



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Thomas Adriaan Topfstedt

Aplicações da Impressão 3D: Educação e Sustentabilidade em Foco

Blumenau
2024

Thomas Adriaan Topfstedt

Aplicações da Impressão 3D: Educação e Sustentabilidade em Foco

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientadora: Dra. Ana Julia Dal Forno

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Topfstedt, Thomas Adriaan
Aplicações da Impressão 3D : Educação e Sustentabilidade
em Foco / Thomas Adriaan Topfstedt ; orientadora, Ana
Julia Dal Forno, 2024.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Impressão 3D.
3. Educação. 4. Sustentabilidade. 5. Inovação. I. Dal Forno,
Ana Julia . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Thomas Adriaan Topfstedt

Aplicações da Impressão 3D: Educação e Sustentabilidade em Foco

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 10 de julho de 2024.

Banca Examinadora:

Dra. Ana Julia Dal Forno
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Blumenau

Dra. Graziela Piccoli Richetti
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Blumenau

Dra. Marilise Luiza Martins dos Reis Sayão
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Blumenau

Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha mãe, cujo suporte incansável foi fundamental em minha jornada. A cada desafio, sua força e amor foram minha inspiração. Também dedico este trabalho à minha namorada, cujo apoio e presença foram essenciais, motivando-me a seguir em frente nos momentos mais desafiadores. Com amor e gratidão, compartilho os frutos deste esforço com vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Blumenau, pela excelência acadêmica e pela oportunidade de cursar Engenharia de Controle e Automação em um ambiente tão estimulante. Agradeço especialmente aos professores da área de computação e robótica, cuja dedicação e expertise foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Um agradecimento especial à Prof. Dra. Ana Julia Dal Forno, minha orientadora e professora da disciplina de Empreendedorismo, cujo suporte e orientação foram decisivos. Sua paciência e *insights* enriqueceram significativamente minha jornada e pesquisa, guiando-me através dos desafios e contribuindo grandemente para o sucesso deste projeto.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo abordar a aplicação da impressão 3D, especialmente na educação, visando promover métodos de ensino inovadores e sustentabilidade. Realizou-se uma revisão de literatura e análise de estudos de caso para avaliar como a impressão 3D é empregada de forma revolucionária em vários setores, como medicina e construção civil, além das implicações educacionais. Destacaram-se as vantagens da customização em massa, otimização de recursos e contribuição para práticas sustentáveis. Os resultados revelaram que, apesar dos desafios de custos elevados, a impressão 3D está fomentando inovações significativas na educação, possibilitando soluções anteriormente impraticáveis, como materiais didáticos customizados e estruturas educativas aprimoradas. Adicionalmente, a implementação dessa tecnologia tem promovido melhorias significativas na eficácia operacional e redução do desperdício de materiais, consolidando sua posição como ferramenta estratégica para o futuro da fabricação e desenvolvimento tecnológico global.

Palavras-chave: Impressão 3D; Inovação Tecnológica; Sustentabilidade; Aplicações Interdisciplinares

ABSTRACT

This work aimed to address the application of 3D printing, especially in education, aiming to promote innovative and sustainable teaching methods. A literature review and case study analysis were conducted to assess how 3D printing is employed in a revolutionary way in various sectors, such as medicine and civil construction, in addition to educational implications. The advantages of mass customization, resource optimization, and contribution to sustainable practices were highlighted. The results revealed that despite the challenges of high costs, 3D printing is fostering significant innovations in education, enabling previously impracticable solutions such as customized educational materials and enhanced educational structures. Additionally, the implementation of this technology has promoted significant improvements in operational efficacy and material waste reduction, consolidating its position as a strategic tool for the future of manufacturing and global technological development.

Keywords: 3D Printing; Technological Innovation; Sustainability; Interdisciplinary Applications

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da seleção de trabalhos	15
Figura 2 – Comparação entre Fabricação Subtrativa e Aditiva.	17
Figura 3 – Comparação entre os processos FDM, SLA, SLS, respectivamente.	18
Figura 4 – Fab@Home Model 1.	18
Figura 5 – Aparelhos Médicos Impressos em 3D: Utilizações em Simulações e Cirurgias. (A) Gabarito para simulação cirúrgica. (B, C) Implantes de PEEK para coluna cervical e pélvica, respectivamente.	22
Figura 6 – Primeira casa impressa da Alemanha	23
Figura 7 – Entradas de Freio Impressas em 3D da Alfa Romeo para Testes em Túnel de Vento	23
Figura 8 – Globo impresso em alta resolução	25
Figura 9 – Polígonos Platônicos	26
Figura 10 – Modelo em disco para ensino de frações	27
Figura 11 – Modelo em disco para o ensino de frações - plástico injetado	28
Figura 12 – Transmissão Manual de Malha Constante de 4 Velocidades	30
Figura 13 – Motor a Jato Impresso em 3D	31
Figura 14 – Neurônio impresso	31
Figura 15 – Célula vegetal impressa	32
Figura 16 – Recorte de seção da pele impresso com tecnologia multicolorida	32
Figura 17 – Mão prótica impressa	33
Figura 18 – Coração impresso com tecnologia multicolorida	34
Figura 19 – Modelo impresso de uma pá de compressor	36
Figura 20 – Teste em túnel de vento do protótipo impresso	37
Figura 21 – Impressora 3D capaz de utilizar até 16 filamentos diferentes.	38
Figura 22 – Montagem de um conjunto de átomos e ligações químicas	39
Figura 23 – Modelo de ligações químicas desenvolvido. Tripla, dupla e simples, respectivamente	39
Figura 24 – Célula de Pino em Braille - Ferramenta para o Ensino de Letras em Braille	40
Figura 25 – Modelo utilizado para testes	44
Figura 26 – Volume de purga em mm^3	44
Figura 27 – Impressão do mesmo objeto mas com a purga em outro modelo	45
Figura 28 – Projeção de uso dos materiais utilizando a purga em outro modelo	45
Figura 29 – Modelo impresso ao lado do material descartado na troca de cores	46
Figura 30 – Peso total da torre de purga	46
Figura 31 – Peso total da purga	47
Figura 32 – Projeção de uso de material	47

Figura 33 – Carretel de filamento plástico eSUN	48
Figura 34 – Carretel de filamento plástico 3DLab	49
Figura 35 – Estrutura impressa usando tecnologia ECAM	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações Médicas da Impressão 3D	21
Quadro 2 – Aplicações Detalhadas da Impressão 3D na Indústria Automotiva e Aeroespacial	24
Quadro 3 – Comparativo entre Modelo de Impressão 3D e Modelo Tradicional para Ensino de Frações	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AIO	<i>All-in-one</i>
ASA	<i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i>
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPU	Unidade Central de Processamento
DIY	<i>Do It Yourself</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
ECAM	Manufatura Aditiva Eletroquímica
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
LCA	<i>Life cycle assessment</i>
NEA	<i>New Enterprise Associates</i>
PEEK	<i>Polyetheretherketone</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PETG-CF	<i>PETG-Carbon Fiber</i>
PLA	Ácido Polilático
PLA-CF	<i>PLA-Carbon Fiber</i>
PVA	<i>Polyvinyl Alcohol</i>
SLA	Estereolitografia
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STEM	Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.3	OBJETIVO GERAL	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.5	METODOLOGIA	15
2	HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO DA IMPRESSÃO 3D .	17
3	APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D	20
3.1	APLICAÇÕES MÉDICAS	20
3.1.1	Próteses	21
3.2	APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL	22
3.3	APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E AEROESPACIAL	23
3.4	APLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO	23
3.4.1	Escolas	24
3.4.1.1	<i>Educação Infantil</i>	26
3.4.1.2	<i>Ensino Fundamental</i>	28
3.4.1.3	<i>Ensino Médio</i>	30
3.4.1.3.1	Impressão multicolorida	34
3.4.2	Universidades	35
3.4.3	Educação Especial	38
4	IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE	42
4.1	REDUÇÃO DE DESPERDÍCIO NA IMPRESSÃO 3D	42
4.1.1	Impressão com múltiplos materiais	43
4.2	USO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS	47
5	DESAFIOS E BARREIRAS	50
6	PERSPECTIVAS FUTURAS	51
6.1	TENDÊNCIAS EMERGENTES	51
6.2	INOVAÇÕES ANTECIPADAS NA MANUFATURA ADITIVA	52
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D emergiu como uma tecnologia disruptiva, transformando não apenas as indústrias de fabricação, mas também o campo da educação. Esta pesquisa se dedica a explorar o papel transformador da manufatura aditiva, com ênfase especial em suas aplicações educacionais. Desde a sua concepção nos anos 1980, a impressão 3D evoluiu de simples ferramentas de prototipagem para poderosas plataformas de fabricação de produtos finais em diversas áreas do conhecimento.

Nos ambientes educacionais, a impressão 3D não é apenas uma ferramenta técnica; ela é um catalisador para a inovação pedagógica. A análise realizada explora como a impressão 3D fomenta métodos de ensino interativos e engajadores, facilitando o aprendizado prático e a visualização de conceitos complexos em várias disciplinas. Através da análise de estudos de caso e revisão bibliográfica, discute-se como essa tecnologia permite a personalização massiva, otimiza recursos e promove práticas sustentáveis, enquanto prepara os estudantes para os desafios do mercado de trabalho moderno.

Com os avanços contínuos em materiais e técnicas, a impressão 3D se destaca como uma ferramenta educacional essencial, possibilitando soluções antes impraticáveis e aprimoramento de técnicas já existentes, transformando a forma como o conhecimento é ensinado e apreendido pelos alunos. O objetivo desta análise é não apenas entender o impacto atual da impressão 3D na educação, mas também prever seu desenvolvimento futuro e suas potenciais inovações disruptivas.

1.1 MOTIVAÇÃO

Este trabalho foi inspirado por experiências significativas adquiridas durante a graduação do autor. Inicialmente, o autor atuou como bolsista voluntário no LABEX da UFSC Blumenau, onde teve a oportunidade de empregar uma impressora 3D para a realização de projetos diversos. Posteriormente, em um estágio não obrigatório dentro da mesma instituição, na oficina multiusuário, o autor assumiu responsabilidades que incluíam, entre outras, a impressão 3D de projetos para estudantes do campus.

Ao longo desse período de aprendizado e prática intensiva, o autor constatou uma discrepância significativa no conhecimento sobre a tecnologia de impressão 3D dentro do ambiente acadêmico. Enquanto alguns estudantes do campus tendiam a trivializar o uso dessa tecnologia, várias instituições educacionais externas enfrentavam barreiras significativas de acesso à mesma. Essa observação evidenciou a existência de uma lacuna de conhecimento que não apenas limitava o potencial educacional e inovador da impressão 3D, mas também refletia desigualdades mais amplas no acesso à tecnologia educacional avançada. A necessidade de abordar essa disparidade motivou a realização deste trabalho, que busca não apenas disseminar o conhecimento sobre uma ferramenta tecnológica extraordinária, mas também promover sua adoção de maneira mais equitativa

e transformadora.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

A impressão 3D oferece vastas aplicações educacionais, desde a criação de modelos físicos para facilitar a aprendizagem até a realização de projetos práticos que estimulam a inovação e o pensamento crítico entre os estudantes. (Martinez *et al.*, 2016) No entanto, a adoção dessa tecnologia no setor educacional não está isenta de desafios. As barreiras incluem o alto custo de equipamentos e materiais, a necessidade de formação específica para professores e alunos e as questões ambientais relacionadas ao uso de plásticos e outros materiais que podem impactar negativamente na sustentabilidade, pois, a falta de otimização no uso desses materiais pode contribuir para o aumento da poluição. Portanto, é essencial que estratégias de mitigação sejam desenvolvidas para maximizar os benefícios educacionais da impressão 3D, enquanto se minimizam seus impactos ambientais. Para isso, esse trabalho busca responder os seguintes questionamentos:

- a) Quais são as aplicações da manufatura aditiva em diversos segmentos, especialmente na educação?
- b) Como a impressão 3D pode ser utilizada para otimizar o aprendizado nos diferentes níveis de ensino?
- c) Quais são as principais barreiras de mercado que impedem a adoção mais ampla da impressão 3D?
- d) É possível realizar impressões com múltiplos materiais com menos consumo?

1.3 OBJETIVO GERAL

Demonstrar como as aplicações da impressão 3D estão transformando as áreas do conhecimento, ressaltando a promoção de métodos de ensino inovadores e a conscientização sobre a sustentabilidade.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

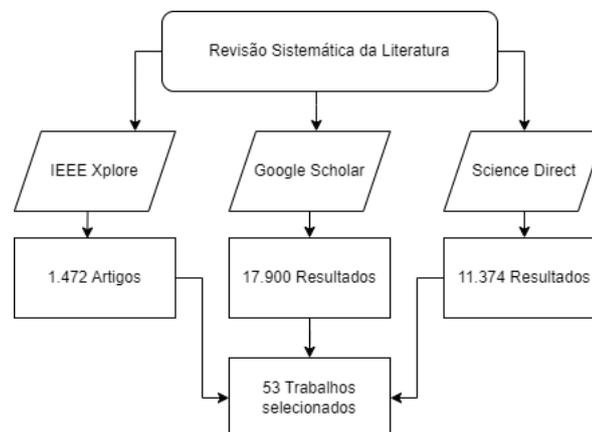
- Investigar o uso da impressão 3D na criação de modelos didáticos e recursos educativos que facilitam o aprendizado interativo e engajador.
- Explorar o uso da impressão 3D na educação especial por meio de projetos inclusivos.
- Identificar as principais barreiras que impedem a adoção mais ampla da impressão 3D na educação e outras indústrias.

- Explorar a viabilidade e as vantagens da utilização de múltiplos materiais em impressões 3D, visando aumentar a funcionalidade e reduzir o desperdício de materiais.

1.5 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e é fundamentado em uma revisão de literatura e na pesquisa-ação para explorar as aplicações e impactos da impressão 3D na educação. As buscas foram conduzidas nas plataformas de bases de dados acadêmicas, tais como Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) Xplore, Google Scholar e ScienceDirect, utilizando palavras-chave como **3D Printing, Education e Innovation**, combinadas através dos operadores lógicos *AND* e *OR*. Após a realização das buscas, foram encontrados 1.472, 17.900 e 11.374 resultados em cada plataforma, respectivamente. Desses resultados, foram selecionados os artigos publicados entre 2015 e 2024 que discutem a impressão 3D em diversos setores, com foco especial na educação. A seleção dos artigos foi feita por meio de uma leitura preliminar dos títulos e resumos que mais se adequavam à proposta do trabalho, resultando em um total de 24 referências de trabalhos apresentados em conferências ou simpósios e 29 referências de periódicos ou artigos científicos, como pode ser visto no diagrama da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama da seleção de trabalhos



Fonte: Autor

O componente de pesquisa-ação envolveu o desenvolvimento de modelos educacionais próprios e a implementação destes em cenários educacionais reais, permitindo uma investigação prática das potencialidades da impressão 3D. Essa parte do estudo foi enriquecida através da colaboração com educadores para adaptar e testar os modelos em diferentes níveis de ensino, desde escolas primárias até o ensino superior.

Como ressaltado por Miguel (2012), o estudo de caso é um método empírico valioso na engenharia de produção, pois permite uma análise profunda de fenômenos dentro de

seus contextos reais, levando a um entendimento detalhado sobre as decisões tomadas, suas implementações e resultados.

Esse conceito, porém, também se aplica a outras áreas e por isso foram utilizados quadros para visualizar a relação entre estudos de caso analisados na literatura e os modelos desenvolvidos pelo autor, facilitando a comparação e a demonstração da evolução das práticas pedagógicas com o uso da impressão 3D.

As limitações deste estudo são notáveis e podem influenciar a interpretação dos resultados. Primeiramente, a dependência de fontes secundárias para a revisão bibliográfica, embora prática, pode introduzir vieses associados à seleção e interpretação dessas fontes. Esta limitação é particularmente relevante porque a literatura sobre tecnologia de impressão 3D está em rápida evolução, e relatos mais recentes ou dados primários podem oferecer *insights* diferentes.

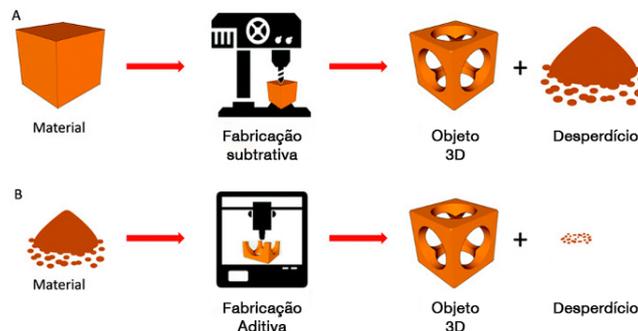
Além disso, a escolha de limitar o estudo a casos disponíveis na literatura restritos também pode impactar a generalização dos resultados. Os casos analisados podem não representar todas as possíveis aplicações e desafios associados à tecnologia de impressão 3D, especialmente em campos emergentes ou em aplicações inovadoras que não foram amplamente documentadas até o momento. Este fato pode limitar a extensão na qual as conclusões do presente estudo podem ser aplicadas a situações fora do contexto dos casos estudados.

Essas limitações sugerem a necessidade de cautela ao generalizar os resultados deste estudo e indicam áreas para pesquisas futuras, que poderiam incluir o uso de fontes primárias e a expansão do escopo dos casos de estudo para uma variedade maior de aplicações da tecnologia.

2 HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO DA IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D, conhecida como fabricação aditiva, emergiu na década de 1980 e apresenta uma metodologia na qual objetos tridimensionais são construídos por adição sucessiva de material. Esse processo difere fundamentalmente da fabricação subtrativa, que faz a remoção de material para criar uma forma a partir de um bloco sólido ou folha. A Figura 2 ilustra essas diferenças, comparando uma impressora 3D com um torno Comando Numérico Computadorizado (CNC), exemplificando visualmente os métodos de fabricação aditiva e subtrativa. (Autodesk, 2023)

Figura 2 – Comparação entre Fabricação Subtrativa e Aditiva.



Fonte: (EngiPrinters, 2024)

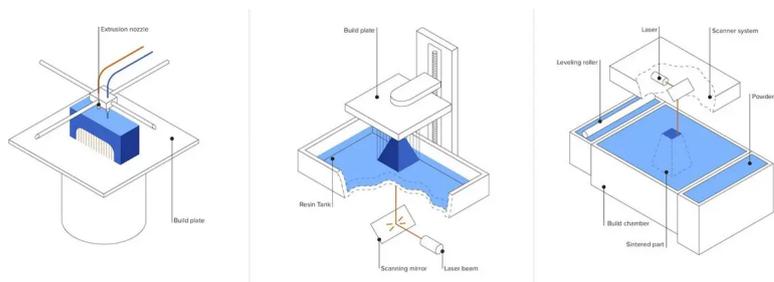
Esta tecnologia, semelhante à utilizada em impressoras *ink-jet*, propiciou um desenvolvimento significativo na produção de protótipos e produtos finais de maneira eficiente e econômica. (Savini, A. e Savini, G., 2015)

Nesse contexto, vale lembrar que a inserção de computadores no processo de fabricação, especialmente através dos softwares de *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), revolucionou o design e a fabricação a partir da segunda metade do século XX. Com isso, profissionais foram capazes de gerenciar e criar modelos detalhados de objetos tridimensionais com precisão aumentada, enquanto a introdução de computadores pessoais e dispositivos móveis com capacidades avançadas de cálculo expandiu ainda mais o acesso às ferramentas de design e fabricação. (Savini, A. e Savini, G., 2015)

Além disso, diversas outras tecnologias marcaram o avanço da impressão 3D, incluindo a Estereolitografia (SLA), inventada por Charles Hull em 1984, que utilizava polímeros líquidos endurecidos por luz ultravioleta. Inovações subsequentes como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) também deram base para muitas das impressoras 3D contemporâneas. Essas tecnologias transformaram a capacidade de criar protótipos complexos e começaram a se expandir para outras aplicações além da prototipagem. A Figura 3 ilustra cada uma dessas tecnologias

em ação, demonstrando como diferentes impressoras 3D operam e os tipos de objetos que elas produzem.(Savini, A. e Savini, G., 2015)

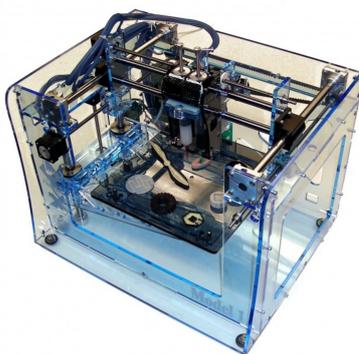
Figura 3 – Comparação entre os processos FDM, SLA, SLS, respectivamente.



Fonte: (Formlabs, 2024) (Adaptado)

A impressão 3D tornou-se mais acessível nos anos 2000, com uma significativa redução nos custos das impressoras e a proliferação de designs e softwares de código aberto. Isso se deve, em parte, à expiração de mais de 200 patentes entre 2002 e 2014, o que permitiu uma maior liberdade e inovação no campo da fabricação aditiva (Hornick, 2016). Projetos como o RepRap (2023), que promovia impressoras capazes de se autorreplicar e o Fab@Home (2006), como ilustrado na Figura 4 da Universidade Cornell, ampliaram o alcance e as possibilidades da impressão 3D, levando a tecnologia das indústrias para as casas dos consumidores e fortalecendo a cultura *Do It Yourself* (DIY) (Savini, A. e Savini, G., 2015).

Figura 4 – Fab@Home Model 1.



Fonte: (Fab@Home, 2006)

Com o passar do tempo, o espectro de materiais e aplicações para impressão 3D expandiu exponencialmente. Novos materiais, como metais, cerâmicas e resinas epóxi, são constantemente testados e integrados em diversas indústrias, incluindo a médica, a automotiva e a da moda. Isso porque as impressoras 3D são capazes de produzir desde

componentes industriais complexos até tecidos humanos para aplicações médicas, transformando radicalmente diversas áreas do conhecimento e setores da economia. (Savini, A. e Savini, G., 2015)

3 APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D

No contexto acadêmico, a impressão 3D desempenha um papel crucial para a prototipagem rápida em diversos setores, como o automotivo e o de saúde pública. Observa-se que essa tecnologia apresenta um crescimento exponencial, o que, paradoxalmente, tem levado a um aumento preocupante no volume de resíduos plásticos produzidos. Visto que processos como a SLA e a *Digital Light Processing* (DLP) produzem, em grande parte, termofixos à base de petróleo, agravando a problemática da poluição plástica. A literatura sugere que alternativas sustentáveis aos materiais convencionais são necessárias para mitigar esse impacto ambiental (Maines *et al.*, 2021).

Desta maneira, o potencial de customização e rapidez na produção da impressão 3D encontra um vasto campo de aplicação na educação, facilitando o aprendizado prático e visual em ciências, engenharia e matemática. Como aponta Eisenberg (2013), o uso de impressão 3D na educação permite aos estudantes não somente uma maior interação com os materiais de estudo, mas também a possibilidade de explorar concepções complexas através de modelos físicos, o que pode profundamente transformar o processo de ensino-aprendizagem. Além disso, Liaw e Guvendiren (2017) destacam como essa tecnologia apoia a personalização no ensino, permitindo a criação de equipamentos e ferramentas educativas adaptadas às necessidades específicas de cada aluno, promovendo uma educação mais inclusiva e eficaz.

Consequentemente, a impressão 3D emerge não apenas como um recurso tecnológico avançado, mas como um efetivo instrumento pedagógico, cuja aplicação transcende as barreiras tradicionais da educação, possibilitando um ensino mais personalizado e interativo (Eisenberg, 2013; Liaw e Guvendiren, 2017).

3.1 APLICAÇÕES MÉDICAS

Além disso, evidencia-se que a impressão 3D tem sido uma ferramenta catalisadora de inovações, sobretudo na área médica, uma vez que ela tem possibilitado a fabricação de produtos customizados, como próteses e modelos anatômicos para procedimentos cirúrgicos, adaptados especificamente às necessidades individuais dos pacientes. Essa tecnologia permite não apenas a fabricação econômica de produtos médicos, mas também a produção de modelos anatômicos personalizados e dispositivos médicos com alta resolução e ajustabilidade, suportando uma variedade de aplicações clínicas e de pesquisa, como engenharia de tecidos, modelos para educação médica, planejamento cirúrgico e fabricação de aparatos médicos e farmacológicos (Haines e Burr, 2023; Liaw e Guvendiren, 2017; Research, 2019). Tais aplicações têm não apenas melhorado os resultados dos tratamentos, mas também ampliado o acesso a soluções médicas personalizadas, promovendo uma revolução no setor de saúde.

Nesse contexto, conforme observado no Quadro 1, a impressão 3D oferece diversas

aplicações na área médica, variando desde a fabricação de próteses personalizadas até a bioimpressão para a regeneração de tecidos.

Quadro 1 – Aplicações Médicas da Impressão 3D

Aplicação Médica	Tecnologia de Impressão	Benefícios	Exemplos	Referências
Próteses	SLS, FDM	Personalização, Redução de custos	Implantes de PEEK	(Eltorai, Nguyen e Daniels, 2015)
Modelos Anatômicos	SLA	Precisão cirúrgica	Planejamento cardíaco	(Giugno <i>et al.</i> , 2022)
Bioimpressão	Impressão de bioinks	Regeneração tecidual	Engenharia de tecidos	(Alamán <i>et al.</i> , 2016)

Fonte: Adaptado de (Research, 2019).

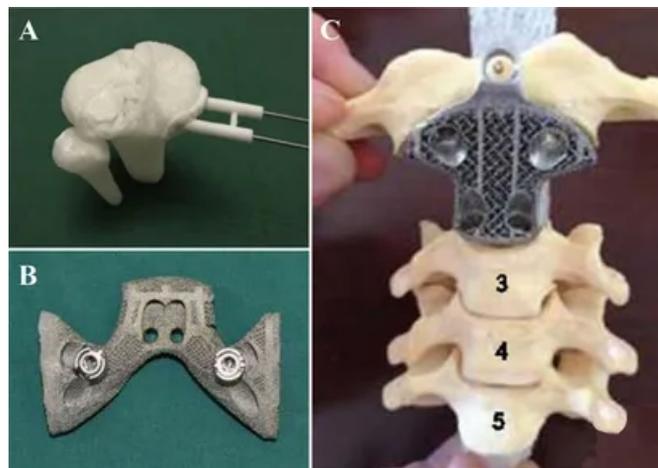
Ademais, em cirurgias complexas, como reconstruções ortopédicas e intervenções cardíacas, a impressão 3D tem demonstrado um valor inestimável. Como exemplo disso, tem-se o uso de implantes personalizados impressos em 3D para tratar necrose avascular do tálus e perdas ósseas naviculares devido a traumas balísticos, com implantes projetados para maximizar a estabilidade e promover a integração óssea (Eltorai, Nguyen e Daniels, 2015; Konta, García-Piña e Serrano, 2017). No campo da cardiologia, por outro lado, modelos específicos de pacientes são impressos para facilitar o planejamento cirúrgico e avaliar intervenções complexas em condições como a transposição corrigida congenitamente das grandes artérias, permitindo procedimentos mais precisos e seguros (Giugno *et al.*, 2022; Zhang, Yanchun *et al.*, 2022).

Outro ponto importante é a bioimpressão 3D que é uma subcategoria da impressão 3D, utiliza *bioinks* para criar tecidos e órgãos em laboratório, com aplicativos que vão desde o desenvolvimento farmacêutico até implantes médicos personalizados. Essa técnica é particularmente promissora para a regeneração de tecidos e a engenharia de órgãos, apresentando uma alternativa para os desafios de transplantes e tratamentos de lesões crônicas (Cui *et al.*, 2010; Alamán *et al.*, 2016).

3.1.1 Próteses

O *Polyetheretherketone* (PEEK) é um polímero de alto desempenho com aplicações significativas em próteses médicas devido às suas propriedades únicas. Esse material é conhecido por sua excelente resistência ao desgaste, biocompatibilidade e menor abrasividade em relação ao esmalte dentário, tornando-o ideal para próteses dentárias fixas e dispositivos de implantes, onde há a necessidade de minimizar o desgaste dos dentes antagonistas e de proporcionar uma distribuição eficaz de tensões mecânicas, como no caso de um implante cervical, conforme demonstrado na Figura 5 (Rahman, Barakh Ali, Ozkan *et al.*, 2018; Eltorai, Nguyen e Daniels, 2015).

Figura 5 – Aparelhos Médicos Impressos em 3D: Utilizações em Simulações e Cirurgias. (A) Gabarito para simulação cirúrgica. (B, C) Implantes de PEEK para coluna cervical e pélvica, respectivamente.



Fonte: (Li *et al.*, 2016)

3.2 APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A evolução da impressão 3D no setor de construção civil tem demonstrado vantagens notáveis, tais como a sustentabilidade e a capacidade de inovar no design. Isso porque esse método de fabricação aditiva possibilita a elaboração de estruturas arquitetônicas complexas que seriam difíceis de executar com técnicas tradicionais, enriquecendo aspectos estéticos e funcionais (Auat-Cheein, 2022).

Além disso, a principal vantagem da impressão 3D na construção civil é a sua contribuição para a sustentabilidade, que é alcançada através do uso eficiente de materiais e viabilidade de empregar materiais ecológicos, sendo que inovações mais recentes incluem a criação de compostos de concreto ecologicamente sustentáveis que superam os desempenhos dos concretos convencionais (Auat-Cheein, 2022).

Contudo, a implementação da impressão 3D na construção civil enfrenta obstáculos, principalmente no que tange à tecnologia dos materiais e à integração desses novos processos nas práticas construtivas vigentes, pois as características mecânicas dos materiais empregados, como a resistência à tração e à compressão, são essenciais para a durabilidade e segurança das construções (Ning *et al.*, 2021).

Apesar desses obstáculos, porém, as possibilidades de redução de custos, aceleração do processo construtivo e a capacidade de edificar em locais inóspitos ou complexos estão fomentando a pesquisa e a adesão a esta tecnologia. Por isso, o desenvolvimento e os testes continuados buscam superar esses desafios, visando uma maior prevalência das construções impressas em 3D no futuro (Ning *et al.*, 2021) (Ver Figura 6).

Figura 6 – Primeira casa impressa da Alemanha



Fonte: (Construction, s.d.)

3.3 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E AEROESPACIAL

A impressão 3D tem transformado significativamente a indústria automotiva e aeroespacial, permitindo avanços em personalização, prototipagem rápida e produção de componentes complexos, além de contribuir para a redução de custos. As principais vantagens e aplicações desta tecnologia nestas indústrias destacam a funcionalidade e a inovação contínua, evidenciando sua importância para o desenvolvimento tecnológico (Ver Quadro 2).

Figura 7 – Entradas de Freio Impressas em 3D da Alfa Romeo para Testes em Túnel de Vento



Fonte: (3DPrint.com, 2023)

3.4 APLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO

A tecnologia de impressão 3D tem se mostrado uma ferramenta inovadora e altamente eficaz na educação, proporcionando uma série de benefícios em diferentes níveis de

Quadro 2 – Aplicações Detalhadas da Impressão 3D na Indústria Automotiva e Aeroespacial

Aspecto	Detalhes	Referência
Personalização	Capacidade de fabricar peças complexas diretamente a partir de dados digitais, facilitando a personalização sem custos adicionais	(Ferrulli e Lindner, 2016)
Prototipagem rápida	Redução significativa do ciclo de desenvolvimento de produtos, com capacidade de prototipar em dias ao invés de semanas	(Ferrulli e Lindner, 2016)
Eficiência de produção	Produção de veículos mais leves e eficientes em termos de consumo de combustível utilizando geometrias complexas	(Tech-Clarity, Inc., 2017)
Fabricação sob demanda	Minimização da necessidade de estoques volumosos e redução nos custos de armazenamento	(Tech-Clarity, Inc., 2017)
Exemplo prático na F1	Entradas de Freio Impressas em 3D utilizadas em testes de túnel de vento na Fórmula 1, como ilustrado na Figura 7	(3DPrint.com, 2023)
Manufatura em órbita	Capacidade de produzir peças de reposição diretamente no espaço, reduzindo a dependência de grandes estoques terrestres	(Cao e Shi, 2023)

Fonte: Autor

ensino. Esta seção aborda as diversas aplicações da impressão 3D em escolas, universidades e na educação especial, destacando como essa tecnologia pode ser utilizada para melhorar a qualidade do ensino, estimular a criatividade dos alunos e facilitar a compreensão de conceitos complexos.

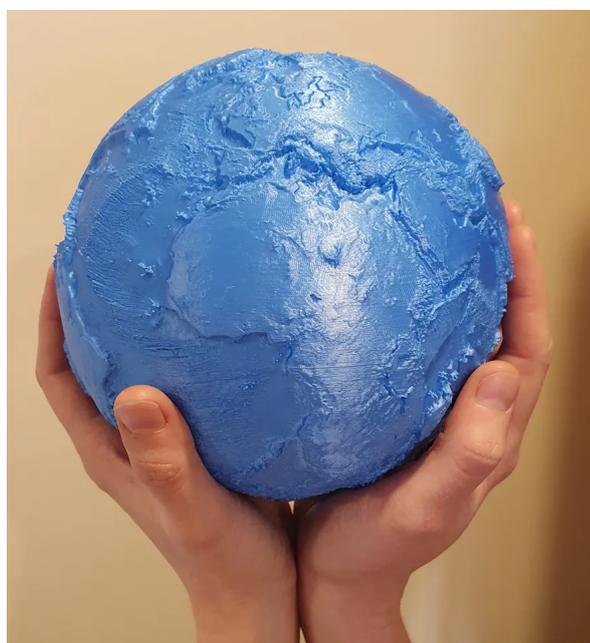
3.4.1 Escolas

A adoção da manufatura aditiva nas escolas representa uma evolução significativa nos métodos pedagógicos tradicionais, introduzindo uma ferramenta que potencializa tanto a aprendizagem quanto a criatividade dos alunos. A capacidade de transformar conceitos teóricos em objetos físicos realça o processo de ensino, tornando-o mais tangível

e interativo. Esse método estimula o engajamento dos alunos, pois permite a visualização e manipulação de modelos que anteriormente só poderiam ser imaginados ou visualizados em livros e telas (Eisenberg, 2013).

Em paralelo a isso, a impressão 3D também incentiva uma abordagem interdisciplinar no ambiente escolar. Ela não está restrita às aulas de ciências e matemática, mas estende seu alcance a disciplinas como história, geografia e arte, nas quais a criação de réplicas e modelos pode enriquecer a compreensão dos alunos sobre diversos temas, como pode ser visto na Figura 8. A flexibilidade desta tecnologia em adaptar-se a diferentes conteúdos curriculares mostra sua versatilidade e capacidade de enriquecer diversas áreas do conhecimento (Blikstein, 2013).

Figura 8 – Globo impresso em alta resolução



Fonte: (Winterbourne, 2023)

No entanto a implementação da impressão 3D em escolas também enfrenta desafios, incluindo a necessidade de formação contínua dos professores e a integração curricular, já que o sucesso dessa iniciativa depende fortemente do suporte institucional e da disponibilidade de recursos, que incluem o acesso a materiais adequados e a manutenção de equipamentos. Logo, é crucial que os educadores estejam preparados e motivados para explorar as possibilidades pedagógicas que essa nova tecnologia oferece (Bull *et al.*, 2015).

Vale ressaltar, porém, que o impacto da impressão 3D nas escolas vai além da sala de aula. Ele promove o desenvolvimento de habilidades importantes como o pensamento crítico, a resolução de problemas e a criatividade. Essas competências são essenciais no mundo moderno, no qual a capacidade de inovar e adaptar-se a novas tecnologias é cada vez mais valorizada. Assim, ao integrar a manufatura aditiva no ambiente educacional, prepara-

se os alunos não apenas para os desafios acadêmicos, mas também para as demandas de um mercado de trabalho em constante evolução (Liu *et al.*, 2017).

3.4.1.1 Educação Infantil

A inclusão da impressão 3D na educação infantil oferece uma nova dimensão ao aprendizado exploratório. Nesse nível, a tecnologia não apenas captura a imaginação das crianças, mas também as envolve em aprendizagem prática que auxilia na construção conceitual de geometria básica e ciências. Durante uma discussão não oficial com membros do Colégio Adventista de Blumenau, relatou-se que um dos desafios enfrentados pelos educadores na educação infantil é a consolidação do entendimento acerca da distinção entre objetos bidimensionais e tridimensionais. Por exemplo, compreender as diferenças entre um triângulo e uma pirâmide, ou entre um quadrado e um cubo. A fabricação de objetos tridimensionais permite que as crianças vejam os resultados de suas ideias em formas físicas, o que é fundamental para o desenvolvimento de habilidades espaciais e de resolução de problemas, sendo esse um método de ensino que estimula a curiosidade natural das crianças, incentivando-as a explorar e a aprender de maneira mais eficaz, com o uso de modelos como os da Figura 9 e Figura 10.

Figura 9 – Polígonos Platônicos

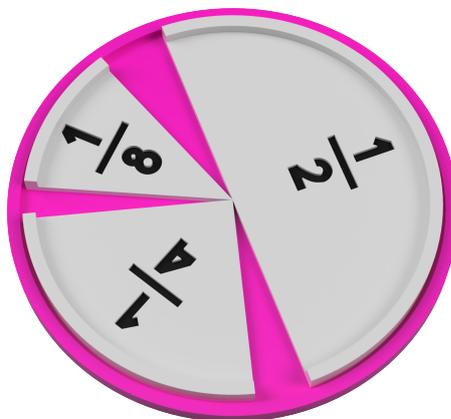


Fonte: (flipmarley, s.d.)

Nesse contexto, a introdução de atividades de sala de aula, com o uso dessa tecnologia pode ser um grande facilitador no desenvolvimento de habilidades motoras finas. Manipular *designs* em *softwares* e posteriormente observar a impressora em ação são atividades que requerem atenção e precisão, elementos chave no desenvolvimento infantil. Estudos mostram que projetos simples, como a criação de pequenos animais ou objetos que as crianças podem usar em suas brincadeiras, fortalecem não apenas as habilidades técnicas, mas também o trabalho em equipe e a comunicação (Cook, Bush e Cox, 2015).

Além dos aspectos técnicos, a impressão 3D pode ajudar a fomentar a criatividade e a expressão artística entre os mais jovens. A possibilidade de trazer à realidade física

Figura 10 – Modelo em disco para ensino de frações



Fonte: Autor

as criações que surgem na imaginação das crianças serve como uma poderosa ferramenta de expressão. Isso é particularmente importante na educação infantil, onde a criatividade desempenha um papel central no desenvolvimento cognitivo, pois o uso dessa tecnologia nas escolas permite que os alunos experimentem com cores, formas e texturas de uma maneira interativa e engajadora (Chen, Zhang, Yun e Zhang, Y.-l., 2014).

Para avaliar a eficácia desses modelos no ensino de conceitos matemáticos como frações, realizamos um comparativo entre o modelo de impressão 3D, elaborado pelo autor (Figura 10) e um modelo comercial em plástico injetado (Figura 11), tradicionalmente usado em escolas. Este comparativo, detalhado no Quadro 3, emprega critérios específicos para analisar aspectos distintos dos modelos, permitindo uma avaliação objetiva e pormenorizada de suas eficácias pedagógicas e limitações.

Os critérios adotados incluem Engajamento, que mede o interesse dos alunos pelo material; Flexibilidade, avaliando a adaptabilidade do modelo a diferentes estilos de aprendizagem; Compreensão, que indica a eficácia na transmissão de conceitos complexos; Custo, considerando os gastos para implementação; Durabilidade, relacionada à vida útil do material; e Aprendizado Ativo, que analisa o potencial de interação e envolvimento do aluno. Tal estruturação criteriosa destaca as vantagens dos recursos tridimensionais em contraste com métodos mais tradicionais (Kohen e Gharra-Badran, 2022).

Finalmente, a integração da impressão 3D na educação infantil é valorizada não só pelo aspecto lúdico, mas também pelo seu potencial pedagógico. Professores podem utilizar recursos impressos em 3D para ensinar letras, números e conceitos básicos de ciências, tornando o aprendizado mais tangível e compreensível para os alunos. Assim, a tecnologia não é vista apenas como uma ferramenta para engenheiros e designers, mas como um meio de enriquecer o currículo escolar desde os primeiros anos de formação

Quadro 3 – Comparativo entre Modelo de Impressão 3D e Modelo Tradicional para Ensino de Frações

Critério	Modelo em Impressão 3D	Modelo Tradicional	Comentários
Engajamento	Alto	Baixo	O modelo 3D captura mais o interesse dos alunos, facilitando a compreensão intuitiva.
Flexibilidade	Alta	Baixa	O modelo 3D é mais adaptável a diferentes estilos de aprendizagem e necessidades.
Compreensão	Alta	Média	Modelos 3D são particularmente eficazes para ensinar conceitos matemáticos complexos.
Custo	Médio/Alto	Baixo	O custo pode ser uma barreira para a implementação do modelo 3D em algumas escolas.
Durabilidade	Alta	Variável	Modelos 3D podem ser mais sustentáveis a longo prazo devido à sua reutilização.
Aprendizado Ativo	Forte	Limitado	A interatividade do modelo 3D promove um aprendizado mais engajador e efetivo.

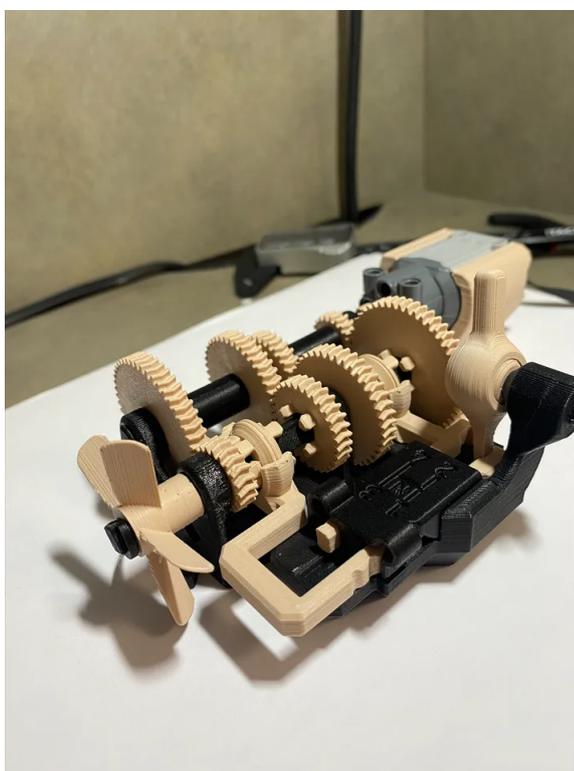
Fonte: (Karsenty, Guitarte, Dulac *et al.*, 2021; Salazar, Thompson, Rosen *et al.*, 2022)(Adaptado)

explorar conceitos de história e geografia, criando réplicas de artefatos históricos ou modelos geográficos. Esse método não só torna o aprendizado mais interativo, mas também ajuda os alunos a entender melhor e a reter informações sobre culturas e geografias distantes. A inclusão de projetos multidisciplinares reforça a utilidade da impressão 3D como uma ferramenta educacional que vai além do escopo tradicional, proporcionando uma educação mais rica e variada (Stansell e Tyler-Wood, 2016).

3.4.1.3 Ensino Médio

No ensino médio, a impressão 3D é empregada não apenas como uma ferramenta para o aprendizado de disciplinas específicas, mas também como um meio de preparar os estudantes para carreiras futuras. A complexidade dos projetos pode ser aumentada nesse nível, permitindo aos alunos explorar e implementar ideias mais sofisticadas. A exemplo disso, tem-se, a construção de protótipos funcionais, como miniaturas de motores ou partes de máquinas, que oferece aos estudantes uma compreensão prática das aplicações da engenharia e da física (Dumond *et al.*, 2014), como pode ser visto nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Transmissão Manual de Malha Constante de 4 Velocidades

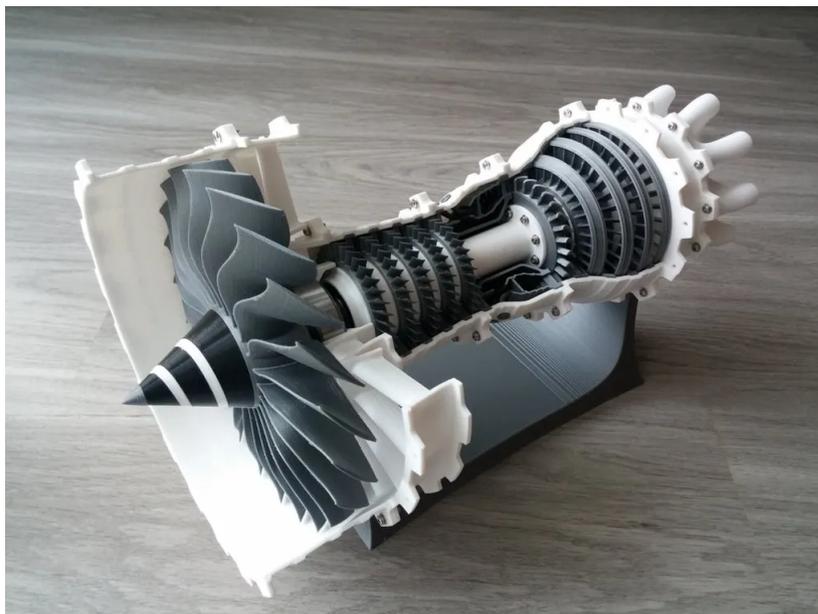


Fonte: (MW-Mechanical, 2023)

Em paralelo a isso, a interação com a impressão 3D no ensino médio também promove um entendimento mais profundo do design e da inovação tecnológica. Através de projetos que integram conceitos de arte, matemática e ciências, os alunos são desafiados a pensar de maneira crítica e criativa. Essa forma de educação STEM enfatiza a importância da criatividade no desenvolvimento tecnológico e prepara os alunos para pensar de forma inovadora e interdisciplinar (Mahil, 2016).

No campo da biologia, por sua vez, a impressão 3D multicolorida abre novas perspectivas para o estudo de estruturas complexas, permitindo a reprodução de modelos anatômicos detalhados em múltiplas cores para uma compreensão mais clara de diferentes tipos de tecidos e órgãos, como demonstrado nas Figuras 14, 15 e 16. Esses modelos são

Figura 13 – Motor a Jato Impresso em 3D



Fonte: (CATIAV5FTW, 2023)

produzidos por uma empresa versátil de Joinville, STLFLIX (2024), que se destaca na comercialização de modelos impressos em 3D, abrangendo uma ampla gama de aplicações, além do âmbito educacional. Através de um modelo de assinatura, a empresa disponibiliza seu portfólio para parceiros, que podem imprimir e comercializar esses modelos conforme necessário.

Figura 14 – Neurônio impresso



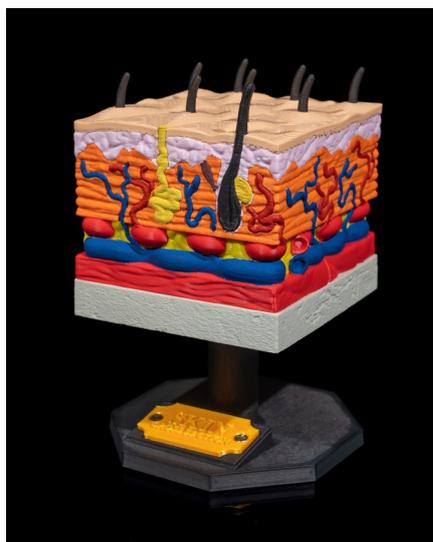
Fonte: (STLFLIX, 2024)

Figura 15 – Célula vegetal impressa



Fonte: (STLFLIX, 2024)

Figura 16 – Recorte de seção da pele impresso com tecnologia multicolorida



Fonte: (STLFLIX, 2024)

Essa abordagem de assinatura permite que os parceiros tenham acesso regular a novos designs e atualizações, garantindo que possam oferecer produtos sempre inovadores e de alta qualidade para diversos mercados, incluindo educação, saúde e entretenimento. Além disso, ao possibilitar a impressão local pelos parceiros, a empresa contribui para reduzir os custos logísticos e promove uma maior personalização dos produtos de acordo com as demandas específicas de cada mercado. Por conseguinte, a empresa de Joinville não só fomenta o uso da tecnologia de impressão 3D, mas também estimula economicamente

a região através de uma rede de produção e comercialização flexível e expansiva.

Adicionalmente, a capacidade de personalizar projetos e experimentar materiais diferentes na impressão 3D permite que os alunos do ensino médio desenvolvam uma relação mais íntima com o processo de criação e produção. Isso não apenas aumenta a satisfação e o engajamento dos alunos, mas também incentiva a autonomia e a responsabilidade pessoal em seus projetos acadêmicos. Projetos significativos, como a criação de próteses acessíveis, como pode ser vista na Figura 17, para comunidades carentes, demonstram o impacto social que a impressão 3D pode ter, inspirando os alunos a considerar as implicações éticas e sociais de suas inovações. (Jacobs *et al.*, 2016).

Figura 17 – Mão protética impressa



Fonte: (JorgeZuniga, 2014)

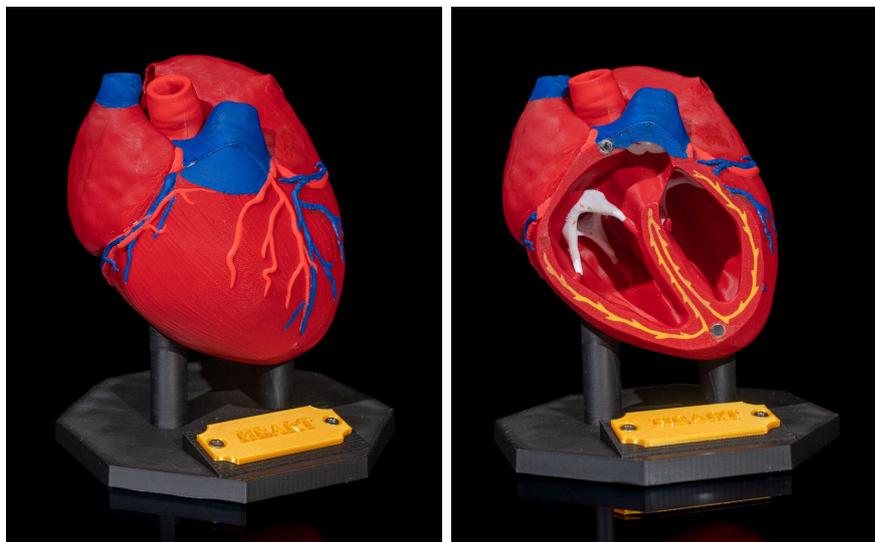
Finalmente, integrar a impressão 3D no currículo escolar do Ensino Médio está alinhado com as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que enfatiza o desenvolvimento de competências essenciais para o século XXI. A BNCC propõe uma educação que mobiliza conhecimentos, habilidades, atitudes e valores para que o estudante esteja apto a resolver demandas do cotidiano e do mundo do trabalho. A inserção da impressão 3D como ferramenta pedagógica pode fomentar a competência de pensar científica, crítica e criativamente, além de desenvolver a capacidade de argumentação e de trabalho em equipe através de projetos práticos. (SAE Digital, 2023)

O treinamento prático na tecnologia pode ser um diferencial significativo na preparação dos alunos para cursos técnicos avançados ou carreiras nas indústrias de tecnologia e engenharia (Lütolf, 2013). Essa abordagem educacional não só reforça a aplicabilidade do conhecimento adquirido, mas também destaca a importância da contínua adaptação e aprendizado ao longo da vida.

3.4.1.3.1 Impressão multicolorida

A impressão 3D multicolorida é crucial para a representação fiel de modelos complexos, especialmente no contexto educacional. Essa tecnologia permite que professores e alunos visualizem com precisão as interações e as diferenciações entre diversas estruturas, o que é essencial para uma compreensão aprofundada. Um exemplo disso, em um modelo anatômico do coração, é o uso de diferentes cores para indicar claramente as câmaras cardíacas, válvulas e fluxo sanguíneo, melhorando significativamente o processo de ensino e aprendizado, como pode ser visto na Figura 18. Isso porque a capacidade de imprimir em múltiplas cores ajuda na identificação rápida de características específicas, permitindo a assimilação de informações complexas com maior facilidade.

Figura 18 – Coração impresso com tecnologia multicolorida



Fonte: (STLFLIX, 2024)

Ademais, a implementação de impressão 3D multicolorida no ensino médio incentiva o desenvolvimento de habilidades técnicas e criativas nos alunos. Trabalhar com essa tecnologia não só engaja os estudantes de forma prática e interativa, mas também os prepara para futuras demandas profissionais em campos que utilizam intensivamente a impressão 3D, como a engenharia, a arquitetura e a medicina. A introdução dessas habilidades em uma fase educacional inicial pode promover uma curva de aprendizado mais suave para tecnologias emergentes, além de fomentar a inovação e a criatividade através de projetos e desafios de design multidisciplinar.

Por fim, a impressão 3D multicolorida no ambiente educacional serve como uma ferramenta excepcional para a inclusão. Alunos com diferentes estilos de aprendizado, incluindo aqueles com deficiências visuais, podem beneficiar-se enormemente de modelos táteis que são diferenciados por cor. A tecnologia não somente torna o aprendizado mais

acessível, mas também promove uma atmosfera de ensino mais inclusiva e adaptativa, onde todos os alunos têm a oportunidade de explorar e entender complexidades científicas e matemáticas de maneira mais eficaz e engajadora. Logo, a utilização destes recursos inovadores demonstra o potencial da impressão 3D para transformar o ensino, tornando-o mais dinâmico, inclusivo e adaptado às necessidades de cada estudante.

3.4.2 Universidades

A adoção da impressão 3D nas universidades tem demonstrado um impacto significativo em diversas áreas do ensino superior. As instituições têm liderado na implementação dessa tecnologia, incorporando-a em múltiplos aspectos do currículo acadêmico, desde a engenharia até as ciências e além. A literatura sobre a impressão 3D em ambientes universitários abrange desde a criação de sistemas e modelos científicos até a sua aplicação em aprendizado baseado em projetos e no desenvolvimento de habilidades específicas através da integração em cursos existentes ou na introdução de novos cursos (Junk e Matt, 2015).

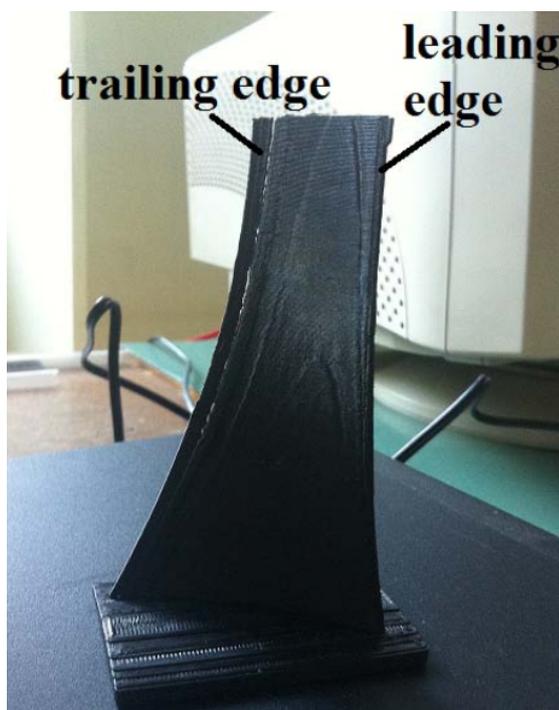
Nos cursos de engenharia, por exemplo, a construção de impressoras 3D de código aberto RepRap é frequentemente um projeto central em cursos de mecatrônica, como observado na Universidade da Filadélfia, Jordânia (Kayfi, Ragab e Tutunji, 2015), e também faz parte de projetos de conclusão de curso apoiados pela seção Princeton / Central Jersey do IEEE (Mercuri e Meredith, 2014). Esses projetos não apenas reforçam o conhecimento técnico dos estudantes, mas também promovem habilidades práticas essenciais e entendimento do design mecânico.

Particularmente nas ciências, os modelos tridimensionais são utilizados para facilitar o aprendizado dos alunos em laboratórios ou em configurações de sala de aula, ajudando na visualização de conceitos complexos e na realização de experimentos mais eficazes (McGahern, Bosch e Poli, 2015; Bagley e Galpin, 2015; Hall *et al.*, 2017; Kröger, Dekiff e Dirksen, s.d.). Além disso, estudantes de engenharia mecânica utilizam componentes impressos para experimentos com ventiladores e turbocompressores (Ver Figura 19) e estudantes de engenharia aeroespacial no Technion – Instituto de Tecnologia de Israel criam configurações de *spoilers* de asa, cujos efeitos são medidos usando modelos em túneis de vento (Figura 20) (Janković *et al.*, 2016; Kroll e Artzi, 2011).

No campo da robótica, em contrapartida, a impressão 3D serve como uma ferramenta de baixo custo para o desenvolvimento de robôs educacionais e dispositivos hápticos. O uso de chassis impressos permite que os alunos modifiquem as plataformas robóticas e compartilhem suas modificações, promovendo um ambiente de aprendizado colaborativo e inovador (Valero-Gomez *et al.*, 2012; Vandeveldel *et al.*, 2016; Vona e NH, 2013; Wong e Cheng, 2016; Ziaeeafard, Ribeiro e Mahmoudian, 2015; Gonzalez-Gomez *et al.*, 2012; Krauss e VanderRoest, 2017; Martinez *et al.*, 2016).

Além da aplicação prática, várias universidades reconheceram a necessidade de inte-

Figura 19 – Modelo impresso de uma pá de compressor



Fonte: (Janković *et al.*, 2016)

grar explicitamente habilidades de modelagem e prototipagem rápida¹ em seus currículos, apesar do uso das impressoras 3D ainda não ser amplamente difundido. A Universidade da Geórgia do Norte, por exemplo, integrou essas técnicas em um curso de gráficos de computador, permitindo que os alunos desenvolvam habilidades de modelagem, digitalização e prototipagem rápida (Payne, 2015). Outras instituições, como a Universidade de Tsinghua e a Universidade Estadual de Londrina no Brasil, incorporaram a impressão 3D em cursos de engenharia e design gráfico, respectivamente, levando a um aumento do interesse pela tecnologia em outras áreas da universidade (Lin *et al.*, 2012; Sampaio *et al.*, 2013).

Vale ressaltar que a incorporação da impressão 3D nas universidades não se limita a melhorar o aprendizado técnico e científico; ela também altera a dinâmica tradicional entre estudantes e professores. Na Universidade Griffith, por exemplo, a adoção dessa tecnologia promoveu uma aprendizagem centrada no aluno e facilitou uma abordagem de sala de aula invertida, na qual os alunos muitas vezes trazem novas informações sobre a tecnologia, desempenhando um papel mais ativo no processo educacional (Loy, 2014).

Nesse contexto, é notório que a introdução de tecnologias de impressão multimaterial nas instituições de ensino superior representa um avanço significativo na prototipagem rápida, incorporando uma gama diversificada de materiais como o *PLA-Carbon Fiber*

¹ Prototipagem rápida é a criação acelerada de modelos físicos usando técnicas de fabricação aditiva, permitindo avaliações rápidas de design e funcionalidade.

Figura 20 – Teste em túnel de vento do protótipo impresso



Fonte: (Kroll e Artzi, 2011)

(PLA-CF), *PETG-Carbon Fiber* (PETG-CF), *Thermoplastic Polyurethane* (TPU), *Acrylonitrile Styrene Acrylate* (ASA), e *Polyvinyl Alcohol* (PVA). Essa diversidade de material permite a fabricação de peças com propriedades mecânicas específicas e superiores, adaptadas às necessidades de cada projeto. A combinação de materiais, como o TPU, que é flexível, e o PLA-CF, conhecido pela sua rigidez e resistência, possibilita a criação de componentes que são simultaneamente fortes e maleáveis. Essa capacidade abre portas para aplicações inovadoras em campos como a indústria e a biomedicina, onde a personalização e as características específicas dos materiais são cruciais.

Além disso, a tecnologia de impressão que suporta múltiplos materiais em uma única peça facilita enormemente o processo de montagem, ao mesmo tempo em que permite a criação de estruturas complexas, anteriormente inalcançáveis com métodos de fabricação tradicionais. Isso é particularmente valioso em áreas como a medicina regenerativa e a robótica, nas quais a customização precisa de componentes é fundamental. Desse modo, o potencial para a inovação aumenta consideravelmente com a capacidade de misturar propriedades distintas dos materiais, como elasticidade, durabilidade e resistência ao calor, em um único objeto. Essa abordagem multidisciplinar não apenas acelera o desenvolvimento de soluções personalizadas, mas também potencializa o intercâmbio criativo e colaborativo dentro do ambiente acadêmico, ampliando o impacto da impressão 3D na educação e na pesquisa científica. Nesse viés, a Figura 21 mostra uma impressora 3D capaz de utilizar até 16 filamentos diferentes, exemplificando a versatilidade e capacidade dessa tecnologia.

Finalmente, a impressão 3D está sendo cada vez mais reconhecida pelas suas contribuições para a segurança em laboratório, a verificação rápida de designs e a capacidade de conectar conhecimentos de várias disciplinas científicas e matemáticas através de obje-

Figura 21 – Impressora 3D capaz de utilizar até 16 filamentos diferentes.



Fonte: (Lab, s.d.)

tos construídos em 3D. Como resultado, essa tecnologia está remodelando não apenas a forma como os conteúdos são ensinados, mas também como os estudantes interagem com o material de aprendizagem, proporcionando uma experiência educacional mais interativa e multidimensional (Jaksic, 2014).

3.4.3 Educação Especial

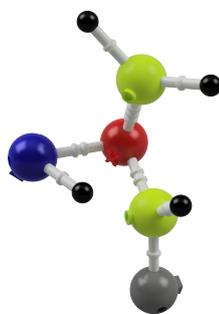
A impressão 3D está ganhando crescente atenção para aplicações na área de educação especial, oferecendo recursos significativos para alunos com deficiências visuais, motoras e cognitivas. Em tais contextos, diversos exemplos destacam o uso dessa tecnologia por estudantes com deficiências visuais, explicitados por Horowitz e Schultz (2014) e Stangl, Jernigan e Yeh (2015), motoras por Buehler, Hurst e Hofmann (2014), Cook, Bush e Cox (2015) e Jacobs *et al.* (2016) e cognitivas por Easley *et al.* (2017) e Buehler *et al.* (2015), além de combinações dessas deficiências Buehler *et al.* (2016), McLoughlin *et al.* (2016) e Buehler, Kane e Hurst (2014).

Diante disso, os dispositivos assistivos criados através da impressão 3D têm oferecido suporte personalizado que se ajusta às necessidades específicas de cada aluno, permitindo uma experiência educacional mais inclusiva e acessível. Como exemplo disso, modelos táteis e ferramentas educacionais impressas podem ajudar alunos com deficiências visuais a compreender conceitos que seriam inacessíveis por métodos tradicionais de ensino. Essas ferramentas proporcionam uma representação física de dados visuais, como gráficos e diagramas, tornando o conteúdo compreensível através do tato (Jo *et al.*, 2016).

Em particular, a criação de modelos educacionais em 3D para o ensino de química tem sido enriquecida com contribuições significativas, incluindo o desenvolvimento de modelos moleculares acessíveis. Este avanço é exemplificado pelo trabalho descrito em Gaspar

(2023), no qual participei na construção de modelos moleculares usando impressoras 3D. Estes modelos foram criados em parceria com Gaspar (2023) e envolvem três tipos de geometrias: Trigonal, Octaédrica e Ortogonal. Adicionalmente, selecionamos cores contrastantes e símbolos que são mais facilmente reconhecíveis através do tato, aprimorando a experiência educativa para estudantes com deficiências visuais. Os modelos também incluem conectores que representam ligações químicas, que podem ser simples, duplas ou triplas, conforme ilustrado na Figura 23. Esses modelos são projetados para melhorar a compreensão de conceitos químicos por estudantes com deficiências visuais, evidenciando o potencial inovador da impressão 3D no contexto educacional especializado (Gaspar, 2023). A representação desses modelos pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Montagem de um conjunto de átomos e ligações químicas



Fonte: Autor

Figura 23 – Modelo de ligações químicas desenvolvido. Tripla, dupla e simples, respectivamente



Fonte: Autor

No entanto, a implementação dessa tecnologia na educação especial enfrenta diversos desafios, semelhantes aos observados em outras áreas de aplicação. De acordo com um estudo de dois anos realizado por Buehler *et al.* (2016), a introdução da impressão 3D enfrentou obstáculos significativos, particularmente no que diz respeito à capacitação e ao envolvimento dos alunos em projetos de design próprio. Muitos alunos com deficiências

cognitivas lutaram com a complexidade de softwares de design, como o Tinkercad, e a necessidade de pensar em três dimensões, o que resultou numa preferência por modificar designs pré-existent de fontes abertas ao invés de criar os próprios modelos (Buehler *et al.*, 2016, 2015).

Adicionalmente, os terapeutas ocupacionais envolvidos nos estudos expressaram preocupações sobre o esforço necessário para aprender a usar o software de impressão 3D. Embora reconhecessem o potencial da tecnologia para melhorar significativamente a educação e a autonomia dos alunos, muitos se viam mais como consumidores dos recursos impressos do que como criadores ativos. Esse desafio destaca a necessidade de programas de treinamento e desenvolvimento profissional que possam equipar os educadores com as habilidades necessárias para integrar efetivamente a impressão 3D na educação especial (Buehler *et al.*, 2016).

Além dos dispositivos assistivos personalizados, a impressão 3D também permite a criação de modelos educacionais que são especialmente valiosos para melhorar o aprendizado e a interação de pessoas com deficiências. Modelos de anatomia, mapas táteis e peças interativas que facilitam a compreensão de conceitos matemáticos e científicos são apenas alguns exemplos de como essa tecnologia pode ser adaptada para atender às necessidades educacionais especiais. Um exemplo notável desenvolvido é um modelo de célula biológica tátil (15), que permite aos alunos com deficiências visuais explorar a estrutura celular através do tato. Esses modelos não apenas enriquecem a experiência educacional, mas também promovem a inclusão, permitindo que todos os alunos participem ativamente das atividades de aprendizagem. Iniciativas como estas demonstram o potencial transformador da impressão 3D em tornar o ensino mais acessível e envolvente para alunos com diferentes necessidades (Buehler *et al.*, 2016). Ver Figuras 22 e 24 para exemplos ilustrativos.

Figura 24 – Célula de Pino em Braille - Ferramenta para o Ensino de Letras em Braille



Fonte: (Printy, s.d.)

Em suma, enquanto a impressão 3D oferece oportunidades transformadoras para a educação especial, sua implementação bem-sucedida requer uma consideração cuidadosa das capacidades dos alunos e do treinamento dos profissionais envolvidos. As soluções devem ser adaptadas para atender às necessidades individuais dos alunos, garantindo que todos possam se beneficiar da tecnologia sem serem sobrecarregados pelos desafios técnicos. A colaboração contínua entre desenvolvedores de tecnologia, educadores e terapeutas ocupacionais será crucial para maximizar o impacto positivo da impressão 3D em ambientes de educação especial.

4 IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, oferece potenciais benefícios ambientais significativos em comparação com métodos de fabricação convencionais, mas esses benefícios dependem amplamente do uso e configuração da tecnologia. As impressoras 3D são capazes de produzir peças complexas com menos desperdício de material, pois adicionam material camada por camada em vez de removê-lo, reduzindo o desperdício de material em até 90% em comparação com métodos tradicionais (Environment, 2020). Além disso, a capacidade de produzir localmente pode diminuir a pegada de carbono associada ao transporte de produtos e componentes. Contudo, o consumo de energia ainda representa um desafio, pois alguns processos de impressão 3D podem ser mais intensivos em energia do que os métodos tradicionais, especialmente se não forem otimizados para eficiência energética (3DPrint.com, 2019).

Os materiais usados na impressão 3D também são uma consideração crítica para a sustentabilidade. O uso de polímeros biodegradáveis e reciclados, como o PLA, que é derivado de recursos renováveis como o milho, está crescendo. Esses materiais não apenas ajudam a reduzir a dependência de plásticos à base de petróleo, mas também oferecem melhores opções de fim de vida para os produtos, como compostagem ou reciclagem mais facilitada (Sustainly, 2020; 3DPrint.com, 2019).

A *Life cycle assessment* (LCA) de produtos impressos em 3D revela que, enquanto a produção pode ser mais eficiente, as fases de uso e fim de vida dos produtos precisam ser melhoradas para maximizar os benefícios ambientais. Estudos de LCA mostram que a impressão 3D pode reduzir o impacto ambiental durante a fase de produção, mas os impactos durante a fase de uso e as opções de reciclagem ou descarte são igualmente importantes para avaliar a sustentabilidade geral (3DPrint.com, 2019).

Além disso, há desafios regulatórios e normativos que precisam ser superados para facilitar uma adoção mais ampla de práticas sustentáveis na impressão 3D. A harmonização das regulamentações ambientais pode ajudar a promover inovações sustentáveis e permitir que a indústria de impressão 3D prospere de maneira ecologicamente responsável. O desenvolvimento e a adoção de ferramentas padronizadas para medir a sustentabilidade na impressão 3D poderiam facilitar este processo, ajudando as empresas a alinhar suas operações com objetivos de sustentabilidade globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (3DPrint.com, 2019).

4.1 REDUÇÃO DE DESPERDÍCIO NA IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D apresenta várias estratégias eficazes para redução de desperdício de materiais, sendo notavelmente eficiente devido ao seu processo de fabricação aditiva. A otimização dos parâmetros de impressão, como espessura das camadas, densidade do preenchimento e velocidade de impressão, pode reduzir significativamente o desperdício de

material, garantindo a qualidade e integridade estrutural dos objetos impressos (Nexa3D, 2023). Técnicas de pós-processamento, como polimento e usinagem, também são essenciais, pois melhoram o aproveitamento das impressões sem necessidade de re-impressões frequentes (JLCPCB, 2023).

A reciclagem de materiais é outra frente crucial para a sustentabilidade na impressão 3D. Materiais como PLA, *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e pós metálicos podem ser reciclados através de processos que incluem trituração, extrusão e fusão dos resíduos das impressões, convertendo-os novamente em filamentos ou resinas utilizáveis (JLCPCB, 2023; Nexa3D, 2023). De modo especial, a reciclagem de pó em técnicas como SLS e *Selective Laser Melting* (SLM) é cada vez mais comum, permitindo a reutilização do pó não fundido, o que reduz o desperdício e maximiza a eficiência do material (ShapeWays, 2022).

Além disso, a conscientização sobre práticas sustentáveis e a formação educacional em impressão 3D podem ser promovidas por meio de programas de treinamento e materiais educativos, incentivando a adoção de práticas responsáveis. Parcerias entre fabricantes, fornecedores de materiais e instalações de reciclagem podem fortalecer a implementação de sistemas de economia circular, transformando o desperdício de um processo em insumo para outro, o que promove um ambiente mais sustentável (JLCPCB, 2023).

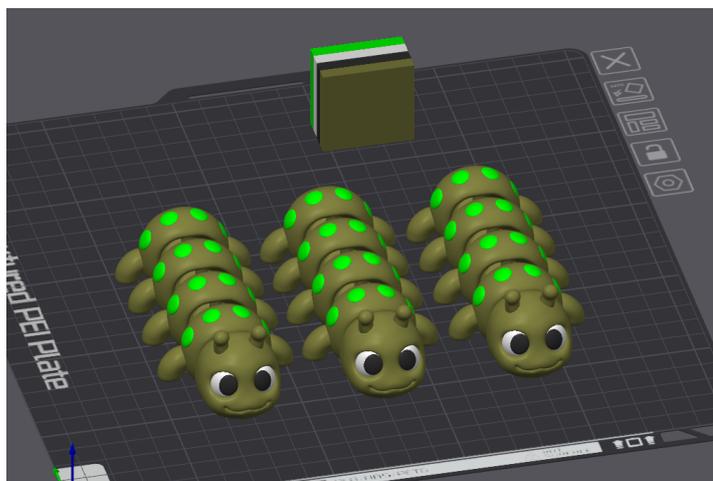
4.1.1 Impressão com múltiplos materiais

Na impressão 3D com múltiplos materiais utilizando impressoras de um único bico, como é o caso de alguns modelos da BambuLab, enfrenta-se um desafio específico no gerenciamento de resíduos. Durante a troca de materiais, uma quantidade considerável de filamento é desperdiçada no processo de purga, necessário para expelir completamente o filamento anterior do bico antes de iniciar a impressão com um novo material. Esse procedimento é vital para garantir a pureza e a qualidade da impressão, mas gera perdas de material que necessitam ser minimizadas.

Para mitigar esse desperdício, várias estratégias têm sido implementadas, incluindo a otimização do software de fatiamento. O BambuStudio, por exemplo, possui um sistema avançado que calcula o volume de purga necessário, que varia conforme a cor do filamento. Esse sistema permite ajustar o ponto de troca de filamento e o comprimento do filamento purgado, equilibrando a minimização de resíduos e a manutenção da qualidade da impressão. Como exemplo prático dessas otimizações, será apresentado um modelo que contém quatro cores durante as demonstrações (Figura 25), ilustrando o cálculo de volume de purga no BambuStudio, como mostrado na Figura 26, onde diferentes cores requerem volumes de purga variáveis.

Além disso, é possível utilizar um objeto designado como purga, aproveitando material que de outra forma seria descartado. As Figuras 27 e 28 mostram um exemplo de objeto utilizado como purga e as estatísticas de consumo de material utilizando essa

Figura 25 – Modelo utilizado para testes



Fonte: Autor

Figura 26 – Volume de purga em mm³

Flushing volumes for filament change

Studio would re-calculate your flushing volumes everytime the filaments color changed or filaments changed. You could disable the auto-calculate in Bambu Studio > Preferences

Re-calculate

To / From	1	2	3	4
1	0	89	248	198
2	214	0	316	304
3	96	90	0	177
4	132	110	283	0

Flushing volume (mm³) for each filament pair.
Suggestion: Flushing Volume in range [107, 800]

Multiplier:
The multiplier should be in range [0.00, 3.00].

OK Cancel

Fonte: Autor

técnica, respectivamente.

Na técnica apresentada, verifica-se geralmente um incremento no consumo de material. Contudo, é factível o aproveitamento de resíduos que, embora não necessariamente atraentes, podem ser reutilizados na fabricação de outras peças funcionais.

Outra abordagem utilizada são as torres de purga, também conhecidas como *wipe towers*. Essas torres são impressas ao lado do objeto principal e servem para a limpeza e *priming* do bico durante as transições de material. Embora consumam material, elas são projetadas para garantir que apenas o mínimo necessário seja utilizado. As Figuras 29, 30 e 31 apresentam um objeto impresso usando mais de um material e evidenciam o volume desperdiçado na torre e na purga, respectivamente.

Figura 27 – Impressão do mesmo objeto mas com a purga em outro modelo



Fonte: Autor

Figura 28 – Projeção de uso dos materiais utilizando a purga em outro modelo

Color Scheme		Filament		
Filament	Model	Flushed	Tower	Total
1	31.23 m 93.14 g	2.23 m 6.64 g	1.95 m 5.82 g	35.41 m 105.61 g
2	0.21 m 0.61 g	0.88 m 2.61 g	0.40 m 1.18 g	1.48 m 4.41 g
3	1.48 m 4.45 g	4.36 m 13.11 g	1.14 m 3.43 g	6.98 m 20.99 g
4	1.67 m 4.98 g	2.20 m 6.55 g	0.60 m 1.78 g	4.46 m 13.31 g
Total	34.58 m 103.19 g	9.66 m 28.92 g	4.08 m 12.21 g	48.33 m 144.31 g
Filament change times: 142				
Cost: 2.95				
Time Estimation				
Prepare time: 6m1s				
Model printing time: 8h19m				
Total time: 8h25m				
Options		Display		
<input type="checkbox"/>	Travel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Retract	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Unretract	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Wipe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Seams	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor

Nos modelos da linha X e P da BambuLab, novos perfis de impressão desenvolvidos pela comunidade permitem uma redução de até 50% no desperdício de material, graças à adição de uma retração antes do corte do filamento. Essa inovação não só melhora a eficiência do uso de material, mas também mantém a alta qualidade das impressões. Na linha A, a redução é de aproximadamente 35%. A Figura 32 mostra o valor projetado de desperdício calculado pelo software. Cabe notar que essa técnica foi utilizada na impressão do modelo de demonstração apresentado e que sem ela os resultados seriam ainda mais expressivos.

Adicionalmente, sistemas mais sofisticados de controle de extrusão estão sendo

Figura 29 – Modelo impresso ao lado do material descartado na troca de cores



Fonte: Autor

Figura 30 – Peso total da torre de purga



Fonte: Autor

explorados. Esses sistemas podem ajustar dinamicamente as configurações de impressão em tempo real, otimizando o uso do filamento e potencialmente reutilizando o material purgado para a fabricação de novos filamentos ou para outros processos dentro da mesma cadeia de produção.

Estas estratégias representam um avanço significativo na direção de práticas mais sustentáveis na impressão 3D com múltiplos materiais, reduzindo o impacto ambiental

Figura 31 – Peso total da purga



Fonte: Autor

Figura 32 – Projeção de uso de material

Color Scheme		Filament		
Filament	Model	Flushed	Tower	Total
1	28.65 m 85.44 g	2.37 m 7.07 g	1.95 m 5.82 g	32.97 m 98.33 g
2	0.21 m 0.61 g	0.88 m 2.61 g	0.40 m 1.18 g	1.48 m 4.41 g
3	0.49 m 1.49 g	5.38 m 16.18 g	1.14 m 3.43 g	7.02 m 21.10 g
4	1.53 m 4.55 g	2.34 m 6.99 g	0.60 m 1.78 g	4.47 m 13.32 g
Total		30.87 m 92.09 g	10.97 m 32.85 g	45.93 m 137.15 g
Filament change times: 142				
Cost: 2.81				
Time Estimation				
Prepare time: 6m1s				
Model printing time: 7h53m				
Total time: 7h59m				
Options		Display		
<input checked="" type="checkbox"/>	Travel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Retract	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Unretract	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Wipe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Seams	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor

associado ao desperdício de filamentos.

4.2 USO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS

A manufatura aditiva, em especial a tecnologia FDM, utiliza predominantemente plásticos para a produção de filamentos. Diante da crescente conscientização ambiental, porém, algumas empresas têm inovado ao adotar práticas mais sustentáveis na fabricação desses materiais. A empresa SUNLU, por exemplo, destaca-se por transformar resíduos de produção industrial em filamentos reciclados. Esse processo não apenas evita que esses

materiais acabem em aterros sanitários, mas também oferece uma alternativa econômica e eficaz para prototipagem, alinhada com os esforços de proteção ambiental (SUNLU INTERNATIONAL (HONG KONG) HOLDINGS LIMITED, 2024).

A SUNLU utiliza materiais descartados e semiacabados, que são geralmente reaproveitados por fábricas de moldagem por injeção para produzir utensílios e brinquedos plásticos. No entanto, a SUNLU reprocessa esses materiais, convertendo-os em novos filamentos reciclados. Esse produto é oferecido a um preço acessível, incentivando a comunidade de impressão 3D a participar ativamente dos esforços de sustentabilidade. É importante destacar que, apesar de reciclados, esses filamentos mantêm a qualidade de impressão, com a única diferença sendo a variação de cor, que é incontornável devido ao processo de reciclagem (SUNLU INTERNATIONAL (HONG KONG) HOLDINGS LIMITED, 2024).

Em contrapartida, a empresa eSUN adotou uma técnica diferente para reduzir o impacto ambiental de seus produtos. Em vez de focar no material do filamento, a eSUN revolucionou a embalagem ao substituir os carretéis plásticos por carretéis de papelão. Esta simples mudança reduz significativamente o uso de plásticos descartáveis, contribuindo para a diminuição da pegada ecológica da impressão 3D. Esse exemplo pode ser visto na figura 33.

Figura 33 – Carretel de filamento plástico eSUN

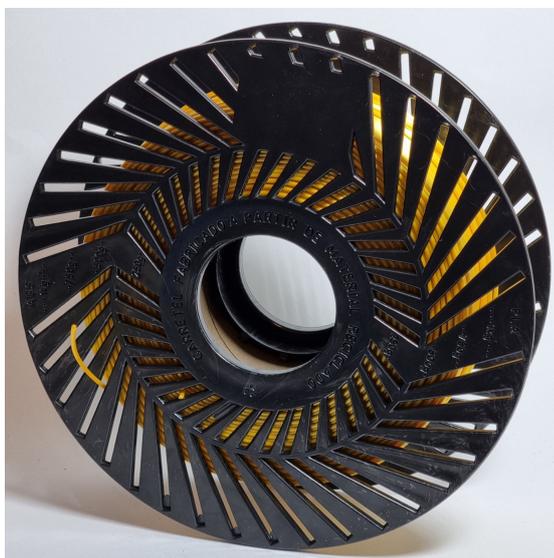


Fonte: Autor

Outra iniciativa relevante é a da 3D Lab, que produz seus carretéis usando ABS reciclado. Este tipo de abordagem não apenas promove o uso de materiais reciclados, mas também serve como exemplo de como as empresas podem repensar suas práticas produtivas para alinhá-las com os princípios de sustentabilidade, conforme observado na Figura 34. Essas ações das empresas SUNLU, eSUN e 3D Lab refletem um movimento mais

amplo no setor de manufatura aditiva para adotar práticas mais verdes, demonstrando que a inovação tecnológica pode andar de mãos dadas com a responsabilidade ambiental.

Figura 34 – Carretel de filamento plástico 3DLab



Fonte: Autor

5 DESAFIOS E BARREIRAS

As impressoras 3D têm se tornado cada vez mais acessíveis e fáceis de usar, marcando significativas melhorias na usabilidade e redução das barreiras de entrada para novos usuários. No entanto, a operacionalização dessas tecnologias ainda apresenta desafios significativos, incluindo a necessidade de habilidades técnicas especializadas para resolver problemas comuns, como bicos entupidos ou falhas em termistores (Industry, 2022).

A operação de impressoras 3D também pode ser desafiadora devido à complexidade dos problemas técnicos que surgem durante o uso. Esses problemas incluem, mas não se limitam a, manutenção de bicos, ajuste de termistores e gestão de falhas de *software*. Além disso, muitas impressoras operam em um ecossistema fechado, obrigando os usuários a adquirir filamentos e peças exclusivas da marca, o que limita a flexibilidade e aumenta os custos de manutenção (Engineering.com, 2022).

A adoção da impressão 3D também levanta questões complexas de propriedade intelectual, especialmente em relação ao uso e distribuição de modelos digitais. Com a tecnologia permitindo a reprodução fácil de produtos, surgem desafios significativos relacionados à proteção dos direitos autorais, patentes e marcas registradas. A falta de regulamentações claras e específicas para a impressão 3D complica ainda mais essa questão, pois os fabricantes e usuários devem navegar em um ambiente jurídico que ainda está se adaptando à nova tecnologia (Conner, Manogharan e Meyers, 2020).

Essas barreiras não apenas dificultam a operação eficiente das impressoras 3D, mas também limitam sua adoção em maior escala, apesar das vantagens significativas que oferecem em termos de personalização e eficiência de produção. O desenvolvimento contínuo de soluções de *software* e *hardware*, juntamente com uma regulamentação mais clara, poderia ajudar a mitigar esses desafios e promover uma integração mais ampla dessa tecnologia em diversos setores (Industry, 2022).

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

No cenário atual do Brasil, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, apresenta-se como uma fronteira promissora de inovação tecnológica. Contudo, enfrenta desafios significativos devido à sua incipiente inserção no mercado global, já que o Brasil representa apenas 2% do mercado mundial de impressão 3D, mas tem demonstrado crescimento acelerado e adotado a tecnologia não só para prototipagem rápida, mas também na fabricação de peças finais, esse avanço, entretanto, ainda não se traduz em uma posição de destaque no cenário internacional, o que sugere uma lacuna de oportunidades para o país expandir sua atuação nesse setor (Betim *et al.*, 2024).

A aplicação da metodologia de prospecção de cenários, particularmente o método *Momentum*, evidencia três cenários possíveis para a manufatura aditiva no Brasil: “Crescendo com Sustentabilidade”, “Imprimindo o Mundo”, e “Falha na Impressão”. Esses cenários delineiam trajetórias que variam desde um desenvolvimento otimista e sustentável até um possível retrocesso devido a entraves tecnológicos e econômicos. Cada cenário reflete diferentes potenciais de desenvolvimento tecnológico e econômico, evidenciando as oportunidades e limitações que podem surgir conforme o país enfrenta suas incertezas político-econômicas e de inovação tecnológica (Betim *et al.*, 2024).

É crucial, portanto, que pesquisas futuras abordem as lacunas identificadas, como a necessidade de dados quantitativos mais robustos e avaliações qualitativas contínuas com especialistas do setor. Isso permitiria uma melhor adaptação das estratégias de crescimento da manufatura aditiva, alinhando-as não só às demandas do mercado global, mas também aos imperativos de sustentabilidade ambiental e econômica. Essa abordagem ampliaria o entendimento sobre o impacto da manufatura aditiva no Brasil e também contribuiria para o aprimoramento de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas para a consolidação da tecnologia no país (Betim *et al.*, 2024).

6.1 TENDÊNCIAS EMERGENTES

A indústria da impressão 3D está em um ponto de transformação significativo, onde avanços tecnológicos e maior integração com processos de manufatura tradicionais estão moldando o futuro. A automação completa, do design à produção, está se tornando mais prevalente, permitindo que as máquinas funcionem com pouca supervisão humana. A inteligência artificial e o aprendizado de máquina estão sendo integrados para otimizar o uso de materiais e melhorar a manutenção preventiva, aumentando a eficiência e a qualidade da produção (3BE, 2024).

Além disso, a sustentabilidade está se tornando um foco central, com um movimento em direção ao uso de materiais mais ecológicos e à adoção de práticas que suportam a economia circular. Isso inclui a redução de resíduos e a maximização da eficiência do material, alinhando a produção aditiva com objetivos ambientais globais. A tecnologia

está sendo cada vez mais vista como uma solução para produzir com mais responsabilidade ambiental, ajudando a reduzir a pegada de carbono das atividades de fabricação (3BE, 2024).

A dinâmica do mercado também está mudando, com uma ênfase crescente em ecossistemas colaborativos e padrões industriais que promovem a inovação e a consistência. A adoção de fabricação descentralizada e localizada está encurtando as cadeias de suprimentos e permitindo uma resposta mais rápida às necessidades do mercado. Isso, está transformando a impressão 3D em uma opção viável não apenas para a prototipagem, mas também para a produção em massa, especialmente em setores que demandam alta personalização e flexibilidade de produção (3BE, 2024).

Finalmente, a integração da impressão 3D com a manufatura convencional está promovendo uma convergência de técnicas, onde a produção aditiva se torna uma extensão natural dos processos de manufatura. Isso, porém, está acompanhado de desafios regulatórios e de propriedade intelectual, que necessitam ser gerenciados para garantir uma implementação segura e eficaz. À medida que a tecnologia amadurece, espera-se uma maior especialização e profissionalização do setor, posicionando a impressão 3D como um componente crucial na paisagem de produção moderna (3BE, 2024).

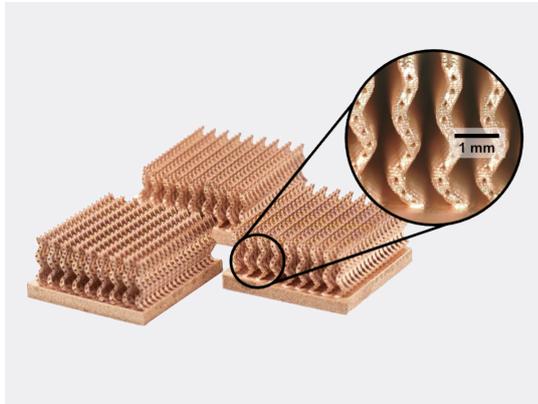
6.2 INOVAÇÕES ANTECIPADAS NA MANUFATURA ADITIVA

A Fabric8Labs, líder em manufatura aditiva eletroquímica, anunciou recentemente um avanço significativo com a arrecadação de US\$ 50 milhões em uma rodada de financiamento da série B, liderada pela *New Enterprise Associates* (NEA). Esses fundos serão utilizados para escalar a tecnologia exclusiva de Manufatura Aditiva Eletroquímica (ECAM) da empresa e para a instalação de uma unidade piloto de produção. Esse desenvolvimento aborda diretamente os desafios de custo e repetibilidade na fabricação aditiva de metais, prometendo revolucionar a indústria (Fabric8Labs, 2023).

A tecnologia ECAM, por sua vez, possibilita a criação de componentes de cobre de ultra-alta resolução em substratos sensíveis à temperatura. Um exemplo recente e notável dessa capacidade é a inovação da empresa em tecnologia de resfriamento a água, destacada em um vídeo recente do canal ShorCircuit (LMG) (2024). A Fabric8Labs desenvolveu uma placa fria impressa em 3D para sistemas *All-in-one* (AIO), que melhora significativamente a performance de resfriamento. A liberdade no design permitida pela manufatura aditiva possibilita a otimização das aletas de resfriamento, concentrando maior densidade nas áreas mais quentes do Unidade Central de Processamento (CPU), com a ajuda de IA para otimizar o caminho do fluxo de água específico para a temperatura da CPU (ShorCircuit (LMG), 2024). A Figura 35 ilustra a pequena estrutura que pode ser impressa para tal aplicação.

O processo de fabricação ECAM difere significativamente da impressão 3D SLA. Em vez de usar lasers para curar resina, a ECAM utiliza eletricidade para depositar cobre

Figura 35 – Estrutura impressa usando tecnologia ECAM



Fonte: (Fabric8Labs, 2023)

em uma placa de construção, um processo considerado relativamente econômico e escalável (ShorCircuit (LMG), 2024).

Além disso, a Fabric8Labs está explorando aplicações da tecnologia ECAM em dispositivos médicos e componentes micromecânicos, capacitando a produção de características finas e complexas. Esse avanço tem o potencial de transformar a fabricação de ferramentas cirúrgicas e equipamentos de diagnóstico, ampliando as possibilidades da manufatura aditiva em setores críticos (Fabric8Labs, 2023).

Por fim, a sustentabilidade da ECAM é uma vantagem notável, oferecendo uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa quando comparada a outras tecnologias aditivas e à manufatura convencional. Essa característica tem fomentado a adoção da tecnologia ECAM em vários mercados e espera-se que a placa fria impressa em 3D esteja disponível entre o terceiro e o quarto trimestre de 2024, com um preço ainda a ser determinado, mas previsto para ser *premium* (Fabric8Labs, 2023; ShorCircuit (LMG), 2024).

7 CONCLUSÃO

Este estudo reitera o impacto significativo da impressão 3D no campo educacional, alinhado com os objetivos desta pesquisa que visava explorar suas aplicações inovadoras em vários setores. Confirmou-se que esta tecnologia não apenas facilita o aprendizado prático e a visualização de conceitos complexos em diversas disciplinas, mas também promove a sustentabilidade por meio da otimização de recursos e redução de desperdícios.

Contudo, a expansão do uso da impressão 3D ainda encontra barreiras significativas, especialmente técnicas e financeiras, que precisam ser superadas para sua implementação mais ampla nos ambientes educacionais. Os altos custos iniciais e a necessidade de capacitação específica para educadores e alunos são desafios primários.

Recomenda-se a incorporação de tecnologia multimaterial em diferentes níveis educacionais, o que poderia não apenas enriquecer o ensino, mas também abrir novas possibilidades para pesquisa em áreas como medicina regenerativa e biotecnologia. A impressão 3D, com sua capacidade de criar componentes complexos e personalizados, mostra um potencial considerável para transformar indústrias como a médica, aeroespacial, automotiva e de construção civil, promovendo inovações que podem transcender as fronteiras tradicionais da fabricação e projetar um impacto econômico substancial.

Para futuros trabalhos, a integração de currículos específicos sobre a impressão 3D, desenvolvimento de materiais didáticos adaptados, e a formação de parcerias estratégicas com indústrias relevantes são essenciais. Essa abordagem não apenas fortalecerá o papel da impressão 3D como uma ferramenta educacional vital, mas também preparará os alunos para enfrentar desafios tecnológicos em um contexto globalizado e competitivo.

Além das recomendações anteriores, é vital reconhecer o papel dos engenheiros de controle e automação na evolução da impressão 3D. Com sua especialização em sistemas precisos e inovadores, esses engenheiros são fundamentais para otimizar tecnologias de automação que elevam a precisão e eficiência da fabricação aditiva. Suas habilidades em programação e controle de sistemas permitem o desenvolvimento de soluções que aprimoram desde a gestão do fluxo de trabalho até a manutenção de equipamentos. Eles são também podem ser cruciais para superar barreiras técnicas e financeiras na educação, além de impulsionar avanços em áreas como medicina regenerativa e biotecnologia, aproveitando a capacidade de fabricar componentes complexos e personalizados.

REFERÊNCIAS

- 3BE. **O futuro das impressões 3D**. [S.l.: s.n.], 2024. Acessado em 17 de Junho 2024. Disponível em: <https://3be.com.br/blog/o-futuro-das-impressoes-3d/>.
- 3DPRINT.COM. Analyzing True Sustainability in 3D Printing. **The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing**, 2019. Acessado em 17 de Junho de 2024.
- 3DPRINT.COM. **The Many Ways F1 Teams Have Put 3D Printing Into Motorsports**. [S.l.: s.n.], 2023. Acessado em 14 de Junho de 2024. Disponível em: <https://3dprint.com/302217/the-many-ways-f1-teams-have-put-3d-printing-into-motorsports/>.
- ALAMÁN, Jorge *et al.* Technical Challenges in Inkjet Based 3D Bioprinting. **Journal of Applied Biotechnology**, Scientific Research Publishing, 2016.
- AUAT-CHEEIN, Fernando. Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. **Buildings**, v. 12, n. 2, p. 229, 2022.
- AUTODESK. **History of 3D printing: It's older than you think**. [S.l.: s.n.], 2023. Acessado em 03 de Junho de 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-3d-printing>.
- BAGLEY, J. R. e GALPIN, A. J. Three-Dimensional Printing of Human Skeletal Muscle Cells: An Interdisciplinary Approach for Studying Biological Systems. **Biochemistry and Molecular Biology Education**, v. 43, p. 403–407, 2015.
- BETIM, Diego Vinicius, S. DE B. TEIXEIRA, Luiz Frederico Horácio de, GOMES, Carlos Francisco Simões, QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves e SANTOS, Marcos dos. Análise de cenários prospectivos: um estudo sobre a manufatura aditiva no Brasil em 2024. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGET**, jan. 2024. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos19/16228143.pdf>.
- BLIKSTEIN, P. Digital Fabrication and “Making” in Education: The Democratization of Invention. *In*: WALTER-HERRMANN, J. e BÜCHING, C. (Ed.). **FabLabs: Machines, Makers, and Inventors**. Bielefeld: Transcript Publishers, 2013. P. 1–21.

- BUEHLER, E., COMRIE, N., HOFMANN, M., MCDONALD, S. e HURST, A. Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education. **ACM Transactions on Accessible Computing**, v. 8, p. 1–28, 2016.
- BUEHLER, E., EASLEY, W., MCDONALD, S., COMRIE, N. e HURST, A. Inclusion and Education: 3D Printing for Integrated Classrooms. *In: ASSETS '15 Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Lisbon, Portugal: ACM, 2015. P. 281–290.
- BUEHLER, E., HURST, A. e HOFMANN, M. Coming to Grips: 3D Printing for Accessibility. *In: ASSETS '14 Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Rochester, USA: ACM, 2014. P. 291–292.
- BUEHLER, E., KANE, S. K. e HURST, A. ABC and 3D: Opportunities and Obstacles to 3D Printing in Special Education Environments. *In: ASSETS '14 Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Rochester, USA: ACM, 2014. P. 107–114.
- BULL, Glen, HAJ-HARIRI, Hossein, ATKINS, Rosa e MORAN, Pam. An Educational Framework for Digital Manufacturing in Schools. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 2, n. 2, p. 42–49, 2015. eprint: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0009>.
- CAO, Simin e SHI, Zhongchuan. Application and Prospect of 3D Printing Technology in Aerospace. *In: 2023 International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII)*. [S.l.: s.n.], 2023. P. 66–69.
- CATIAV5FTW. **3D Printable Jet Engine**. [S.l.: s.n.], 2023. Acessado em 13 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.printables.com/model/572421-3d-printable-jet-engine>.
- CHEN, Mo Shui, ZHANG, Yun e ZHANG, Yue-ling. Effects of a 3D printing course on mental rotation ability among 10-year-old primary students. **International Journal of Psychophysiology**, v. 94, p. 240, 2014.
- CHERY, D., MBURU, S., WARD, J. e FONTECCHIO, A. Integration of the Arts and Technology in GK-12 Science Courses. *In: 2015 IEEE Frontiers in Education Conference*. El Paso, USA: IEEE, 2015. P. 1–4.

- CONNER, B.P., MANOGHARAN, G.P. e MEYERS, K.L. 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 20, n. 2, article 38, 2020.
- CONSTRUCTION, PERI 3D. **News - PERI 3D Construction**. [S.l.: s.n.]. Acessado em 18 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.peri3dconstruction.com/en/news>.
- COOK, K. L., BUSH, S. B. e COX, R. Creating a Prosthetic Hand: 3D Printers Innovate and Inspire and Maker Movement. **Science and Children**, v. 53, p. 80–86, 2015.
- CORUM, K. e GAROFALO, J. Using Digital Fabrication to Support Student Learning. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 2, p. 50–55, 2015.
- CUI, Xiaofeng, DEAN, Delphine, RUGGERI, Zaverio M. e BOLAND, Thomas. Cell damage evaluation of thermal inkjet printed Chinese hamster ovary cells. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 106, n. 6, p. 963–969, 2010.
- DUMOND, D., GLASSNER, S., HOLMES, A., PETTY, D. C., AWISZUS, T., BICKS, W. e MONAGLE, R. Pay it Forward: Getting 3D Printers Into Schools. *In: 4TH IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC 2014)*. Princeton, USA: IEEE, 2014.
- EASLEY, W., BUEHLER, E., SALIB, G. e HURST, A. Fabricating Engagement: Using 3D Printing to Engage Underrepresented Students in STEM Learning. *In: ASEE Annual Conference and Exposition*. Columbus, USA: ASEE, 2017.
- EISENBERG, Michael. 3D printing for children: What to build next? **International Journal of Child-Computer Interaction**, v. 1, n. 1, p. 7–13, 2013. ISSN 2212-8689.
- ELTORAI, Adam E. M., NGUYEN, Eric e DANIELS, Alan H. Three-Dimensional Printing in Orthopedic Surgery. **Orthopedics**, v. 38, n. 11, p. 684–687, 2015.
- ENGINEERING.COM. **White Paper: Breaking Down the Barriers of 3D Printing**. [S.l.: s.n.], 2022. Acessado em 15 de Junho de 2024. Disponível em: <https://www.engineering.com/story/white-paper-breaking-down-the-barriers-of-3d-printing>.
- ENGIPRINTERS. **Impressão 3D x usinagem CNC: Qual é o melhor para prototipagem?** [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em 06 de junho de 2024. Disponível em:

<https://engiprinters.com.br/impressao-3d-x-usinagem-cnc-qual-e-o-melhor-para-prototipagem/>.

ENVIRONMENT, Yale School of the. 3D Printing and the Environment: The Implications of Additive Manufacturing. **Yale Journal of Industrial Ecology**, 2020. Acessado em 17 de Junho de 2024.

FAB@HOME. **Fab@Home - WebArchive**. [S.l.: s.n.], 2006. Acesso em 06 de Junho de 2024. Disponível em: https://web.archive.org/web/20100416034206/http://fabathome.org/wiki/index.php?title=Image:IMG_0110.jpg.

FABRIC8LABS. **Fabric8Labs Closes \$50M Series B Financing for Electrochemical Additive Manufacturing Technology**. [S.l.: s.n.], 2023. Acesso em 17 de junho de 2024. Disponível em: https://www.prnewswire.com/news-releases/fabric8labs-closes-50m-series-b-financing-for-electrochemical-additive-manufacturing-technology-301740761.html?tc=eml_cleartime.

FERRULLI, Davide e LINDNER, Christoph. **Five Ways 3D Printing is Transforming the Automotive Industry**. [S.l.]: Stratasys Ltd., 2016. Acessado em 15 de Junho de 2024. Disponível em: <https://purpleplatypus.com/wp-content/uploads/2018/05/White-Paper-5-Ways-3D-Printing-is-Transforming-the-Automotive-Industry-EN-A4.pdf>.

FLIPMARLEY. **The Platonic Solids**. [S.l.: s.n.]. Acessado em 13 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.printables.com/model/220227-the-platonic-solids>.

FORMLABS. **Comparing FDM, SLS, SLA 3D Printing**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em 06 de junho de 2024. Disponível em: https://formlabs.com/blog/comparing-fdm-sls-sla-3d-printing/?utm_source=facebook&utm_medium=social.

GASPAR, Gabriela. **Construção de Modelos Moleculares Acessíveis: Uma Proposta para o Ensino de Química com Impressora 3D**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação, Departamento de Ciências Exatas e Educação, Curso de Química – Licenciatura, Blumenau.

GIUGNO, Luca, FORMATO, Giovanni Maria, CHESSA, Massimo, VOTTA, Emiliano, CARMINATI, Mario e STURLA, Francesco. Personalized transcatheter approach to mid-aortic syndrome by in vitro simulation on a 3-dimensional printed model. **Frontiers**

in **Cardiovascular Medicine**, v. 9, 2022. This article is part of the Research Topic Applications of 3D Printing in Cardiovascular Medicine.

GONZALEZ-GOMEZ, J., VALERO-GOMEZ, A., PRIETO-MORENO, A. e ABDERRAHIM, M. A New Open Source 3D-Printable Mobile Robotic Platform for Education. *In: 6TH International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMiRE 2011)*. Bielefeld, Germany: Springer, 2012.

HAINES, Justin e BURR, Eldon. **10 Great Innovations Made Possible Thanks to 3D Printing**. 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/2/3d-printing-innovations-innovative-3d-printing/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

HALL, S., GRANT, G., ARORA, D., KARAKSHA, A., MCFARLAND, A., LOHNING, A. e DUKIE, S. A pilot study assessing the value of 3D printed molecular modelling tools for pharmacy student education. **Currents in Pharmacy Teaching and Learning**, v. 9, p. 723–728, 2017.

HORNICK, John F. How Patents Die: Expiring 3D Printing Patents. **Robotics Business Review**, abr. 2016.

HOROWITZ, S. S. e SCHULTZ, P. H. Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research. **Journal of Geoscience Education**, v. 62, p. 138–145, 2014.

INDUSTRY, 3D Printing. Executive Survey: Overcoming Barriers in 3D Printing: A Comprehensive Guide to Addressing 3D Printing Industry Pain Points, 2022. Acessado em 15 de Junho de 2024.

JACOBS, S., SCHULL, J., WHITE, P., LEHRER, R., VISHWAKARMA, A. e BERTUCCI, A. e-NABLING Education: Curricula and Models for Teaching Students to Print Hands. *In: 2016 IEEE Frontiers in Education Conference*. Erie, USA: ASEE, 2016.

JAKSIC, N. I. New Inexpensive 3D Printers Open Doors to Novel Experiential Learning Practices in Engineering Education. *In: ASEE Annual Conference and Exposition*. Indianapolis, USA: ASEE, 2014. P. 24.932.1–24.932.23.

JANKOVIĆ, N. Z., SLIJEPČEVIĆ, M. Z., ČANTRAK, Đ. S. e GAĐANSKI, I. I. Application of 3D Printing in M.Sc. Studies – Axial Turbocompressors. *In:*

INTERNATIONAL Conference on Multidisciplinary Engineering Design Optimization. Belgrade, Serbia: IEEE, 2016. P. 96–99.

JLCPCB. **Enhancing Sustainability And Waste Reduction In 3D Printing**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://jlcpcb.com/blog/478-enhancing-sustainability-and-waste-reduction-in-3d-printing>. Acessado em 13 de junho de 2024.

JO, W., I, J. H., HARIANTO, R. A., SO, J. H., LEE, H., LEE, H. J. e MOON, M.-W. Introduction of 3D Printing Technology in the Classroom for Visually Impaired Students. **Journal of Visual Impairment & Blindness**, v. 110, p. 115–121, 2016.

JORGEZUNIGA. **Cyborg Beast**. [S.l.: s.n.], mar. 2014. Acessado em 13 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:261462>.

JUNK, S. e MATT, R. New Approach to Introduction of 3D Digital Technologies in Design Education. **Procedia CIRP**, v. 36, p. 35–40, 2015.

KARSENTY, C., GUITARTE, A., DULAC, Y. *et al.* The usefulness of 3D printed heart models for medical student education in congenital heart disease. **BMC Medical Education**, BioMed Central, v. 21, p. 480, 2021.

KAYFI, R., RAGAB, D. e TUTUNJI, T. A. Mechatronic System Design Project: A 3D Printer Case Study. *In*: 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies. Amman, Jordan: IEEE, 2015. P. 1–6.

KOHEN, Zehavit e GHARRA-BADRAN, Yasmin. A rubric for assessing mathematical modelling problems in a scientific-engineering context. **Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA**, v. 42, n. 3, p. 266–288, out. 2022. ISSN 0268-3679. eprint: <https://academic.oup.com/teamat/article-pdf/42/3/266/51356276/hrac018.pdf>.

KONTA, Andrea Alice, GARCÍA-PIÑA, Marta e SERRANO, Dolores R. Personalised 3D Printed Medicines: Which Techniques and Polymers Are More Successful? **Bioengineering**, v. 4, n. 4, 2017. ISSN 2306-5354.

KRAUSS, R. W. e VANDERROEST, C. T. MAKER: A 3D Printed Balancing Robot for Teaching Dynamic Systems and Control. *In*: ASEE Annual Conference and Exposition. Columbus, USA: ASEE, 2017.

- KRÖGER, E., DEKIFF, M. e DIRKSEN, D. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. **European Journal of Dental Education**, p. 1–7. n.d.
- KROLL, E. e ARTZI, D. Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. **Rapid Prototyping Journal**, v. 17, p. 393–402, 2011.
- LAB, 3D. **AMS Bambu Lab - Sistema Automático de Materiais**. [S.l.: s.n.]. <https://3dlab.com.br/produto/ams-bambu-lab/>. Acessado em 18 de junho de 2024.
- LI, H. *et al.* Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with Ewing sarcoma. **Spine**, v. 41, n. 1, e50–e54, 2016.
- LIAW, Chen-Yuan e GUVENDIREN, Murat. Progressive 3D Printing Technology and Its Application in Medical Materials. **Frontiers in Pediatrics**, Frontiers, 2017.
- LIN, F., ZHANG, L., ZHANG, T., WANG, J. e ZHANG, R. Innovative Education in Additive Manufacturing in China. *In*: 23RD Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, USA: Laboratory for Freeform Fabrication e University of Texas at Austin, 2012. P. 14–44.
- LIU, X., GONG, X., WANG, F.-Y., SUN, R., GAO, Y., ZHANG, Y., ZHOU, J. e DENG, X. A New Framework of Science and Technology Innovation Education for K-12 in Qingdao, China. *In*: ASEE International Forum. Columbus, USA: ASEE, 2017.
- LOY, J. eLearning and eMaking: 3D Printing Blurring the Digital and the Physical. **Education Sciences**, v. 4, p. 108–121, 2014.
- LÜTOLF, G. Using 3D Printers at School: the Experience of 3drucken.ch. *In*: CANESSA, E., FONDA, C. e ZENNARO, M. (Ed.). **Low-Cost 3D Printing for Science, Education, and Sustainable Development**. [S.l.]: ICTP, 2013. P. 149–158.
- MAHIL, S. Fostering STEM+ Education: Improve Design Thinking Skills. *In*: 2016 IEEE Global Engineering Education Conference. Abu Dhabi, UAE: IEEE, 2016. P. 125–129.
- MAINES, Erin M., PORWAL, Mayuri K., ELLISON, Christopher J. e REINEKE, Theresa M. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes. **Green Chemistry**, Royal Society of Chemistry, v. 23, p. 6863–6897, 2021.

MARTINEZ, M. O. *et al.* 3-D Printed Haptic Devices for Educational Applications. *In*: 2016 IEEE Haptics Symposium. Philadelphia, USA: IEEE, 2016. P. 126–133.

MCGAHERN, P., BOSCH, F. e POLI, D. Enhancing Learning Using 3D Printing: An Alternative to Traditional Student Project Methods. **The American Biology Teacher**, v. 77, p. 376–377, 2015.

MCLOUGHLIN, L., FRYAZINOV, O., MOSELEY, M., SANCHEZ, M., ADZHIEV, V., COMNINOS, P. e PASKO, A. Virtual Sculpting and 3D Printing for Young People with Disabilities. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 36, p. 22–28, 2016.

MW-MECHANICAL. **4 Speed Constant Mesh Manual Transmission - 100% 3D Printable**. [*S.l.: s.n.*], 2023. Acessado em 13 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.printables.com/model/407245-4-speed-constant-mesh-manual-transmission-100-3d-p>.

MERCURI, R. e MEREDITH, K. An Educational Venture into 3D Printing. *In*: 2014 IEEE Integrated STEM Education Conference. Princeton, USA: IEEE, 2014. P. 1–6.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. (Abepro). Recurso digital, Formato: Flash, Requisitos do sistema: Adobe Flash Player, Modo de acesso: World Wide Web, Inclui bibliografia. ISBN 978-85-352-4850-0.

MMP MATERIAIS PEDAGÓGICOS. **Kit Ensino de Frações**. [*S.l.: s.n.*], 2024. Acesso em 25 de junho 2024. Disponível em: <https://mmpmateriaispedagogicos.com.br/produto/kit-ensino-de-fracoes/>.

NEXA3D. **How Does 3D Printing Reduce Waste? Understanding Sustainable 3D Printing**. [*S.l.: s.n.*], 2023. <https://nexa3d.com/blog/3d-printing-products-reduce-waste/>. Acessado em 13 de junho de 2024.

NING, Xin, LIU, Tong, WU, Chunlin e WANG, Chao. 3D Printing in Construction: Current Status, Implementation Hindrances, and Development Agenda. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, n. 1, p. 6665333, 2021. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2021/6665333>.

PAYNE, B. R. Using 3D Printers in a Computer Graphics Survey Course. **Journal of Computer Science in Colleges**, v. 31, p. 44–51, 2015.

PRINTY, 3D. **Braille Peg Cell**. [S.l.: s.n.]. Acessado em 13 de Junho de 2024. Disponível em: <https://www.printables.com/model/146102-braille-peg-cell>.

RAHMAN, Z., BARAKH ALI, S.F., OZKAN, T. *et al.* Additive Manufacturing with 3D Printing: Progress from Bench to Bedside. **AAPS J**, v. 20, p. 101, 2018.

REPRAP. **RepRap Wiki - About**. [S.l.: s.n.], 2023. Acesso em 06 de Junho de 2024. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/About>.

RESEARCH, MarketsandMarkets. 3D Printing Market Forecast to 2024. **MarketsandMarkets Report**, 2019.

SAE DIGITAL. **Base Nacional Comum Curricular: Competências**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://sae.digital/base-nacional-comum-curricular-competencias/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

SALAZAR, D., THOMPSON, M., ROSEN, A. *et al.* Using 3D Printing to Improve Student Education of Complex Anatomy: a Systematic Review and Meta-analysis. **Medical Science Educator**, Springer, v. 32, p. 1209–1218, 2022.

SAMPAIO, C. P. de, O. SPINOSA, R. M. de, TSUKAHARA, D. Y., SILVA, J. C. da, BORGHI, S. L. S., ROSTIROLLA, F. e VICENTIN, J. 3D Printing in Graphic Design Education: Educational Experiences Using Fused Deposition Modeling (FDM) in a Brazilian University. *In*: PROCEEDINGS of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. [S.l.]: Leiria, Portugal, 2013. P. 25–30.

SAVINI, A. e SAVINI, G.G. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *In*: 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). [S.l.: s.n.], 2015. P. 1–8.

SHAPEWAYS. **Reducing Waste and Enhancing 3D Printing Sustainability**. [S.l.: s.n.], 2022. <https://www.shapeways.com/blog/3d-printing-sustainability-waste-reduction>. Acessado em 13 de junho de 2024.

SHORCIRCUIT (LMG). **This could change water cooling forever... - Fabric8 Labs @ Computex 2024**. [S.l.: s.n.], 2024. Acessado em 18 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Gc2YPi00V94>.

STANGL, A., JERNIGAN, B. e YEH, T. Write, Design, and 3D Print Tactile Stories for Visually Impaired: Critical Making in a Middle School Classroom. *In: FABLEARN 2015*. Stanford, USA: [s.n.], 2015.

STANSELL, A. e TYLER-WOOD, T. Digital Fabrication for STEM Projects: A Middle School Example. *In: IEEE 16th International Conference on Advanced Learning Technologies*. Austin, USA: IEEE, 2016. P. 483–485.

STLFLIX. **STLFLIX**. Joinville, SC: [s.n.], 2024. Empresa de tecnologia.

SUNLU INTERNATIONAL (HONG KONG) HOLDINGS LIMITED. **Environmental Recycled Filament ABS, PETG, PLA, PLA-META, SILK - 1KG Roll**. [S.l.: s.n.], 2024. Acessado em 18 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.sunlu.com/products/environmental-recycled-filament-abs-petg-pla-pla-meta-silk-1kg-roll>.

SUSTAINLY. The Impact of 3D Printing Sustainability. **Sustainly.com**, 2020. Acessado em 17 de Junho de 2024.

TECH-CLARITY, INC. **How Top Manufacturers Are Planning for the Future with 3D Printing**. [S.l.]: Tech-Clarity, Inc., 2017. Acessado em 15 de Junho de 2024. Disponível em: https://www.geoplmm.com/knowledge-base-resources/Asset_2_-_Whitepaper_3D_Printing.pdf.

VALERO-GOMEZ, A., GÓNZALEZ-GÓMEZ, J., GONZÁLEZ-PACHECO, V. e SALICHS, M. A. Printable Creativity in Plastic Valley UC3M. *In: 2012 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Marrakech, Morocco: IEEE, 2012. P. 1–9.

VANDEVELDE, C., WYFFELS, F., CIOCCI, M. C., VANDERBORGHT, B. e SALDIEN, J. Design and evaluation of a DIY construction system for educational robot kits. **International Journal of Technology and Design Education**, v. 26, p. 521–540, 2016.

VONA, M. e NH, S. Teaching Robotics Software With the Open Hardware Mobile Manipulator. **IEEE Transactions on Education**, v. 56, p. 42–47, 2013.

WINTERBOURNE, Jeff. **Ultra High Resolution Earth Topography**. [*S.l.: s.n.*], 2023. Acessado em 13 de junho de 2024. Disponível em:
<https://www.printables.com/model/31355-ultra-high-resolution-earth-topography>.

WONG, N. e CHENG, H. H. CPSBot: A Low-Cost Reconfigurable and 3D-Printable Robotics Kit for Education and Research on Cyber-Physical Systems. *In: 2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*. Auckland, New Zealand: IEEE, 2016. P. 1–6.

ZHANG, Yanchun, LI, Yongnan, MA, YuMei, WEI, Yalin, HE, Fengxiao, ZHU, Yilin, LU, Weixin, ZHAO, Yinglu e WU, Xiangyang. Case report: Surgical repair of congenitally corrected transposition of the great arteries with the guidance of three-dimensional printing. **Frontiers in Cardiovascular Medicine**, v. 9, 2022.

ZIAEEFARD, S., RIBEIRO, G. A. e MAHMOUDIAN, N. GUPPIE, Underwater 3D Printed Robot a Game Changer in Control Design Education. *In: 2015 American Control Conference*. Chicago, USA: IEEE, 2015. P. 2789–2794.