

APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA 3D NA INOVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS TÊXTEIS

APPLICATIONS OF 3D TECHNOLOGY IN THE INNOVATION AND DEVELOPMENT OF TEXTILE MATERIALS

Allan Matheus Silva Barbosa¹, ORCID ID:0009-0006-7116-6800

Clovis de Medeiros Bezerra¹, ORCID ID:0009-0004-7093-5028

Maria Gorete Felipe¹, ORCID ID:0009-0001-6797-6169

Silvagner Adolfo Veríssimo¹, ORCID ID:0009-0006-1660-3414

¹-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dept. de Engenharia Têxtil, Natal-RN, BRASIL

RESUMO: Este trabalho é uma revisão sistemática da literatura científica publicada entre 2019 e 2024, que investiga o impacto da tecnologia de impressão 3D na indústria têxtil. A análise abrangeu as contribuições da manufatura aditiva em diversas dimensões, incluindo design, funcionalidade, sustentabilidade e personalização de produtos. O estudo explorou os princípios da impressão 3D e seus principais métodos – Modelagem por Deposição Fundida (FDM), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Escrita Direta a Tinta (DIW), Estereolitografia (SLA) e Processamento Digital de Luz (DLP) – assim como os materiais mais empregados na produção têxtil. A análise detalhou os avanços propiciados pela tecnologia, tais como a inovação no design, funcionalidade dos tecidos, otimização da eficiência produtiva, redução do desperdício, e transformação de setores como a moda e a produção de têxteis técnicos. O estudo também avaliou o potencial da impressão 3D para uma produção mais sustentável, considerando a economia circular, a mitigação de impactos ambientais e o apoio à produção local. Adicionalmente, a pesquisa identificou os desafios e limitações da tecnologia. Conclui-se que a impressão 3D apresenta um potencial transformador para o setor têxtil, apesar das barreiras existentes. Recomenda-se, portanto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais e processos, bem como em capacitação profissional, para acelerar a adoção e o avanço da tecnologia na indústria.

Palavras-chave: Impressão 3D têxtil, Manufatura Aditiva, Impressão 3D de vestuário, Design de impressão 3D.

ABSTRACT: This work, a systematic review of the scientific literature published between 2019 and 2024, its investigates the impact of 3D printing technology on the textile industry. The analysis encompassed the contributions of additive manufacturing across several dimensions, including product design, functionality, sustainability, and personalization. The study explored the principles of 3D printing and its main methods—Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Ink Writing (DIW), Stereolithography (SLA), and Digital Light Processing (DLP)—as well as the materials most commonly employed in textile production. The analysis detailed the advancements enabled by the technology, such as innovation in design, enhanced fabric functionality, optimization of production efficiency, waste reduction, and transformation of sectors like fashion and technical textiles production. The study also evaluated the potential of 3D printing for more sustainable production, considering the circular economy, the mitigation of environmental impacts, and the support of local production. Furthermore, the research identified the challenges and limitations of the technology. It concludes that 3D printing presents transformative potential for the textile sector, despite existing barriers. It is therefore recommended that investments be made in research and development of materials and processes, as well as in professional training, to accelerate the adoption and advancement of the technology in the industry.

Keywords: 3D printing textile, Additive Manufacturing, 3D printing clothing, 3D printing design.

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é um dos pilares da economia global, e tem sido caracterizada por seu dinamismo e capacidade de inovação (CHATTERJEE, GHOSH, 2020). Desde a produção de fibras, fios, tecidos, não-tecidos, malhas e vestuário básico até aplicações em áreas técnicas como saúde, esportes e transporte, o setor têxtil tem se mostrado bastante ajustado às demandas sociais e econômicas. No entanto, diante da crescente preocupação com o impacto ambiental e da demanda por produtos personalizados, a indústria têxtil enfrenta o desafio de se reinventar. Nesse contexto, a tecnologia de impressão 3D surge como uma promissora ferramenta de transformação, oferecendo um caminho para a inovação e a sustentabilidade (MANAIA, CEREJO, DUARTE, 2023).

A manufatura aditiva, conhecida também como impressão 3D, refere-se a processos que constroem objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, adicionando material camada por camada (FRANCO URQUIZA, 2024). Essa tecnologia, que iniciou sua trajetória no setor de prototipagem, evoluiu para um meio de produção em diversas áreas, como a aeroespacial, automotiva, de saúde e, mais recentemente, a têxtil (XIAO, KAN, 2022). Na indústria têxtil, a impressão 3D apresenta um enorme potencial para revolucionar como os têxteis são produzidos, projetados e personalizados (ZHANG, DENG, 2021).

O objetivo geral deste estudo é analisar as contribuições da tecnologia 3D para a produção de têxteis, identificar e avaliar os avanços em design, funcionalidade, sustentabilidade e personalização. Os objetivos específicos incluem: explorar os princípios e métodos de impressão 3D relevantes para o setor têxtil; investigar os materiais utilizados na impressão de têxteis; analisar as contribuições da tecnologia para a inovação, funcionalidade e sustentabilidade; avaliar os desafios e limitações da impressão 3D na produção têxtil; e identificar tendências futuras para a tecnologia.

1.1 Metodologia

O presente estudo é uma revisão da literatura científica, com foco na análise das contribuições da tecnologia 3D na área têxtil. A pesquisa abrangeu artigos científicos publicados nos últimos 5 anos (2019 a 2024), buscando identificar os principais avanços, desafios e tendências na aplicação da impressão 3D no setor têxtil.

2

A busca dos artigos foi realizada em bases de dados científicas relevantes para a área, como a Web of Science, Scopus, ScienceDirect e Google Scholar, utilizando uma combinação de palavras-

chave e termos de busca. Foram encontrados um total de 358 artigos, sendo selecionados 97 para leitura completa, após a análise dos títulos e resumos. A seguir, aplicaram-se os critérios de inclusão e exclusão definidos: - **Critérios de Inclusão:** a) Artigos científicos originais, publicados em revistas indexadas e revisadas; b) Com o tema tecnologia de impressão 3D na indústria têxtil; c) Com foco na produção de têxteis, funcionalidades, design, sustentabilidade e personalização; d) Publicados no período de 2019 a 2024, em inglês, português ou espanhol. - **Critérios de Exclusão:** a) Artigos sobre impressão 3D em outros setores; b) Outras tecnologias de produção; c) Artigos sem resultados e dados empíricos; d) Resumos de congressos, revisões de livros, notas, artigos de opinião, editoriais ou similares.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, selecionou-se 29 artigos que foram analisados em profundidade para a elaboração deste trabalho. A análise dos artigos incluiu a identificação dos principais métodos de impressão 3D utilizados na área têxtil, os materiais utilizados, as contribuições da tecnologia para a inovação, funcionalidade e sustentabilidade e as principais limitações e desafios da tecnologia.

A estrutura do trabalho compreende esta introdução, seguida por seções que abordam os fundamentos da impressão 3D, suas contribuições para a produção de tecidos, o impacto na sustentabilidade e os desafios e limitações da tecnologia. Ao final, serão apresentadas as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

2. FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA 3D E SUA APLICAÇÃO NA ÁREA TÊXTIL

2.1 Princípios da Manufatura Aditiva (Impressão 3D)

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, revolucionou como os objetos são produzidos, baseando-se na construção tridimensional através da adição sequencial de material (FRANCO URQUIZA, 2024). Diferentemente dos processos subtrativos, que removem material de um bloco sólido, a impressão 3D deposita material camada por camada, a partir de um modelo digital, permitindo a criação de geometrias complexas e personalizadas. Este processo não apenas elimina o desperdício de material, mas também oferece uma flexibilidade sem precedentes em termos de design e produção.

3

O processo de impressão 3D começa com a elaboração de um modelo tridimensional utilizando um software de design assistido por computador (CAD). Em seguida, esse modelo é

dividido em camadas bidimensionais, as quais orientam a impressora durante a deposição sequencial do material (HUNDE, WOLDEYOHANNES, 2022). Por meio de um bico de extrusão, de um laser ou de outro mecanismo, a impressora aplica o material conforme as diretrizes do modelo, permitindo a construção do objeto final camada por camada, conforme ilustrado na figura 1. Essa abordagem torna viável a criação de estruturas complexas que seriam difíceis ou até impossíveis de serem fabricadas por métodos tradicionais.

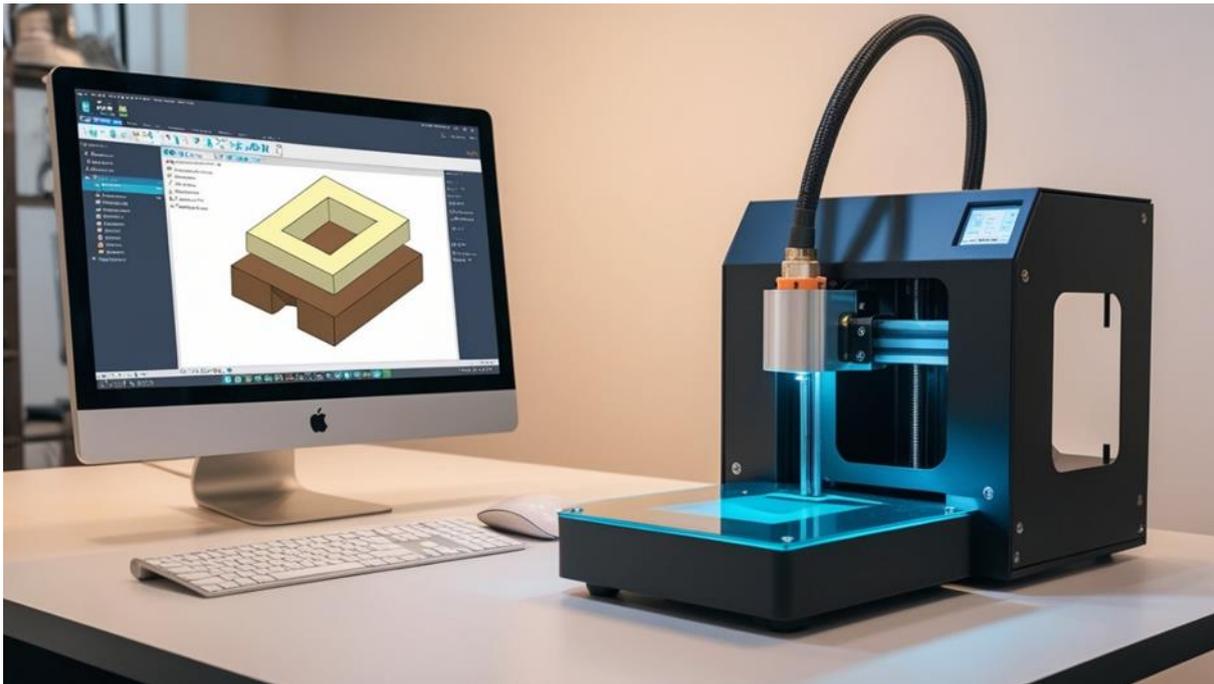


Figura 1. Sistema genérico de impressão 3D (autoral).

2.2. Métodos de Impressão 3D Relevantes para o Setor Têxtil

Diversas técnicas de impressão 3D têm demonstrado relevância para o setor têxtil, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas. As mais utilizadas incluem:

- **Modelagem por Deposição Fundida (FDM):** Esta técnica é a mais acessível e a mais utilizada; ela usa filamentos termoplásticos que são aquecidos e extrudados através de um bico, depositando seu material em camadas, conforme a figura 2. É adequada para estruturas mais rígidas e semirrígidas e, em geral, utilizada na construção de protótipos e peças de vestuário com topologias geométricas complexas (ALI, DEIAB, PERVAIZ, 2024). A exatidão e a velocidade de deposição podem ser ajustadas para as necessidades específicas do projeto.

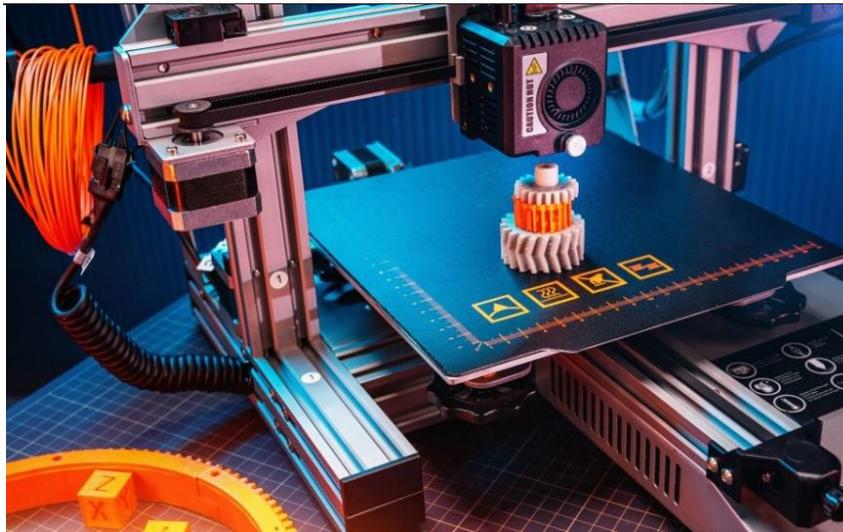


Figura 2: Imagens do processo de impressão FDM (autoral).

• **Sinterização Seletiva a Laser (SLS):** A técnica de SLS emprega um laser a fim de fundir partículas de polímero em pó, criando objetos camada por camada, conforme ilustrado na figura 3. Essa metodologia se apresenta como adequada ao processo de obtenção de estruturas complexas e resistentes, evitando a necessidade de suportes adicionais (ZHANG, ZHOU, FENG, 2025). A SLS é utilizada para a confecção de peças técnicas e funcionais, como calçados e acessórios com alta resistência mecânica.

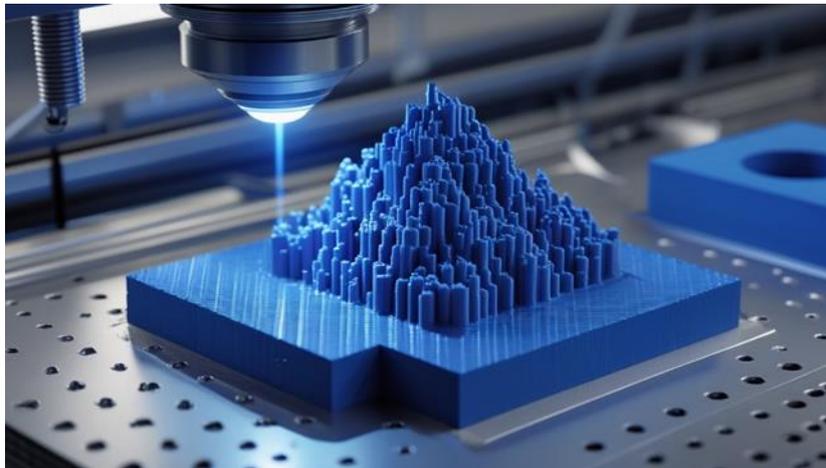


Figura 3. Imagem processo de impressão SLS: laser fundindo partículas de polímero em pó criando um objeto (autoral).

• **Escrita Direta à Tinta (DIW):** A DIW consiste na extrusão de materiais em forma de pasta ou gel, depositando-os em camadas para formar o objeto, figura 4. Essa técnica é adequada para a produção de tecidos flexíveis e adaptáveis, e para a integração de componentes eletrônicos em

estruturas têxteis (SAADI et. al., 2022). A versatilidade da DIW permite a utilização de diversos materiais, desde polímeros até materiais condutores.

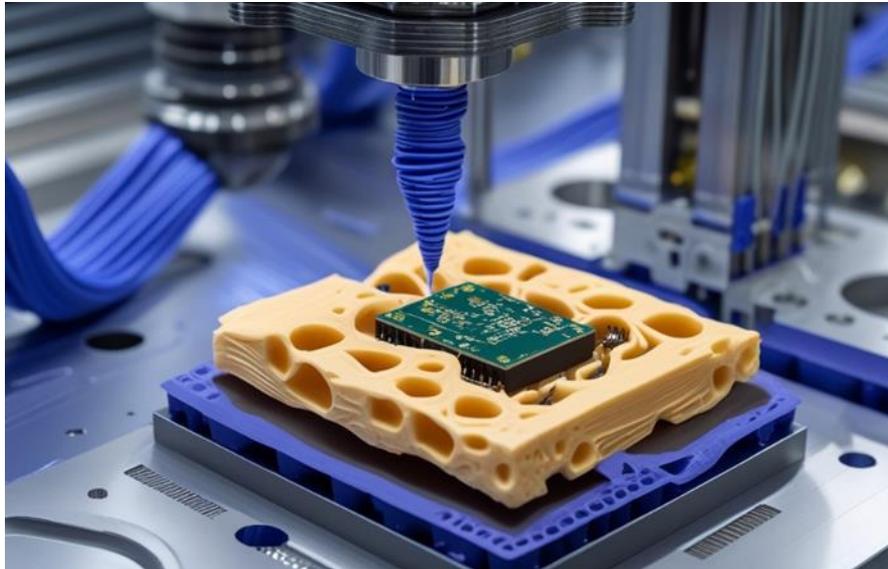


Figura 4. Imagem processo de impressão DIW: extrusão de tinta com grafeno criando um circuito eletrônico (autoral)

• **Estereolitografia (SLA) e Processamento Digital de Luz (DLP):** Estas técnicas utilizam resinas líquidas fotossensíveis, endurecidas por meio de luz ultravioleta, figura 5. A SLA usa um laser para solidificar a resina, enquanto a DLP utiliza um projetor. Ambas as técnicas são adequadas para a criação de peças com alta precisão e resolução, sendo utilizadas na produção de acessórios e componentes com detalhes intrincados (LI et. al., 2024).

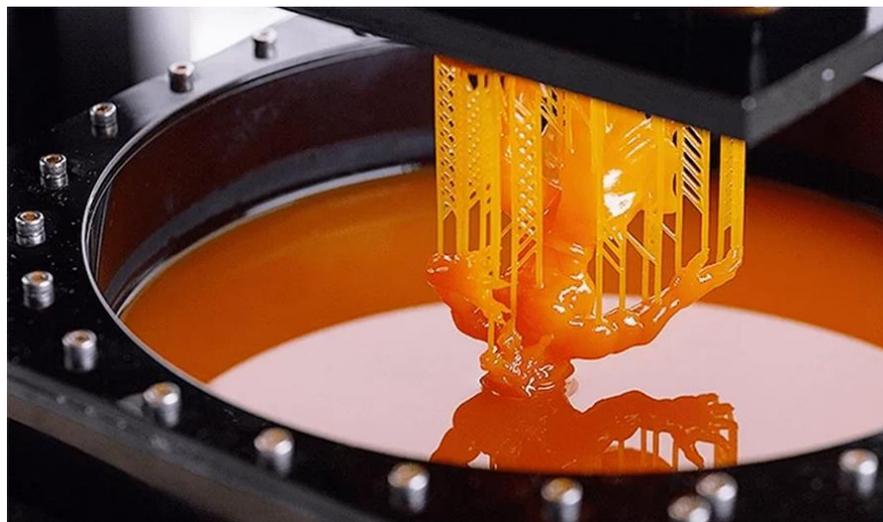


Figura 5. Imagem do processo de impressão SLA (WISHBOX, 2024).

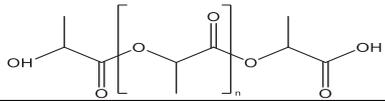
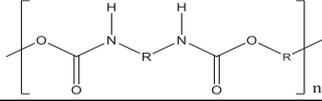
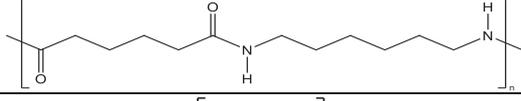
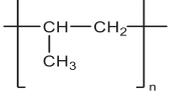
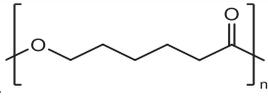
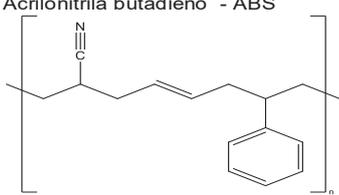
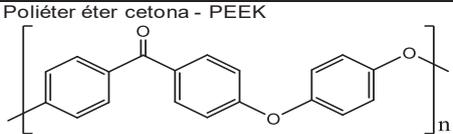
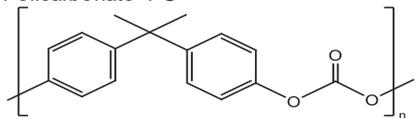
Além destas, outras como o PolyJet, uma técnica de Jato de Material que imprime gotas de material fotopolimerizável, e impressão com ligantes Binder Jetting, baseada no uso de um ligante que une as partículas de pó, também possuem potencial em aplicações têxteis, embora menor.

2.3. Materiais para Impressão 3D Têxtil

A escolha do material é crucial para o sucesso da impressão 3D, e uma variedade de materiais tem sido explorada para a produção de tecidos, incluindo:

- **Polímeros:** Os polímeros são os materiais mais utilizados na impressão 3D, devido à sua versatilidade e facilidade de processamento. Entre eles, destacam-se o PLA (ácido polilático), um polímero biodegradável derivado de fontes renováveis; o TPU (poliuretano termoplástico), conhecido pela sua flexibilidade e resistência; o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), um material resistente e durável; o Nylon, um polímero forte e flexível; e outros polímeros com propriedades específicas (SHIVA, et. al., 2023), ver Quadro 1. Cada polímero oferece diferentes vantagens em termos de resistência, flexibilidade, durabilidade e custo, permitindo que os designers escolham o material mais adequado para cada aplicação.
- **Resinas:** São polímeros ou mistura de polímeros viscosos capazes de ser moldados. As resinas fotossensíveis são utilizadas em técnicas como SLA e DLP, e oferecem alta precisão e detalhe. Estas resinas podem ser formuladas para diferentes propriedades, desde resinas rígidas até resinas mais flexíveis e com diferentes resistências mecânicas, tornando-as adequadas para a criação de acessórios e detalhes complexos.
- **Compósitos:** Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais, geralmente uma matriz polimérica reforçada com fibras. As fibras podem ser naturais, como celulose, linho e cânhamo, ou sintéticas, como carbono e vidro. O uso de compósitos permite a criação de materiais com propriedades mecânicas aprimoradas, oferecendo maior resistência, rigidez ou flexibilidade, além de serem opções mais sustentáveis ao utilizar fontes naturais ou recicladas (CHAKRABORTY, BISWAS, 2020).
- **Materiais Funcionais:** Além dos materiais estruturais, a impressão 3D permite a utilização de materiais com propriedades funcionais, como grafeno, que conferem condutividade elétrica aos tecidos, permitindo a integração de componentes eletrônicos. Materiais termo-responsivos, que mudam suas propriedades em resposta a variações de temperatura, também têm sido utilizados na criação de tecidos com propriedades especiais.

Quadro 1. Formula molecular estrutural de alguns polímeros (SHIVA, et al, 2023).

<p>Polilactídeo - PLA</p> 	<p>Aplicações em engenharia tecidual, tratamento ósseos, embalagens, implantes cardiovasculares e dispositivos ortopédicos.</p>
<p>Poliuretano Termoplástico - TPU</p> 	<p>Espumas, colchões e curativos a vácuo</p>
<p>Nylon</p> 	<p>Materiais para fechamento de feridas, balões de cateter cardiovasculares, cotonetes.</p>
<p>Polipropileno – PP</p> 	<p>Fios de suturas, próteses, seringas, sistemas de inalação, recipientes, sistemas de administração de medicamentos</p>
<p>Policaprolactona - PCL</p> 	<p>Arcabouço, sistemas de liberação de fármacos, cicatrização óssea</p>
<p>Acrilonitrila butadieno - ABS</p> 	<p>Aplicações de suporte de carga, como implantes ósseos, máscaras médicas, válvulas para ventiladores</p>
<p>Poliéter éter cetona - PEEK</p> 	<p>Implantes ortopédicos, aplicação em engenharia de tecidos ósseos</p>
<p>Policarbonato- PC</p> 	<p>Dispositivos de administração de medicamentos (nebulizadores, máquinas de diálise e seringas), barreira de segurança para pacientes</p>

A escolha do material para impressão 3D têxtil deve levar em consideração não apenas suas propriedades mecânicas e funcionais, mas também sua sustentabilidade, custo e adequação ao processo de impressão escolhido.

3. CONTRIBUIÇÕES DA TECNOLOGIA 3D PARA A PRODUÇÃO DE TECIDOS

3.1. Inovação no Design Têxtil

8

A tecnologia tridimensional (3D) está transformando o design têxtil, possibilitando a configuração de peças com geometrias inovadoras e complexas, as quais seriam antes impraticáveis ou excessivamente complexas para serem produzidas pelos métodos tradicionais (MANAIA;

CEREJO; DUARTE, 2023). Os designers passaram a trabalhar com novas formas, texturas e padrões, cooperados com softwares de modelagem tridimensional que oferecem uma liberdade criativa sem precedentes. Além disso, a impressão tridimensional permite a produção de tecidos com estruturas tridimensionais, garantindo um maior volume e profundidade para as peças.

A personalização é outro aspecto que tem sido potencializado. Designers têm a oportunidade de criar peças sob medida, adaptando o design e as medidas das mesmas ao gosto e à necessidade dos clientes. Assim, as tecnologias de digitalização tridimensional associadas com softwares de modelagem paramétrica estabelecem a possibilidade de se desenvolver protótipos e peças finais com um encaixe perfeito do corpo, diante de um nível de customização até então não imaginado, figura 6.



Figura 6. Peças de vestuário produzidas com tecnologia 3D (ZHANG; DENG, 2021. DICAS DE COSTURA, 2020. FERNANDA, 2021. LUANA SILVA, 2022. LIVIA, 2021. AUNGKH, 2020).

3.2. Avanços na Funcionalidade dos Tecidos

A impressão 3D possibilita a criação de tecidos com funcionalidades avançadas, integrando diferentes materiais e componentes em uma mesma estrutura. A incorporação de materiais condutores, como grafeno e nanotubos de carbono, permite a criação de tecidos especiais, capazes de monitorar sinais vitais, regular a temperatura corporal ou interagir com dispositivos eletrônicos, figura 7 (WANG et. al., 2023).

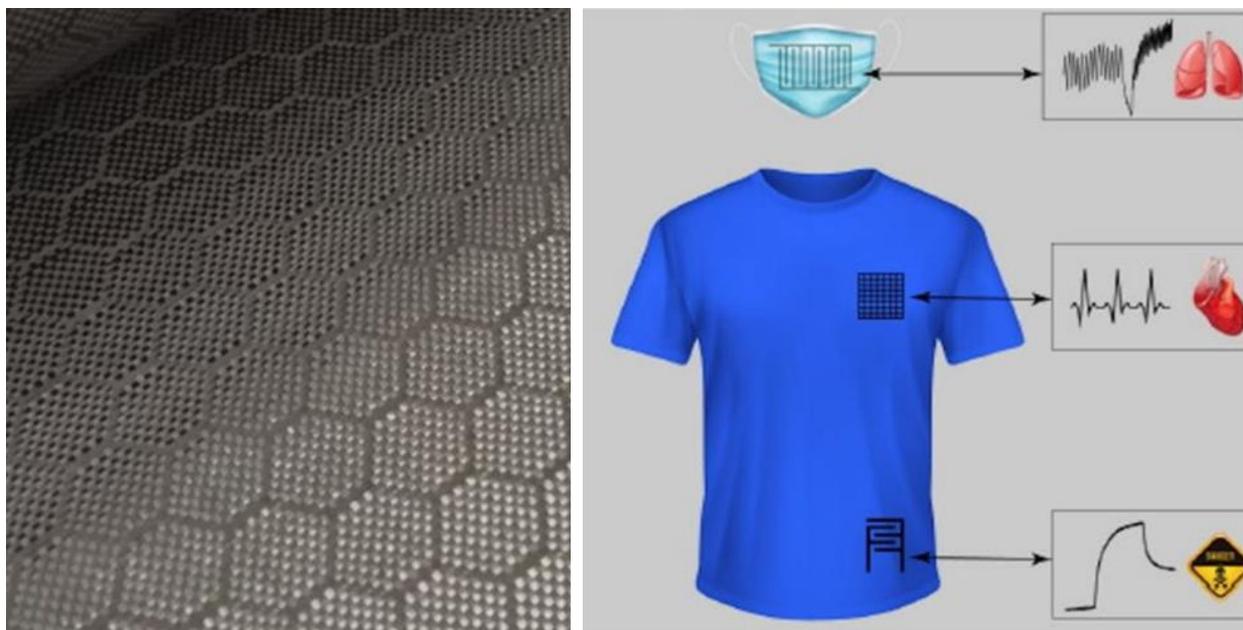


Figura 7. A imagem a esquerda é de um tecido condutor elétrico produzido com nanotubos de carbono (GLOBAL SOURCES, [s.d.]). A camiseta a direita possui sensores para respiração, frequência cardíaca e gases exalados (DIÁRIO DA SAÚDE, 2020).

A integração de sensores e atuadores em tecidos permite o desenvolvimento de roupas com funções de monitoramento de sinais corporais, interação com o ambiente e outros dispositivos. Estas aplicações abrem um leque de possibilidades para o desenvolvimento de roupas de trabalho especializadas, vestuário para atletas e roupas para pessoas com necessidades especiais, máscaras de proteção, órteses, etc. figura 8 (LI, 2023).



Figura 8. Mascara e órtese de imobilização de punho: impressão 3D (DONE 3D, 2024; GALANTA, 2024).

A inclusão de elementos de regulação térmica, como materiais termo-responsivos, permite que os tecidos se adaptem a variações de temperatura, proporcionando maior conforto e proteção. Além disso, a impressão 3D possibilita a criação de tecidos com propriedades antibacterianas, através da integração de materiais biocidas ou através da criação de estruturas que dificultam o crescimento de microrganismos (CHEN et. al., 2023).

Um exemplo da tecnologia de resfriamento pessoal que direciona o calor corporal para o ambiente externo é o tecido produzido usando fibras compostas de nitreto de boro (BN) / poli (álcool vinílico) (PVA). Estas fibras são fabricadas por meio de um método de impressão tridimensional (3D) rápido e escalável. A dispersão uniforme e o alto alinhamento de nanofolhas de BN (BNNSs) resultam em uma combinação de resistência mecânica e alta condutibilidade térmica (GAO et. al., 2017).

3.3. Aumento da Eficiência e Redução de Desperdício

A impressão 3D permite uma produção mais eficiente, uma vez que propicia a fabricação de peças sob demanda e sem excessos, com minimização de resíduos e redução do impacto ambiental, eliminando a necessidade de grandes estoques e reduzindo o desperdício de materiais. A produção sob demanda permite que empresas e designers produzam apenas aquilo que é necessário, o que é uma prevenção contra a superprodução e o despejo de peças não vendidas (AGNUSDEI; DEL PRETE, 2022). Outra vantagem da impressão 3D é a redução do tempo de produção, pois a impressão 3D permite que peças complexas sejam produzidas em poucas horas, ao contrário de dias ou semanas necessários para produzir de forma convencional.

3.4. Personalização e Customização

A personalização e customização são aspectos fundamentais do impacto da impressão 3D na produção têxtil. A tecnologia da digitalização corporal 3D permite a criação de modelos virtuais e, em seguida, a elaboração de peças sob medida, adaptadas às preferências de cada cliente, com ajustes ergonômicos que se alinham melhor ao corpo e proporcionam maior conforto. Isto oferece uma experiência de consumo mais personalizada e satisfatória. Além disso, a impressão 3D possibilita a criação de peças exclusivas, com designs, cores e texturas escolhidas pelo cliente, oferecendo um alto nível de personalização (JIANPING, FEIFEI, 2023).

3.5. Contribuições para Setores Específicos

A impressão 3D tem impactado diversos setores da indústria têxtil, como:

- **Moda:** A impressão 3D tem sido utilizada por designers para criar peças de vestuário conceituais e inovadoras, explorando novas formas, texturas e materiais. Assim, é possível elaborar peças únicas para clientes especiais, e dispostos a pagar um valor elevado pela exclusividade de suas peças, atendendo um mercado que exige exclusividade e customização, figura 9 (GIGLIO, PAOLETTI, CONTI, 2022).



Figura 9. Vestidos produzidos com tecnologia 3D (PEOPLE, 2023).

- **Têxteis Técnicos:** No setor de têxteis técnicos, a impressão 3D tem sido utilizada para a produção de equipamentos de proteção individual (EPI), produtos para saúde, vestuário para atletas e outras aplicações especializadas. A tecnologia permite a criação de peças com propriedades específicas, como resistência à abrasão, isolamento térmico e proteção contra impactos (XIAO, KAN, 2022).
- **Têxteis para o Lar:** A impressão 3D tem sido aplicada na produção de cortinas, tapetes, estofados e outros itens para o lar, oferecendo maior liberdade criativa e personalização. A tecnologia permite elaborar peças com designs diferenciados, texturas inovadoras e funcionalidades adaptadas às necessidades de cada ambiente, ver figura 10 (MANAIA, CEREJO, DUARTE, 2023).

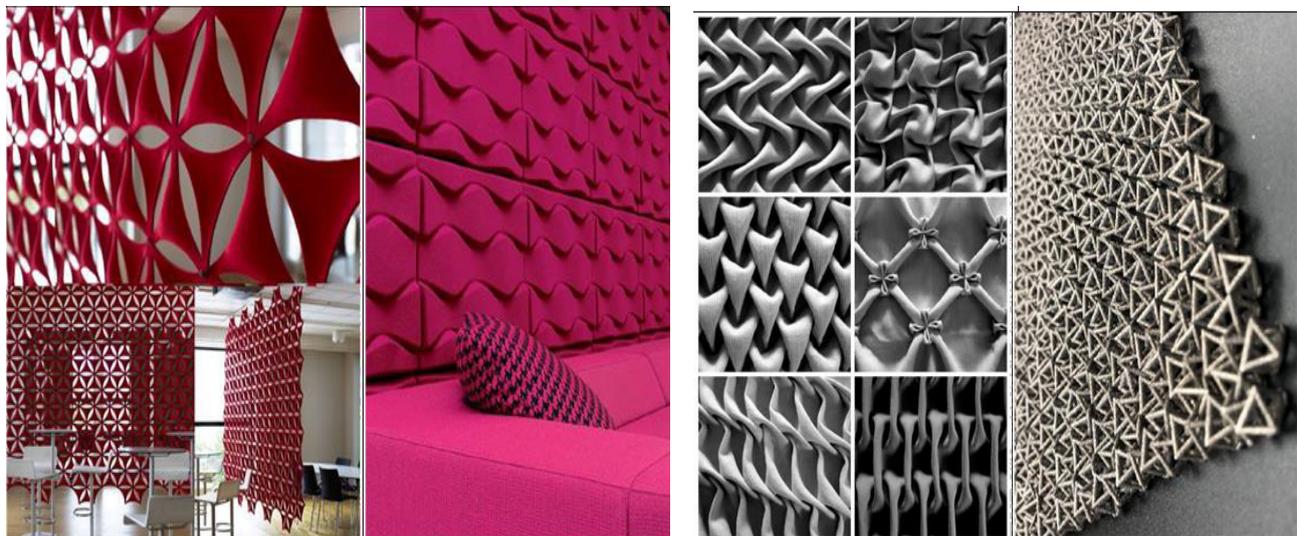


Figura 10. Imagens de cortinas e divisórias, decorações para paredes, cobertura de almofadas (TECHNICAL TEXTILES (2024). PINTEREST, 2024).

- **Acessórios e Calçados:** A impressão 3D tem sido utilizada para a produção de acessórios como bolsas, cintos, joias e calçados com designs inovadores e personalizados. A tecnologia possibilita a criação de peças complexas, com detalhes intrincados e ajustes ergonômicos, atendendo a um mercado cada vez mais exigente por produtos exclusivos, figura 11 (SAXENA, 2023).



Figura 11. Bolsa e calçados produzidos com tecnologia 3D (ZHANG; DENG, 2021. PHROZEN, 2022. ARCHDAILY BRASIL, 2015. TECMUNDO, 2021).

4. IMPACTOS DA TECNOLOGIA 3D NA SUSTENTABILIDADE DA INDÚSTRIA TÊXTIL

4.1. Redução do Impacto Ambiental

A indústria têxtil é conhecida pelo seu alto impacto ambiental, devido ao consumo excessivo de água, energia e matérias-primas, além da geração de resíduos e emissões poluentes (SANTOS et al., 2023). A impressão 3D surge como uma solução promissora para mitigar esses impactos, oferecendo um caminho para uma produção mais sustentável.

A impressão 3D permite a redução do consumo de água e energia, através da produção sob demanda e da otimização do uso de materiais (GOPAL; LEMU; GUTEMA, 2023). Ao utilizar apenas a quantidade necessária de material, a tecnologia elimina o desperdício e reduz a necessidade de processos que consomem muitos recursos, bem como a emissão de gases poluentes no transporte de produtos.

4.2. Economia Circular

A impressão 3D é uma tecnologia que pode ser integrada em modelos de economia circular, com a reutilização de materiais de impressão e a criação de peças com materiais reciclados (SINGH; AHN, 2024). Materiais como celulose regenerada, que podem ser produzidos a partir de fontes

renováveis e são biodegradáveis, e outros polímeros reciclados, podem ser utilizados na impressão 3D, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens.

A impressão 3D também oferece a possibilidade de reparo e atualização de peças, prolongando seu ciclo de vida útil e evitando o descarte precoce (MANAIA; CEREJO; DUARTE, 2023).

4.3. Materiais Sustentáveis

O desenvolvimento de materiais sustentáveis é um aspecto crucial para a redução do impacto ambiental da impressão 3D na indústria têxtil. O PLA, produzido a partir de fontes renováveis como milho e cana-de-açúcar, emerge como uma alternativa aos polímeros derivados do petróleo. O uso de compósitos com fibras naturais, como celulose, linho e cânhamo, também é uma alternativa para reduzir a dependência de materiais sintéticos. A pesquisa em novos materiais com menor impacto ambiental e maior biodegradabilidade é fundamental para o futuro da impressão 3D na indústria têxtil (KUMAR et. al., 2024).

4.4. Produção Local e Sob Demanda

A impressão 3D possibilita a produção local, eliminando a necessidade de grandes cadeias de produção e reduzindo o impacto ambiental associado ao transporte de produtos. A produção local e sob demanda possibilita a criação de peças adaptadas às necessidades e preferências de cada região, utilizando materiais e técnicas que levam em consideração as condições climáticas e culturais. A produção local também incentiva a economia regional, apoiando pequenos produtores e negócios locais.

4.5. Análise Comparativa de Sustentabilidade

A análise comparativa da sustentabilidade econômica entre os modelos tradicionais de produção têxtil e a manufatura aditiva por impressão 3D é fundamental para avaliar a viabilidade de longo prazo desta tecnologia no setor. Uma avaliação criteriosa dos custos ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a aquisição de matérias-primas até a comercialização e descarte, permite identificar vantagens e desafios econômicos inerentes a cada método produtivo.

A análise preliminar de custo-benefício indica que a impressão 3D, sob determinadas condições, pode oferecer um modelo economicamente mais vantajoso para a indústria têxtil. A produção sob demanda, característica da manufatura aditiva, reduz significativamente os custos associados ao excesso de estoque e perdas por obsolescência, comuns em modelos de produção tradicionais. Além disso, a capacidade de personalizar produtos através da impressão 3D abre novas oportunidades de mercado e aumenta o valor percebido pelos consumidores, resultando em margens de lucro potencialmente maiores. A possibilidade de utilizar materiais reciclados ou de fontes sustentáveis também pode reduzir os custos de matéria-prima e posicionar a empresa como ecologicamente responsável, um fator cada vez mais valorizado pelos consumidores. No entanto, é crucial considerar os custos de investimento em equipamentos e softwares de impressão 3D, bem como os custos energéticos de operação. A otimização do processo produtivo, a redução do tempo de impressão e o uso eficiente de materiais são fatores determinantes para garantir a competitividade econômica da manufatura aditiva em têxteis. Uma análise cuidadosa da relação custo-benefício, incluindo a avaliação de retorno sobre o investimento (ROI), é essencial para uma transição econômica bem-sucedida para este modelo de produção. Portanto, o foco deve ser em uma gestão que equilibre os aspectos econômicos e ambientais, de modo que a impressão 3D se consolide como uma alternativa economicamente viável e sustentável para a indústria têxtil (SHAH et. al., 2024).

5. DESAFIOS E LIMITAÇÕES DA TECNOLOGIA 3D NA ÁREA TÊXTIL

5.1. Desafios Técnicos

Apesar de seu potencial transformador, a impressão 3D na indústria têxtil enfrenta alguns desafios técnicos que precisam ser superados. Os custos de produção e equipamentos ainda são elevados, limitando a adoção da tecnologia por pequenas empresas e produtores (DHIWAR, AMBTKAR, BEDARKAR, 2024). A escalabilidade da produção em larga escala é outro desafio, pois a fabricação em quantidade de peças com impressão 3D ainda é mais lenta e cara do que os métodos tradicionais.

O acabamento e a textura dos tecidos impressos também apresentam algumas limitações, pois os materiais impressos tendem a ser mais rígidos e menos maleáveis do que os tecidos tradicionais. A durabilidade e resistência dos materiais impressos também precisam ser melhoradas, para que as peças produzidas possam resistir ao uso e lavagens. As propriedades de conforto, como flexibilidade,

respirabilidade e absorção de umidade, também precisam ser otimizadas para que os tecidos impressos possam ser utilizados em vestuário e outras aplicações que exigem conforto e funcionalidade.

5.2. Limitações de Materiais

A disponibilidade de materiais com propriedades adequadas para a impressão 3D têxtil é outra limitação. A variedade de materiais que atendem aos requisitos de flexibilidade, durabilidade, conforto e funcionalidade ainda é limitada, o que dificulta a criação de peças com as mesmas características dos tecidos tradicionais (ALI; DEIAB; PERVAIZ, 2024). Além disso, o custo de materiais mais avançados e com propriedades específicas pode ser elevado, limitando sua utilização em larga escala.

A pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais para impressão 3D têxtil são fundamentais para superar essas limitações. Materiais biodegradáveis, reciclados, com propriedades funcionais e com melhor desempenho em termos de conforto e durabilidade são necessários para impulsionar a adoção da tecnologia em diferentes setores da indústria têxtil.

5.3. Desafios de Design e Adaptação

A adaptação do design dos produtos para o processo de impressão 3D também representa um desafio. Os designers precisam de conhecimento e habilidade em modelagem 3D, softwares CAD e técnicas de impressão, para criar peças que sejam adequadas para a produção em 3D (XIAO; KAN, 2022).

A criação de moldes precisos e adaptados ao corpo do usuário também exige conhecimento e experiência em design, modelagem e adaptação ao processo de impressão. A necessidade de competência técnica em modelagem 3D e softwares CAD pode representar uma barreira para a adoção da tecnologia por pequenas empresas e designers independentes.

5.4. Barreiras Econômicas

As barreiras econômicas representam um grande obstáculo para a adoção em larga escala da impressão 3D na indústria têxtil. O custo elevado dos equipamentos, a necessidade de investimentos

em pesquisa e desenvolvimento, e a concorrência com os métodos tradicionais de produção tornam a tecnologia menos acessível para muitos produtores (MANAIA; CEREJO; DUARTE, 2023).

A dificuldade em alcançar a viabilidade econômica em grandes volumes é outro desafio, pois a produção em massa com impressão 3D ainda é mais cara do que os métodos convencionais. A aceitação da tecnologia pelo mercado consumidor também é importante, pois muitos consumidores ainda não estão familiarizados com os produtos impressos em 3D e não conhecem suas vantagens e benefícios.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS E TENDÊNCIAS

6.1. Impressão 4D

A impressão 4D, que combina a tecnologia 3D com materiais inteligentes que se transformam ao longo do tempo, emerge como uma tendência promissora na indústria têxtil. Essa tecnologia permite a criação de tecidos adaptáveis e responsivos, que mudam suas propriedades em resposta a variações de temperatura, umidade, luz e outros estímulos (MANAIA; CEREJO; DUARTE, 2023).

A impressão 4D abre um leque de possibilidades para a criação de tecidos multifuncionais e adaptáveis, que podem ser utilizados em diversas aplicações, desde vestuário que se ajusta às condições climáticas até produtos para saúde que respondem às necessidades do usuário. O desenvolvimento de materiais com memória de forma e capacidade de transformação é fundamental para o avanço da impressão 4D na indústria têxtil.

6.2. Materiais Inteligentes e Nanotecnologia

A integração de materiais inteligentes e nanotecnologia na impressão 3D têxtil oferece possibilidades para a criação de tecidos com propriedades avançadas. Nanomateriais como nanotubos de carbono e grafeno podem ser utilizados para criar tecidos com condutividade elétrica, permitindo a integração de componentes eletrônicos. Materiais antimicrobianos e com propriedades de proteção UV também podem ser integrados em tecidos impressos em 3D, oferecendo maior funcionalidade e proteção (LI, 2023).

A nanotecnologia também pode ser utilizada para criar materiais com maior resistência, flexibilidade e durabilidade, otimizando as propriedades dos tecidos impressos em 3D. Além disso,

nanomateriais podem ser utilizados para melhorar o acabamento e a textura dos tecidos, tornando-os mais confortáveis e agradáveis ao toque.

6.3. Inteligência Artificial e Automação

A inteligência artificial (IA) e a automação têm o potencial de revolucionar a produção de tecidos impressos em 3D. Através da IA, é possível criar designs inovadores de forma mais rápida e precisa, otimizando parâmetros de impressão e garantindo a qualidade dos materiais. A automação, por sua vez, agiliza o processo produtivo, permitindo a fabricação de peças personalizadas em grande escala. Essa sinergia entre IA e automação não apenas reduz custos e tempo de produção, mas também possibilita a criação de tecidos com propriedades únicas e sob medida para diferentes aplicações, como demonstra a figura 12, um exemplo de tecido desenvolvido com o auxílio dessas tecnologias.



Figura 12. Vestido criado por IA e impresso em 3D (FREEPIK, 2024).

6.4. Colaboração e Ecossistemas de Inovação

A colaboração entre designers, engenheiros, cientistas de materiais e empresas é fundamental para acelerar a inovação na área de impressão 3D têxtil. A criação de ecossistemas de inovação, onde diferentes profissionais e empresas trabalham juntos no desenvolvimento de novas tecnologias,

materiais e produtos, pode impulsionar a adoção da impressão 3D em diferentes setores da indústria têxtil.

A troca de conhecimento, a colaboração em projetos de pesquisa e desenvolvimento e a criação de redes de contato entre empresas, instituições de pesquisa e designers são importantes para o avanço da tecnologia e para a formação de profissionais capacitados para trabalhar com impressão 3D têxtil (MANAIA; CEREJO; DUARTE, 2023).

7. CONCLUSÃO

A impressão 3D desponta como uma tecnologia de grande potencial transformador na indústria têxtil, oferecendo novas e inovadoras possibilidades para a criação de produtos, com destaque para áreas como moda e têxteis técnicos. Apesar de ainda enfrentar desafios e limitações em termos de escala de produção e custos, a tecnologia já demonstrou sua eficácia em diversos segmentos do setor, proporcionando uma série de vantagens, como a otimização de processos produtivos, a redução de custos logísticos e a minimização de desperdícios, o que contribui para a sustentabilidade ambiental. Além disso, a impressão 3D possibilita a criação de materiais e peças têxteis com propriedades específicas e personalizadas, permitindo uma enorme variedade de aplicações que atendem a diferentes necessidades e demandas do mercado.

Recomendações

Futuros estudos devem se concentrar no desenvolvimento de materiais biodegradáveis e recicláveis para a impressão 3D têxtil, bem como na otimização das propriedades dos tecidos impressos, como flexibilidade, respirabilidade, durabilidade e toque. É fundamental investigar a aplicação de nanomateriais e tecnologias inteligentes na criação de tecidos funcionais e adaptáveis, capazes de atender às crescentes demandas do mercado por produtos inovadores e sustentáveis. Além disso, é crucial que empresas e governos invistam em capacitação e treinamento no uso de impressão 3D e softwares de modelagem, garantindo que possam aplicar a tecnologia de maneira apropriada.

REFERÊNCIAS

AGNUSDEI, L.; DEL PRETE, A. Additive manufacturing for sustainability: A systematic literature review. *Sustainable Futures*, v. 4, p. 100098, 2022. DOI: 10.1016/j.sftr.2022.100098.

ALI, S.; DEIAB, I.; PERVAIZ, S. State-of-the-art review on fused deposition modeling (FDM) for 3D printing of polymer blends and composites: innovations, challenges, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 135, p. 5085-5113, 2024.

ARCHDAILY BRASIL. Zaha Hadid expõe um sapato feito através de impressão 3D na Semana de Design de Milão. **ARCHDAILY BRASIL**, 2015. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/765485/zaha-hadid-expoe-um-sapato-feito-atraves-de-impressao-3d-na-semana-de-design-de-milao>. Acesso em: 27 out. 2023.

AUNGKH. african beauty. **Pinterest**, 2020. Disponível em: <https://in.pinterest.com/aungkh/african-beauty/>. Acesso em: 27 out. 2023.

CHAKRABORTY, S.; BISWAS, M. 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer. **Composite Structures**, v. 248, p. 112562, 2020.

CHATTERJEE, K.; GHOSH, T. K. 3D Printing of Textiles: Potential Roadmap for Printing with Fibers. **Advanced Materials**, v. 32, 2020.

CHEN, F.; HAN, J.; GUO, Z.; MU, C.; YU, C.; JI, Z.; SUN, L.; WANG, Y.; WANG, J. Antibacterial 3D-Printed Silver Nanoparticle/Poly Lactic-Co-Glycolic Acid (PLGA) Scaffolds for Bone Tissue Engineering. **Materials**, [S. l.], v. 16, n. 11, 2023.

DIÁRIO DA SAÚDE. Sensores vestíveis estilizados em camisetas e máscaras faciais. **Diário da Saúde**, 2020. Disponível em: <https://www.diariodasaude.com.br/news.php?article=sensores-vestiveis-estilizados-camisetas-mascaras-faciais&id=15572>. Acesso em: 11 out. 2024.

DICAS DE COSTURA. Cropped com Babado. **Pinterest**, 2020. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/1477812364303439/>. Acesso em: 25 out. 2023.

DHIWAR, K.; AMBTKAR, M. M.; BEDARKAR, M. 3D Printing in Fashion Manufacturing: Applications, Challenges and Opportunities Toward Achieving Sustainable Development Goals. **Journal of Lifestyle and SDGs Review**, v. 4, n. 4, e03045, 2024.

DONE 3D. Impressão 3D no combate à Covid-19. Done 3D. Disponível em: <https://done3d.com.br/impressao-3d-no-combate-a-covid-19/>. Acesso em: 26 out. 2024.

FERNANDA. Conjunto de calça e cropped com amarração. **Pinterest**, 2021. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/621215342344855809/>. Acesso em: 26 out. 2023.

FRANCO URQUIZA, E. A. Advances in Additive Manufacturing of Polymer-Fused Deposition Modeling on Textiles: From 3D Printing to Innovative 4D Printing—A Review. **Polymers**, v. 16, p. 700, 2024.

FREEPIK. Smart textiles wearable technology adaptive clothing functional fashion innovative materials created with generative ai technology. **Freepik**, [s.d.]. Disponível em: https://www.freepik.com/premium-ai-image/smart-textiles-wearable-technology-adaptive-clothing-functional-fashion-innovative-materials-created-with-generative-ai-technology_54923386.htm. Acesso em: 09 out. 2024.

21 GAO, T. et al. Three-Dimensional Printed Thermal Regulation Textiles. **ACS Nano**, v. 11, n. 11, p. 11513-11520, 2017. DOI: 10.1021/acsnano.7b06295.

GALANTA. Curso de impressão 3D: imobilizadores ortopédicos. *Galanta*. Disponível em: <https://www.galanta.com.br/cursos/impressao-3d-na-ortopedia/curso-de-impressao-3d-imobilizadores-ortopedicos>. Acesso em: 26 out. 2024.

GIGLIO, A.; PAOLETTI, I.; CONTI, G. M. Three-Dimensional (3D) Textiles in Architecture and Fashion Design: a Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. **Applied Composite Materials**, v. 29, p. 187-204, 2022.

GLOBAL SOURCES. Pano de fibra de carbono. **Global Sources**, [s.d.]. Disponível em: https://portuguese.globalsources.com/product/pano-de-fibra-de-carbono_1198403541f.htm. Acesso em: 11 out. 2024.

GOPAL, M.; LEMU, H. G.; GUTEMA, E. M. Sustainable Additive Manufacturing and Environmental Implications: Literature Review. **Sustainability**, v. 15, p. 504, 2023.

HUNDE, B. R.; WOLDEYOHANNES, A. D. Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. **Results in Engineering**, v. 14, 2022, 100478. ISSN 2590-1230.

JIANPING, G.; FEIFEI, X. Application of 3D Printing Technology in Fashion Design. **The Frontiers of Society, Science and Technology**, 2023.

KUMAR, V.; REDDY, U.; NAGPAL, A.; KUMAR, A.; JAYRONIA, S.; HUSSIEN, R. Towards Sustainable Additive Manufacturing: Exploring Ecofriendly Materials for Green 3D Printing. **E3S Web of Conferences**, [S. l.], v. 505, p. 01009, 2024.

LI, S. Review on development and application of 4D-printing technology in smart textiles. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 18, p. 1-18, 2023.

LI, W. et al. Stereolithography apparatus and digital light processing-based 3D bioprinting for tissue fabrication. **iScience**, v. 26, n. 2, p. 106039, 2024.

LIVIA, R. Vestido floral longo com detalhes em renda. **Pinterest**, 2021. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/6966574419177217/>. Acesso em: 27 out. 2023.

LUANA SILVA. Inspiração look verão: Vestido branco com detalhes em renda. **Pinterest**, 2022. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/2462974791921554/>. Acesso em: 26 out. 2023.

MANAIA, J. P.; CERREJO, F.; DUARTE, J. Revolutionising textile manufacturing: a comprehensive review on 3D and 4D printing technologies. **Fashion and Textiles**, v. 10, 2023.

PEOPLE. Mermaidcore Trend: Everything to Know. 2023. Disponível em: <https://people.com/style/mermaidcore-trend-everything-to-know/>. Acesso em: 12 out. 2024.

PHROZEN. Como a impressão 3D funciona para sapatos. **Phrozen**, 2022. Disponível em: <https://www.phrozen.com.br/post/como-a-impress%C3%A3o-3d-funciona-para-sapatos>. Acesso em: 10 out. 2024.

PINTEREST. Banheiro De Acampamento. **Pinterest**. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/531565562243182069/>. Acesso em: 10 out. 2024.

SAADI, M. A. S. R.; MAGUIRE, A.; POTTACKAL, N. T.; THAKUR, M. S. H.; IKRAM, M. M.; HART, A. J.; AJAYAN, P. M.; RAHMAN, M. M. Direct Ink Writing: A 3D Printing Technology for Diverse Materials. **Advanced Materials**, [S. l.], v. 34, n. 14, p. 2108855, 2022.

SANTOS, V. É. da S.; COSTA, A. F. da; SILVA, I. T. da; LIMA, F. V. Impacto ambiental causado pela indústria têxtil. **RBFH**, Pombal – PB, Brasil, v. 13, n. 4, p. 1811-1829, 2023.

SAXENA, P. K. The Future of Footwear: Exploring the Transformative Potential of 3D Printing. **International Journal of Research in Commerce and Science**, v. 7, n. 10, p. 15-20, 2023.

SHAH, H. H.; TREGAMBI, C.; BARESCHINO, P.; PEPE, F. Environmental and economic sustainability of additive manufacturing: A systematic literature review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 51, p. 628-643, nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.10.012>.

SINGH, R.; AHN, Y.-H. Progress of Biopolymers in 3D and 4D Printing for Biomedical Applications. In: ANNU (Ed.). **Biopolymers for Biomedical Applications**. [S. l.]: Wiley, 2024. Cap. 19. DOI: 10.1002/9781119865452.ch19.

SHIVA, S.. et al. A review on the recent applications of synthetic biopolymers in 3D printing for biomedical applications. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 34, p. 62, 2023.

TECMUNDO. Adidas lança tênis com partes impressas em 3D e tecnologia 4D. **Tecmundo**, 2021. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/produto/216766-adidas-lanca-tenis-partes-impressas-3d-tecnologia-4d.htm>. Acesso em: 27 out. 2023.

TECHNICAL TEXTILES. NTU/Caltech 3D-printed fabric. **Technical Textiles**, 2024. Disponível em: <https://technical-textiles.textiletechnology.net/news/news/ntucaltech-3d-printed-fabric-30748>. Acesso em: 11 jun. 2024.

WANG, Y.; WANG, Z.; WANG, Z.; XIONG, T.; SHUM, P. P.; WEI, L. Multifunctional Electronic Textiles by Direct 3D Printing of Stretchable Conductive Fibers. **Advanced Electronic Materials**, [S. l.], v. 9, 2023.

WISHBOX. Estereolitografia: o que é e como funciona. **Wishbox**, 2024. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/estereolitografia/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

XIAO, Y.-Q.; KAN, C.-W. Review on Development and Application of 3D-Printing Technology in Textile and Fashion Design. **Coatings**, v. 12, n. 2, p. 267, 2022.

ZHANG, X.; ZHOU, L.; FENG, G. et al. Laser technologies in manufacturing functional materials and applications of machine learning-assisted design and fabrication. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, v. 8, p. 76, 2025.

ZHANG, F.; DENG, K. Innovative application of 3D printing technology in Fashion design. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], v. 1790, p. 012030, 2021.