



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica

JOEL VICTOR RODRIGUES DE SANTANA MOURA

IMPRESSÃO 4D: FUNDAMENTOS E BIBLIOMETRIA

Recife - PE
2025

Joel Victor Rodrigues de Santana Moura

Impressão 4D: Fundamentos e bibliometria

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Dr. Justo Emílio Alvarez Jácomo

Recife - PE
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Moura, Joel Victor Rodrigues de Santana.
IMPRESSÃO 4D: FUNDAMENTOS E BIBLIOMETRIA / Joel Victor
Rodrigues de Santana Moura. - Recife, 2025.
55 p. : il., tab.

Orientador(a): Justo Emilio Alvarez Jacobo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Impressão 4D. 2. Material Inteligente. 3. Impressão 3D. I. Jacobo, Justo
Emilio Alvarez . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Joel Victor Rodrigues de Santana Moura

Impressão 4D: Fundamentos e bibliometria

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovado em 08 de agosto de 2025:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Justo Emílio Alvarez Jácomo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Dayanne Diniz de Souza (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Antônio Marques da Costa Soares Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

A impressão 3D, que transforma modelos digitais em objetos físicos tridimensionais, tem ganhado popularidade em vários setores industriais e científicos. Recentemente, a impressão 4D surgiu como uma inovação revolucionária, introduzida pelo MIT, que adiciona uma "quarta dimensão" de tempo ou estímulos ambientais ao processo de fabricação. Diferente da impressão 3D, a impressão 4D permite que os objetos se transformem e se auto montem, aumentando suas funcionalidades. Apesar de seu potencial, a impressão 4D enfrenta desafios significativos relacionados à seleção de materiais inteligentes e à compreensão de suas reações em diferentes condições. Sendo assim o objetivo do presente trabalho é explorar os desafios e obstáculos associados à fabricação 4D, com foco na utilização de materiais inteligentes, identificando métodos de fabricação, adequação de equipamentos, e as reações dos materiais a diferentes estímulos, para desenvolver uma metodologia eficaz para a seleção de materiais inteligentes. Este trabalho adotou uma abordagem qualitativa e descritiva, utilizando um método hipotético-dedutivo e procedimentos de pesquisa bibliográfica. A pesquisa se baseia em uma revisão de literatura, consultando livros, artigos, teses e outras fontes acadêmicas relevantes disponíveis na internet, especialmente através do Scopus e Google Acadêmico. O foco está na análise de publicações sobre impressão 4D e materiais inteligentes, abrangendo o período de 2013 a 2022. Observa-se que a impressão 4D apresenta vantagens significativas sobre a impressão 3D, incluindo a capacidade de criar estruturas adaptáveis e responsivas a estímulos variados, como umidade, temperatura, luz e eletricidade. Esses materiais inteligentes e multimateriais proporcionam maior eficiência, qualidade e desempenho, permitindo autoaprimoramento e contribuições para práticas de construção sustentáveis. O uso de polímeros ativos e o desenvolvimento de novos materiais e softwares específicos são essenciais para avançar na impressão 4D. Ressalta-se que a impressão 4D reduz o tempo de fabricação, o trabalho humano e os custos logísticos, possibilitando designs personalizados e aplicações avançadas em áreas como medicina, robótica e engenharia aeroespacial. No entanto, apesar dos avanços recentes, a impressão 4D ainda enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de novos materiais, softwares especializados e a complexidade no design de estruturas adaptáveis. A colaboração multidisciplinar e o contínuo desenvolvimento de tecnologia serão essenciais para superar esses obstáculos e viabilizar a adoção generalizada da impressão 4D, prometendo transformar diversos setores e criar novas oportunidades no futuro.

Palavras-chave: Impressão 4D; Material Inteligente; Impressão 3D.

ABSTRACT

3D printing, which transforms digital models into three-dimensional physical objects, has gained popularity across various industrial and scientific sectors. Recently, 4D printing has emerged as a revolutionary innovation, introduced by MIT, which adds a "fourth dimension"—time or environmental stimuli—to the manufacturing process. Unlike 3D printing, 4D printing enables objects to transform and self-assemble, enhancing their functionalities. Despite its potential, 4D printing faces significant challenges related to the selection of smart materials and understanding their reactions under different conditions. Thus, the objective of this study is to explore the challenges and obstacles associated with 4D manufacturing, focusing on the use of smart materials, identifying manufacturing methods, appropriate equipment, and the reactions of materials to different stimuli, in order to develop an effective methodology for smart material selection. This research adopted a qualitative and descriptive approach, using a hypothetical-deductive method and bibliographic research procedures. It is based on a literature review, consulting books, articles, theses, and other relevant academic sources available online, especially through Scopus and Google Scholar. The focus is on the analysis of publications about 4D printing and smart materials, covering the period from 2013 to 2022. In this context, 4D printing presents significant advantages over 3D printing, including the ability to create adaptable and responsive structures to various stimuli, such as moisture, temperature, light, and electricity. These smart and multi-materials offer greater efficiency, quality, and performance, allowing for self-improvement and contributions to sustainable construction practices. The use of active polymers and the development of new materials and specific software are essential for advancing 4D printing. It is noteworthy that 4D printing reduces manufacturing time, human labor, and logistical costs, enabling personalized designs and advanced applications in fields such as medicine, robotics, and aerospace engineering. However, despite recent advancements, 4D printing still faces significant challenges, including the need for new materials, specialized software, and the complexity involved in designing adaptable structures. Multidisciplinary collaboration and continuous technological development will be essential to overcome these obstacles and enable the widespread adoption of 4D printing, which promises to transform various sectors and create new opportunities in the future.

Keywords: 4D Printing; Smart Materials; 3D Printing.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa	9
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
2.METODOLOGIA	11
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1 Manufatura Aditiva	12
3.1.1 Princípios de uma Impressora 3D	13
3.1.1.1 Fusão a Laser	15
3.1.1.2 <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	16
3.1.1.3 Por Jateamento	18
3.1.1.4 <i>Digital Light Processing</i> (DLP)	20
3.1.1.5 <i>Binder Jetting</i>	20
3.1.1.6 <i>Material Jetting</i>	21
3.1.1.7 Deposição Direta de Energia (DED)	21
3.2 FUNDAMENTOS DA IMPRESSÃO 4D	21
3.2.1 Materiais Inteligentes	23
3.2.1.1 Hidrogel	25
3.2.1.2 Polímeros com Memória de Forma (SMPs)	26
4.ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS FUTURAS	29
5.BIBLIOMETRIA	38
6.CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A impressão é definida como o ato de criar textos e imagens geralmente em papel usando a pintura de prensa. Já a impressão em três dimensões ou impressão 3D são os termos usados para indicar o processo de fabricação marcado por criar objetos concebidos digitalmente para peças reais em três dimensões com uma impressora de materiais, de modo análogo à uma impressora de papel. (VARDHAN et al. 2014).

Atualmente a impressão em três dimensões vem ganhando cada vez mais espaço nos diversos processos de fabricação, dessa forma não está apenas amplamente consolidado nos vários setores da indústria e da ciência como no dia a dia de milhões de pessoas. Naturalmente como qualquer outra tecnologia bem consolidada, surgem inovações de todos os modos (MORANDINI e VECHIO, 2020; STEWART, 2019). Neste sentido uma das recentes e revolucionárias dessas novidades foi a impressão 4D, termo apresentado por um grupo de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que consiste basicamente na concepção de um utensílio 3D capaz de modificar a sua forma sem a ação direta humana ou equipamento eletromecânicos, ou seja, além das três outras dimensões que qualquer objeto possui, uma peça 4D possui uma “quarta dimensão” que é em função do tempo ou meio ao qual o objeto está inserido, ou ambos simultaneamente (TIBBITS, 2013).

A mudança da impressão 3D para a 4D significa uma transição de paradigma na prototipagem e fabricação de objetos que antes eram estáticos e agora passam a ter a possibilidade de serem mais dinâmicos e adaptáveis. (SABRY, 2021)

Nesse sentido a impressão 4D abre um leque de possibilidades de aplicações imensurável, pois torna viável que um objeto antes 3D, agora possa se reconstruir, ter multifuncionalidade ou a capacidade de se auto montar (LEE, KIM e CHOI, 2017). Devido as suas inúmeras perspectivas e por se tratar de um tema tido como novo, a impressão 4D também contém uma série de adversidades que precisam ser compreendidas e desenvolvidas para que seja possível chegar em um objetivo final que tenha aplicabilidade.

Tendo em vista a atualidade do tema, sua pouca exploração acadêmica na UFPE e no Brasil de modo geral e com o propósito de ajudar a apresentar novas pesquisas, este trabalho acadêmico fará revisão e atualização dos diversos aspectos que circulam a impressão 4D, sendo por isso fundamental compreender e relacionar os principais desafios que este tipo de fabricação traz em si, é importante entender, por

exemplo, como os materiais inteligentes se modificam de acordo com o meio inserido, ou como as formas complexas de um objeto ajudam ou atrapalham essas mudanças no material. Uma vez identificadas limitações, os desenvolvedores poderão otimizar tempo e recursos financeiros durante a concepção de novos artefatos mercadológicos ou acadêmicos baseados em impressão 4D. Adicionalmente, este estudo fornece um direcionamento para pesquisas futuras, contribuindo para o avanço metodológico e aplicado nesse campo emergente.

Este trabalho explora algumas opções para a seleção de um material inteligente para cada peça feita em impressão 4D, para que o objeto concebido se modifique como esperado e também que examina algumas das inúmeras possibilidades de escolha desses materiais. Para investigação de perspectivas selecionadas o presente o presente trabalho se propõe a esclarecer, por meio de uma revisão bibliográfica e bibliométrica, como identificar e entender os principais desafios e problemas relacionados a impressão 4D, bem como apresentar, através de um texto descritivo, o funcionamento físico e químico da modificação de objetos 4D, e além de tudo deve indicar meios de seleção de materiais inteligentes e métodos de fabricação para concepção de utensílios 4D específicos.

Diante desse contexto, este trabalho busca consolidar as bases teóricas da impressão 4D, investigando sistematicamente os mecanismos de transformação dos materiais inteligentes, os métodos de fabricação aplicáveis e os desafios técnicos envolvidos. Por meio de uma abordagem crítica e atualizada da literatura, pretende-se não apenas mapear esta tecnologia emergente, mas também identificar lacunas de pesquisa que possam orientar futuros desenvolvimentos acadêmicos e até industrial. Os resultados aqui apresentados visam contribuir para a compreensão dos parâmetros fundamentais que regem o comportamento dinâmico de estruturas 4D, oferecendo subsídios para a seleção adequada de materiais e processos de fabricação, com potencial aplicação em setores estratégicos da engenharia e da medicina.

1.1 Justificativa

Este trabalho se justifica pelo potencial transformador que a impressão 4D apresenta para revolucionar diversos setores estratégicos. Na área médica, possibilita o desenvolvimento de implantes inteligentes que se adaptam à fisiologia humana (MIRI et al., 2018), enquanto na robótica soft permite a criação de atuadores autoajustáveis com morfologia variável (KOTIKKANAT et al., 2020). No campo aeroespacial, oferece soluções para estruturas que se reconfiguram em diferentes condições ambientais (ZHOU et al., 2021), demonstrando seu caráter multidisciplinar e inovador.

A incorporação da quarta dimensão - representada pela capacidade de transformação temporal em resposta a estímulos como temperatura, luz, umidade e campos elétricos - eleva a funcionalidade dos objetos impressos além das limitações da manufatura tradicional. Estudos recentes (YANG et al., 2022) destacam que essa tecnologia pode reduzir em até 40% o desperdício de materiais e em 30% os custos de produção quando comparada a métodos convencionais, apresentando vantagens econômicas e ambientais significativas.

Contudo, como apontado por TIBBITS (2019), a maturidade tecnológica da impressão 4D enfrenta desafios críticos: previsibilidade do comportamento dos materiais inteligentes em condições operacionais reais; reprodutibilidade dos processos de fabricação; e ausência de protocolos padronizados para seleção e combinação de materiais. Essas limitações são particularmente relevantes no contexto brasileiro, onde pesquisas nesse campo ainda são incipientes (ANDRADE et al., 2021).

Nesse cenário, este trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia sistemática para classificar materiais inteligentes segundo sua resposta a estímulos, correlacionar parâmetros de processamento com desempenho funcional, e estabelecer critérios para seleção otimizada de materiais. Tal abordagem contribuirá não apenas para o avanço científico nessa fronteira tecnológica, mas também para a formação de recursos humanos especializados e o desenvolvimento de aplicações industriais competitivas no âmbito nacional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Investigar sistematicamente os fundamentos, métodos e aplicações da impressão 4D, com enfoque especial na integração de materiais inteligentes e nos processos de fabricação adaptados para essa tecnologia emergente.

1.2.2 Objetivos específicos

Sendo assim possível listar os seguintes objetivos específicos:

- Explorar os métodos, desafios e perspectivas da fabricação 4D.
- Esclarecer os conceitos de materiais inteligentes, destacando seus mecanismos de ativação e resposta a estímulos externos, bem como elucidar os princípios físico-químicos que os fundamentam.
- Realizar um levantamento bibliométrico temporal da produção científica entre 2013 e 2022, de modo a mapear sua evolução e identificar os principais autores, instituições, países e redes de colaboração. Identificar os principais autores, instituições, países e redes de colaboração.
- Contribuir para o entendimento da impressão 4D por meio da elaboração de um documento que elucide seus conceitos, classificações, desafios, impactos e relevância.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho caracterizou-se por uma abordagem qualitativa, descritiva e exploratória, adotando o método hipotético-dedutivo como estrutura lógica de investigação. A pesquisa teve como principal estratégia a revisão sistemática da literatura, objetivando reunir, avaliar e sintetizar os conhecimentos existentes sobre impressão 4D e materiais inteligentes.

Para tanto, estabeleceu-se um protocolo de pesquisa que envolveu a definição clara dos descritores e critérios de inclusão e exclusão dos documentos analisados. Os descritores utilizados foram: “impressão 4D”, “materiais inteligentes”, “hidrogel”, “SMPs” e “manufatura aditiva”. As buscas foram realizadas principalmente nas bases de dados Scopus e Google Acadêmico, complementadas por repositórios acadêmicos institucionais. O período delimitado para análise dos documentos compreendeu os anos de 2013 a 2022, visando capturar a produção científica mais recente e relevante.

Durante a etapa de triagem, os estudos foram avaliados quanto à sua pertinência temática, profundidade teórica, qualidade metodológica e grau de contribuição científica. Foram priorizados artigos com alto número de citações, publicados em periódicos de impacto e alinhados aos objetivos do trabalho. Posteriormente, os documentos selecionados foram submetidos a uma leitura crítica, categorizando-se os principais achados em: tipos de materiais utilizados, mecanismos de estímulo-resposta, desafios tecnológicos, aplicações práticas e lacunas existentes no campo.

Além disso, foram analisadas também dissertações, teses e livros especializados, possibilitando a construção de uma base teórica robusta e atualizada. A utilização da revisão sistemática permitiu não apenas identificar os principais avanços e desafios da tecnologia de impressão 4D, mas também consolidar informações dispersas em uma análise coesa, contribuindo para a formação de uma visão abrangente do estado da arte.

Com base nesse levantamento, foi possível compilar dados comparativos entre as diferentes abordagens existentes, identificando pontos convergentes e divergentes entre os autores, bem como estabelecer diretrizes para uma metodologia eficaz na seleção de materiais inteligentes aplicáveis à fabricação 4D

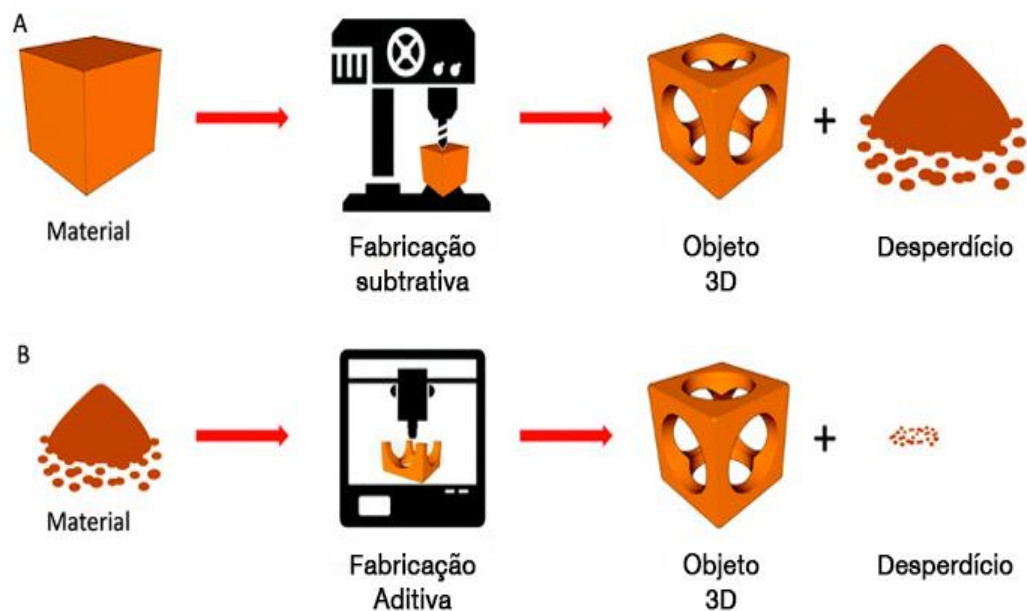
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva é uma tecnologia essencial da Indústria 4.0. Ela permite que as fábricas funcionem de maneira mais inteligente, conectando máquinas e processos por meio de sensores e sistemas digitais (KAGERMANN et al., 2013). Com essa tecnologia, as empresas podem produzir peças sob demanda, reduzir custos e aumentar a eficiência (XU et al., 2018).

A manufatura aditiva (MA) consiste em um processo de fabricação baseado na deposição sequencial de camadas de material para construção de objetos tridimensionais a partir de modelos digitais. Diferentemente dos processos de usinagem convencionais, que exigem ferramentas específicas e geram significativo desperdício de material, a MA apresenta vantagens como maior liberdade geométrica, redução de etapas produtivas e menor geração de resíduos (GIBSON et al., 2021).

Figura 1 - Manufatura aditiva versus fabricação subtrativa.



Fonte: ENGIPRINTERS, 2023

Essa comparação evidenciada na Figura 1 mostra que enquanto a fabricação subtrativa remove material de um bloco sólido (GERARDE, 2020), a manufatura aditiva constrói peças camada por camada, permitindo geometrias complexas e reduzindo desperdícios (GIBSON et al., 2021). Estudos comprovam que para lotes

pequenos e protótipos, a manufatura aditiva oferece vantagens em custo e tempo (ENGIPRINTERS, 2023), enquanto métodos tradicionais mantêm superioridade em produção em massa e acabamento superficial (GROOVER, 2020).

A MA engloba diversos métodos, como FDM (*Fused Deposition Modeling*), SLA (Stereolithography) e SLS (Selective Laser Sintering), cada um adequado a diferentes aplicações industriais (DEBROY, T. et al., 2021). Cada uma dessas tecnologias apresenta características específicas que as tornam adequadas para diferentes finalidades, como será detalhado nas seções subsequentes. Inicialmente, porém, é fundamental compreender os princípios básicos da impressão 3D, seu desenvolvimento histórico e fundamentos tecnológicos.

3.1.1 Princípios da uma impressora 3D

Próximo do término dos anos 80 deu-se início um processo de fabricação que tinha como base a adição de material (VOLPATO et al. 2017; GOKHARE, SHINDE e RAUT, 2017) de modo que ia de encontro às antigas metodologias de fabricação que baseavam-se na remoção (por exemplo fresamento, furação, eletroerosão, etc.), fusão (por exemplo fundição, moldagem por injeção plástica, metalurgia do pó, etc.), união de componentes (por exemplo soldagem, colagem, brasagem, etc.), divisão de componentes (por exemplo serragem e cortes) e conformação (por exemplo forjamento, extrusão, laminação, etc.) de material. Enfim, este recém apresentado modo de produzir por adição de material ficou conhecido como manufatura aditiva ('AM', derivado do inglês *additive manufacturing*) ou como impressão 3D (MORANDINI e VECHIO, 2020).

Especificamente produtos criados a partir de impressão 3D são tidos como um mercado ainda em expansão e muito promissor, que tende a tomar o lugar de outros tipos de manufatura nas linhas de produção por permitirem cada vez mais materiais e geometrias mais complexas (STEWART, 2019; COSETTI, 2018).

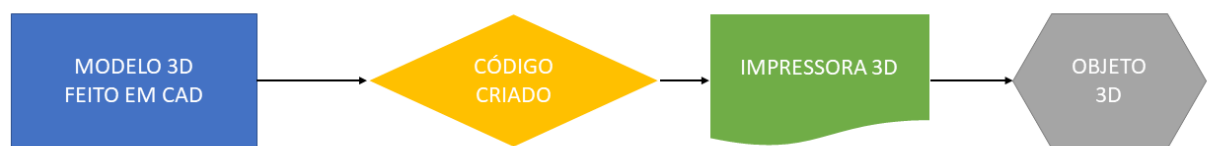
Vale destacar que, a impressão 3D consiste no método de produção no qual os materiais são depositados uns sobre os outros camada por camada até formarem um objeto tridimensional baseado em um modelo virtual (SCHUBERT, LANGEVELD e DONOSO, 2013).

Segundo DAWOOD et al. (2015), a impressão 3D é uma tecnologia disruptiva que combina dispositivos robóticos integrados, os quais, do ponto de vista mecânico,

operam em conjunto com softwares de CAD (Computer Aided Design ou projetos assistidos por computador). Esses programas são essenciais para o processo, pois convertem modelos virtuais em instruções precisas para a criação de objetos físicos. A importância desses softwares é evidenciada por Marks e Riley (1995), que destacam sua influência na economia, apontando que cerca de 80% do produto interno bruto americano passa por avaliações realizadas em plataformas de design digital.

Após a criação do modelo virtual com auxílio de um dos vários *softwares* CAD disponíveis no mercado, faz-se necessário que o objeto digital seja dividido em inúmeros planos infinitesimais, assim outro programa cria um código que será responsável por orientar a impressora a criar um objeto real imprimindo em sequência cada uma dessas camadas (HAGER, GOLONKA e PUTANOWICZ, 2016; TROTT, 2012). Para ilustrar o processo desde a transformação de objeto virtual em um objeto real tem-se a Figura 2 como exemplo.

Figura 2 – Diagrama do processo típico de impressão 3D



Fonte: Adaptado de Hager, Golonka Putanowicz (2016).

Desde que o projeto tenha sido desenvolvido em um software do tipo CAD, uma impressora 3D é capaz de criar qualquer forma que a mente humana possa imaginar. A única ressalva ou exigência física necessária é que a estrutura da peça precisa ser integral, ou seja, completamente preenchida. Tal fato ocorre porque a impressora cria cada camada por cima da camada anterior. Quando há necessidade de vazios na peça (como furos ou aberturas, por exemplo), é criada uma espécie de apoio interno para que a peça não seja danificada durante a impressão, podendo os apoios serem removidos após a finalização do objeto (COSTA, 2012).

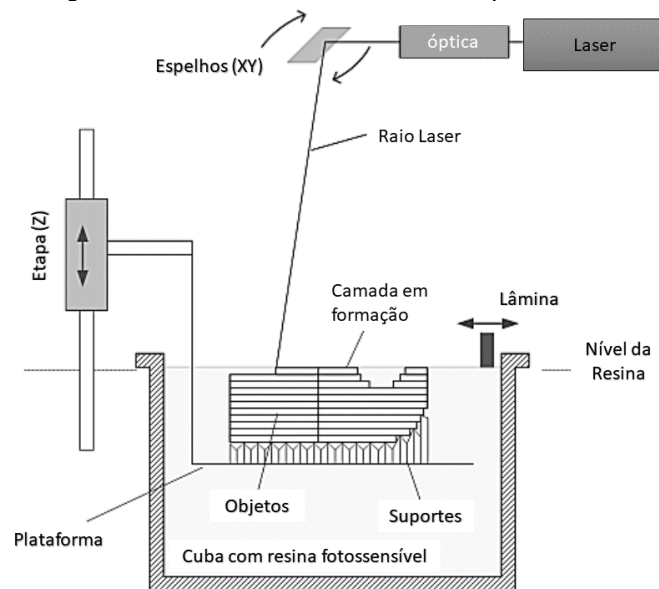
Ao examinar os fundamentos da impressão 4D, torna-se essencial compreender as técnicas de manufatura aditiva que possibilitam sua fabricação. Entre os diversos métodos disponíveis, a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) emerge como uma das abordagens mais promissoras e amplamente estudadas para a

produção de estruturas 4D.(YUAN *et al*, 2020).Atualmente há várias maneiras de realizar uma manufatura aditiva, conseqüentemente também existem alguns tipos principais de impressoras 3D (VARDHAN *et al*. 2014; EVANS, 2012;). A seguir, serão apresentados os principais tipos de impressoras 3D e seus respectivos processos de fabricação.

3.1.1.1 Fusão a laser

Inicialmente desenvolvido pela empresa 3D Systems, foi o primeiro processo de prototipagem aditiva rápida. Esse tipo de impressora usa uma cuba onde há uma plataforma imersa em um fotopolímero em estado líquido que se solidifica quando atingido com precisão por um *laser* que cria camada por camada um objeto 3D. Usando os espelhos móveis para os eixos X e Y, e uma plataforma móvel para o Z, uma impressora deste tipo pode criar peças da maneira direta a partir de um programa CAD (3D Systems, 2022; BIKAS, STAVROPOULOS e CHRYSSOLOURIS, 2014). A Figura 4 ilustra o funcionamento deste tipo de impressora

Figura 3 – Diagrama do funcionamento de uma impressora de fusão a laser.



Fonte: Adaptado de BEAL, AHRENS e WENDHAUSEN (2004).

O laser é direcionado por espelhos, que por sua vez são precisamente controlados, direcionam o laser à uma cuba com resina fotossensível que solidifica em cima de um suporte. Dessa forma é criado um objeto tridimensional, sendo os eixos X e Y orientados pelos espelhos, e assim o eixo Z dirigido pela plataforma de

suporte (SCHMIDLEITHNER e KALASKAR, 2018).

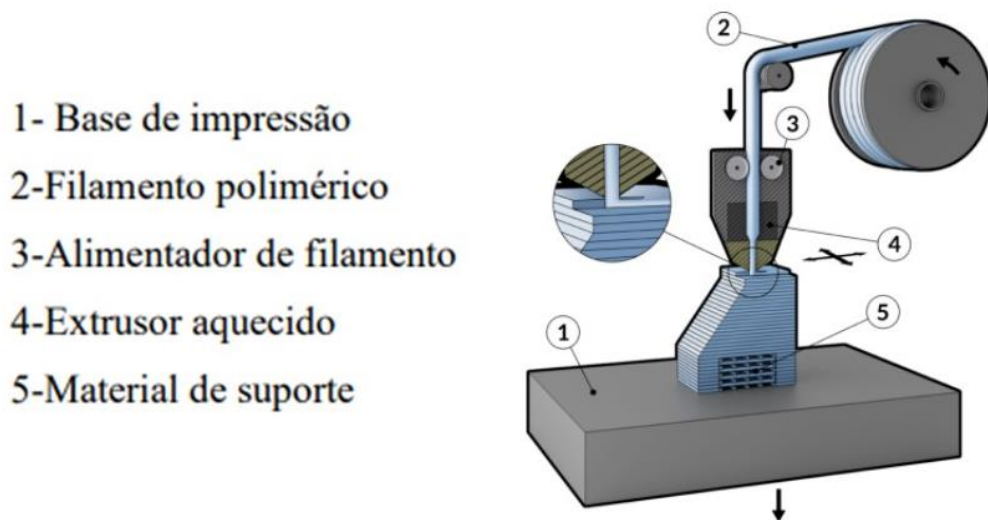
3.1.1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

A impressão por modelagem de deposição, ou *Fused Deposition Modeling* (FDM) em inglês, consiste basicamente em fundir um material, geralmente termoplástico, que tenha a capacidade de se tornar pastoso em temperaturas específicas, moldar camada por camada e depois resfriá-lo para que se solidifique novamente (EVANS 2012; BIKAS, STRAVROPOULOS e CHRYSSOLOURIS, 2015).

A tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou modelagem por deposição fundida funciona através da extrusão de um filamento termoplástico aquecido (como PLA ou ABS) que é depositado camada por camada sobre uma plataforma de impressão, seguindo um modelo digital tridimensional pré-definido em software CAD (KUMAR et al., 2020). O processo inicia com o aquecimento do filamento até seu ponto de fusão no bico extrusor (entre 180°C e 260°C, dependendo do material), enquanto um sistema de movimentação controlada (eixos X, Y e Z) posiciona precisamente o material fundido para formar cada seção transversal do objeto (GIBSON et al., 2015). À medida que cada camada é depositada, o material se solidifica por resfriamento, aderindo à camada anterior, até a completa formação da peça. Essa técnica é amplamente utilizada por sua versatilidade, baixo custo operacional e capacidade de produzir geometrias complexas com estruturas de suporte removíveis (TİMANIS et al., 2021).

A Figura 5 mostra o funcionamento de uma impressora deste tipo, bem como os seus principais componentes.

Figura 4 – Diagrama do funcionamento de uma impressora de extrusão.



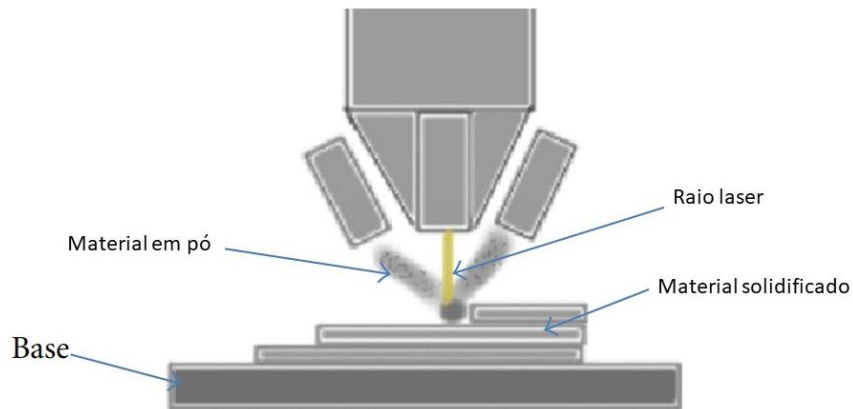
Fonte: Adaptado Manufacturing Guide Sweden AB, acesso em 2022.

A Figura 4 ilustra o processo de impressão 3D por FDM, destacando seus cinco componentes principais: (1) a base de impressão, que proporciona a superfície de construção e pode incluir sistemas de aquecimento para melhor adesão da primeira camada; (2) o filamento polimérico (como PLA ou ABS), que serve como matéria-prima na forma de fio; (3) o alimentador de filamento, composto por um motor de passo e engrenagens que empurram o material com precisão; (4) o extrusor aquecido, onde o filamento é derretido a temperaturas entre 180-300°C antes de passar por um bico com diâmetro entre 0,2-0,8 mm; e (5) o material de suporte, utilizado para estruturas com saliências ou vãos, removível após a impressão (AKINLABI e MWEMA, 2020).

3.1.1.3 Por jateamento

A princípio, a impressão 3D por jateamento, ou *jetting* em inglês, não é substancialmente diferente da impressão a laser, conforme tabela 1, embora nenhuma mudança de fase ocorra. A diferença se dá ao fato de que esse tipo de impressão “pulveriza” material por bicos finos de maneira controlada ou por um ligante que junta o pó em um objeto sólido, fazendo assim que o aglutinante mantenha as partículas de pó juntas. (WONG, 2012; CHRYSSOLOURIS, STAVROPOULOS e BIKAS, 2016). Na Figura 5 é mostrado o esquemático de funcionamento deste tipo de técnica.

Figura 5 – Diagrama do funcionamento de uma impressora por jateamento.



Fonte: Adaptado de Wong (2012).

A imagem ilustra o processo de impressão 3D por sinterização seletiva a laser (SLS), onde quatro elementos fundamentais são destacados: o material em pó (geralmente polímeros como nylon ou metais), que serve como matéria-prima distribuída em camadas finas; a base móvel, que desce progressivamente após a sinterização de cada camada, permitindo a aplicação de nova camada de pó; o raio laser de alta precisão (tipicamente com potência de 30-100W), que aquece seletivamente as partículas de pó até sua fusão ou sinterização; e o material solidificado, resultante da fusão controlada pelo laser, que forma a estrutura tridimensional camada por camada (KRUTH et al., 2005). Diferentemente da tecnologia FDM, este método não requer estruturas de suporte, pois o próprio pó não sinterizado atua como suporte durante a impressão (GOODRIDGE et al., 2012).

As diferentes técnicas de manufatura aditiva apresentam particularidades que impactam diretamente sua aplicabilidade em diversos setores industriais e científicos. Cada método possui especificidades relacionadas ao princípio de funcionamento, materiais empregados, precisão, acabamento, custo e propriedades mecânicas resultantes (GIBSON et al., 2020, WOHLERS ASSOCIATES, 2023). A Tabela 1 apresenta uma comparação entre três das principais tecnologias: Fusão a Laser; Jateamento de Material (Material Jetting); e Modelagem por Deposição Fundida (FDM), destacando seus aspectos técnicos, vantagens, limitações e aplicações típicas.

Tabela 1 - Comparação técnica entre os processos de fusão a Laser, jateamento e FDM

Técnica	Fusão a Laser	Jateamento de Material (Material Jetting)	FDM (Fused Deposition Modeling)
Princípio	Laser sinteriza/funde pó metálico ou polimérico	Jateamento de fotopolímeros ou ligantes por bicos	Extrusão de filamento termoplástico
Materiais	Metais (Ti, Al, aço), polímeros (Nylon, PEEK)	Fotopolímeros, cerâmicas suspensas, ligantes metálicos	Termoplásticos (ABS, PLA, PETG)
Precisão (mm)	±0,1	±0,02–0,05	±0,1–0,3
Acabamento Superficial	Rugoso (requer usinagem)	Liso (pós-cura UV)	Camadas visíveis (requer pós-processamento)
Velocidade	Lenta (depende da complexidade)	Rápida para peças pequenas	Moderada (depende do tamanho)
Suportes	Necessários (SLM); não necessários (SLS)	Necessários (removíveis)	Necessários (mesmo material ou solúvel)
Propriedades Mecânicas	Excelentes (peças densas e resistentes)	Frágeis (fotopolímeros) ou médias (compósitos)	Boas (dependente do material)
Custo	Alto (equipamento e materiais)	Moderado a alto (resinas especiais)	Baixo a moderado
Aplicações Típicas	Aeroespacial, médico-ortopédico, ferramentarias	Prototipagem rápida, joias, odontologia	Prototipagem, peças funcionais, educação
Vantagens	Alta resistência, geometrias complexas	Alta precisão, múltiplos materiais em uma peça	Custo acessível, fácil operação
Limitações	Alto custo, porosidade (SLS), tensões térmicas (SLM)	Materiais frágeis, custo de resinas	Limitação mecânica, acabamento inferior

Fonte: GIBSON, I. et al. (2021); CHUA, C. K.; LEONG, K. F. (2017) e WOHLERS, T. (2023)

Em síntese, a comparação entre os processos de fusão a laser, jateamento de material e FDM revela que cada técnica possui vantagens e limitações intrínsecas, direcionando suas aplicações a cenários específicos (GIBSON et al., 2021). Enquanto a fusão a laser destaca-se pela alta resistência e precisão em metais e polímeros avançados (ideal para setores aeroespacial e médico), conforme demonstrado por DEBROY et al. (2018), o jateamento oferece acabamento superior e multimaterialidade (CHUA; LEONG, 2017), sendo indicado para prototipagem rápida e peças detalhadas. Já o FDM, embora menos preciso, mantém-se como a opção

mais acessível e versátil para uso geral, educação e peças funcionais simples (WOHLERS, 2023). A escolha do método depende, portanto, de critérios como complexidade geométrica, propriedades mecânicas exigidas, orçamento e escalabilidade, reforçando a importância de uma análise técnica criteriosa para cada projeto.

Embora as técnicas de impressão 3D tradicionais (fusão à laser, jateamento e FDM) ofereçam soluções consolidadas para fabricação aditiva, a evolução para a impressão 4D representa um avanço paradigmático ao incorporar a dimensão temporal e a capacidade de autotransformação (TIBBITS, 2013). Como demonstrado na comparação anterior, cada método de fabricação apresenta características distintas que influenciarão diretamente sua adaptação para a produção de estruturas 4D. Neste contexto, a próxima seção explorará como esses processos podem ser potencializados através da integração com materiais inteligentes, como polímeros com memória de forma e hidrogéis termorresponsivos (YANG et al., 2020), analisando os desafios técnicos e as oportunidades emergentes nesse campo inovador, onde objetos impressos ganham a capacidade de mudar de forma, propriedades ou funcionalidades após a fabricação (KUANG et al., 2019).

3.1.1.4 *Digital Light Processing (DLP)*

O *Digital Light Processing* (DLP) é uma técnica de impressão 3D semelhante à estereolitografia (SLA), baseada na fotopolimerização de resinas líquidas sensíveis à luz. A principal diferença está no uso de um projetor digital que emite luz UV para curar, de uma só vez, toda a camada de resina, o que confere ao DLP uma velocidade de impressão superior ao SLA. A tecnologia permite alta resolução e excelente qualidade superficial, sendo bastante utilizada nas áreas de odontologia, joalheria e design de produtos detalhados (JANG et al., 2018; SCHUBERT et al., 2014).

3.1.1.5 *Binder Jetting*

O processo de *Binder Jetting*, ou jateamento de aglutinante, utiliza cabeçotes de impressão para depositar um agente ligante líquido sobre camadas sucessivas de pó (como metais, areia ou cerâmica). Após a deposição do ligante, o pó se aglutina temporariamente, formando o objeto desejado. Posteriormente, pode-se aplicar um processo de sinterização térmica para aumentar a resistência final da peça. Esta

técnica é amplamente empregada na fundição, engenharia de materiais e arquitetura, pela sua capacidade de produzir peças complexas com baixo custo e boa velocidade (CHRYSSOLOURIS et al., 2016).

3.1.1.6 Material Jetting

A técnica de *Material Jetting* é comparável à impressão jato de tinta, porém em três dimensões. Pequenas gotículas de material fotopolimérico líquido são depositadas seletivamente em uma plataforma de construção e curadas imediatamente por luz UV. Esta abordagem permite a impressão com múltiplos materiais e cores em uma única peça, conferindo versatilidade e alto detalhamento. O *Material Jetting* é comumente utilizado na criação de protótipos visuais realistas, modelos médicos e peças com texturas complexas (LEE et al., 2017; WONG, 2012).

3.1.1.7 Deposição Direta de Energia (DED)

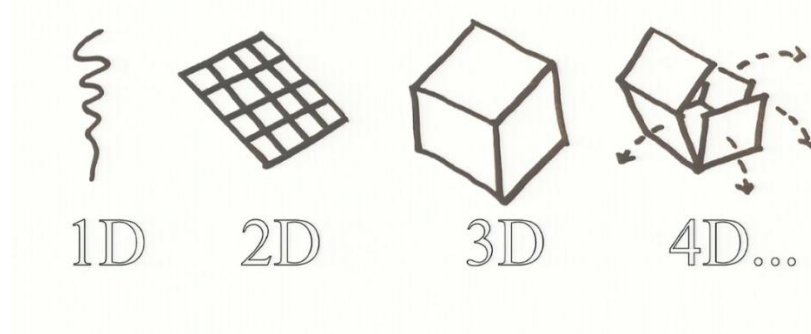
A Deposição Direta de Energia (DED) é um processo de impressão 3D em que o material, geralmente metálico, é fundido enquanto é depositado, por meio de uma fonte de energia concentrada, como um feixe de laser ou arco elétrico. O material pode ser alimentado em forma de pó ou arame, e a fusão ocorre simultaneamente com a deposição. Essa tecnologia é frequentemente utilizada para reparo de peças metálicas de alto valor ou fabricação de componentes com geometria complexa, especialmente nas indústrias aeroespacial e automotiva. O DED permite o controle preciso do material depositado, sendo uma alternativa viável para produção ou manutenção de peças com alta exigência mecânica (FIROOZI, 2023).

3.2 Fundamentos da impressão 4D

Desde sua criação, a impressão 3D foi amplamente utilizada pelos diversos setores da sociedade (MORANDINI e VECHIO, 2020). Porém esta limita-se a criar apenas objetos inertes, tendo em vista este impasse, pesquisadores do MIT criaram a impressão 4D e a apresentaram em uma conferência TED de 2012 (KUANG et al. 2019). Essa inovação relacionaria consiste basicamente em um objeto criado de modo similar a uma peça de impressão 3D, porém com uma quarta dimensão: o tempo, ou seja, o objeto tem a capacidade de se modificar e se reconstruir depois de um

determinado tempo (TIBBITS, 2013). Na mesma conferência supracitada, Tibbts (2013) trouxe a Figura 1 na qual ele ilustra a definição do que seria uma impressão 4D.

Figura 6 – Esquemático de um objeto 4D



Fonte: TIBBITS, 2013.

Os autores Ahmed et al. (2021) e Schwartz (2018) entendem que a impressão 4D é a expansão da impressão 3D para que o objeto criado modifique suas dimensões ou forma quando expostos a umidade, luz, eletricidade, pH, temperatura, campos magnéticos e tensão. Em outras palavras, um objeto 4D oferece a capacidade de atuação sensorial e programável diretamente do próprio material, comumente chamado de material inteligente, e em virtude disso fornece uma série de vantagens em relação a impressão 3D. Na da Figura 6, observa-se que um objeto 4D nada mais é do que um objeto criado por uma impressora 3D, porém com um material que tenha a capacidade de se modificar depois de determinado tempo (TIBBITS, 2013; LEE, KIM e CHOI, 2017).

Ao examinar os fundamentos da impressão 4D, torna-se essencial compreender não apenas as técnicas de manufatura aditiva, mas também os materiais inteligentes que conferem a quarta dimensão aos objetos impressos. Esses materiais, como polímeros com memória de forma, hidrogéis termorresponsivos e compósitos ativáveis por estímulos, são os responsáveis pela capacidade de transformação autônoma das estruturas 4D, respondendo a variáveis ambientais como temperatura, umidade, luz ou campos eletromagnéticos (TIBBITS, 2013; YANG et al., 2020). A seleção e combinação adequada desses materiais com processos como FDM, SLS ou jateamento determinam não apenas a eficácia da transformação, mas também a precisão, durabilidade e aplicabilidade final dos objetos 4D (KUANG et al., 2019).

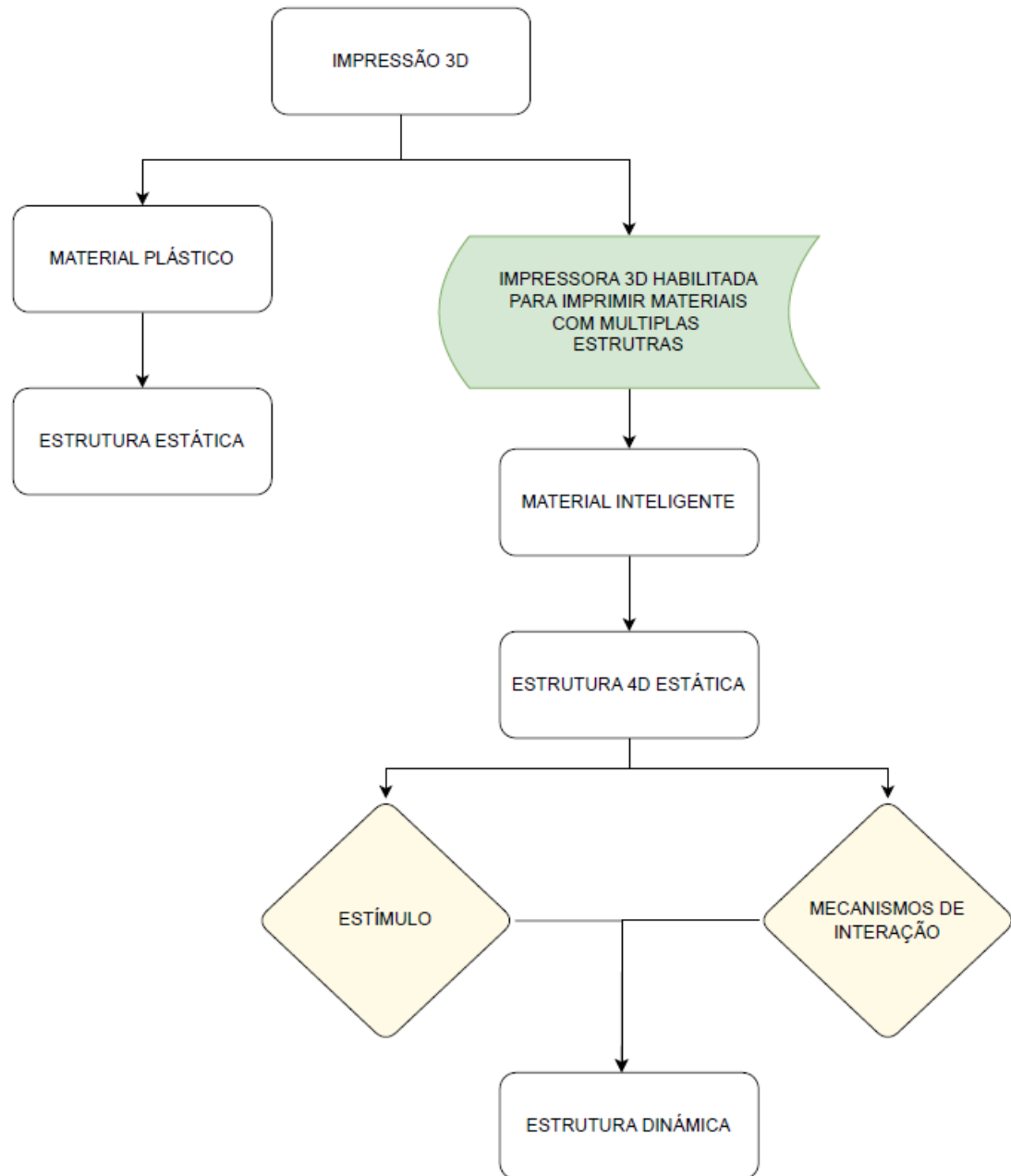
3.2.1 Materiais inteligentes

Em contraste com os processos tradicionais de impressão 3D, que geram objetos com geometrias imutáveis e características materiais definitivas pós-fabricação, a incorporação de materiais inteligentes viabiliza a produção de componentes com capacidade de adaptação funcional. Como ilustrado na Figura 7, esta classe avançada de materiais - englobando polímeros com memória de forma (SMPs), hidrogéis estimulorresponsivos e compósitos multifuncionais - exibe propriedades dinâmicas que permitem alterações programadas em sua microestrutura quando submetidos a gradientes térmicos, radiação eletromagnética ou variações de pH (LI et al., 2021)

Apesar de não haver um consenso de toda a comunidade científica ainda sobre o conceito exato, um material é tido como “inteligente” basicamente se o mesmo tem a capacidade de mudar suas características, propriedades, formas ou funcionalidades após um estímulo (TIBBITS, 2013), ou seja, elementos como a eletricidade, água ou simplesmente o tempo podem fazer que uma estrutura feita como uma de impressão 3D se modifique a partir de um estímulo externo (LI, SHANG e WANG, 2016; GE, QI e DUNN, 2013).

A Figura 7 ilustra a comparação entre materiais convencionais e inteligentes utilizados em impressão 3D. Enquanto os materiais convencionais (como PLA ou ABS) mantêm propriedades físicas visualmente invariáveis após a impressão, os materiais inteligentes possuem a capacidade de alterar suas características (forma, cor, condutividade ou volume) em resposta a estímulos ambientais específicos, como variações de temperatura, exposição à luz ou contato com fluidos (LEE et al., 2017).

Figura 7 - Diagrama do funcionamento de uma impressão 4D em comparação com uma 3D



Fonte: Autor.

É importante ressaltar que um material inteligente pode se alterar várias vezes, só dependendo de um único tipo de estímulo, ou pode se alterar uma única vez e precisar de uma reprogramação ou reciclagem para ser estimulado novamente. (MOMENI et al. 2017).

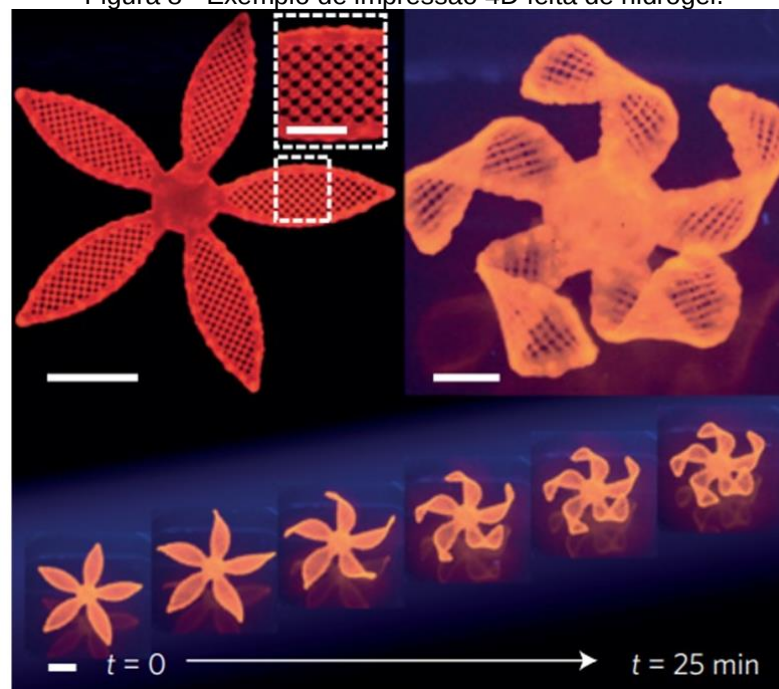
Há os vários tipos de materiais inteligentes e as diferentes maneiras de reação

às interações. Como materiais inteligentes fundamentais para impressão 4D, os hidrogéis destacam-se por sua rede polimérica hidrofílica que permite respostas dinâmicas a estímulos externos. Sua estrutura tridimensional adaptável, que alterna entre estados expandidos e colapsados, será analisada em detalhes a seguir. (ZHU, W. et al, 2019)

3.2.1.1 Hidrogel

Materiais inteligentes como o Hidrogel, tem a capacidade de mudar drasticamente o seu volume após um estímulo, porém estruturas feitas à base desse material são mecanicamente delicadas e frágeis. Em virtude disso as peças de fabricação 3D são feitas de uma composição de um polímero rígido e o hidrogel, formando o hidrogel polimérico. Tendo isso como base, através de impressoras 3D é possível criar peças que modificam o seu formato a partir do contato com umidade, temperatura ou luminescência (KUANG, 2019; AHMED, 2021; JANG, 2018; BAKARICH, 2015). A Figura 8 é um exemplo de impressão 4D composta do hidrogel, é possível notar que com a passagem de tempo o objeto muda o seu formato.

Figura 8 - Exemplo de impressão 4D feita de hidrogel.



Fonte: GLADMAN et al. 2016.

Materiais como o Hidrogel, tem a capacidade de mudar drasticamente o seu volume após um estímulo, porém estruturas feitas à base desse material são

mecanicamente delicadas.

Os hidrogéis podem sofrer transformações de forma e estrutura devido à expansão ou contração causadas por estímulos, como temperatura, pH ou umidade. Essas deformações mecânicas ocorrem quando as forças físicas alteram o volume do material, enquanto mudanças de estado físico, como transições entre sólido e gel, também podem ser induzidas pelos estímulos. Esses processos permitem que os hidrogéis realizem movimentos direcionados, como dobramento ou torção, ao longo do tempo, sendo úteis em diversas aplicações de impressão 4D.(LEONG, et al. 2020).

Mecanismos Físico-Químicos dos Hidrogéis podem se dar pela absorção de água para a alteração do volume, pela resposta a estímulos térmicos ou pela reação a estímulos químicos, os quais serão analisadas posteriormente. c (MIAO, Y., et al. 2019).

Conforme demonstrado por Pereira et al. (2020), os hidrogéis apresentam uma estrutura polimérica tridimensional formada por cadeias moleculares capazes de expansão ou contração em função da absorção hídrica. Na presença de água, essas redes poliméricas expandem-se devido à pressão osmótica, ao passo que em condições de baixa umidade ocorre sua contração progressiva.

Alguns hidrogéis são projetados para reagir a mudanças no pH do ambiente. Isso ocorre porque os grupos funcionais no polímero podem ser ionizáveis (como grupos carboxilatos ou amino), e, dependendo do pH do ambiente, esses grupos podem se ligar ou desligar a prótons, levando a uma mudança na carga elétrica das cadeias poliméricas. Essa mudança de carga pode resultar em uma alteração na interação entre as moléculas de água e o polímero, fazendo com que o hidrogel inche ou encolha. (PEPPAS et al, 2006; QIU & PARK, 2001)

Conforme Pereira et al (2020), o uso de íons específicos, como sais ou íons metálicos, pode induzir transformações estruturais no hidrogel. Por exemplo, em ambientes salinos, alguns hidrogéis podem mudar sua forma devido a interações iônicas entre o gel e o meio externo.

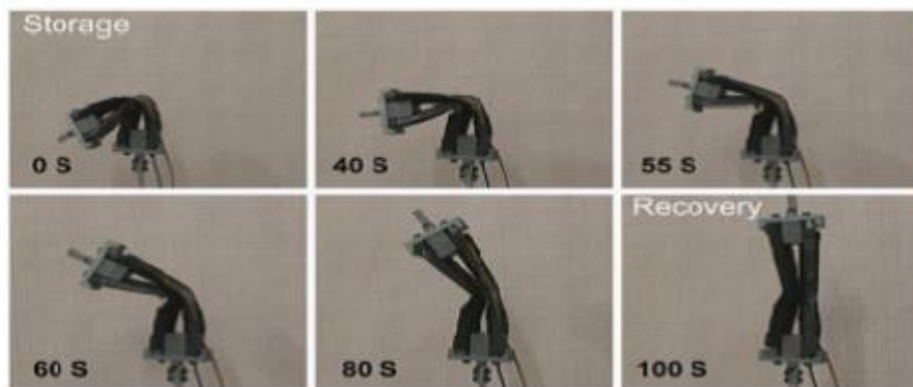
Hidrogéis podem ser projetados com grupos fotossensíveis que reagem a diferentes comprimentos de onda de luz. Quando expostos a luz UV ou luz visível, esses materiais podem sofrer uma mudança de forma ou propriedades (por exemplo, alterar a forma de um dispositivo ou se tornar mais ou menos permeáveis).

3.2.1.2 Polímeros com Memória de Forma - SMPs

Os Polímeros com Memória de Forma (SMPs - *Shape Memory Polymers*) são uma classe de materiais amplamente utilizada na impressão 4D devido à sua capacidade de reter uma forma temporária e retornar à forma original sob um estímulo específico. Essa propriedade é de grande interesse para aplicações em dispositivos médicos, robótica e engenharia. (MOMENI, LIU & NI. 2017).

Os SMPs (*Shape Memory Polymers*) apresentam alta processabilidade por meio de técnicas convencionais de impressão 3D, como FDM (*Fused Deposition Modeling*) e SLA (*Stereolithography*), o que facilita sua aplicação em impressão 4D devido à capacidade de resposta a estímulos externos. (YANG et al. 2017). A Figura 9 apresenta uma dobradiça confeccionada com SMP, de modo que é possível notar que com a variação de tempo o objeto recupera o seu formato.

Figura 9 - O processo de recuperação de forma da dobradiça SMP acionada por corrente contínua.



Fonte: LENG et al. 2011.

Em condições controladas, a ativação por corrente contínua durante 100 segundos promoveu a recuperação da geometria original em estruturas do tipo dobradiça fabricadas com SMP, conforme documentado por LENG et al. (2011)

A memória de forma dos SMPs é atribuída à transição entre uma fase rígida (fixadora de forma) e uma fase flexível (ativa). Essa transição pode ocorrer devido à diferentes estímulos como a mudança de temperatura, luz, pH ou campo elétrico conforme será apresentado a seguir (KUANG et al. 2019 e AHMED et al. 2021).

- **Calor/Temperatura:** O estímulo mais comum. O aquecimento faz com que o polímero retorne à sua forma original.
- **Luz:** Alguns SMPs respondem a luz UV ou visível, permitindo ativação remota.
- **Umidade:** Polímeros hidro-responsivos mudam de forma em contato com água.

- **Campos Elétricos ou Magnéticos:** SMPs podem ser projetados para responder a estímulos elétricos ou magnéticos.

A impressão 4D não está limitada a materiais como o hidrogel, materiais compostos e materiais não ativos também podem ser usados, pois estes também podem mudar de forma se observado após algum tempo. Por exemplo, materiais poliméricos em poucas proporções podem ser combinados com nanotubos de carbono criando assim um composto com características singulares que podem ter propriedades de autoconstrução (KOERNER et al. 2004; JOSHI, et al. 2019).

4 ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS FUTURAS.

De acordo com AHMED et al. (2021), quando comparada à impressão 3D, a impressão 4D oferece várias vantagens, como o rápido crescimento de materiais inteligentes e multimateriais, estruturas mais flexíveis e deformáveis, além de adicionar mais aplicações potenciais à impressão 4D e 3D. Entre essas vantagens, destacam-se a melhor eficiência, qualidade e desempenho em relação às técnicas tradicionais, onde as estruturas impressas em 4D podem autoaprimorar suas propriedades e comportamento. A baixa utilização de materiais na impressão 4D também contribui para manter o desenvolvimento sustentável.

Em complemento, FIROOZI (2023) ressalta que a impressão 4D, em primeiro lugar, permite o desenvolvimento de infraestrutura adaptável e responsiva, o que pode melhorar a segurança e a resiliência diante de desastres naturais ou condições climáticas extremas. Por exemplo, uma ponte impressa em 4D pode ser capaz de redistribuir a carga em tempo real, garantindo a integridade estrutural mesmo sob tensões inesperadas. Em segundo lugar, a impressão 4D tem o potencial de contribuir para práticas de construção mais sustentáveis.

Entretanto, as diferenças nas propriedades de cada material utilizado, como o coeficiente de expansão térmica, por exemplo, para CUSTÓDIO (2021), proporcionarão a capacidade de mudança de forma desejável à impressão. Por isso, a viabilidade da impressão 3D do projeto e do material interferirá diretamente no comportamento 4D do produto final, sendo o material responsivo ao estímulo (que determinará o comportamento de mudança de forma, propriedade ou funcionalidade do material, incluindo água, calor, etc.) uma das bases mais críticas da impressão 4D. Nesse contexto, o modelamento matemático se faz necessário para criar uma conexão entre o projeto desejado e o produto final da impressão. Esse modelamento permite criar o design da mudança de forma, funcionalidade e propriedade do material, obtendo resultados previsíveis.

Estruturas com capacidade de adaptação são outra aplicação importante da impressão 4D. SILVA et al. (2019) afirmam que esse sistema é capaz de integrar a detecção e a atuação diretamente no material utilizado, tornando desnecessária a utilização de sistemas eletromecânicos. Dessa forma, a quantidade de peças em uma estrutura seria reduzida drasticamente, bem como o tempo de montagem, a energia gasta, o custo e também a quantidade de dispositivos sujeitos a falhas, comparando-

se aos números atuais.

Vale ressaltar que o conceito de automontagem pode também ser utilizado para a autodesmontagem. A capacidade de correção e autocorreção de possíveis falhas dos produtos impressos em 4D oferece grandes vantagens em termos de reutilização e reciclagem. Algumas aplicações possíveis incluem tubos e hidrogéis de autocura, tecidos com tecnologia 4D de multifuncionalidade e autoadaptação, e dispositivos médicos personalizados impressos em 4D, como *stents* traqueais e próteses ortopédicas, que são exemplos extraordinários da impressão 4D (SILVA et al. 2019).

Em complemento, JOSHI et al. (2019) ressaltam que o conceito de automontagem envolve matérias-primas que se reúnem e se montam. No entanto, a impressão 4D não se restringe apenas à automontagem, mas também à técnica de uso da manufatura aditiva em sistemas responsivos a estímulos de materiais ativos, que resultam em uma mudança física ou química em sua composição ao longo do tempo. Esses estímulos podem ser de natureza física ou química, como umidade, pH, intensidade da luz e temperatura.

Para TIBBITS et al. (2013), a impressão 4D oferece uma série de vantagens exclusivas sobre a impressão 3D, que podem se provar como a capacidade crítica necessária para catalisar sua implementação em larga escala. Mais especificamente, a impressão 4D incorpora atuação, detecção e programabilidade diretamente em um material, sem a dependência de dispositivos externos e sistemas eletromecânicos. Isso resulta em características e vantagens sem precedentes:

- I. minimizar o número de componentes em um produto ou sistema;
- II. minimizar o tempo de montagem em comparação com os processos tradicionais processos onde motores, sensores e componentes eletrônicos são montados após a fabricação;
- III. minimizar custos em comparação com componentes caros;
- IV. minimizar dispositivos propensos a falhas que se tornaram comuns em eletrônica e robótica.

Segundo JOSHI et al. (2019), entre as principais técnicas empregadas na impressão 4D está a bioimpressão, que envolve aplicações que requerem um material polimérico biodegradável capaz de se decompor quando a formação do tecido estiver completa. Outra técnica é a automontagem de pequenas partículas inteligentes de dimensões microscópicas, que, ao serem estimuladas, mudam seu padrão. Vários outros planos e estratégias também são projetados para fornecer uma metodologia

adequada para impressão 4D, a fim de fornecer uma base para o projeto de impressão, exigindo a classificação de materiais inteligentes com base na resposta fornecida por eles quando expostos a estímulos. Esse plano pode ser potencialmente melhorado pela integração de aditivos e estruturas de fabricação computacionais.

Para CHOI (2015), o design inteligente e os materiais inteligentes são as principais diferenças da impressão 4D em comparação com a impressão 3D. Entre os principais materiais inteligentes estão os materiais automontados, multimateriais e materiais projetados, como ligas/polímeros com memória de forma, materiais de autodegradação/deformação e materiais acionados por temperatura ou UV. Vale ressaltar que materiais como metal e cerâmica, que são comumente utilizados na impressão 3D, não são aplicáveis à 4D devido à falta de reação a estímulos externos. Portanto, a escolha adequada de materiais é fundamental para este tipo de impressão.

Segundo JING-JUAN (2018), uma opinião amplamente aceita é que o uso de materiais ativos compatíveis com as impressoras é crucial na impressão 4D. Os polímeros, em particular, são muito mais diversos em termos de comportamentos ativos de mudança de forma e designabilidade de material em comparação com metais e cerâmicas, por exemplo.

Nesse sentido, a integração da impressão 3D com polímeros ativos, juntamente com a modelagem matemática necessária e a estimulação sequencial, permite que os objetos impressos se transformem entre múltiplas configurações. Vale ressaltar, no entanto, que os polímeros ativos foram extensivamente investigados antes da impressão 4D surgir, sendo os polímeros com memória de forma (SMPs) uma das classes mais conhecidas. Esses polímeros são ativados por estimulação externa, o que desencadeia uma mudança de forma pré-programada (JING-JUAN, 2018).

Em relação ao mecanismo de interação, MOMENI (2017) afirma que, em alguns casos, a forma desejada de uma estrutura impressa em 4D não é obtida diretamente pela simples exposição dos materiais inteligentes ao estímulo. O estímulo precisa ser aplicado em uma sequência específica ao longo de um período de tempo apropriado, o que é conhecido como mecanismo de interação. Por exemplo, um dos principais mecanismos de interação é a termomecânica restrita. Nesse mecanismo, o estímulo é o calor, e o material inteligente possui efeito de memória de forma, envolvendo um ciclo de quatro etapas. (LIU et al., 2014; LENG et al., 2011; MIAO et al., 2019; YAKACKI et al., 2008)

1. A estrutura é deformada por uma carga externa a uma temperatura alta;

2. A temperatura é abaixada enquanto a carga externa é mantida;
3. A estrutura é descarregada na baixa temperatura onde a forma é alcançada;
4. A forma original pode ser recuperada reaquecendo a estrutura.

Dessa forma, em concordância com LEE (2017), o design de estruturas impressas em 3D para impressão 4D precisa ser completamente pré-programado em detalhes para deformações específicas que dependem de estímulos ao longo do tempo. Além do design, os materiais para impressão 4D requerem “transformabilidade”, como propriedades expansíveis, flexíveis e/ou deformáveis em resposta a estímulos aplicados.

Em relação aos tipos de materiais utilizados na impressão 4D, AHMED et al. (2021) e JOSHI et al. (2019) os classificam e definem como:

- I. Materiais responsivos à umidade: hidrogéis são materiais que são responsivos à umidade ou água e têm atraído enorme interesse devido a uma ampla gama de aplicações. Eles são, na verdade, uma classe de redes 3D de cadeias de polímeros formadas por reticulação, que podem expandir até 200% de seu volume original após o contato com a umidade.
- II. Materiais sensíveis à temperatura: são termo-responsivos que respondem a estímulos de calor ou temperatura. As mudanças na forma desses materiais em resposta aos estímulos térmicos são principalmente devidas a dois mecanismos: o efeito de mudança de forma (SCE) e o efeito de memória de forma (SME).
- III. Materiais responsivos à luz: são foto-responsivos, onde a luz atua como um estímulo indireto para a deformação do material. Quando uma área de um material inteligente que responde à luz (também chamado de material fotossensível) é exposta à luz, ela absorve a luz, o que eventualmente produz um fenômeno de aquecimento.
- IV. Materiais responsivos à energia elétrica: são eletro-responsivos, onde a eletricidade atua como um estímulo indireto, assim como a luz. Foi comprovado que a eletricidade pode causar efeito de aquecimento devido à natureza resistiva do material pelo qual passa. Assim, materiais que sofrem deformação devido ao seu comportamento responsivo à corrente elétrica são chamados de materiais eletro-responsivos.
- V. Materiais responsivos à energia magnética: são magneto-responsivos. O

campo magnético ou a energia magnética é um estímulo indireto que pode provocar deformação nos materiais inteligentes. Aqueles materiais usados para imprimir estruturas 4D devido à sua resposta de deformação à energia magnética são chamados de magneto-responsivos.

VI. Materiais piezoelétricos: podem produzir uma carga quando um estresse mecânico é aplicado a eles. Esses materiais também podem ser usados em aplicações de impressão 4D, pois têm a capacidade de se deformar sob a influência de uma força mecânica.

VII. Materiais responsivos ao pH: são materiais inteligentes que podem responder ao valor do pH e sofrer mudanças na forma e no volume de acordo com esse valor. A deformação na forma em resposta a diferentes valores de pH torna esses materiais adequados para a tecnologia de impressão 4D. Polímeros que são responsivos ao pH, como os polieletrólitos, têm sido utilizados na impressão 4D, pois podem receber ou doar prótons conforme o valor do pH muda, devido à presença de grupos laterais ionizáveis.

Em concordância, CUSTÓDIO (2021) complementa afirmando que os hidrogéis são cadeias poliméricas que os diferenciam dos polímeros de estado seco. Após a absorção de grandes volumes de água, eles podem reverter ao seu tamanho original. Devido à sua grande capacidade de absorção de água (gerando uma transformação de forma utilizando a umidade como estímulo) e à sua natureza biomimética, os hidrogéis têm grande aplicação em usos médicos, como sistemas de distribuição de medicamentos, músculos artificiais e na produção de estruturas que imitam ambientes celulares, reproduzindo tecidos corporais com ótima eficiência.

Outra classe de materiais interessante são as ligas com memória de forma (SMA). Estas ligas possuem uma estrutura martensítica em baixas temperaturas, o que lhes confere uma forma flexível e deformável, e se transformam em uma estrutura austenítica em altas temperaturas. Uma das ligas mais utilizadas para a impressão 4D é a liga *Nitinol* (uma liga níquel-titânio, composta por aproximadamente 50% de níquel e 50% de titânio), que apresenta uma propriedade conhecida como superelasticidade, caracterizada pela alta taxa de recuperação elástica da liga quando a carga é removida (CUSTÓDIO, 2021).

Neste cenário, KUANG et al. (2019) confirma que a impressão 4D possui duas vantagens fundamentais. Primeiro, ela fabrica dispositivos inteligentes que são

aprimorados pela evolução da forma e das funções dos materiais e estruturas inteligentes impressos. Segundo, ao imprimir estruturas de paredes finas ou estruturas de treliça, a impressão 4D tem o potencial de economizar tempo e materiais de impressão. Por exemplo, a impressão 4D com SMPs pode ser programada em uma superfície plana para facilitar o pós-tratamento, o transporte e o armazenamento.

TIBBITS et al. (2013) enfatiza que, para criar produtos, materiais e arquitetura inteligentes, todos os sistemas anteriores exigiam componentes adicionais que eram caros, propensos a falhas e difíceis de montar. A impressão 4D agora permite que materiais inteligentes sejam produzidos com atuadores lineares programáveis, mecanismos de dobramento, superfícies de enrolamento/flexão e sensores de material.

Porém, um grande desafio em qualquer sistema impresso em 4D é projetar estruturas que possam se transformar de uma forma arbitrária em qualquer outra. No lado do hardware, isso requer programação complexa de materiais, impressão precisa de vários materiais e uma variedade de projetos de juntas altamente específicos para dobrar, enrolar, torcer, expandir linearmente/encolher, etc. Em relação aos softwares, o desafio é ainda maior, exigindo simulação sofisticada e transformação topológica para incluir as restrições de fabricação e material (TIBBITS et al. 2013).

Para JOSHI et al. (2019), os vários avanços na impressão 4D oferecem um futuro emocionante, onde a técnica pode ser usada em diferentes setores industriais e de manufatura. Para alcançar um sucesso futuro em relação à impressão 4D, é necessário desenvolver novos materiais altamente personalizáveis que possam responder a uma variedade de estímulos externos e sofrer as respectivas transformações de forma.

Há a necessidade de desenvolver um novo software para impressão 4D que suporte os diferentes tipos de técnicas de impressão. É importante destacar que a impressão 4D tem um grande potencial em muitos subcampos da engenharia biomédica. Há uma necessidade de desenvolver materiais inteligentes biocompatíveis que não tenham compatibilidade limitada e possam oferecer funcionalidade completa com múltiplos tecidos e sistemas de estímulos. Assim, é essencial desenvolver bioimpressões totalmente automatizadas e de alta resolução (JOSHI, 2013).

Dessa forma, CHOI (2015) afirma que a impressão de componentes multimateriais é um fator-chave para a impressão 4D de estruturas com adaptabilidade e funcionalidades desejadas. Impressoras multimateriais permitem que as estruturas

impressas tenham cores, formas ou propriedades eletrônicas que mudam em resposta a estímulos como raios UV, luz, calor ou água. Além disso, essas impressoras podem criar estruturas bimateriais ou estruturas funcionalmente graduadas misturando dois ou três materiais diferentes dentro de uma única peça impressa.

Em complemento, JING-JUAN (2018) afirma que, com a maior flexibilidade da impressão 4D, surgem inevitavelmente novos desafios técnicos que exigem uma colaboração multidisciplinar mais estreita. Por exemplo, a questão de como controlar previsivelmente a evolução da forma é um desafio significativo. Compromissos como esse certamente serão objeto de estudos futuros.

A análise da literatura é essencial para compreender as abordagens, objetivos e aplicações relacionadas à impressão 4D, além de identificar lacunas e tendências emergentes no campo. A tabela 2 apresenta uma síntese comparativa de estudos relevantes, destacando os objetivos, materiais utilizados e de cada pesquisa. Essa organização permite uma visão estruturada das diferentes perspectivas científicas, contribuindo para fundamentar discussões teóricas e direcionar futuras investigações.

Tabela 2. Resumo dos artigos incluídos na revisão em ordem definida pelo ano de publicação.

Autor/ano	Objetivo	Material Utilizado	Principais conclusões
TIBBITS et al. 2013	Criar técnicas de dobra precisas e universais que abordam uma gama mais ampla de aplicações por meio de uma série de modelos físicos radicalmente novos.	Materiais Digitais (DMs) que representam combinações distintas de ambos os componentes em diferentes proporções e arranjos espaciais, material rígido e expansível.	Vários protótipos físicos e digitais demonstram grandes avanços na impressão 4D, incluindo: estruturas angulares personalizadas que podem se transformar de qualquer forma em outra estrutura 3D rígida, origami de vinco curvo para superfícies duplamente curvas e campos dinâmicos utilizando ondulação de superfície e distribuição de material gradiente.
CHOI. 2015	Analisar a comparação das semelhanças e diferenças entre a impressão 3D e a impressão 4D, examinando os principais fatores que compõem a tecnologia de impressão 4D, como materiais e designs inteligentes.	Materiais automontados em resposta à temperatura, raios UV, multimateriais, materiais projetados.	A impressão 4D vem ganhando atenção porque as estruturas impressas têm a capacidade de mudar de forma ou função ao longo do tempo em resposta a estímulos como pressão, temperatura, vento, água e luz. A tecnologia de impressão 4D, que usa materiais inteligentes, designs para prever processos de mudança e impressão inteligente, pode ser aplicada a vários campos, desde mudanças simples até bioimpressões para organismos.
LEE. 2017	Discutir os benefícios mútuos de dispositivos inteligentes impressos em 3D e recursos impressos em 4D, que podem ser construídos em um único corpo.	Materiais ativos que reagem a algum estímulo, a exemplo a umidade ou variações de temperatura, radiação, eletricidade e outras formas de energia.	Os métodos híbridos fornecem um processo de fabricação rápido e simples. A impressão 4D fornece um método viável para fabricar uma estrutura compacta implantável.
MOMENI. 2017	Análise do processo de impressão 4D em relação aos conceitos práticos e ferramentas relacionadas.	Liga com memória responsiva (SMA), polímero com memória de forma (SMP), material híbrido com memória de forma (SMH), cerâmica com memória de forma (SMC) e gel com memória de forma (SMG).	A impressão 4D possui três capacidades principais, como a automontagem, multifuncionalidade e autorreparo. A modelagem matemática é necessária no processo de impressão 4D principalmente por três razões como a previsão da mudança de forma em função do tempo, a prevenção de colisões entre componentes da estrutura durante as operações de automontagem e,

			finalmente, redução do número de experimentos de tentativa e erro, onde uma grande quantidade de pesquisas multidisciplinares precisa ser conduzida no futuro.
JING-JUAN. 2018	Analisar os principais avanços tecnológicos recentes na impressão 4D com foco em métodos, materiais e seus vínculos intrínsecos em relação a aplicação potencial e perspectivas futuras.	Polímero com memória de forma (SMA), hidrogel, estrutura multimaterial; estrutura monomaterial.	Com a maior flexibilidade da impressão 4D, novos desafios técnicos inevitavelmente surgem questões que exigem uma colaboração multidisciplinar mais estreita, por exemplo, como controlar previsivelmente a evolução da forma. Acredita-se que a impressão 4D terá um impacto profundo tanto na fabricação industrial quanto em nossas vidas diárias em um futuro próximo.
JOSHI et al. 2019	Destacar os vários materiais inteligentes, mecanismos de ativação e as técnicas de mudança de forma empregadas no processo de impressão 4D enfatizando o potencial e a viabilidade da impressão 4D.	Liga com memória de forma (SMA), polímero com memória de forma (SMP), Hidrogéis e materiais SMPs com adição de nanocompósitos de grafeno.	A impressão 4D cresceu consideravelmente desde seu início e espalhou sua influência em vários setores industriais. A impressão 4D tem o potencial de erradicar a fraqueza inerente dos sistemas mecânicos. Materiais inteligentes impressos em 4D podem ser usados para projetar novos sistemas que não são limitados a nenhum grau particular de liberdade.
KUANG et al. 2019	Analisar os avanços na impressão 4D, os materiais e aplicações.	Polímeros com memória de forma (SMP) único responsivo a estímulos, multimateriais, hidrogel e compósitos.	A impressão 4D tem despertado grande interesse e gerado tremenda atenção desde sua concepção há 5 anos, onde ainda se faz necessário uma quantidade significativa de esforços para desenvolvimento futuro aplicado à robótica suave, biomedicina, engenharia de tecidos, eletrônica, defesa e segurança.
SILVA et al. 2019	Realizar um mapeamento sistemático da produção do conhecimento científico e tecnológico no que diz respeito à impressão em quatro dimensões.	Materiais ativos que reagem a algum estímulo, a exemplo a umidade ou variações de temperatura, radiação, correntes de ar e outras formas de energia, e materiais programáveis.	A área da Ciência de Materiais tem recebido as maiores contribuições desta tecnologia, uma vez que a mesma visa a construção de modelos a partir do conceito de adição de matéria ou manufatura aditiva, podendo esta ser aplicada futuramente a várias outras áreas, em especial, as ciências médicas e arquitetura. Para tanto, é importante a difusão desse conhecimento para as diversas áreas, as quais a tecnologia tem potencial para ser utilizada.
AHMED et al. 2021	Discutir os fundamentos e as leis que regem a impressão 4D, os materiais empregados na impressão, juntamente com aplicações como robótica suave e os desafios que precisam ser superados para que a impressão 4D evolua como uma tecnologia de fabricação convencional.	Materiais programáveis ou materiais inteligentes (SMs), como hidrogéis, termo-responsivo, foto-responsivo, eletro-responsivo, magneto-responsivo, materiais piezoelétricos e materiais responsivos ao pH.	A impressão 4D envolve o uso de técnicas de impressão 3D para imprimir materiais inteligentes, ou seja, material único, multimaterial ou material não ativo. Na engenharia de tecidos, a bioimpressão 4D avançou o campo do desenvolvimento de tecidos e órgãos para transplantes. Ela tem o potencial de replicar fisicamente o caminho de desenvolvimento da biologia e trazer a impressão de órgãos um passo mais perto da realidade.
CUSTÓDIO 2021	Analisar o estado da arte da impressão 4D no mundo, principais aplicações e suas perspectivas.	Polímeros com memória de forma (SMP), Ligas com memória de forma (SMA) e os hidrogéis.	O desenvolvimento de uma maior variedade de materiais inteligentes que possuem uma boa capacidade de impressão, de processos de impressão em si mais rápidos e eficientes, de diferentes respostas a estímulos e de produtos com impactos reais no dia-a-dia são alguns dos obstáculos que devem ser superados. O avanço em novas tecnologias de impressão, novos materiais inteligentes, e em <i>software</i> /ferramentas de modelamento vão permitir que a impressão 4D satisfaça uma grande quantidade de aplicações funcionais, principalmente na área de robótica, biomedicina, engenharia de tecidos, eletrônica e engenharia aeroespacial.
SARITHA, 2021	Analisar o desenvolvimento da impressão 4D em relação a resposta à estímulos externos, aplicações e oportunidades futuras.	Polímeros com memória de forma (SMPs) com melhor desempenho.	O progresso da impressão 4D é viável com o desenvolvimento de materiais inteligentes. Flexibilidade ambiental, baixa taxa de produção e menos tempo essencial são as principais necessidades de qualquer procedimento a ser escolhido por materiais

			inteligentes. Impressoras com vários bicos são obrigatórias para incorporar diversos materiais ao mesmo tempo e algoritmos avançados para criar diferentes formas são necessários para o avanço das técnicas de impressão 4D.
FEIJÓ et al. 2022	Apresentar resultados preliminares do processo de impressão das MEC 4D, o que inclui, treinamento para operação de impressoras, bem como a fabricação mecânica.	O biomaterial selecionado para a realização dos primeiros testes foi o biopolímero alginato de sódio.	A variação da área da ponteira e a velocidade de extrusão têm grande influência no resultado final da impressão da matriz 4D. A facilidade do manuseio e a acessibilidade do alginato foram observadas durante o processo de fabricação da MEC nesse estudo. O alginato provou ser de grande utilidade na engenharia de tecidos e seu potencial como biomaterial qualifica-o para futuros estudos visando a estabilização do filamento extrudado.
FIROOZI. 2023	Sintetizar o conhecimento atual sobre as aplicações, potenciais benefícios e desafios da impressão 4D na engenharia civil, com foco em seu papel em soluções sustentáveis.	Polímeros com memória de forma (SMPs), hidrogéis e compósitos responsivos a estímulos.	A tecnologia 4D, caracterizada por seu recurso exclusivo de transformação responsiva ao tempo, apresenta inúmeras oportunidades para a criação de estruturas adaptáveis e resilientes para a construção civil.

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

Diante do exposto, a complexidade e diversidade de materiais, técnicas e aplicações da impressão 4D evidenciam a necessidade de sistematizar o conhecimento produzido. Nesse contexto, a análise bibliométrica pode ser uma ferramenta essencial, permitindo mapear a evolução das publicações, destacar os principais autores e instituições e fornecer uma visão quantitativa que complementa a revisão qualitativa do estado da arte, para que possa orientar futuras investigações na área.

5 BIBLIOMETRIA

Neste tópico, foi realizada uma análise bibliométrica da produção científica sobre impressão 4D, catalogada na base de dados Scopus, no período de 2013 a 2022.

A partir dos resultados obtidos, realizou-se uma triagem rigorosa dos artigos com base na relevância para os objetivos do estudo, vantagens, limitações, aplicações, direções futuras para a impressão 4D e qualidade científica das publicações, levando em consideração fatores como número de instruções e impacto do periódico. Além disso, uma seleção destes trabalhos que abordaram de maneira aprofundada a interação dos materiais inteligentes com os estímulos ambientais, os métodos de fabricação 4D e os desafios tecnológicos envolvidos.

A análise identificou um total de 493 documentos, dos quais se destacam 225 artigos científicos. Além disso, foram registrados 5 livros, 59 capítulos de livros, 58 artigos de conferência, 3 editoriais e 145 revisões. Vejamos abaixo a quantidade de documentos produzidos por ano:

Quadro 1 - Quantidade de artigos por ano.

ANO ▾	QUANTIDADE DE ARTIGO ▾
2014	2
2015	4
2016	4
2017	25
2018	32
2019	59
2020	80
2021	118
2022	171

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

Na tabela acima é possível perceber que há um aumento significativo dos números de produções feitos através dos anos. Isso se confirma quando confrontado com o gráfico a seguir que mostra a produção científica pelo ano:

Gráfico 1 – Crescimento da produção de documentos científicos sobre o tema através dos anos



Fonte: Base de dados Scopus, 2024

No gráfico anterior, observa-se um crescimento acentuado, com características semelhantes ao crescimento exponencial, no número de documentos científicos produzidos ao longo dos anos, dentre estes trabalhos verifica-se alguns pesquisadores com maior número de produções científicas sobre o tema:

Quadro 2 – Ranking dos autores de artigos

Posição	Autores	Quantidade de artigo
1	LIU Y.	26
2	LENG J.	25
3	BODAGHI M	18
4	DEMOLY F.	16
5	QI HJ.	16
6	WANG Y.	16
7	ZOLFAGHARIAN A.	15
8	WANG L.	13
9	LIU L.	11
10	REN L.	11
11	YAN C.	11
12	ZHANG F.	11
13	GOMES S.	10
14	KUANG X.	10
15	SINGH R.	10
16	ZHANG Y.	10
17	AN J.	9
18	CHUA CK.	9
19	LI X.	9
20	SHI Y.	8

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

Além do ranking dos autores com maior produção de artigos, o quadro a seguir apresenta os 20 principais países responsáveis pela criação de artigos científicos, juntamente com suas respectivas quantidades de publicações.

Quadro 3 - Tabela dos países com maior produção científica no período de 2013 a 2022.

País	Documento	Produção única	Produção em colaboração com outro país
CHINA	124	103	21
ÍNDIA	45	38	7
EUA	44	36	8
COREIA	20	18	2
REINO UNIDO	19	9	10
FRANÇA	18	9	9
ITÁLIA	16	12	4
AUSTRÁLIA	11	5	6
GEÓRGIA	10	4	6
CINGAPURA	9	8	1
CANADÁ	6	5	1
ALEMANHA	6	5	1
GRÉCIA	6	4	2
IRÃ	6	2	4
PORTUGAL	6	5	1
PAÍSES BAIXOS	5	2	3
BÉLGICA	4	0	4
ESPAÑA	4	1	3
TURQUIA	4	4	0

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

A partir da tabela, observa-se que, embora a China não tenha sido a pioneira no desenvolvimento da impressão 4D, ela se consolidou como o principal produtor de documentos científicos sobre o tema, superando a Índia, segunda maior produtora, em 175,56% na quantidade de publicações.

Outro ponto importante de mencionar é que no Brasil somente o artigo intitulado “3D and 4D bioprinted human model patenting and the future of drug development” dos autores Cabral et al. de 2020, pela fundação Oswaldo Cruz do Rio de Janeiro, aparece na pesquisa do Scopus. O artigo brasileiro analisou 176 patentes relacionadas à bioimpressão, depositadas entre 2006 e 2019, para discutir o potencial da bioimpressão 3D e 4D de tecidos e órgãos humanos para revolucionar o campo biomédico, particularmente no desenvolvimento de medicamentos, e como isso pode eliminar a necessidade de testes em animais de laboratório. Por fim os autores Cabral et al concluem que, embora a bioimpressão 3D/4D ainda esteja em desenvolvimento, é provável que se torne uma realidade nos próximos anos, exigindo mudanças significativas na forma como a pesquisa e o desenvolvimento de medicamentos são conduzidos.

Ainda assim, como visto no quadro 3, a China se destaca também como a maior produtora colaborativa, evidenciando sua capacidade de gerar artigos científicos em parceria com outros países. Isso pode ser corroborado pelo quadro 4, que apresenta o *ranking* dos principais países responsáveis pela produção de artigos em colaboração internacional.

Outro fator relevante é que dentre um conjunto de 20 autores, são apresentados os documentos científicos mais citados por outras produções acadêmicas, juntamente com os respectivos DOIs utilizados para referenciar este estudo.

Quadro 4 – Principais artigos mencionados por artigos do tema de impressão 4D.

Documento	DOI	Citação	Citações por an
SYDNEY, G., 2016	10.1038/nmat4544	2504	250.4
MOMENI et al. 2017	10.1016/j.matdes.2017.02.068	913	101.4
KUANG et al. 2019	10.1002/adfm.201805290	818	116.9
KHOO et al. 2015	10.1080/17452759.2015.1097054	769	69.9
PAN et al. 2021	10.1016/j.autcon.2020.103517	658	131.6
GE et al. 2014	10.1088/0964-1726/23/9/094007	635	52.9
AHMED et al. 2021	10.1016/j.polymer.2021.123926	468	93.6
BAKARICH et al. 2015	10.1002/marc.201500079	458	41.6
RASTOGI et al. 2019	10.1088/1758-5090/ab331e	450	64.3
KUANG et al. 2018	10.1021/acsami.7b18265	447	55.9
MITCHELL et al. 2018	10.1016/j.addma.2018.10.038	438	54.8
AMBULO et al. 2017	10.1021/acsami.7b11851	403	44.8
CHOI et al. 2015	10.1089/3dp.2015.0039	333	30.3
LANZALACO et al. 2017	10.3390/gels3040036	323	35.9
LI et al. 2017	10.1088/1758-5090/9/1/012001	322	35.8
TAMAY et al. 2019	10.3389/fbioe.2019.00164	317	45.3
ZHANG Z, 2019	10.1080/19475411.2019.1591541	307	43.9
WEI et al. 2020	10.1186/s40779-020-00280-6	302	50.3
CHAMPEAU et al. 2020	10.1002/adfm.201910606	294	49.0

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

O artigo intitulado 'Biomimetic 4D printing', de Sydney et al, é o mais citado entre os artigos que utilizam 'impressão 4D' como palavra-chave. Os autores desse artigo são filiados a universidades americanas (Harvard University, University of Illinois e MIT). Embora a China seja o principal produtor de artigos sobre impressão 4D, o país aparece apenas em segundo lugar no número de referências, com o artigo 'A Comprehensive Review of 4D Printing in the Context of Structural Applications', publicado em 2017 pelos autores Momeni et al. (2017)

Outro aspecto relevante consiste em analisar os países cujos artigos

apresentam o maior número de citações, bem como a média de citações por artigo, conforme ilustrado na tabela a seguir:

Quadro 5 – Ranking dos países com maior número de citações em documentos científicos sobre impressão 4D

País	Total de Citações	Citações Médias por Artigo
EUA	6489	147.48
China	6387	51.51
Índia	2408	53.51
Geórgia	1708	170.80
Reino Unido	1435	75.53
Coréia do Sul	1392	69.60
Cingapura	1144	127.11
França	973	54.06
Austrália	942	85.64
Itália	867	54.19
Países Baixos	732	146.40
Turquia	600	150.00
Espanha	488	122.00
Brasil	386	193.00
Alemanha	365	60.83
Egito	344	172.00
Paquistão	305	152.50
Canadá	286	47.67
Irã	238	39.67

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

Na tabela anterior, observa-se que, embora a China seja o maior produtor de artigos, ela ocupa apenas a segunda posição em número de citações, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Outro ponto relevante é que, embora o Brasil não tenha publicado diversos artigos especificamente sobre o tema da impressão 4D, o país ainda é amplamente citado. Isso pode ser atribuído, possivelmente, à sua significativa produção de pesquisas em tecnologias relacionadas.

O quadro 6 apresenta uma análise bibliométrica das palavras-chave mais frequentes utilizadas pelos autores em documentos científicos sobre impressão 4D, destacando os principais temas e áreas de interesse dentro dessa tecnologia emergente.

Quadro 6 - Palavras-chaves mais citadas.

Palavras-chave do Autor	Artigos
IMPRESSÃO 4D	307
MANUFATURA ADITIVA	110
MATERIAIS INTELIGENTES	103
IMPRESSÃO 3D	100
POLÍMEROS COM MEMÓRIA DE FORMA	53
POLÍMERO DE MEMÓRIA DE FORMA	33
ENGENHARIA DE TECIDOS	27
EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA	19
HIDROGÉIS	15
MATERIAL INTELIGENTE	15
ROBOTICA SOFT	15
MEMÓRIA DE FORMA	13
BIO IMPRESSÃO	12
MODELAÇÃO POR DEPOSIÇÃO FUSIONADA	11
AUTOCURA	10
MATERIAIS RESPONSORES A ESTÍMULOS	10
IMPRESSÃO 3D/4D	9
COMPOSTOS	9
ELASTÔMEROS DE CRISTAL LÍQUIDO	8

Fonte: Base de dados Scopus, 2024

Outros termos relevantes, como "Manufatura Aditiva", "Materiais inteligentes" e "Impressão 3D", evidenciam a relação intrínseca entre a impressão 4D e tecnologias de fabricação aditiva, bem como a importância dos materiais inteligentes para a funcionalidade e adaptabilidade dos objetos impressos.

Além disso, termos como "Polímeros com memória de forma" e "Hidrogéis" destacam os materiais mais estudados para aplicações em impressão 4D, enquanto "Engenharia de tecidos" e "Bioimpressão" indicam o potencial dessa tecnologia em áreas biomédicas. Essa análise reforça a interdisciplinaridade da impressão 4D, abrangendo desde o desenvolvimento de materiais avançados até aplicações práticas em setores como medicina, robótica e engenharia.

A partir da análise bibliométrica realizada, foi possível identificar padrões claros de produção científica, autores e países mais influentes, bem como os principais temas e aplicações da impressão 4D, evidenciando o crescimento significativo da área nos últimos anos. Esses resultados fornecem uma base quantitativa sólida que complementa a revisão qualitativa do estado da arte, permitindo compreender não apenas a evolução tecnológica e científica da impressão 4D, mas também as lacunas e oportunidades de pesquisa futuras. Dessa forma, os dados bibliométricos servem

de suporte para as conclusões a seguir deste estudo, destacando os avanços, desafios e perspectivas para a consolidação dessa tecnologia emergente em diferentes setores.

6 CONCLUSÕES

A impressão 4D representa um avanço significativo em relação às tecnologias de fabricação convencionais e à impressão 3D, oferecendo benefícios notáveis tanto em termos de eficiência quanto de funcionalidade. Diferente das tecnologias tradicionais, a impressão 4D não apenas reduz o tempo de fabricação e o trabalho humano necessário para montar máquinas ou produtos, mas também otimiza a logística ao diminuir os custos e o volume de transporte dos bens. Além disso, permite atender à crescente demanda por designs personalizados em itens de consumo, como smartphones e relógios.

Através da impressão 4D se faz possível o desenvolvimento de novos produtos com avançada tecnologia e aplicações nas mais diversas áreas, notavelmente na medicina, na robótica e na engenharia aeroespacial, por ser um método de processamento recente, tendo uma atenção mais notável nos últimos cinco anos, existem uma grande quantidade de desafios a serem superados.

Apesar dos avanços promissores, a impressão 4D ainda está em fase de desenvolvimento e enfrenta desafios significativos, como a necessidade de novos materiais e softwares específicos e a complexidade de projetar estruturas que evoluam de maneira previsível. A colaboração multidisciplinar e o progresso contínuo em pesquisa e desenvolvimento serão cruciais para superar esses desafios e tornar a impressão 4D uma tecnologia amplamente aplicada.

O avanço em novas tecnologias de impressão, novos materiais inteligentes, e em software/ferramentas de modelamento vão permitir que a impressão 4D satisfaça uma grande quantidade de aplicações funcionais, principalmente na área de robótica, biomedicina, engenharia de tecidos, eletrônica e engenharia aeroespacial.

Com base na análise bibliométrica realizada, é evidente que a pesquisa sobre impressão 4D vem ganhando destaque crescente na comunidade científica, especialmente nos últimos anos. O aumento exponencial na produção de artigos científicos e colaborações internacionais indica um interesse global na exploração das potencialidades dessa tecnologia. A predominância de países como China e Estados Unidos na produção acadêmica ressalta a importância do investimento contínuo em pesquisa e inovação para impulsionar o desenvolvimento da impressão 4D. No contexto brasileiro, embora a produção ainda seja limitada, o potencial para avanços

tecnológicos e contribuições científicas é promissor, especialmente em áreas como biomedicina.

Por fim, embora a impressão 4D tenha o potencial de transformar diversos setores, sua adoção generalizada pode levar algum tempo. Em comparação com a impressão 3D, que, apesar de ter se popularizado apenas recentemente, já existe há mais de 30 anos, a impressão 4D ainda está em seus estágios iniciais. No entanto, à medida que a tecnologia avança e os desafios são superados, a impressão 4D promete revolucionar a fabricação e o design de produtos, criando novas oportunidades e aplicações no futuro.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. et al. 4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges. *Polymer*, v. 228, p. 123926, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926>
- AKINLABI, E. T.; MWEMA, F. M. Basics of fused deposition modelling (FDM). In: *Fused Deposition Modeling*. Cham: Springer, 2020. p. 1-15.
- ANDRADE, R. M. et al. Impressão 4D no Brasil: estado da arte e perspectivas. São Paulo: Editora USP, 2021.
- ANTONELLI, L. A. Impressora 3D de baixo custo. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019.
- BAKARICH, S. E. et al. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 36, n. 12, p. 1211-1217, 2015.
- BEAL, V. E.; AHRENS, C. H.; WENDHAUSEN, P. A. The use of stereolithography rapid tools in the manufacturing of metal powder injection molding parts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 26, n. 1, p. 40-46, 2004.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 83, n. 1, p. 389-405, 2016.
- CHUA, C. K.; LEONG, K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. 5. ed. Singapura: World Scientific, 2017.
- COSTA, M. P. Processo de estereolitografia (SLA) no auxílio de design de veículos automotivos. 2012. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Design) -

Instituto de Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

COSSETTI, M. C. Como funciona uma impressão 3D. Tecnoblog, 2018. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/como-funciona-impressora-3d/>. Acesso em: 9 abr. 2022.

DAWOOD, A. et al. 3D printing in dentistry. British Dental Journal, v. 219, n. 11, p. 521-529, 2015.

DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. Progress in Materials Science, v. 92, p. 112-224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

ENGIPRINTERS. Impressão 3D x Usinagem CNC: Qual é o melhor para prototipagem? 2023. Disponível em: <https://engiprinters.com.br/impressao-3d-x-usinagem-cnc-qual-e-o-melhor-para-prototipagem/>. Acesso em: 31 mar. 2025.

EVANS, B. Practical 3D printers: The science and art of 3D printing. Nova York: Apress, 2012.

FEIJÓ, H. M.; INOCÊNCIO, M. L. M.; ARRUDA, L. C. et al. Impressão 4D de matriz extracelular: projeto piloto para o desenvolvimento de tecidos complexos. Anais da Faculdade de Medicina de Olinda, Olinda, v. 7, n. 1, p. 7-13, 2022.

Fused Deposition Modeling, FDM. Estocolmo: Manufacturing Guide Sweden AB, 2020. Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. Acesso em: 19 abr. 2020.

GE, Q.; QI, H. J.; DUNN, M. L. Active materials by four-dimension printing. Applied Physics Letters, v. 103, n. 13, p. 131901, 2013.

GIBSON, I. et al. Additive Manufacturing Technologies. 3. ed. Nova York: Springer, 2021.

GOKHARE, V. G.; SHINDE, D. K.; RAUT, D. N. A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 6, n. 6, p. 953-958, 2017.

GOODRIDGE, R. D. et al. Laser Sintering of Polyamides and Other Polymers. *Progress in Materials Science*, v. 57, n. 2, p. 229-267, 2012.

HAGER, I.; GOLONKA, A.; PUTANOWICZ, R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*, v. 151, p. 292-299, 2016.

HULL, C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent 4,575,330, 1986.

JANG, T. S. et al. 3D printing of hydrogel composite systems: Recent advances in technology for tissue engineering. *International Journal of Bioprinting*, v. 4, n. 1, 2018.

KOERNER, H. et al. Remotely actuated polymer nanocomposites-stress-recovery of carbon-nanotube-filled thermoplastic elastomers. *Nature Materials*, v. 3, n. 2, p. 115-120, 2004.

KOTIKKANAT, A. et al. 4D printed soft robotics: materials, design and applications. *Advanced Materials Technologies*, v. 5, n. 12, p. 2000187, 2020. DOI: 10.1002/admt.202000187.

KRUTH, J. P. et al. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. *Rapid Prototyping Journal*, v. 11, n. 1, p. 26-36, 2005.

KUANG, X. et al. Advances in 4D printing: materials and applications. *Advanced Functional Materials*, v. 29, n. 2, p. 1805290, 2019. <https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>

KUMAR, N. et al. Fused deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties, part quality, and materials. *Progress in Additive*

Manufacturing, v. 5, p. 319-330, 2020.

LEE, A. Y.; KIM, M.; CHOI, S. Shape-memory polymers for 4D printing. *Advanced Materials Technologies*, v. 2, n. 9, 2017. <https://doi.org/10.1002/admt.201700167>

LEE, J. et al. A review on 3D printed smart devices for 4D printing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, v. 4, n. 3, p. 373-383, 2017.

LENG, Jinsong et al. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications. *Progress in Materials Science*, v. 56, n. 7, p. 1077-1135, 2011.

LI, X.; SHANG, Jianzhong; WANG, Z. Intelligent materials: a review of applications in 4D printing. *Assembly Automation*, v. 37, n. 2, p. 142-155, 2017.

LIU, Yanju et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review. *Smart Materials and Structures*, v. 23, n. 2, p. 023001, 2014.

MARKS, P.; RILEY, K. *Aligning technology for best business results*. Los Gatos: Design Insight, 1995.

MIAO, Y. et al. 4D Printing: From Advanced Materials to Applications. *Advanced Functional Materials*, v. 29, n. 2, p. 1805290, 2019.

MIRI, Z. et al. 4D printing of biomedical devices: current capabilities and future trends. *Biofabrication*, v. 10, n. 4, p. 042001, 2018. DOI: 10.1088/1758-5090/aad56a.

MOMENI, Farhang et al. A review of 4D printing. *Materials & Design*, v. 122, p. 42-79, 2017.

MORANDINI, M. M.; DEL VECHIO, G. H. IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. *Revista Interface Tecnológica*, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 67-77, 2020. DOI: 10.31510/infa.v17i2.866. Disponível em:

<https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/866>. Acesso em: 7 abr. 2022.

MWEMA, F. M.; AKINLABI, E. T. Basics of fused deposition modelling (FDM). In: Fused Deposition Modeling. Cham: Springer, 2020. p. 1-15.

PEPPAS, N. A. et al. Hydrogels in Biology and Medicine: From Molecular Principles to Bionanotechnology. *Advanced Materials*, v. 18, n. 11, p. 1345-1360, 2006.

PEREIRA, R. M. et al. Smart Hydrogels for 4D Printing: A Review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, v. 139, p. 100561, 2020.

QIU, Y.; PARK, K. Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 53, n. 3, p. 321-339, 2001.

RODRIGUES DA SILVA, W. V. et al. Mapeamento sistemático da produção científica e tecnológica no contexto da impressão 4D. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGICAL INNOVATION, 2019, Aracaju. Anais... Aracaju: UFS, 2019. p. 1144-1152.

RODRIGUES, L. R. et al. Fused deposition modeling with smart materials: A review. *Additive Manufacturing*, v. 46, p. 102156, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102156>

SABRY, Fouad. Impressão 4D: Espere um segundo, você disse impressão 4D? One Billion Knowledgeable, 2021.

SARITHA, D.; BOYINA, D. A concise review on 4D printing technology. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, n. 1, p. 692-695, 2021.

SCHMIDLEITHNER, C.; KALASKAR, D. M. Stereolithography. Belgrado: IntechOpen, 2018.

SCHUBERT, C.; LANGEVELD, M. C. V.; DONOSO, L. A. Innovations in 3D printing: a

3D overview from optics to organs. *BMJ Journals*, v. 98, p. 159-161, 2014.

SCHWARTZ, J. J. et al. 4D printing: reconfigurable, programmable matter. *Science*, v. 347, n. 6229, p. 1349-1352, 2018. <https://doi.org/10.1126/science.1260899>

SCHWARTZ, M. *Smart materials*. Boca Raton: CRC Press, 2008.

SOFTONIC. Apps para criar seu objeto em impressoras 3D, 2023. Disponível em: <https://www.softonic.com.br/artigos/apps-criar-seu-objeto-impressoras-3d>. Acesso em: 27 mar. 2025.

STEWART, D. 3D printing growth accelerates again. *Deloitte Insights*, 2018. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/3d-printing-market.html>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SYDNEY, A. G. et al. Biomimetic 4D printing. *Nature Materials*, v. 15, n. 4, p. 413-418, 2016.

TĪMANIS, U. et al. Comparative analysis of FDM and SLA 3D printing technologies for rapid prototyping. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 64, p. 1366-1382, 2021.

TIBBITS, S. Active matter: the next generation of 4D printing. *Science Robotics*, v. 4, n. 29, p. eaav5189, 2019. DOI: 10.1126/scirobotics.aav5189.

TIBBITS, S. The emergence of "4D printing". TED Conference, 2013. Disponível em: https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing

TROTT, P. *Gestão da inovação e desenvolvimento de novos produtos*. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2012.

VARDHAN, G. H. et al. 3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, v. 2, n. 8, p. 2373-2376, 2014.

VOLPATO, N. et al. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

WOHLERS, T. et al. Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry. Fort Collins: Wohlers Associates, 2023.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. International Scholarly Research Notices, v. 2012, 2012.

YANG, Y. et al. Sustainability assessment of 4D printing technologies. Nature Sustainability, v. 5, p. 389-398, 2022. DOI: 10.1038/s41893-022-00863-2.

YUAN, C. et al. 3D/4D printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA). Polymers, v. 12, n. 11, p. 2701, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12112701>

ZHOU, L. et al. 4D printing for aerospace applications: smart materials and structural design. Progress in Aerospace Sciences, v. 121, p. 100696, 2021. DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100696.

LI, X. et al. Stimuli-responsive 4D printing: from basic research to practical applications. Advanced Materials, v. 33, n. 45, p. 2005348, 2021. <https://doi.org/10.1002/adma.202005348>

ZHU, W. et al. 3D printing of functional hydrogels. Soft Matter, v. 15, p. 1790-1810, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8SM02263J>

LIU, Y. et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review. Smart Materials and Structures, v. 23, n. 2, p. 023001, 2014. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/2/023001>

LENG, J. et al. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications. Progress in Materials Science, v. 56, n. 7, p. 1077-1135, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.03.001>

MIAO, Y. et al. 4D Printing: From Advanced Materials to Applications. *Advanced Functional Materials*, v. 29, n. 2, p. 1805290, 2019.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>

YAKACKI, C. M. et al. Shape-memory polymer networks with thermoset topography. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 46, n. 18, p. 1933-1941, 2008.
<https://doi.org/10.1002/polb.21525>