimes. Técnicas de impressão coaxial (core-shell), fotopolimerização por projeção de luz e fracionamento de camadas ultrafinas permitem fabricar construtos com resolução sub-celular e elevada viabilidade (>90) de células encapsuladas já durante o processo de deposição [11]. Tais recursos têm viabilizado, por exemplo, patches cardíacos baseados em alginato-gelatina que combinam gradientes elásticos e alinhamento de fibras para restaurar a contratilidade pós-infarto, assim como implantes osteocondrais bilaminares em PCL/PGA que reproduzem a transição cartilagem-osso.

### 3.5.2 Sistemas de Liberação Controlada de Fármacos (Drug Delivery)

Hidrogéis poliméricos apresentam capacidade de inchamento na ordem de  $10m^3$ , o que os torna matrizes ideais para veiculação e liberação modulada de agentes terapêuticos [10]. Redes interpenetradas (interpenetrating polymer networks — IPN) sensíveis a pH, temperatura, campos elétricos ou luminosos ajustam dinamicamente seu grau de reticulação, viabilizando a liberação on-demand de fármacos contra doenças crônicas ou de evolução rápida [7]. Estratégias de liberação bifásica — com pico inicial (burst) seguido de difusão sustentada — têm proporcionado concentrações terapêuticas estáveis por semanas, como demonstrado em sistemas PEG-PLGA para proteínas recombinantes e em microgéis quitosana/ $\beta$ -glicerofosfato para moléculas hidrofóbicas [7][10]. No contexto da medicina personalizada, desenvolvem-se film-forming hydrogels de ácido hialurônico para cirurgia oftálmica, capazes de liberar anti-inflamatórios sem necessidade de

trocas frequentes de curativos.

### 3.5.3 Hidrogéis Funcionais e Membranas Gel-Base

Os hidrogéis avançados dividem-se em subclasses cujas respostas a estímulos externos habilitam funções ativas e inteligentes em dispositivos médicos. Entre elas destacam-se:

1. Hidrogéis com memória de forma — Hidro-ou termo-responsivos, retornam à configuração pré-programada após deformação, sendo aptos a atuar como stents auto-expansíveis ou suturas que se “fecham” sem auxílio externo [8].
2. IPNs “smart” — Comutam permeabilidade, cor ou condutividade diante de variações de pH ou íons, possibilitando curativos que mudam de aparência quando contaminados ou que liberam antimicrobianos apenas na presença de infecção [7].
3. Membranas gel-base — Estruturas multicamadas que regulam seletivamente fluxo de solventes e solutos; aplicam-se em hemodiálise, regeneração óssea guiada e filtração plasmática [5].

Adicionalmente, o uso de polímeros condutores (PEDOT:PSS, MXene) dentro de hidrogéis possibilitou a criação de atuadores suaves (soft actuators) que se deformam até 150 % sob tensões de poucos volts, abrindo caminho para pinças cirúrgicas minimamente invasivas e cateteres autonavegáveis [9]. A combinação dessas propriedades mecânicas com condutividade elétrica também sustenta pesquisas em eletroestimulação tecidual e interface neurônio-dispositivo.

## IV. CONCLUSÃO

Conclui-se que os materiais poliméricos se destacam como elementos fundamentais na engenharia biomédica, devido à sua versatilidade estrutural e a ampla gama de propriedades adaptadas que apresentam. Ao longo do artigo, evidenciou-se que propriedades físicas, mecânicas e químicas — como rigidez, elasticidade, permeabilidade, bioatividade e biodegradabilidade controlada — podem ser moduladas nesses materiais para atender a requisitos específicos de diferentes dispositivos e sistemas médicos. Essa adaptabilidade confere aos polímeros um caráter multifuncional, viabilizando sua aplicação em frentes diversas da área biomédica, incluindo a engenharia tecidual, os sistemas de liberação controlada de fármacos e o desenvolvimento de hidrogéis funcionais. Por outro lado, foram ressaltados no decorrer do trabalho diversos desafios críticos associados ao uso de polímeros neste mesmo tipo de aplicação. Dentre esses desafios, destacam-se a necessidade de assegurar a biocompatibilidade dos materiais e minimizar eventuais respostas adversas, controlar suas taxas de degradação e bioabsorção ao longo do tempo e aperfeiçoar os métodos de processamento para garantir reprodutibilidade nas características finais. Adicionalmente, enfatizou-se a importância de viabilizar a integração efetiva com tecidos vivos, de cumprir exigências

regulatórias rigorosas de segurança e eficácia, bem como de aprimorar a sustentabilidade no uso e descarte desses polímeros. A superação desses obstáculos é essencial para que o potencial dos polímeros seja plenamente aproveitado nas aplicações citadas, consolidando seu papel central no avanço da engenharia biomédica.

## REFERENCES

- [1] R. A. Linsenmeier and A. Saterbak, "Fifty years of biomedical engineering undergraduate education," *Annals of biomedical engineering*, vol. 48, no. 6, pp. 1590–1615, 2020.
- [2] G. Bass, M. L. Becker, D. E. Heath, and S. L. Cooper, "Polymers: Basic principles," in *Biomaterials science*, pp. 85–102, Elsevier, 2020.
- [3] A. Acharya, M. A. Ackun-Farmmer, and J. R. A. et al., "List of contributors," in *Biomaterials Science (Fourth Edition)* (W. R. Wagner, S. E. Sakiyama-Elbert, G. Zhang, and M. J. Yaszemski, eds.), pp. xi–xx, Academic Press, fourth edition ed., 2020.
- [4] W. R. Wagner, S. E. Sakiyama-Elbert, G. Zhang, M. J. Yaszemski, B. D. Ratner, A. S. Hoffman, F. J. Schoen, and J. E. Lemons, "Preface," in *Biomaterials Science (Fourth Edition)* (W. R. Wagner, S. E. Sakiyama-Elbert, G. Zhang, and M. J. Yaszemski, eds.), pp. xxi–xxii, Academic Press, fourth edition ed., 2020.
- [5] C. Ungureanu, S. Răileanu, R. Zgârian, G. Tihan, and C. Burnei, "State-of-the-art advances and current applications of gel-based membranes," *Gels*, vol. 10, no. 1, p. 39, 2024.
- [6] M. Z. A. Mahmud, M. D. Islam, and M. H. Mobarak, "The development of eco-friendly biopolymers for use in tissue engineering and drug delivery," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2023, no. 1, p. 9270064, 2023.
- [7] J. Wu, W. Xue, Z. Yun, Q. Liu, and X. Sun, "Biomedical applications of stimuli-responsive "smart" interpenetrating polymer network hydrogels," *Materials Today Bio*, vol. 25, p. 100998, 2024.
- [8] A. Farrukh and S. Nayab, "Shape memory hydrogels for biomedical applications," *Gels*, vol. 10, no. 4, p. 270, 2024.
- [9] X. Kong, M. Dong, M. Du, J. Qian, J. Yin, Q. Zheng, and Z. L. Wu, "Recent progress in 3d printing of polymer materials as soft actuators and robots," *Chem & Bio Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 312–329, 2024.
- [10] N. H. Thang, T. B. Chien, and D. X. Cuong, "Polymer-based hydrogels applied in drug delivery: An overview," *Gels*, vol. 9, no. 7, p. 523, 2023.
- [11] H. LEE et al., "Advanced 3d printing of biomaterials for biofabrication: strategies and applications," *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 19, pp. 10695–10754, 2019.
- [12] B. D. Ratner, A. S. Hoffman, F. J. Schoen, J. E. Lemons, W. R. Wagner, S. E. Sakiyama-Elbert, G. Zhang, and M. J. Yaszemski, "Introduction—biomaterials science: an evolving, multidisciplinary endeavor," *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine; Wagner, W., Sakiyama-Elbert, S., Zhang, G., Yaszemski, M., Eds*, pp. 3–19, 2020.