

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Estado da arte da Impressão 4D: Conceitualização e  
Perspectivas Tecnológicas**

**BRUNO CUSTODIO**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2021**

# **Estado da arte da Impressão 4D: Conceitualização e Perspectivas Tecnológicas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli

São Carlos-SP  
2021



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Bruno Custodio

**RA:** 594237

**TÍTULO:** Estado da arte da impressão 4D: conceitualização e perspectivas tecnológicas

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 19/11/2021, 09h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli	7,0	9,0
Prof. Dr. Juliano Marini	7,0	9,0
<b>Média</b>	7,0	9,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli e Prof. Dr. Juliano Marini e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli

**DEDICATÓRIA**

À Clara, Marcia e Tatiana. Minha família de sangue e meu elo mais forte.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a minha família, que me possibilitou desde o berço ter acesso ao que existe de mais importante no mundo: a educação. Espero poder retribuir tamanho presente.

Aos meus colegas e amigos de curso, que compartilharam da mesma trajetória junto a mim.

Ao professor Márcio Raymundo Morelli, por confiar sempre na minha capacidade e entender meus objetivos e limitações.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, por ter me sido muito mais que uma escola.

“Enfrente a sua vida, sua dor, seu prazer, não deixe nenhum caminho por trilhar.”

*Neil Gaiman*

## RESUMO

O presente trabalho visou traçar um panorama dos principais pontos relacionados ao estado da arte da Impressão 4D através da análise de diferentes literaturas disponíveis acerca do assunto. Foram trabalhadas as origens do processo de manufatura aditiva, com uma breve exposição do seu histórico e levantamento dos nomes de seus desenvolvedores, juntamente com suas contribuições. Dentro do histórico, foram vistos alguns conceitos fundamentais da Impressão 3D e, posteriormente, da Impressão 4D. Na revisão de literatura, foram vistos os pontos fundamentais que permeiam a tecnologia de Impressão 4D, inicialmente com exposição de uma série de conceitos gerais que auxiliam na definição desse tipo de processo e com o levantamento dos principais pilares que tornam a Impressão 4D um processamento avançado na área de engenharia, sendo esses: facilidade de Impressão 3D, estímulo, material responsivo ao estímulo, mecanismo de interação e modelamento matemático. Seguindo a revisão de literatura, foram definidos o que são materiais inteligentes, mais especificamente materiais com memória de forma, e a diferenciação do conceito de *Shape Memory Materials* e *Shape Changing Materials*. Posteriormente, houve o levantamento desses materiais mais comumente utilizados no processo: os *Shape Memory Polymers* (SMP), *Shape Memory Alloys* (SMA) e os hidrogéis, e o porquê da sua viabilidade de utilização, através da análise de características do seu comportamento responsivo a diferentes estímulos. Posteriormente, foram vistos os principais comportamentos de resposta a estímulos dos produtos de Impressão 4D, que são os comportamentos de *folding*, *bending*, inchamento e alongamento. Também, foram definidos os tipos básicos de estímulos existentes: térmico e com aplicação de força, térmico e sem aplicação de força, pH e sem aplicação de força e termo-foto-mecânico e explicados seu funcionamento, além da pontuação de possíveis outros mecanismos. Adiante, houve um levantamento das principais técnicas de impressão utilizadas na manufatura aditiva em conjunto com suas definições e etapas de processo, sendo a estereolitografia (SLA), a *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Direct Ink Writing* (DIW) e *Digital Light Projection* (DLP) as técnicas mais conhecidas. Por fim, foram pesquisadas as principais aplicações, majoritariamente presentes na área da saúde, robótica e aeroespacial devido à alta possibilidade de customização dos produtos do processo e também as perspectivas de novas aplicações, que apresentariam grande impacto na vida cotidiana.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva. Impressão 4D. Impressão 3D. Estado da arte. Processamento avançado.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismo de mudança de forma de um SMA	5
Figura 2 – Mecanismo termicamente induzido de um SMP	7
Figura 3 – Mecanismo de inchamento apresentado por um hidrogel quando imerso em água	9
Figura 4 – Comportamento de alongamento	10
Figura 5 – <i>Folding e Bending</i>	11
Figura 6 – Mecanismo de mudança de forma térmico com aplicação de força	12
Figura 7 – Programação e Esquema de um SMP de impressão 4D para liberação controlada de drogas	15
Figura 8 – Garras robóticas produzidas por impressão 4D	17



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bases da Impressão 4D	3
Tabela 2 – Classe e exemplos de estímulos	13

## LISTA DE SIGLAS

SMA – *Shape Memory Alloy*

SMP – *Shape Memory Polymer*

SME – *Shape Memory Effect*

M.A. – *Manufatura Aditiva*

AM – *Addictive Manufacturing*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

DLP – *Digital Light Projection*

DMD – *Digital Mirror Device*

SLA – *Estereolitografia*

DIW – *Direct Ink Writing*

$T_g$  – *Temperatura de Transição Vítreá (Glass Transition Temperature)*

$T_m$  – *Temperatura de Fusão (Melting point)*

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
a. CONCEITOS GERAIS .....	3
b. MATERIAIS UTILIZADOS .....	4
c. MECANISMOS DE MUDANÇA DE FORMA.....	9
d. ESTÍMULOS .....	12
e. TÉCNICAS DE IMPRESSÃO .....	13
f. PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	15
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>19</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>20</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 80, o mundo presencia uma revolução na área de processamento de materiais com o surgimento e a crescente tomada de mercado pela manufatura aditiva.

A primeira máquina de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping – RP*), popularmente conhecida por impressora 3D, surgiu em 1984, no estado da Califórnia, desenvolvida por Chuck Hull, um engenheiro físico norte-americano. Esta impressora utilizava-se de uma tecnologia precursora desse tipo de processamento conhecido como estereolitografia. Isso possibilitou à Chuck uma patente tecnológica em 1986 de sua criação e de diversas formas de impressão e, no mesmo ano, a fundação da *3D Systems Corp.*, primeira empresa do ramo e que permanece uma das líderes até os dias atuais.

O termo *Rapid Prototyping* origina-se do propósito dessas máquinas: a produção de modelos tridimensionais de produtos de uma forma acelerada e generalizada (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). Porém, nos dias atuais, os dispositivos não possuem a produção de protótipos como única finalidade, mas sim a fabricação de produtos finais. Logo, a terminologia utilizada na área técnica, definida pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing – AM*).

A impressão 3D consiste na manufatura de um produto através de deposição de camadas de material, uma após a outra, no eixo Z (vertical). Os variados métodos de deposição existentes permitem a construção de diversos produtos, como sapatos, próteses, brinquedos, acessórios, peças automotivas e aeronáuticas, etc, com geometrias extremamente complexas. Apesar da notável flexibilidade de produtos possíveis e da diminuição de vários estágios de processo de manufatura, a impressão 3D ainda possui grandes limitações que impedem que este tipo de processamento substitua outros métodos mais convencionais.

Segundo Ali (2019), um dos grandes desafios à maior implementação da manufatura aditiva é a velocidade do processo, que é muito reduzida em relação à outros tipos de processamento, já que o produto é gerado pela deposição *layer-by-layer* de material, em que a máquina dá uma pausa após a deposição de cada camada, atrasando a produção. Além disso, a complexidade do sistema de Manufatura Aditiva como um todo e a processibilidade de cada material utilizado como

matéria-prima também contribuem para a desaceleração do processamento. O acabamento de superfície também é um defeito característico da manufatura aditiva, devido ao que é conhecido como *staircase effect*, um efeito de aumento da rugosidade do produto final, inerente ao processo de deposição, que se agrava quanto mais inclinada é a superfície. Além disso, a necessidade pós-processamento como polimento ou deposição de vapor se faz comumente necessária para melhorar o acabamento do produto (WU J. et al, 2017).

Com o desenvolvimento das técnicas e parâmetros da manufatura aditiva, buscando o refinamento dos produtos e sua diversificação de aplicações, uma nova dimensão foi adicionada ao processo: o tempo, que possibilitou uma rápida mudança de visão no conceito de prototipagem rápida. A partir disto, originou-se o processo que hoje é conhecido por impressão 4D. Inicialmente, a impressão 4D foi conceitualizada como uma extensão da impressão 3D em que eram utilizados “materiais inteligentes”, o que permitiria com que os produtos de manufatura aditiva pudessem sofrer alteração em sua forma, volume, cor, etc com a aplicação de algum estímulo externo como calor ou umidade. Segundo Tibbits (2014) a impressão 4D abre novos campos para aplicação em que a estrutura pode ser ativada por auto-montagem, reconfiguração e replicação através de energia livre do ambiente.

O presente trabalho visa fazer um estudo do estado da arte da impressão 4D no mundo, através de revisão de diversas fontes de bibliografia incluindo teses de mestrado e doutorado, artigos científicos, artigos tecnológicos, excertos de revistas e periódicos científicos, levantando conceitos práticos e teóricos que dizem respeito à esse campo, além das principais aplicações e suas perspectivas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### a. CONCEITOS GERAIS

“Em vez de construir itens tridimensionais a partir de camadas de plásticos ou metais, a impressão 4D emprega materiais dinâmicos que continuam a evoluir em resposta a seu ambiente.”

Diz Tibbits em entrevista à *Scientific American*. No Laboratório de AutoMontagem do Instituto de Tecnologia de Massachussets, foram desenvolvidos diversos experimentos com produtos manufaturados por uma impressora 3D compostos por “materiais programáveis”. Após a deposição, era observado apenas como esses produtos se comportavam alterando sua forma e se reorganizando em novos modelos. Com a melhoria de computadores, desenvolvimento de novos softwares e de novas pesquisas na área de “materiais inteligentes”, foi possível notar uma evolução nos projetos para a impressão 4D, mas Tibbits acredita em um cenário em que os próprios materiais já conterão as informações necessárias para a auto-montagem, poupando assim tempo e dinheiro de seus desenvolvedores.

Ilustrados na Tabela 1, estão os blocos fundamentais para a construção de uma impressão 4D: facilidade de impressão 3D, estímulo, material responsivo ao estímulo, mecanismo de interação e modelamento matemático.

Tabela 1: Bases da Impressão 4D

Bases da Impressão 4D				
<i>Facilidade de Impressão 3D</i>	<i>Estímulo</i>	<i>Material responsivo ao estímulo</i>	<i>Mecanismo de interação</i>	<i>Modelamento matemático</i>

Fonte: Momeni et al (2017)

Facilidade de impressão 3D: a impressão 4D é criada combinando diversos materiais na distribuição apropriada em uma estrutura única. As diferenças nas propriedades de cada material utilizado como coeficiente de expansão térmica, por exemplo, irão proporcionar a capacidade de mudança de forma desejável à impressão, por isso, a viabilidade da impressão 3D do projeto e do material interferirão diretamente no comportamento 4D do produto final.

Estímulo: Os estímulos precisam ser planejados já que estes que irão dizer

como será o comportamento de mudança de forma, propriedade ou funcionalidade do material, além de serem selecionados levando em consideração a aplicação específica do produto. Entre esses estímulos estão incluídos água, calor, uma combinação de calor e luz, etc;

Material responsivo ao estímulo: uma das bases mais críticas da impressão 4D. A resposta de cada grupo de materiais pode ser definida através de capacidade de cada um de tomada de decisão, responsividade, memória de forma, auto-adaptabilidade, multi-funcionalidade, etc. Ligas metálicas, polímeros, cerâmicas, gel e híbridos com memórias de forma são as classes de materiais usualmente utilizadas por apresentarem características viáveis para a impressão 4D: a capacidade de sofrerem deformação plástica evidente antes de chegarem à fratura e, principalmente, pela possibilidade de permanecerem em um estado metaestável com a aplicação de estímulo específico e, retornarem a um estado anterior mediante aplicação de outro estímulo.

Mecanismo de interação: Nem sempre o material tem uma resposta instantânea ao aparecimento do estímulo. Por algumas vezes, este estímulo deve ser aplicado em um determinado período de tempo e de uma determinada forma para se obter a resposta adequada do produto. Como por exemplo, para um material que possua memória de forma utilizando o calor como estímulo podemos ter um ciclo de 4 passos: primeiramente, o material é deformado através da aplicação de uma carga em uma alta temperatura, posteriormente a temperatura é reduzida e segue-se com a aplicação da carga, após isso a carga é retirada e então a forma desejada é finalmente obtida. Por último a forma anterior consegue ser alcançada novamente com um aumento de temperatura.

Modelamento matemático: o modelamento matemático se faz necessário para criar uma conexão entre o projeto desejado e o produto final da impressão. Este modelamento permite criar o *design* de mudança de forma, funcionalidade e propriedade do material e obter resultados previsíveis (Momeni et al, 2017).

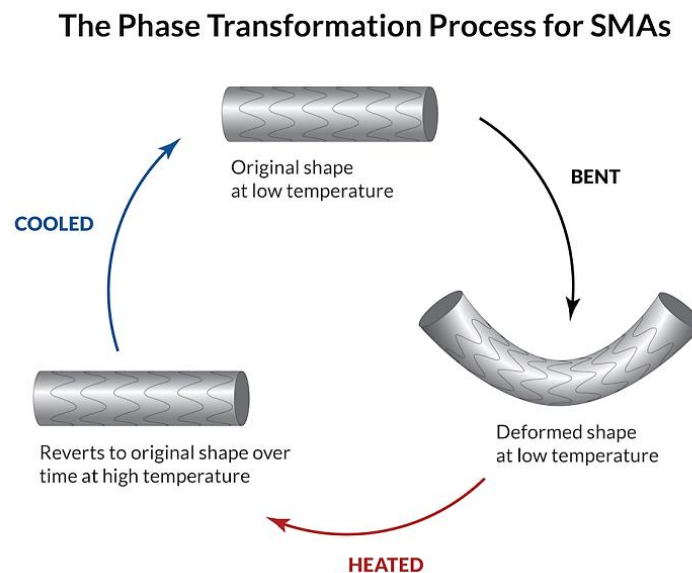
## **b. MATERIAIS UTILIZADOS**

Para a construção de estruturas de impressão 4D não são todos os materiais que possuem aplicabilidade desejada. Se faz imprescindível a capacidade de responder a estímulos externos.

Novos desenvolvimentos permitiram a obtenção desses materiais que possuem a capacidade de responder a estímulos externos, de forma mais específica, de se rearranjarem em resposta à temperatura, radiação UV, auto-degradação ou absorção de água (Vidim et al, 2013). A classe de materiais que possui essa capacidade de resposta é conhecida como materiais inteligentes, e estes podem ser divididos em duas subcategorias: *Shape Memory Materials* e *Shape Changing Materials*.

Os *Shape Changing Materials* são materiais que mudam sua configuração gradualmente com a aplicação de algum estímulo, enquanto que os *Shape Memory Materials*, subclasse essa de maior interesse como matéria-prima para Impressão 4D, mudam sua configuração com a aplicação de um estímulo e permanecem em um estado metaestável, até aplicação de um novo estímulo, como exemplificado na Figura 1. Dentro dessa classe, os SMP e os SMA são amplamente utilizados no processo.

Figura 1: Mecanismo de mudança de forma de uma SMA



Fonte: Comsol (2018)

O efeito de memória de forma não está relacionado unicamente a uma propriedade específica de um material, mas sim resulta da combinação de sua estrutura e morfologia associadas com o tipo de processamento aplicado e a tecnologia de programação.



Os polímeros com memória de forma (SMP), materiais que possuem a habilidade de deformar inelasticamente para criar formas metaestáveis temporárias em resposta a estímulos como mudança de luz, umidade ou temperatura (Choong et al, 2017) são a classe mais amplamente utilizada para a impressão 4D, devido à sua variedade de temperaturas de transição vítrea (de -70 até 100°C aproximadamente), permitindo com que a rigidez desses produtos possa ser controlada (Erkeçoğlu et al, 2016).

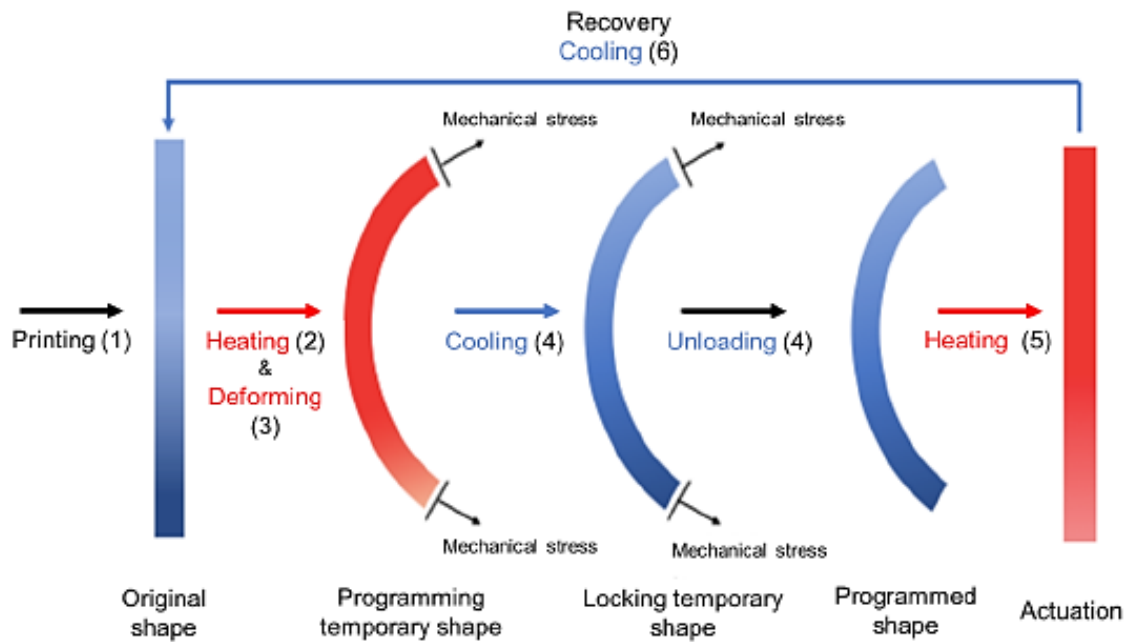
SMP's possuem um potencial de atingirem propriedade de recuperação de forma até 400% da deformação plástica, além de possuírem baixo custo, baixa densidade, biodegradabilidade e biocompatibilidade enquanto que ligas de memória de forma (SMA), por exemplo, apenas atingem de 7 – 8% de recuperação de deformação plástica, além destas possuírem parâmetros de processamento mais complexos, custos mais altos e maior toxicidade (Pei et al, 2018).

Já que, para processamentos comuns, SMP's ainda majoritariamente dependem de processos de polimerização e extrusão, a manufatura aditiva acaba se tornando um tipo de processamento interessante para sua utilização.

Os principais SMP's utilizados são os poliésteres, como o PLA, o PCL e o poliéster uretano (Miao et al, 2016). Grande parte das aplicações na manufatura aditiva vem da biocompatibilidade dos SMP's, podendo ser aplicados como suturas cirúrgicas, *stents* intravasculares ou limpadores de trombos.

Para que um SMP atinja um comportamento desejado de mudança de forma, require-se uma etapa de programação desse comportamento, como mencionado anteriormente, e, posteriormente, uma etapa de recuperação. Na etapa de programação, o SMP é primeiramente deformado em uma temperatura superior à uma temperatura de transição ( $T_t$ ), podendo ser a temperatura de fusão,  $T_m$ , para um polímero semicristalino ou a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para um polímero amorfo. Após isso, há uma redução de temperatura pra um valor abaixo de  $T_t$  e é retirada a carga aplicada. A mudança de forma do material é atingida através da etapa de recuperação, na qual o SMP é aquecido até uma temperatura superior a  $T_t$ , possibilitando que o material recupere sua forma original devido à elasticidade entrópica. Importante ressaltar que o aquecimento para mundaça de forma dos SMP pode ser feito através de aquecimento direto ou aquecimento indireto por efeito Joule, efeito fototérmico, efeito de histerese, da mesma forma que aquecimento remotamente controlado por campo magnético (Kuang, 2019).

Figura 2: Mecanismo termicamente-induzido de um SMP



Fonte: Bajpai et al, 2020

Os hidrogéis são cadeias poliméricas compostas por monômeros hidrofílicos. A rede vasta tridimensional em que as cadeias são dispostas fornece a propriedade à essa classe de materiais de absorção de grandes volumes de água sem dissolver. Isso os diferencia de polímeros de estado seco pois, após a absorção desses grandes volumes de água, eles podem reverter ao seu tamanho original (Zhang, 2018).

Devido à sua grande capacidade de absorção de água (gerando uma transformação de forma utilizando a umidade como estímulo) e sua natureza biomimética, os hidrogéis têm grande aplicação para usos médicos como sistemas de distribuição de medicamentos, por exemplo, músculos artificiais, ou também produzir estruturas que são similares à ambientes celulares, imitando tecidos corporais com ótima eficiência (Highley et al, 2015).

Os hidrogéis possuem propriedades desinteressantes para seu processamento através de manufatura aditiva, por possuírem uma baixa resistência mecânica, baixo módulo de Young e altos períodos de resposta, atribuídos ao fato de seu mecanismo de inchamento ser realizado principalmente através de difusão. Devido a isto, geralmente são combinados com polímeros de estado seco para formar estruturas rígidas e de processamento mais simples (Bajpai et al, 2018)

Outra classe de materiais interessante são as ligas com memória de forma (SMA). Estas são materiais que possuem uma estrutura martensítica em baixas

temperaturas, estrutura esta flexível e deformável, originando uma estrutura austenítica em altas temperaturas. Com a utilização de um estímulo termomecânico (resfriando-se ou retirando a carga do material) é possível flutuar entre essas duas estruturas, dependendo dos requisitos da aplicação (Khoo et al, 2015). Uma das ligas mais utilizadas para a impressão 4D é a liga Nitinol (uma liga níquel-titânio, com aproximadamente 50% do peso em níquel e 50% do peso em titânio) por apresentar uma propriedade conhecida como superelasticidade, caracterizada pela alta taxa de recuperação elástica da liga quando se é retirada a carga. A transformação da forma martensítica causa deformações espontâneas recuperáveis, fornecendo ao material uma “memória de forma”. Como mencionado anteriormente, apesar dessas características, as SMA's ainda possuem um alto custo, um processamento mais complicado vindo da sua rigidez e baixa degradabilidade, o que às torna inviáveis para certas aplicações.

Comparando-se a funcionalidade de SMA's e SMP's, os SMP's possuem uma densidade muito menor em comparação ao primeiro grupo o que resulta em produtos finais com estruturas mais leves, permitindo aplicação, por exemplo em tecnologia aeroespacial e na superfície interior de automóveis. O processamento de SMP's também é muito mais barato e, em sistemas tradicionais ou avançados, formas complexas conseguem ser facilmente atingidas com alta qualidade e acurácia dimensional (Huang et al, 2018). A ampla variedade de TG (-125 – 200°C) para SMP's também facilita seu processamento de impressão 4D. Além disso, SMP's tem uma recuperação de deformação 400% maior que os SMA's.

SMP's e hidrogéis com memórias de forma são, segundo Zafar et al, 2019, considerados os melhores materiais para impressão 4D.

As limitações inerentes impostas à certas classes de materiais individuais podem ser superadas através da combinação dos mesmos, gerando um material compósito com memória de forma (SMC) mais promissor. Como exemplo temos que na Universidade de Hanyang foi realizado um estudo em 2018 para a produção de *stents* e controladores de válvula utilizando-se um compósito de Nylon 12 com Nitinol (Kang et al, 2018) e também Tobushi et al fabricou um atuador utilizando uma liga SMA NiTi (níquel – titânio) embutido em uma matriz de poliuretano.

Os biomateriais também são uma classe extremamente interessante quando se pensa em manufatura aditiva. Materiais funcionais que possuam alguma capacidade de interação com o corpo humano já vêm sendo pesquisados desde 1990

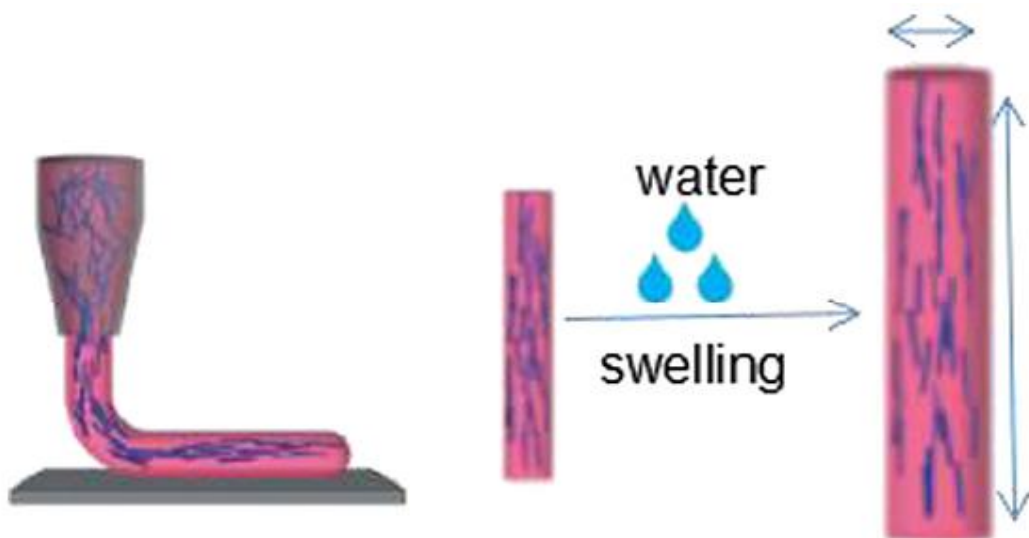
para impressão 3D. Como o corpo humano é composto por diferentes ambientes, com diferentes condições, e sistemas com alta dinamicidade, as estruturas impressas com biomateriais também devem possuir essa capacidade de apresentar sua funcionalidade em diferentes situações *in vivo*, devendo se degradar de acordo com a sua programação em um período pré-determinado de tempo. Para que essa degradação ocorra, é necessário controlar o processo de corrosão e oxidação em ambientes úmidos e secos, respectivamente, desses materiais. Biomateriais responsivos à umidade, temperatura ou radiação ultravioleta possuem tempos de degradação que podem variar desde segundos até dias dentro do corpo. Alguns biomateriais amplamente utilizados são o PLA e o PCL, ambos possuem tempos de degradação de até anos para que a cadeia polimérica dissolva-se completamente dentro do corpo humano (Choi et al, 2015).

### c. MECANISMOS DE MUDANÇA DE FORMA

#### i. Comportamento de Inchamento

O inchaço é um comportamento básico de deformação apresentado nos materiais de impressão 4D que consiste basicamente no aumento (ou diminuição de tamanho) da estrutura do material em todas as direções quando submetido a algum estímulo externo (Ding et al, 2018).

Figura 3: Mecanismo de inchamento apresentado por um hidrogel quando imerso em água



Fonte: Ding et al, 2018

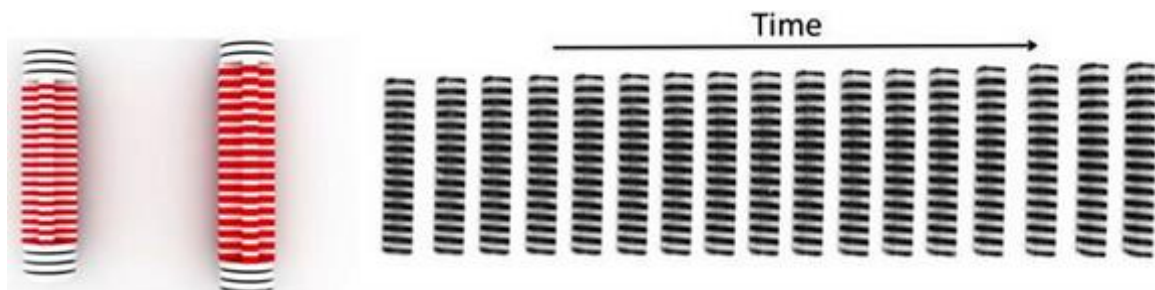
Como é possível observar na Figura 2, os compósitos de hidrogel costumam apresentar um comportamento de inchamento em contato com água (nesse caso, o hidrogel é composto por fibras de celulose envolvidas em uma matriz de acrilamida) (Sidney, 2016).

O principal pilar que determina o comportamento de inchamento de um material baseia-se nas forças interativas entre o polímero e a água. De maneira simples, quanto mais hidrofílica é a estrutura polimérica do hidrogel, maior a interação polímero-água (Omidian et al, 2010). Hidrogéis com grupos funcionais hidrofílicos incham na presença de água apenas com a força dessa interação, e se os hidrogéis possuem grupos iônicos em sua estrutura, a osmose é gerada por esses íons devido à diferença de concentração dentro do gel e da solução exterior. Quanto maior a diferença de concentração, mais se torna a pressão osmótica.

De maneira geral, as três forças: interação polímero-água, força eletrostática e osmose são responsáveis pela expansão na estrutura desses materiais, gerando o inchamento.

## ii. Comportamento de Alongamento

Figura 4: Comportamento de alongamento



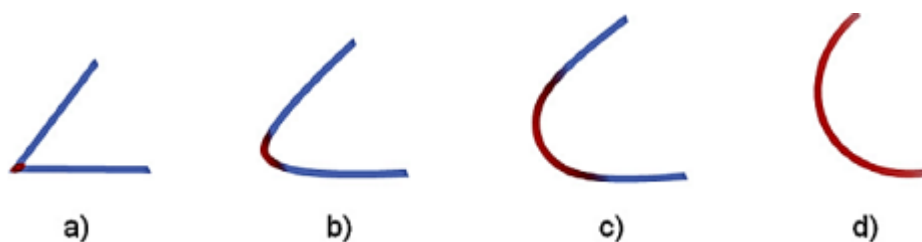
Fonte: Ding et al, 2018

O comportamento de alongamento de materiais para impressão 4D encontra-se representado na Figura 4: nela, são representados discos rígidos de materiais expansíveis. Através do controle do raio de cada um dos discos é possível controlar também a alteração de tamanho da estrutura dentro de um determinado período de tempo.

O alongamento nos materiais pode ser explicado pelo mecanismo de memória de forma anteriormente trabalhado: o material em sua forma inicial

## iii. Comportamento de Dobramento (*Folding e Bending*)

Figura 5: *Folding e Bending*



Fonte: Liu et al, 2016

Na Figura 5 estão representados os dois mecanismos de dobramento para um material de impressão 4D: *folding* e *bending*. Aproximando-se da representação d) nós temos um comportamento de *bending*, caracterizado por curvaturas mais suaves, enquanto que aproximando-se de a), temos um comportamento de *folding*, associado à curvaturas mais agudas (Liu et al, 2016).

Uma série de *folding* locais resulta em *bending*.

Na base de todas as técnicas de fabricação, temos um princípio guia: um padrão de tensão é imposto no material para forçá-lo a uma configuração “dobrada”. O que é impressionante, nesse caso, é o grande grau de controle que consegue ser obtido apenas com métodos simples de fabricação.

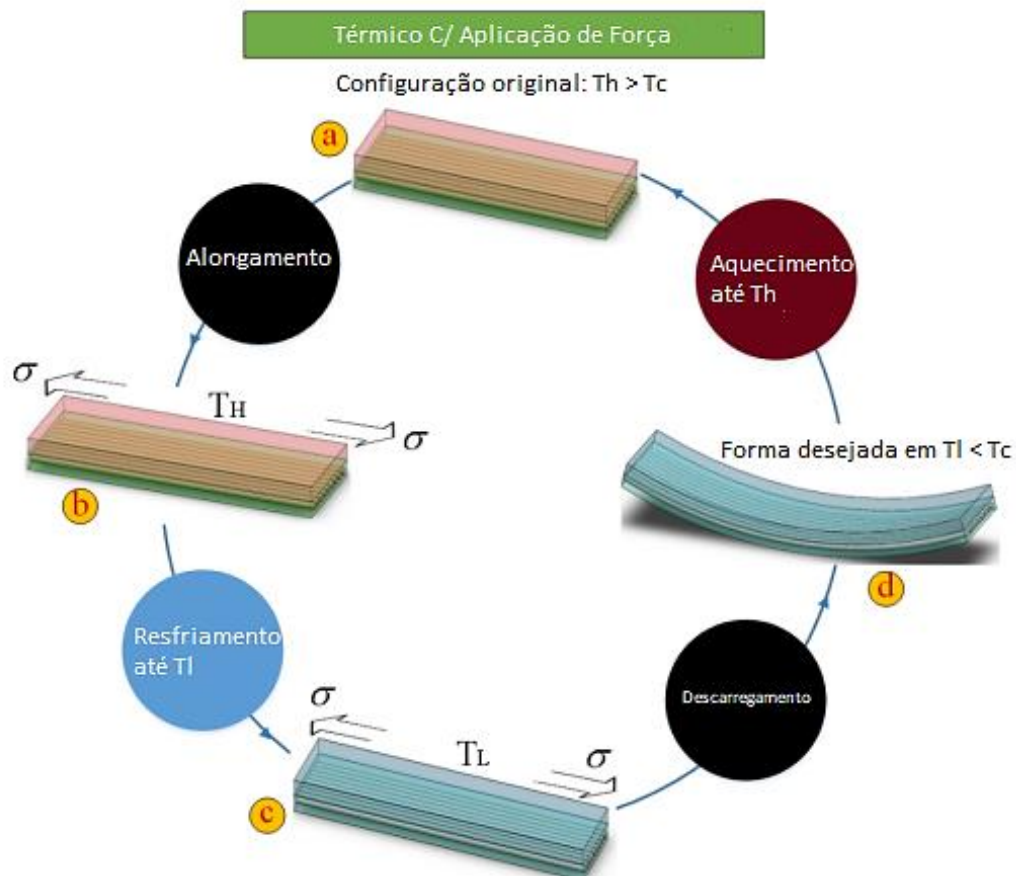
O mecanismo é relativamente simples: o material, ao ser aquecido localmente, o alívio de tensão acarreta o encolhimento do material, e quando propriamente projetado, dobramento.

#### d. ESTÍMULOS

Para que os materiais apresentem os mecanismos de mudança de forma trabalhados no item anterior, é necessário que haja a aplicação de um estímulo externo. A partir da aplicação desse estímulo, a mudança na configuração do produto é uma resposta ativada pela estrutura do material.

Aplicação de radiação UV, mudança de temperatura, pH ou umidade são possíveis estímulos que engatilham os mecanismos.

Figura 6: Mecanismo de mudança de forma térmico com aplicação de força



Fonte: Momeni et al, 2017

Na Figura 6 observa-se de maneira simples como ocorre a resposta a um estímulo térmico em conjunto com aplicação de tensão.

Em **a)** tem-se primeiramente o produto em sua configuração original, em uma temperatura  $T_h$ , acima de uma temperatura crítica  $T_c$ , que pode ser tanto  $T_g$  (temperatura de transição vítrea) quanto  $T_m$  (temperatura de fusão cristalina).

Aplica-se então uma força de tração, resultando-se em um material tensionado em **b)**.

O material é então resfriado até uma temperatura  $T_l$  congelando-se, dessa forma, as tensões em sua estrutura em **c)**.

Após isso, acontece o descarregamento das tensões e atinge-se a forma desejada para o produto em **d)** e, para que ocorra a recuperação da sua forma inicial, é necessário apenas um novo aquecimento até  $T_h$ , aliviando-se assim, as tensões residuais encontradas no material (Momeni et al, 2017).

As respostas à diferentes classes de estímulos acontecem de maneira semelhante, como um *feedback* da estrutura do material (Tabela 2).

Tabela 2: Classe e exemplos de estímulos

	Umidade
<b>Físicos</b>	Campo Elétrico
	Campo Magnético
	Temperatura
<b>Químicos</b>	pH
	Concetração Iônica
<b>Biológicos</b>	Enzimas
	Glicose

Fonte: Momeni et al (2017)

#### e. TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 4D

Para a realização de deposição de material em manufatura aditiva, pensando-se especificamente no caso da produção de materiais inteligentes de impressão 4D, as técnicas e métodos são similares às utilizadas para impressão 3D, com algumas modificações pensadas para satisfazer às condições de alteração de forma desses materiais. Por exemplo, é possível utilizar a técnica de FDM de deposição para impressão 4D adicionando-se um sistema de circulação de ar na impressora (Yang et al, 2016).

A técnica de FDM (*fused deposition modeling*) consiste na extrusão de um filamento de material fundido através de um bocal e posterior deposição de uma forma camada-a-camada. Essa técnica já é amplamente utilizada na impressão 3D e sua relativa simplicidade e baixo custo em relação às outras técnicas de manufatura aditiva permitem a produção de uma quantidade variada de produtos de impressão 4D como garras robóticas por exemplo (Yang et al, 2016). A maior desvantagem da técnica de FDM é que as estruturas produzidas não possuem um acabamento superficial muito interessante como de outras técnicas mais modernas.

A técnica de polimerização em cuba (*Vat Polymerization*) é uma técnica de manufatura aditiva que consiste na utilização de uma resina líquida fotopolimerizável, que é endurecida através do processo de cura camada-a-camada para chegar à estrutura 3D final.



Uma outra técnica de manufatura aditiva que se utiliza da luz em seu processo é DLP (*Digital Light Projection*). Nessa técnica é utilizado um DMD (*Digital Mirror Device*) que é composto por diversos espelhos em seu interior. Um padrão 2D de pixels é projetado no espelho, o que permite a a polimerização completa de toda a resina. Através da rotação do DMD é possível o corte da fonte de luz e o ligamento/desligamento do processo. O tempo de impressão é unicamente dependente da espessura da camada e do tempo de exposição, já que a camada inteira é curada de uma só vez (Melchels et al, 2010).

A estereolitografia (SLA) é uma outra técnica amplamente utilizada para manufatura aditiva que utiliza-se de processos fotoquímicos e de solidificação controlada de uma resina polimérica para a construção das camadas de deposição. Cada camada viscosa se solidifica através do processo de cura da resina polimérica dando origem a uma camada sólida. Uma das maiores desvantagens desse processo de deposição é a grande contração dimensional que segue-se na solidificação. Apesar disso, em relação à outros processos de deposição, a estereolitografia tem uma maior precisão e acurácia final das camadas.

Na técnica de DIW (*direct ink writing*) tem-se a utilização de materiais viscoelásticos na forma de tinta para a construção das camadas deposição. Para que essa técnica atinja seu máximo potencial em relação à qualidade do produto final e facilidade do processo de deposição, é necessário que as propriedades reológicas do material que está sendo impressão estejam sob um controle extremamente rígido. Hidrogeis, e polímeros com baixas viscosidades com domínios microcristalinos são possíveis de serem impressos através dessa técnica (Longyu et at, 2019).

## **f. PRINCIPAIS APLICAÇÕES**

Os produtos de impressão 4D podem ser aplicados nos mais diversos campos de tecnologia, enriquecendo ainda mais as possíveis aplicações de manufatura aditiva já vistas em impressão 3D. As áreas de robótica, aeroespacial e médica são as que mais se beneficiam desse tipo de processamento, considerando a necessidade de materiais de alta tecnologia e com funções extremamente específicas que todas elas requerem. Os produtos de manufatura aditiva possuem um alto custo comparados a processamentos mais tradicionais e também uma baixa produtividade, apresentando viabilidade de aplicação nas áreas de tecnologia de ponta.

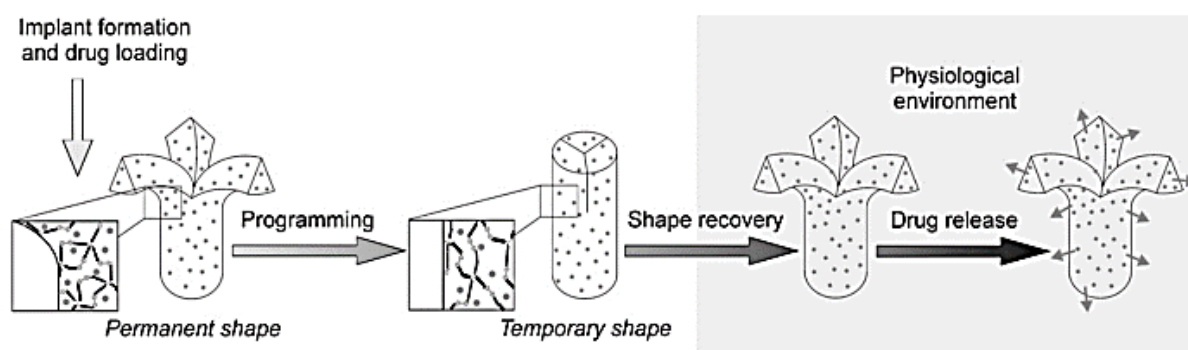
Na área médica, a impressão 4D é conhecida como “bioimpressão 4D” e tem-se apresentado como uma solução eficaz para diversas aplicações, como de sistemas de distribuição de medicamentos, regeneração de tecidos e próteses.

Segundo Shiet et al, 2019, alguns SMP que apresentam parâmetros interessantes de biodegradabilidade podem ser utilizados como sistemas de distribuição de drogas dentro do organismo. Um exemplo seria um dispositivo minimamente invasivo com proposta anti-inflamatória ou com o intuito de iniciar um processo de regeneração (Huang et al, 2018).

Na Figura 6 é possível observar esse tipo de aplicação: um material SMP utilizado como sistema de distribuição de drogas dentro do organismo. Se faz interessante pontuar que a capacidade de distribuição pensando em quantidade, tempo e outros parâmetros pode ser rigidamente controlada, permitindo que o material seja customizado de acordo com a necessidade de cada indivíduo.

Apesar da desvantagem da solubilidade da droga, foi identificado que o dispositivo necessita de doses bem menores que as administradas oralmente, além da possibilidade de se controlar a liberação da droga no corpo de maneira rápida ou em intervalos controlados, dependendo da necessidade (Wishcke et al, 2009).

Figura 7: Programação e esquema de um SMP de impressão 4D para liberação controlada de drogas



Fonte: Shiet et al, 2019

A engenharia de tecidos visa substituir tecidos danificados do corpo ou manter e melhorar suas funções através da combinação de culturas de células e *scaffolds* para gerar tecidos compatíveis com a estrutura humana. De acordo com Wong et al, 2014, os SMP possuem propriedades únicas que permitem sua utilização como *scaffolds*, integrando tecidos recentemente formados em ossos ou estruturas reais.

Esses SMP podem ser introduzidos no corpo humano de maneira pouco agressiva, não havendo a necessidade de cirurgias agressivas abertas, por exemplo.

Podem ser ativados através de estímulos externos, como temperatura ou umidade do ambiente, mudando sua configuração geométrica para a determinada pré-fabricação.

Falhas intestinais acontecem quando o corpo do indivíduo não consegue promover o crescimento do intestino e manter seu peso normal, acarretando em alterações na homeostase corpórea devido ao tamanho reduzido da massa intestinal. Uma forma inovadora de se lidar com essas falhas intestinais se dá com a utilização de SMP's induzindo regeneração e crescimento do intestino através da aplicação de tensões mecânicas neste. Segundo Fisher et al, 2015, a introdução de SMP no intestino possibilita a introdução de tensões mecânicas e alongamento que promovem o crescimento de tecidos intestinais que apresentam características similares ao tecido nativo.

Na área de cosmetologia, a tecnologia de manufatura aditiva permitiu a fabricação de tecidos para cuidados com a pele: SMPs que possuem a habilidade de mudança forma, voltando à sua forma original após estímulo externo. De acordo com Shie et al, 2019 cosmetotêxteis são tecidos que contém em sua estrutura uma substância ativa com propriedades de cuidado com a pele que é liberada ao contato com o corpo da maneira desejada.

Os produtos de cuidado com a pele são preparados através da utilização de aroma, diferentes tipos de amaciantes de pele, materiais com memória de forma que visam auxiliar na termorregulação do corpo, e também agentes químicos antibacterianos. Em conjunto, eles possuem a função de entregar substâncias farmacêuticas para o nosso corpo.

Aplicações em angiografia também são de extremo interesse atualmente. Angiografia consiste no procedimento médico de introduzir *stents* de material compatível no interior dos vasos sanguíneos humanos com o objetivo de localizar e posteriormente tratar as regiões que estão bloqueadas por placas de gordura ou qualquer outro tipo de oclusão. Usualmente, esses *stents* podem ser fabricados em aço inoxidável, mas esse material é extremamente vulnerável à deformação conforme o caminho dentro dos vasos se torna mais complicado.

Com a utilização de materiais inteligentes, como o nitinol, por exemplo, se tornou possível a produção de *stents* a partir de manufatura aditiva. Os *stents* de

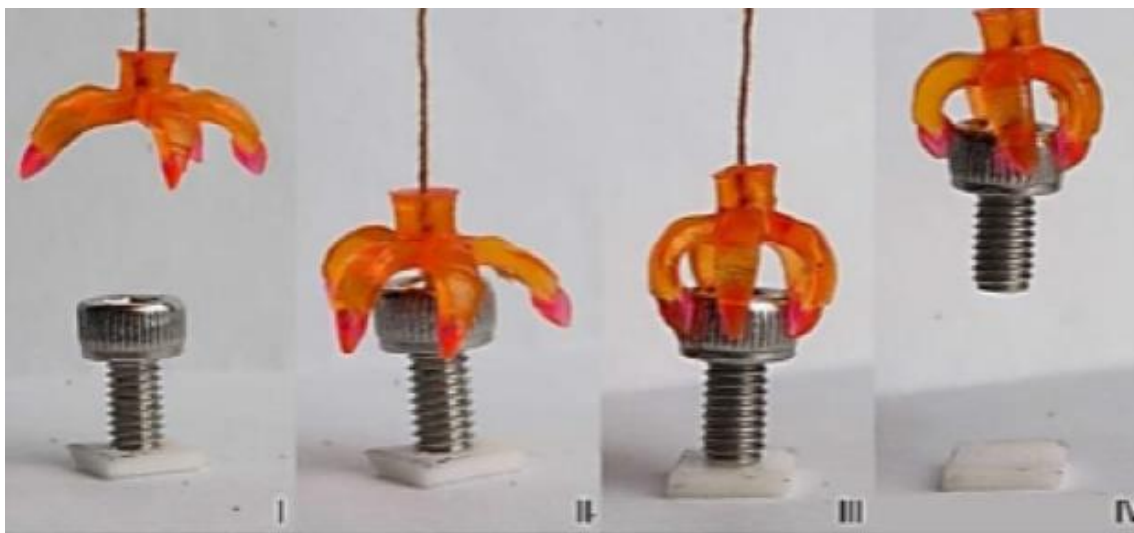
nitinol possuem uma notável resistência à torção e uma boa elasticidade e flexibilidade (Morgan et al, 2004), permitindo uma maior facilidade de aplicação na angiografia.

Na tecnologia aeroespacial, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas visando a aplicação de SMA's e SMP's. Como por exemplo a utilização de SMP's para fabricação de antenas para satélites (Ishizawa et al, 2003).

Na robótica as últimas tendências estudadas dizem respeito ao desenvolvimento de robôs feitos de materiais extensíveis e mais “macios”. Esses robôs mais flexíveis são capazes de realizar movimentos complexos com uma maior facilidade. Tecnologias de impressão 4D são utilizadas para imprimir tintas compostas por polímeros líquidos cristalinos reticulados que, quando expostos ao estímulo de temperatura adequados, fazem com que essas tintas possam gerar atuadores complexos com funcionalidade na robótica.

Joshi et al (2019) apresenta estudos desenvolvidos para construir garras robóticas com a utilização de materiais com memória de forma. Essas garras são extremamente ágeis e possuem a capacidade de lidar com uma variedade muito interessante de objetos.

*Figura 8: Garras robóticas produzidas por impressão 4D.*



Fonte: Joshi et al, 2019

Segundo Tibbits, futuras aplicações da Impressão 4D consistirão de produtos programáveis que serão projetáveis pra responder a um ou conjunto diverso de estímulos como temperatura, umidade, pressão, ou até som. Tibbits também

menciona a vantagem da impressão 4D para aplicação em embalagens de produtos de expedição: permitirá que esses produtos tenham sua embalagem inicialmente plana para que, mais tarde, esta configuração seja alterada para o design planejado no local através da aplicação de um estímulo. Também há a possibilidade de produção de containers de carga de navios, que reagem com forças durante o transporte para distribuir as cargas de maneira mais uniforme.

## **2. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A impressão 4D é um método de processamento avançado que combina a liberdade de criação da manufatura aditiva convencional com a capacidade de resposta inteligente a estímulos dos materiais com memória de forma.

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.

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.

Além disso, a comercialização de produtos de impressão 4D é dificultada. Isso se dá principalmente porque a produção dos materiais inteligentes é muito mais custosa que materiais convencionais.

Enquanto muito desses desafios devem ser o alvo de pesquisa intensiva, também deve ser levado em consideração que a impressão 4D ainda se encontra em um estado embrionário e precisa de uma significativa quantidade de esforços para futuro desenvolvimento.

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.

#### 4. REFERÊNCIAS

CAMPBELL, Ian; BOURELL, DAVID; GIBSON, Ian. (2012), "**Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age**", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss 4 pp. 255 - 258. Disponível em: <  
[https://www.researchgate.net/publication/263593130\\_Additive\\_manufacturing\\_Rapid\\_prototyping\\_comes\\_of\\_age](https://www.researchgate.net/publication/263593130_Additive_manufacturing_Rapid_prototyping_comes_of_age)>. Acesso em: 14 set. 2021.

ALI Ahmed; Abdussalam & Musbah; Ali & Atiyah, Abdelrazag. (2020). **4D Printing Technology: A Revolution Across Manufacturing**. 7. 45-51.. Disponível em: <  
[https://www.researchgate.net/publication/339662414\\_4D\\_Printing\\_Technology\\_A\\_Revolution\\_Across\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/339662414_4D_Printing_Technology_A_Revolution_Across_Manufacturing)>. Acesso em: 14 set. 2021.

HUANG, Limei et al. **Ultrafast digital printing toward 4D shape changing materials**. *Advanced materials*, v. 29, n. 7, p. 1605390, 2017. Disponível em: <  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2399-7532/aac322/meta>>. Acesso em: 15 set. 2021.

MOMENI, Farhang; MEHDI Seyed M; N., Hassani; LIU, Xun; NI, Jun. **A Review of 4D Printing**. *Material & Design*, v. 122, pages 42-79, 2017. Disponível em <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517302034>>. Acesso em: 20 set. 2021.

CHOONG, Yu Ying Clarrisa et al. **4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography**. *Materials & Design*, v. 126, p. 219-225, 2017. Disponível em  
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517304069>>. Acesso em: 20 set. 2021.

ERKEÇOĞLU, Sera; SEZER, Ali Demir; BUCAK, Seyda. **Smart delivery systems with shape memory and self-folding polymers. Smart drug delivery system**, p. 30, 2016. Disponível em < [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TmqQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=\(Erke%C3%A7o%C4%9Flu+et+al,+2016\).+&ots=2bH9IRoKdy&sig=N0eCWVPIInQqYlu7wgppYVI9leeg](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TmqQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=(Erke%C3%A7o%C4%9Flu+et+al,+2016).+&ots=2bH9IRoKdy&sig=N0eCWVPIInQqYlu7wgppYVI9leeg)>. Acesso em: 20 set. 2021.

PEI, Eujin; LOH, Giselle Hsiang. **Technological considerations for 4D printing: an overview**. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 3, n. 1, p. 95-107, 2018. Disponível em < <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-018-0047-1>>. Acesso em: 20 set 2021.

MIAO, Shida et al. **4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate**. *Scientific reports*, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep27226>. Acesso em: 01 out. 2021.

LUIS, Eric et al. **3D printed silicone meniscus implants: Influence of the 3D printing process on properties of silicone implants.** *Polymers*, v. 12, n. 9, p. 2136, 2020. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/831446>>. Acesso em: 01 out. 2021.

ZHANG, Lu; LOU, Yimin; SCHUTYSER, Maarten Al. **3D printing of cereal-based food structures containing probiotics.** *Food structure*, v. 18, p. 14-22, 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213329118300893>>. Acesso em: 01 out. 2021.

HIGHLEY, Christopher B.; RODELL, Christopher B.; BURDICK, Jason A. **Direct 3D printing of shear-thinning hydrogels into self-healing hydrogels.** *Advanced Materials*, v. 27, n. 34, p. 5075-5079, 2015. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201501234>>. Acesso em: 10 out. 2021.

KHOO, Zhong Xun et al. **3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing.** *Virtual and Physical Prototyping*, v. 10, n. 3, p. 103-122, 2015. Disponível em: < <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2015.1097054>>. Acesso em: 10 out. 2021.

WU, Jing-Jun et al. **4D printing: history and recent progress.** *Chinese Journal of Polymer Science*, v. 36, n. 5, p. 563-575, 2018. Disponível em: < <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10118-018-2089-8.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2021.

KANG, Minkyu et al. **Design of a shape memory composite (SMC) using 4D printing technology.** *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 283, p. 187-195, 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717323270>>. Acesso em: 20 out. 2021.

CHOI, Jin et al. **4D printing technology: A review.** *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 2, n. 4, p. 159-167, 2015. Disponível em: < <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/3dp.2015.0039>>. Acesso em: 20 out. 2021.

KUANG, Xiao et al. **Advances in 4D printing: Materials and applications.** *Advanced Functional Materials*, v. 29, n. 2, p. 1805290, 2019. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201805290>>. Acesso em: 01 nov. 2021

LI, Nanya; LI, Yingguang; LIU, Shuting. **Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 238, p. 218-225, 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616302515>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

YANG, Yang et al. **3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 9, p. 2079-2095, 2016. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7843-2>>. Acesso em 01 nov. 2021.

Melchels, F.P.W., Feijen, J., Grijpma, D.W., 2010. **A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering.** *Biomaterials* 31, 6121-6130. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20478613/>>. Acesso em: 01 nov 2021.

LI, Longyu et al. **Advanced polymer designs for direct-ink-write 3D printing. Chemistry—A European Journal**, v. 25, n. 46, p. 10768-10781, 2019. Disponível em: < <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/chem.201900975>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

WONG, Julielynn Y.; PFAHNL, Andreas C. **3D printing of surgical instruments for long-duration space missions. Aviation, space, and environmental medicine**, v. 85, n. 7, p. 758-763, 2014. Disponível em: < <https://www.ingentaconnect.com/content/asma/ase/2014/00000085/00000007/art00013>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

CHILDERS, Erin P. et al. **3D printing of resorbable poly (propylene fumarate) tissue engineering scaffolds. Mrs Bulletin**, v. 40, n. 2, p. 119-126, 2015. Disponível em: < <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/3d-printing-of-resorbable-polypropylene-fumarate-tissue-engineering-scaffolds/CABFF7EDBBDA0D16601DA0654AEB9525>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

JIMENEZ, Edgar Mendoza et al. **Parametric analysis to quantify process input influence on the printed densities of binder jetted alumina ceramics. Additive Manufacturing**, v. 30, p. 100864, 2019. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419307821>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

Y. Liu, J. Genzer, M.D. Dickey, “**2D or not 2D**”: **Shape-programming polymer sheets, Progress in Polymer Science**, 52 (2016) 79-106. Disponível em: < <https://people.engr.ncsu.edu/jgenzer/pubs/pub-16-01.pdf>> . Acesso em: 10 nov. 2021.

Wischke, C.; Neffe, A.T.; Steuer, S.; Lendlein, A. **Evaluation of a degradable shape-memory polymer network as matrix for controlled drug release.** *J. Control. Release* 2009, 138, 243–250. [CrossRef] [PubMed]. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19470395/>>. Acesso em: 10 nov. 2021.



Melchels, F.P.; Feijen, J.; Grijpma, D.W. **A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering.** *Biomaterials* 2010, 31, 6121–6130. [CrossRef]. Disponível em: <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142961210005661>>. Acesso em: 10 nov. 2021.