



IMPRESSÃO 4D A OPORTUNIDADE DE IMPLEMENTAR A ENGENHARIA BIOMIMÉTICA

AUTOR

Filipe Wiltgen

Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação para Fusão Termonuclear Controlada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA e docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo - FATEC Pindamonhangaba e Cruzeiro. ORCID 0000-0002-2364-5157.

E-mail: Filipe.Wiltgen@fatec.sp.gov.br ou ProfWiltgen@gmail.com

RESUMO

Em um mundo acostumado a utilizar a energia para realizar todas as tarefas, parece até impossível pensar em como fazer para que algumas máquinas especiais possam realizar ações sem ter que de fato utilizar de uma fonte de energia, a não ser a energia disponível no ambiente via estímulos naturais advindos de efeitos ambientais como a iluminação natural, a variação da temperatura e umidade do dia, presença de campo magnético ou elétrico, entre tantos outros. A impressão 4D é na verdade a impressão 3D utilizando materiais especiais chamados de metamateriais, que são capazes de reagir a determinados estímulos realizando uma tarefa projetada (pré-programada) de forma a permitir movimentos e ações que simulam os comportamentos naturais da própria natureza. Na biomimética, ciência capaz de entender e replicar a natureza em suas ações cinemáticas e geométricas. Esta nova técnica pode enfim obter uma revolução há muito esperada que é a implementação factível da engenharia biomimética, adotando todos os comportamentos da natureza para aproveitar este conhecimento intrínseco biológico natural. Este artigo aborda a implementação da técnica biomimética com a utilização da manufatura aditiva (impressão 3D) como um caminho para a utilização de metamateriais em impressões 4D que permitem explorar novas forma de fazer engenharia.

Palavras-chave: Impressão 3D; Impressão 4D, Manufatura Aditiva; Biomimética; Meta-materiais.

4D PRINTING THE OPPORTUNITY TO IMPLEMENT BIOMIMETICS ENGINEERING

ABSTRACT

In a world accustomed to using energy to carry out all tasks, it even seems impossible to think of how to make some special machines able to perform actions without actually having to use an energy source, other than energy available in environment via natural stimuli arising from environmental effects such as natural lighting, variation in temperature and humidity of day, presence of magnetic or electric field, among many others. 4D printing is actually 3D printing using special materials called metamaterials, which are capable of reacting to certain stimuli by performing a projected (pre-programmed) task in order to allow movements and actions that simulate natural behaviors of nature itself. In biomimetics, science capable of understanding and replicating nature in its kinematic and geometric actions. This new technique can finally achieve a long-awaited revolution that is feasible implementation of biomimetic engineering, adopting all behaviors of nature to take advantage of this intrinsic natural biological knowledge. This paper discusses implementation of biomimetic technique with use of additive manufacturing (3D printing) as a way to use metamaterials in 4D printing that allow exploring new ways of doing engineering.

Keywords: 3D printing; 4D Printing, Additive Manufacturing; Biomimicry; Metamaterials.

INTRODUÇÃO

Entender os processos ambientais e biológicos tão utilizados pela natureza os quais foram testados, e devidamente aperfeiçoados por tantos anos, permite aos humanos atentos a estes conhecimentos intrínsecos da própria natureza fazerem uso desta inteligência a seu favor. Não é fácil e nem simples absorver este conhecimento, entretanto, a engenharia há muitos anos persegue uma forma de imitar nos mínimos detalhes a natureza.

A imitação da natureza e das formas biológicas é uma ciência chamada de biomimética. A biomimética faz uso de conceitos consagrados pelos mecanismos naturais presentes em seres vivos, e outras formas usuais que a natureza se esmera em tornar útil e eficaz. Quase sempre a natureza utiliza de estímulos naturais para realizar funções mecânicas, tais como movimentar uma planta em direção da luz, ou alterar a abertura de flores em função da temperatura ambiente, mudar a cor de animais pela pigmentação química presente na pele, mudar o comportamento pela simples absorção de umidade do ar, entre tantos outros mecanismos.

A engenharia neste momento de crescimento da manufatura aditiva encontra uma maneira interessante de implementar a biomimética via a utilização de materiais especiais que permitem atuar através de estímulos, similar ao que a natureza faz, usando os metamateriais. Metamateriais são materiais que podem realizar tarefas apenas quando na presença de estímulos sem a necessidade de utilizar de uma fonte de energia própria, apenas com a utilização da energia disponível no ambiente (IVANOVIĆ et al., 2018; KUMAR et al., 2021).

Metamateriais podem ser impressos em 3D e dependendo da geometria do projeto, podem realizar determinados movimentos esperados, cada qual dependendo do tipo de estímulo escolhido. Quando isso é realizado é chamado de impressão 4D.

A impressão 4D se mostra como uma boa alternativa para alavancar a engenharia biomimética principalmente por ser aliada a manufatura aditiva uma técnica muito promissora para assumir a maioria das construções em manufatura industrial (KANTAROS et al., 2023).

No decorrer deste artigo, serão apresentadas as possibilidades de integrar a engenharia biomimética utilizando a manufatura aditiva como ferramenta de inserção de tecnologia e mudança de conceito. Permitindo avançar nas ideias de sustentabilidade e de economia de energia, ambos integrados a engenharia, arquitetura e biologia. Serão apresentados e discutidos novos materiais, como metamateriais e materiais metamórficos aplicados na manufatura aditiva (impressão 3D), tornando possível a realização da impressão 4D, que será capaz de viabilizar a engenharia biomimética no qual terá um grande impacto no futuro da humanidade.

2 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada é do tipo exploratória qualitativa baseada em estudo bibliográfico. De tal forma que a pesquisa permite argumentar o estudo por meio de análises e percepções qualitativas investigando um determinado problema apresentando hipóteses baseadas na busca de pesquisa bibliográfica para facilitar a compreensão do tema abordado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA MANUFATURA ADITIVA COM METAMATERIAIS (METAMÓRFICOS)

Na década de 80 surgiu uma nova técnica de manufatura no qual o material utilizado seria apenas o necessário para produzir a peça ou objeto escolhido, evitando desperdício de matéria-prima, com intuito de tornar o processo de fabricação mais eficiente. Esta forma de fabricar permite ser realmente mais eficiente na utilização da matéria-prima e torna o processo de manufatura sustentável. Esta nova técnica chamada de impressão 3D está incluída na área chamada manufatura aditiva, processo pelo qual se insere o material (matéria-prima) por composição (junção) para formar um determinado objeto (WILTGEN, 2019; GAO et al., 2015).

O processo de impressão 3D pressupõe que antes de tudo exista um projeto desenhado em um modelo tridimensional digital em uma ferramenta do tipo CAD (Computer-Aided Design) (WILTGEN, 2022 B; WILTGEN, 2022 C).

Na Figura 1 é possível observar o fluxo do processo iterativo da construção em uma operação de impressão 3D.

Todo processo de impressão 3D parte de um modelo digital, que pode ser obtido por um desenho digital em CAD, por um scanner 3D ou fotogrametria. Todas estas ferramentas, produzem um modelo digital em 3D, que pode ser utilizado por uma máquina que realiza a impressão 3D.

Com o modelo em 3D podem ser gerados arquivos digitais que enviam a informação geométrica do volume do objeto no qual as coordenadas em 3D podem ser separadas em camadas, ou seja, em área (coordenadas nos eixos X comprimento e Y largura) que irá compor o objeto pela junção das camadas sobrepostas do volume (coordenada Z altura).

Uma vez que estes arquivos são desenvolvidos, é possível prosseguir com um programa responsável pelo fatiamento do objeto. O objeto será separado em diversas camadas cuja espessura de cada camada depende apenas da escolha do usuário em conformidade com a especificação da máquina que irá proceder a construção da peça, ou como é comum de se dizer, a impressão 3D. Quando o modelo está fatiado, ele pode ser enviado para a máquina que irá realizar a impressão 3D para a confecção do objeto.

Com o objeto fabricado, é possível proceder etapas de acabamento (lixamento, pintura, limpeza, entre outros). Depois é possível verificar o dimensional da peça em relação ao projeto real no desenho do modelo tridimensional. Se as medidas estiverem

dentro da tolerância estipulada, pode considerar o objeto pronto. Caso o contrário, deve ser realizado ajuste de impressão 3D para que o objeto fique dentro das tolerâncias estipuladas (WILTGEN, 2022 A; ZHAO et al., 2018).

Figura 1 – Processo de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de Wiltgen (2023).

Metamateriais, ou materiais metamórficos, são materiais que podem mudar de forma toda vez que estiverem imersos, ou sob efeito, de um determinado tipo de condição ambiental no qual é susceptível. De tal forma que ao se modificar, permite uma transformação geométrica o que pode ser muito útil para diversas situações, desde movimentação, até abertura ou mesmo fechamento voluntário de alguns dispositivos, de forma similar ao que a natureza realiza.

Estes materiais devem ser especificados em conformidade com as necessidades operacionais esperadas para cada tipo e seu comportamento. Quase sempre são sensíveis a condições ambientais (temperatura, pressão e umidade, pH, campo magnético, campo elétrico, radioatividade, incidência direta de luz, entre muitos outros) (CHEN et al., 2021).

Sob estas condições adversas do ambiente cada tipo de metamaterial irá se comportar fisicamente de forma diferente, podendo realizar movimentos que permitem ações mecânicas que realizam uma tarefa sem o uso direto e consumo de energia elétrica. Isto torna este material incrivelmente versátil, podendo ser utilizado de forma a se comportar como o esperado sob uma determinada condição, como se o mesmo fosse programado para executar as ações esperadas, e previstas nestas condições (BARLETTA et al., 2021; COULAIS et al., 2018; GE et al., 2023).

Ao realizar ações sem a necessidade de uma fonte própria de energia elétrica, estas máquinas metamórficas, poderão executar ações nas quais o ambiente é propício para suas mudanças geométricas e seus movimentos voluntários, o que abrirá um leque de oportunidades de implantação em diversas áreas da engenharia.

Uma vantagem estratégica na utilização de metamateriais é unir estes tipos de materiais com a manufatura aditiva em processos de impressão 3D. Quando isso ocorre, o processo de impressão 3D muda de nome, e ganha mais uma dimensão além das três dimensões geométricas típicas do processo (X, Y e Z), esta nova dimensão é a de movimentação. Desta forma, passa a ser conhecido como impressão 4D (X, Y, Z e M).

A impressão 4D permite que sejam construídos objetos que ao serem inseridos em um determinado ambiente no qual o metamaterial reage a um determinado estímulo, o objeto passa mudar sua forma geométrica realizando movimentos pré-programados, e assim, funcionar como um robô, porém sem um sistema de controle eletrônico ou fonte de energia elétrica.

A natureza é capaz de ser muito eficiente energeticamente em seus processos naturais principalmente quando se observa em detalhes os diversos tipos de plantas, flores e gavinhas. Movimentação solar, movimentação tátil, ancoragem e fixação abertura e fechamento, entre tantas outras ações que são naturalmente executadas por plantas com muita eficiência de forma econômica e sustentabilidade.

Na Figura 2 é possível notar as diferenças básicas entre a construção de um objeto em impressão 3D para um objeto em impressão 4D. No qual a única diferença no processo é a utilização de um metamaterial geometricamente projetado para realizar um determinado movimento sob um determinado estímulo do ambiente (RAYATEA and JAIN, 2018).

Deve sempre existir um compromisso entre o projeto de engenharia e o tipo de material utilizado em conformidade com o estímulo do ambiente. Espera-se também um largo desenvolvimento em diferentes tipos de material metamórfico. Quem sabe no futuro uma fusão de diferentes metamateriais para diversos estímulos ambientais possam ser desenvolvidos, no qual cada estímulo realizará diferentes ações na máquina possibilitando diferentes programações (DAS et al., 2023; DUIGOU et al., 2020; FU et al., 2022; JOSHIA et al., 2020).

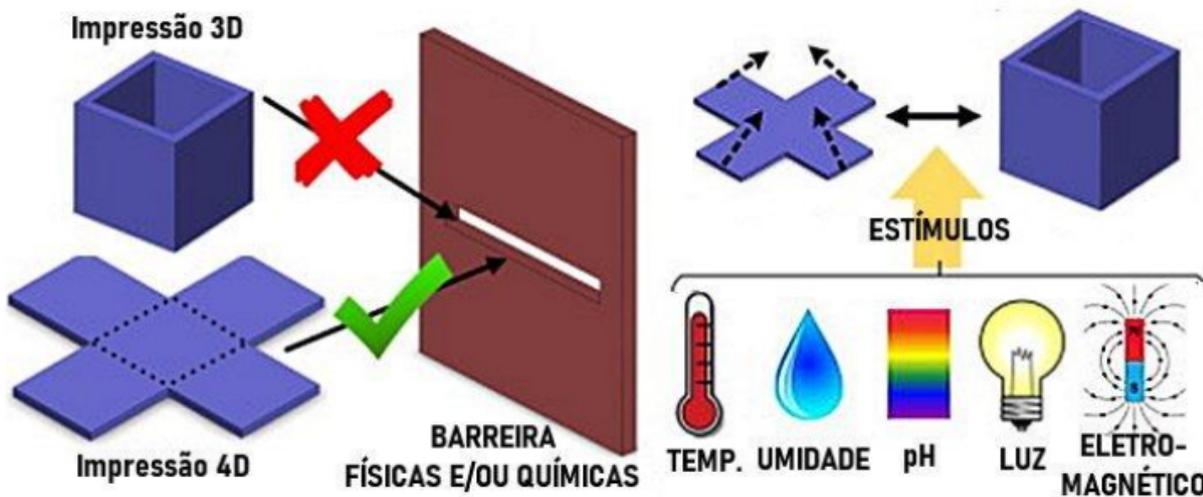
Figura 2 – Comparação entre a impressão 3D e a evolução para impressão 4D (metamateriais com estímulos ambientais).



Fonte: Adaptado de Wiltgen (2023).

Na Figura 3, observa-se um tipo de metamaterial impresso no formato plano, que depois de receber um estímulo se torna útil e se transforma em uma caixa. É possível notar que dado uma entrada tão estreita na barreira, a única opção seria que o objeto realizasse uma transformação geométrica após sua inserção pela barreira. Isso implica diretamente em diversas possibilidades de engenharia e medicina no qual as ações só devem ocorrer quando estiverem nos locais corretos (MALLAKPOUR et al., 2021; MEHTA and SAHLOT, 2021; RAMEZANI and RIPIN, 2023).

Figura 3 – Metamateriais impressos 4D podem facilmente assumir geometrias complexas em 3D a partir de geometrias planas simples.



Fonte: Adaptado de Falahati et al. (2020).

4 ENGENHARIA BIOMIMÉTICA

A engenharia desde sempre tem como função primária desenvolver algo que possa dar apoio aos anseios, necessidades e desejos da sociedade. Sempre com o intuito de pensar em uma forma de facilitar as ações na realização das tarefas humanas. Aprender e copiar a natureza faz da engenharia um instrumento de eficácia. Toda vez que engenheiros se permitem observar a natureza e as artimanhas da evolução, seguem um caminho sem volta que quase sempre tem como ápice perceber a importância de entender os mecanismos naturais que regem o planeta.

Um humano inteligente molda o planeta a ele próprio, um humano sábio molda ele próprio ao planeta (WILTGEN, 2023 B).

Se entender é saber, e se saber é conhecimento, todo o conhecimento a respeito dos mecanismos da natureza deve levar a sabedoria. Se a engenharia for capaz de conhecer e saber a respeito da natureza terá finalmente encontrado a sabedoria. Copiar e imitar a natureza pode levar a engenharia a fazer tudo de forma muito mais eficiente. Deve-se ter em mente sempre que a natureza tem todos os recursos, e possui o tempo necessário para testar tudo e todas as formas até encontrar a melhor solução, tempo e recursos que a engenharia não possui. Assim sendo, para encurtar os caminhos uma solução inteligente é sempre entender e imitar o que a natureza desenvolveu durante muitas tentativas e muitos anos (WILTGEN, 2022 A)

A mimética é a forma de imitar algo. Para imitar algo biológico (vivo) no qual a observação é capaz de extrair conhecimento a respeito de um ser vivo, isto é chamado de biomimética. A biomimética é a capacidade de imitar aquilo que um ser vivo por natureza é capaz de realizar normalmente enquanto está vivo.

A união da engenharia com a biomimética permite ir além na construção de máquinas e de processos cujo cerne é ser tão eficaz quanto a natureza é. Entender dos inúmeros mecanismos que a natureza dispõe em cada espécie neste planeta pode ser uma tarefa de algumas centenas de anos para seu entendimento e compreensão, e depois mais algumas centenas de anos para seu desenvolvimento em engenharia (WILTGEN, 2019).

A própria natureza em muitas de suas artimanhas naturais dispõe em algumas espécies a biomimética com intuito de imitar algo que ajuda a se disfarçar, e a parecer diferente do que realmente é (SPECK and SPECK, 2021).

Na Figura 4 tem-se dois bons exemplos da natureza utilizando da biomimética, em um camaleão, no qual sua pigmentação da pele muda de cor como uma forma de disfarce com a finalidade de dificultar seu reconhecimento quando em um determinado ambiente. Assim como, a planta carnívora, que aparenta ser inofensiva ficando completamente estática até que sua presa seja rapidamente capturada em uma armadilha mortal feita por suas folhas adaptadas.

O estímulo mecânico rápido e preciso da planta carnívora em capturar insetos, assim como, o estímulo da rápida adaptação da pigmentação no tecido superficial do camaleão, são mecanismos eficientes de biomimética natural, a qual a engenharia tem sempre motivação e interesse de conseguir reproduzir em suas máquinas.

Figura 4 – A natureza faz uso da biomimética em vários animais, e em várias plantas, como neste do camaleão e na planta carnívora (*Dionaea Muscipula*).



Fonte: Adaptado da homepage Olhar Digital (2023).

Nos últimos anos a engenharia tem se esforçado para entender e imitar a natureza, principalmente ao que se refere a dinâmica dos animais. A engenharia robótica desde sempre percebeu a importância de adaptar estas máquinas a forma biológica utilizando a engenharia biomimética (WILTGEN, 2023 B; VATES, et al., 2021).

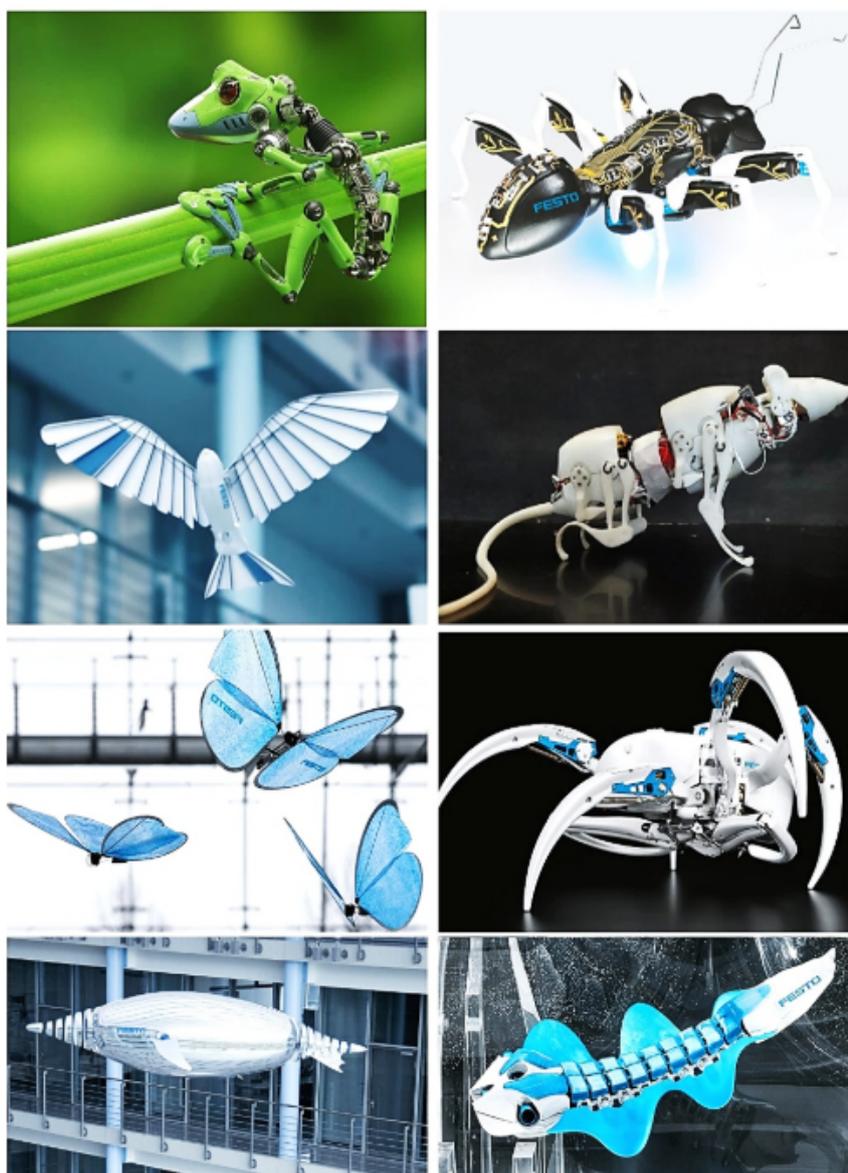
Todas as espécies de animais possuem características importantes para a área de

robótica. Diversas são as aplicações destas máquinas que possam se beneficiar em utilizar destas características para atuar em diversas áreas, principalmente em áreas de risco. Típicas aplicações para robôs, e principalmente para robôs biomiméticos, que não comprometem as tarefas e nem a integridade da máquina (HANN et al., 2020; LI et al., 2023; XING et al., 2023).

Escalar, se pendurar, flutuar, voar, correr, se esconder, nadar, mergulhar, são algumas das coisas que um robô em engenharia biomimética é capaz de realizar de forma eficiente.

Na Figura 5 é possível ver diversos tipos de robôs em engenharia biomimética que fazem uso das habilidades naturais de diversos tipos de animais em máquinas, permitindo a aplicação em tarefas que até então eram difíceis, ou mesmo impossíveis de serem realizadas na engenharia tradicional robótica.

Figura 5 – Animais robóticos construídos e baseados na engenharia biomimética.



Fonte: Adaptado pelo próprio autor (2023).

Outro avanço significativo da engenharia biomimética é encontrar aplicações diretas da engenharia nas formas que a natureza cria a fim de simplificar o que a engenharia desenvolve.

Existem soluções prontas da natureza para problemas antigos e novos os quais foram exaustivamente testados durante centenas de ciclos evolutivos e quase sempre muito bem adaptados as condições físicas do planeta (WILTGEN, 2023 A).

Durante o desenvolvimento em engenharia, depara-se com problemas de toda ordem e grandeza, em certos momentos estas dificuldades técnicas se tornam muito dispendiosas, tanto no tempo de desenvolvimento quanto no custo para a obtenção de uma solução técnica, e muitas vezes sem alcançar o pleno domínio do problema, e assim, sem alcançar a solução global, ou seja, obtendo penas a solução local, ou paliativa (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022 D).

Na Figura 6 podem ser apreciadas algumas soluções da natureza que a engenharia com o tempo incorporou a seus desenvolvimentos tecnológicos para aperfeiçoar suas máquinas e equipamentos.

Dentre estas é possível notar a engenhosidade da proteção da fruta por um sistema no qual o impacto se propaga pela superfície e a parte interior fica protegida dado a absorção e o amortecimento do efeito do impacto, não transferindo a energia. Algo que um capacete humano deve ter para não permitir lesões no cérebro por impacto.

A imitação de um bico de ave nos tens ultrarrápidos. Garras modernas de robôs que permitem manipular objetos de diferentes formas geométricas, tal como um polvo faz com seus tentáculos. A aerodinâmica peculiar de um baiacu adaptada para um veículo. Desenvolvimento de um calçado aderente na forma dos dedos dos pés similares a estrutura típica de uma lagartixa que consegue se aderir a diversas superfícies e inclusive superfícies lisas. O contorno da forma geométrica das asas dos aviões em similaridade as asas de uma gaivota.

Todos exemplos de uma profunda observação e entendimento da funcionalidade natural adotada pela natureza para dispor de alternativas factíveis para superar dificuldades de adaptação das espécies.

Todas as espécies possuem características interessantes para a engenharia, provavelmente uma reformulação técnica educacional seja necessária para que se possa implementar as ferramentas multidisciplinares, interdisciplinares e/ou transdisciplinares que permitam integrar em um projeto de engenharia diversos conhecimentos diferentes e interdependentes permitindo aos estudantes despertar desde cedo a percepção aguçada pela natureza. Entendendo a mesma como uma forte aliada aos desenvolvimentos tecnológicos (WILTGEN, 2024).

Figura 6 – Exemplos de aplicação de biomimética geométrica na engenharia.



Fonte: Adaptado pelo próprio autor (2023).

5 IMPRESSÃO 4D VIA METAMATERIAIS BIOMIMÉTICOS

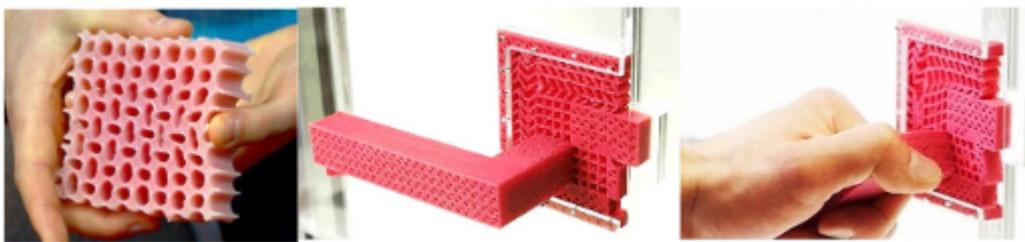
A impressão 4D é uma realidade a alguns anos, porém mesmo assim, continua sendo preterida e pouco conhecida na engenharia atual. A união da técnica de fabricação com os desenvolvimentos de novos metamateriais permite testar novas ideias,

quase todos baseadas na observação da natureza (SARITHA and DHATREYI, 2021).

Encontrar e manipular determinados materiais susceptíveis aos estímulos que a própria natureza dispõe é uma alternativa inteligente de adaptar soluções no qual desgastes de peças, fabricação complicada, composição de muitos componentes em sistemas e subsistemas, quase sempre produz perdas de energia e torna o dispositivo pouco eficiente (WILTGEN, 2022 D; WILTGEN, 2023 B), além é claro de não permitir uma rápida e fácil reintegração a natureza na forma de reciclagem.

Uma interessante solução que vai de encontro a simplicidade e a utilização de componentes mínimos pode ser observado na Figura 7, com a pesquisa em borrachas geometricamente modificadas para serem programadas suas deformações com a finalidade de por exemplo ser uma maçaneta de portas sem nenhum tipo de componente extra ou que possa gerar qualquer tipo de atrito (FLORIJN, 2015; ION et al., 2016).

Figura 7 – Impressão 4D em borracha e estrutura deformável sensível a pressão mecânica e a ação de geometria biomimética na engenharia com metamateriais em uma maçaneta de porta deformável elasticamente.



Fonte: Adaptado de B. Florijn (2015) e Ion et al. (2016).

Na Figura 7 fica fácil perceber que a estrutura desta borracha é impressa em 3D e sem a aplicação de estímulos naturais. Neste caso em particular o estímulo realizado no metamaterial vem da própria ação humana de movimentar a maçaneta e desta forma abrir a lingueta que fecha a porta. A lingueta por sua vez é tracionada devido à forma geométrica da borracha que ao se deformar com o acionamento da maçaneta puxa a lingueta permitindo a abertura da porta.

Uma outra interessante aplicação foi desenvolvida com a impressão 4D e um metamaterial magnético geometricamente desenhado para receber o estímulo magnético (MIT, 2015 – Projeto Automontagem). Quando isso ocorre o pequeno robô se contrai, e se desloca devido a movimentação imposta pelo campo magnético. Estes robôs são chamados de origami devido à prática japonesa de dobrar papel, muito semelhante ao movimento de composição de uma forma geométrica toda vez que está sob efeito do campo magnético.

Figura 8 – Exemplo de aplicação de metamateriais na engenharia biomimética com um robô magnético do tipo origami.



Fonte: Adaptado de MIT Self-Assemble (2015).

Outra aplicação muito útil da biomimética em 4D para a sustentabilidade e o conforto térmico é a utilização do exaustor automático sem fonte de energia própria sensível apenas a temperatura ambiente, como apresentado na Figura 9. As seis pétalas do exaustor se curvam, e se doblam para fora abrindo o exaustor deixando o calor sair, e quando a temperatura cai, as pétalas voltam a posição normal e o exaustor se fecha.

Figura 9 – Exaustor biomimético por impressão 4D sensível a temperatura ambiente.

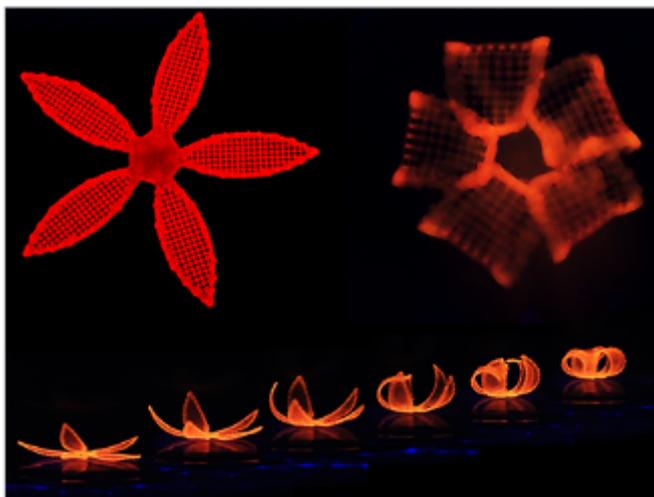


Fonte: Adaptado de S. Tibbits (2021).

Um desenvolvimento para dispositivos de ação controlada, e provavelmente para a ampla utilização em aplicações médicas importantes, são as geometrias planas 4D que realizam movimentos programáveis a estímulos térmicos (SAHAFNEJAD-MOHAMMADI et al., 2022; UBOLDI et al., 2023).

Pequenas estruturas que sob um estímulo térmico para uma determinada temperatura, conseguem se movimentar em um fluido abrindo e fechando suas pétalas conforme pode ser observado na Figura 10 (ZAFAR and ZHAO, 2020; ALDAWOOD, 2023).

Figura 10 – Implementação da biomimética via a impressão 4D com bio-metamaterial sensível a temperatura.



Fonte: Adaptado de Zafar e Zhao (2020).

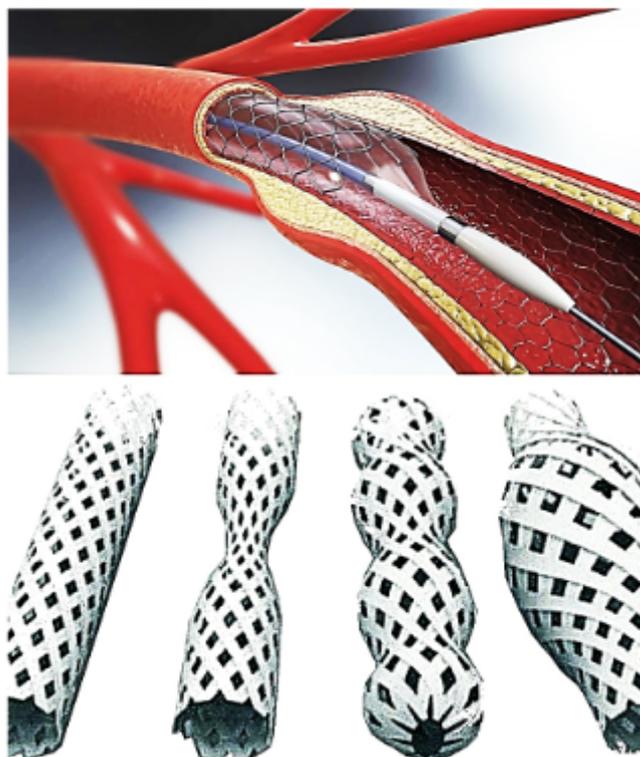
Em medicina a incursão de dispositivos que possam ser inseridos com o mínimo de interferência e ferimentos, sem a necessidade de cortes ou suturas, é sempre importante para uma rápida recuperação. Exames e cirurgias que conseguem ser realizadas via dispositivos pouco invasivos são sempre uma boa opção de recuperação do paciente (MIAO et al., 2017).

A angioplastia, uma técnica em que um duto com um pequeno balão inflável que possui um pequeno dispositivo expansível chamado de stent (estente) é inserido até o local desejado, e depois o balão é inflado deixando o stent na região necessária. O stent é uma endoprótese expansível tipo uma malha, feita de metal como aço inoxidável ou liga de cobalto, caracterizada como um tubo perfurado que é inserido para prevenir (reconstruir) ou impedir a constrição do fluxo no local causada por entupimento de uma artéria.

Uma das futuras aplicações de metamateriais é na utilização de pequenos dutos como um stent de angioplastia, que pode ser modificado sem a necessidade de um balão, apenas pela ação de um estímulo elétrico ou magnético. Sua forma geométrica será controlada por diferentes pré-programações que permitem obter diferentes tipos de geometria.

Na Figura 11 é possível ver uma angioplastia tradicional com a inserção de um stent de malha metálica inserido por um balão inflado dentro de uma artéria, na sequência é possível notar quatro formas geométricas diferentes em um mesmo stent construído com metamaterial no futuro. Este tipo de tecnologia poderá ajudar a desobstruir ou mesmo se alojar em um determinado local conforme a necessidade permitindo ao médico escolher a forma geométrica mais adequada para cada situação (MITCHELL et al., 2018; PATIL and SARJE, 2021).

Figura 11 – Exemplo de aplicação de metamateriais em impressão 4D na engenharia médica aplicado como um stent em angioplastia em humanos.



Fonte: Adaptado pelo próprio autor (2023).

O processo de construção via manufatura aditiva permite construir também em hidrogel, biomaterial ou biomoléculas (WILTGEN, 2023 A; MALEKMOHAMMADI et al., 2021). Este processo permite a construção ou reconstrução de órgãos e tecidos vivos que permitem transplantes sem rejeição, utilizando as células dos próprios pacientes. Diversos países têm conduzido pesquisas nestas linhas, mas atualmente a grande maioria destas pesquisas não estão sendo divulgadas (HALEEM et al., 2021; IBANGA et al., 2023; PINHO et al., 2020).

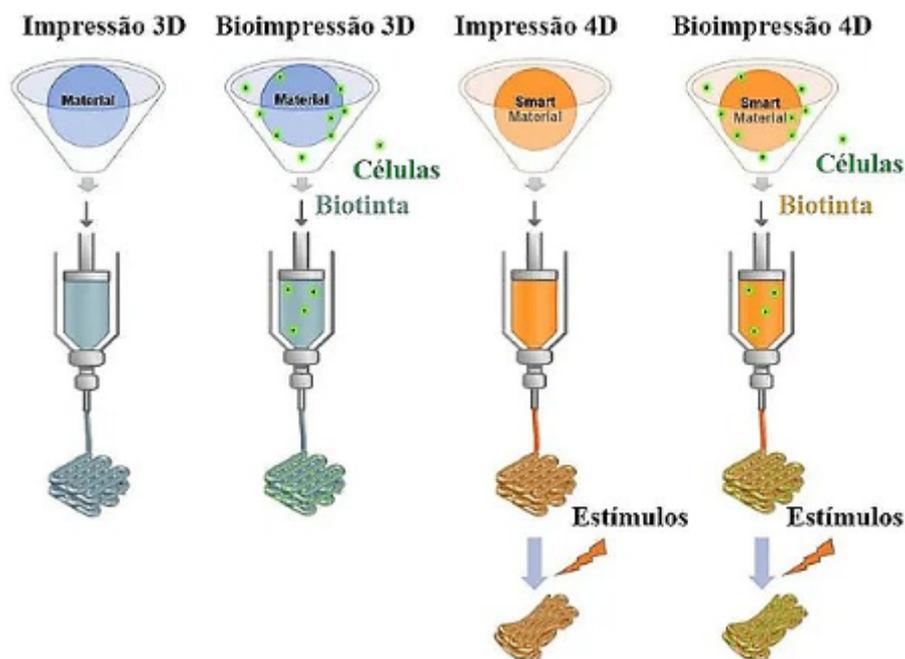
Fato é que mesmo a impressão 3D utilizando apenas hidrogel, ou a bioimpressão 3D utilizando biotinta a base de células e hidrogel, apesar de ser algo impressionante, ainda assim, podem ser melhorados com a inserção de um hidrogel especial na forma de metamaterial. Neste caso seguindo duas linhas distintas, com e sem as células compondo a biotinta (quer sejam biomaterial ou em biomoléculas) (SONATKAR et al., 2022).

Na Figura 12 é possível ver as diferenças claras entre os quatro processos de bioimpressão (em 3D e em 4D). Observe que no caso da bioimpressão 4D o material chamado de Smart é na verdade um metamaterial que será misturado ao hidrogel, e receberá ou não o material genético do paciente na forma de células a serem inseridas na biotinta para a construção de parte de um órgão ou mesmo um órgão completo

(ASHAMMAKHI et al., 2018).

Avanços significativos nesta linha de pesquisa demandarão de grandes investimentos e provavelmente não serão divulgados cientificamente em detalhes. A utilização da bioimpressão 4D com metamateriais será uma quebra de paradigmas na medicina (GAZZANIGA et al., 2023; JAVAID and HALEEM, 2019; GONZÁLEZ-HENRÍQUEZA et al., 2019).

Figura 12 – Comparação entre impressão 3D, bioimpressão 3D, impressão 4D e a bioimpressão 4D.



Fonte: Adaptado de Ashammakhi et al. (2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a manufatura aditiva muitas oportunidades tecnológicas irão surgir, de forma similar a esta que permite implementar a engenharia biomimética de forma mais fácil e rápida. Aliado a utilização de novos materiais biomiméticos tanto a engenharia quanto a medicina têm muito a se beneficiar.

Dispositivos biomiméticos impressos em 4D utilizando materiais metamórficos miméticos para funções biológicas poderão fazer parte de uma nova abordagem de tratamento médico inédito. Funcionando como minúsculos robôs poderão realizar tarefas com o mínimo de incisões, provavelmente injetados na corrente sanguínea. Ao chegarem em seu destino possam se modificar geometricamente, dado um determinado estímulo, com a finalidade específica de exercer as tarefas designadas, quer sejam, de uma simples desobstrução ou construção de uma estrutura interna de artérias e veias, quer seja na contenção de uma hemorragia interna.

Como estas micromáquinas não irão possuir fontes de energia ou mesmo componentes eletroeletrônicos, o metamaterial pode inclusive ser programado para se desintegrar após a realização da tarefa, em horas ou dias.

Fato relevante é que poderão ser confeccionadas inclusive com material genético do próprio paciente, viabilizando reparos em órgãos sem a complicada reação dada as rejeições que ocorrem neste tipo de procedimento.

Com relação a engenharia, a demais do que foi explorado no conteúdo deste artigo, ficam as especulações futuristas dado a enorme quantidade de ideias que poderão surgir com esta nova engenharia. Principalmente ao que tange a sustentabilidade e a redução dos efeitos antropogênicos presentes no desenvolvimento tecnológico.

Ter uma opção de realizar tarefas sem a necessidade de sistemas apêndices tais como eletroeletrônicos de controle, ou mesmo motores e/ou dispositivos atuadores que dependam de energias (elétrica, hidráulica, pneumática, entre outras), assim como de uma fonte própria de energia desperta em qualquer engenheiro a curiosidade e a oportunidade de mudar a forma de atuar no mundo, e conseguir uma autoprogramação de reciclagem natural destes dispositivos.

Sendo muito mais otimista, tudo isso pode mudar a forma de como interagir com o mundo se tornando amplamente sustentável, minimizando sempre que possível os diversos impactos antropogênicos, e quem sabe assim, favorecendo e fortalecendo o equilíbrio biológico e ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDAWOOD, F.K. A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges. *Actuators*. v.12, p.01-32, 2023.
- ASHAMMAKHI, N., AHADIAN, S., ZENGJIE, F., SUTHIWANICH, K., ORIVE, F.L.G., OSTROVIDOV, S., KHADEMHOSEINI, A. Advances and Future Perspectives in 4D Bioprinting. *Biotechnology Journal*. v.13(12), p.01-21, 2018.
- BARLETTA, M., GISARIO, A., MEHRPOUYA, M. 4D Printing of Shape Memory Polylactic Acid (PLA) Components: Investigating the Role of the Operational Parameters in Fused Deposition Modelling (FDM). *Journal of Manufacturing Processes*. v.61, p.473-480, 2021.
- CHEN, A.Y., PEGG, E., CHEN, A., JIN, Z., GU, G.X. 4D Printing of Electroactive Materials. *Adv. Intell. Syst.* p.01-15, 2021.
- COULAIS, C., KETTENIS, C., HECKE, M.V. A Characteristic Length Scale Causes Anomalous Size Effects and Boundary Programmability in Mechanical Metamaterials. *Nature Physics*. v.14, 01-06, 2018.
- DAS, I., BARMAN, A., MADHUKUMAR, K. A Review on the Advent of 4D Printing. *International Journal of Engineering & Science Research*. v.12, p.46-52, 2023.
- DUIGOU, A.L., CORREA, D., UEDA, M., MATSUZAKI, R., CASTRO, C. A Review of 3D and 4D Printing of Natural Fibre Biocomposites. *Materials and Design*. v.194, p.01-26, 2020.
- FALAHATI, M., AHMADVAND, P., SAFAEE, S., CHANG, Y-C, LYU, Z., CHEN, R., LI, L., LIN, Y. Smart Polymers and Nanocomposites for 3D and 4D Printing. *Mater. Today*. v.40, p.215-245, 2020.
- FU, P., LI, H., GONG, J., FAN, Z., SMITH, A.T., SHEND, K., KHALFALLA, T.O., HUANG, H., QIAN, X., MCCUTCHEON, J.R., SUN, L. 4D Printing of Polymers: Techniques, Materials, and Prospects. *Progress in Polymer Science*. v.126, p.01-16, 2022.
- GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS, C.B., WANG, C.L., SHIN, Y.C. ZHANG, S., ZAVATTIERI, P.D. The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering. *Computer-Aided Design*. v.69, p.65-89, 2015.
- GAZZANIGA, A., FOPPOLI, A., CERE, M., PALUGAN, L., CIRILLI, M., MOUTAHARRIK, S., MELOCCHI, A., MARONI, A. Towards 4D Printing in Pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics*. v.X5, p.01-11, 2023.
- GE, Q., SAKHAEI, A.H., LEE, H., DUNN, C.K., FANG, N.X., DUNN, M.L. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. *Scientific Reports*. v.6, p.01-12, 2023.

GONZÁLEZ-HENRÍQUEZA, C.M., SARABIA-VALLEJOS, M.A., RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. Polymers for Additive Manufacturing and 4D-Printing: Materials, Methodologies, and Biomedical Applications. *Progress in Polymer Science*. v.94, p.57–116 01-60, 2019.

HALEEM, A., JAVAID, M., SINGH, R.P., SUMAN, R. Significant Roles of 4D Printing using Smart Materials in the Field of Manufacturing. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. v.4, p.301-311, 2021.

HANN, S.Y., CUI, H., NOWICKI, M., ZHANG, L.G. 4D Printing Soft Robotics for Biomedical Applications. *Additive Manufacturing*. v.36, p.01-11, 2020.

IBANGA, I.J., MASTUL, A.H., BAMIDELE, O., SOLOMON, Y., ROMERO, C.B., JAYME, C.B. Revolutionizing Healthcare with 3D/4D Printing and Smart Materials. *Engineering Science Letter*. v.2(01), p.01-09, 2023.

ION, A., FROHNHOFEN, J., WALL, L., KOVACS, R., ALISTAR, M., LINDSAY, J., LOPES, P., CHEN, H-T., BAUDISCH, P. Metamaterial Mechanisms. *Proceedings of UIST '16*. October 16-19, p.01-11, 2016.

IVANOVIĆ, L., VENCL, A., STOJANOVIĆ, B., MARKOVIĆ, B. Biomimetics Design for Tribological Applications. *Tribology in Industry*. v.40(03), p.448-456, 2018.

JAVAID, M., HALEEM, A. 4D Printing Applications in Medical Field: A Brief Review. *Clinical Epidemiology and Global Health*. v.7, p.317–321, 2019.

JOSHIA, S., RAWATA, K., CA, K., RAJAMOCHANB, V., MATHEWA, A.T., KOZIOLC, K., THAKURC, V.K., BALAN A.S. 4D Printing of Materials for the Future: Opportunities and Challenges. *Applied Materials Today*. v.18, p.01-22, 2020.

KANTAROS, A., GANETSOS, T., PIROMALIS, D. 3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry 4.0. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. v.16(01), p.12-22, 2023.

KUMAR, S.B., JEEVAMALAR, J., RAMUC, P., SURESH, G., SENTHILNATHAN, K. Evaluation in 4D Printing – A Review. *Materials Today Proceedings*. v.45, p.1433–1437, 2021.

LI, G., TAN, L., REN, L., ZHENG, A., LI, Y., HE, Z. WANG, K., HAN, Z., QINGPING LIU, Q., WU, W., REN, L. Biomimetic 4D Printing of Dome-Shaped Dynamic Mechanical Metamaterials. *Journal of Materials Research and Technology*. v.24, p.4047-4059, 2023.

MALEKMOHAMMADI, S., AMINABAD, S.N., SABZI, A., ZAREBKOHAN, A., RAZAVI, M., VOSOUGH, M., BODAGHI, M., MALEKI, H. Smart and Biomimetic 3D and 4D Printed Composite Hydrogels: Opportunities for Different Biomedical Applications. *Biomedicines*. v.9, p.1537-1582, 2021.

- MALLAKPOUR, S., TABESH, F., HUSSAIN, C.M. 3D and 4D Printing: From Innovation to Evolution. *Advances in Colloid and Interface Science*. v.294, p.01-11, 2021.
- MEHTA, P., SAHLOT, P. Application of Phase Change Materials in 4D Printing: A Review. *Materials Today Proceedings*. v.47, p.4746–4752, 2021.
- MIAO, S., CASTRO, N., NOWICKI, M., XIA, L., CUI, H., ZHOU, X., ZHU, W., LEE, S., SARKAR, K., VOZZI, G., TABATA, Y., FISHER, J., ZHANG, L.G. 4D Printing of Polymeric Materials for Tissue and Organ Regeneration. *Materials Today*. v.20(10), p.577-591, 2017.
- MITCHELL, A., LAFONT, U., HOŁYŃSKA, M., SEMPRIMOSCHNIG, C. Additive Manufacturing — A Review of 4D Printing and Future Applications. *Additive Manufacturing*. v.24, p.606–626, 2018.
- PATIL, A.N., SARJE, S.H. Additive Manufacturing with Shape Changing/Memory Materials: A Review on 4D Printing Technology. *Materials Today Proceedings*. v.44, p.1744–1749, 2021.
- PINHO, A.C., BUGA, C.S., PIEDADE, A.P. The Chemistry Behind 4D Printing. *Applied Materials Today*. v.19, p.01-26, 2020.
- RAMEZANI, M., RIPIN, Z.M. 4D Printing in Biomedical Engineering: Advancements, Challenges, and Future Directions. *Journal Funct. Biomater*. v.14, p.01-27, 2023.
- RAYATEA, A., JAIN, P.K. A Review on 4D Printing Material Composites and Their Applications. *Materials Today: Proceedings*. v.5, p.20474–20484, 2018.
- SAHAFNEJAD-MOHAMMADI, I., KARAMIMOGHADAM, M., ZOLFAGHARIAN, A., AKRAMI, M., BODAGHI, M. 4D Printing Technology in Medical Engineering: A Narrative Review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. v.44, p.01-26, 2022.
- SARITHA, D., DHATREYI, B. A Concise Review on 4D Printing Technology. *Materials Today Proceedings*. v.46, p.692–695, 2021.
- SONATKAR, J., KANDASUBRAMANIAN, B., ISMAIL, S.O. 4D printing: Pragmatic Progression in Biofabrication. *European Polymer Journal*. v.169, p.01-11, 2022.
- SPECK, O., SPECK, T. Biomimetics and Education in Europe: Challenges, Opportunities, and Variety. *Biomimetics*. v.6, p.01-14, 2021.
- VATES, A.U.K., MISHRA, S., KANU, N.J. Biomimetic 4D Printed Materials: A State-of-the-Art Review on Concepts, Opportunities, and Challenges. *Materials Today Proceedings*. v.47, p.3313–3319, 2021.
- WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva - Sua Importância no Au-

- xílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF. São Carlos, 05-07 de agosto, p.01-05, 2019.
- WILTGEN, F. Técnicas de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas. v.4(01), p.51-60, 2020.
- WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva - Sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Engenharia - Construção de Conhecimentos (ISBN: 978-65-84599-44-4). Uniesmero. Cap.3, p.36-47, 2022 A.
- WILTGEN, F. Fabricação de Protótipos para Testes Experimentais. Revista de Engenharia e Tecnologia. v.14(02), p.09-22, 2022 B.
- WILTGEN, F. Prototypes are Important. Transformation. v.4(115), p.109-125, 2022 C.
- WILTGEN, F. Projetos Baseados em Requisitos. Revista de Engenharia e Tecnologia. v.14(01), p.240-251, 2022 D.
- WILTGEN, F. Sustentabilidade via Manufatura Aditiva. Revista H-TEC da FATEC de Cruzeiro. v.07(02), p.01-22, 2023 A.
- WILTGEN, F. O Efeito Antropogênico e a Relação com a Energia Elétrica. Revista FAT da Unifatea. v.25(02), p.01-16, Em publicação, 2023 B.
- WILTGEN, F. Construcionismo o “Aprender a Aprender Fazendo” – A Epistemologia do Ensino Prático em Laboratório. Revista H-TEC da FATEC de Cruzeiro. p.01-12, Em publicação, 2024.
- UBOLDI, M., PERROTTA, C., MOSCHENI, C., ZECCHINI, S., NAPOLI, A., CASTIGLIONI, C., GAZZANIGA, A., MELOCCHI, A., ZEMA, L. Insights into the Safety and Versatility of 4D Printed Intravesical Drug Delivery Systems. *Pharmaceutics*. v.15, p.01-21, 2023.
- XING, R., YANG, J., ZHANG, D., GONG, W., NEUMANN, T.V., WANG, M., HUANG, R., KONG, J., QI, W., DICKEY, M.D. Metallic Gels for Conductive 3D and 4D Printing. *Matter*. v.6, p.2248–22625, 2023.
- ZAFAR, M.Q., ZHAO, H. 4D Printing: Future Insight in Additive Manufacturing. *Metal and Material International*. v.26, p.564-585, 2020.
- ZHAO, P., RAO, C., GU, F., SHARMIN, N., FU, J. Close-looped Recycling of Polylactic Acid used in 3D Printing: an Experimental Investigation and Life Cycle Assessment. *Journal Clean Production*. v.197(01), p.1046–1055, 2018.