

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

POTENCIALIDADES DA MANUFATURA ADITIVA

GABRIELA BANIN MAZZALI

SÃO CARLOS - SP
2022

POTENCIALIDADES DA MANUFATURA ADITIVA

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

Orientador: Prof(a). Dr(a). Lidiene Cristina Costa.

São Carlos-SP
2022



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

NOME: Gabriela Banin Mazzali

RA: 754751

TÍTULO: Potencialidades da manufatura aditiva

ORIENTADOR(A): Profa. Dra. Lidiane Cristina Costa

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 19/04/2022, 15h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Profa. Dra. Lidiane Cristina Costa	8,0	7,0
Prof. Dr. Piter Gargarella	8,0	7,0
Média	8,0	7,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Profa. Dra. Lidiane Cristina Costa e Prof. Dr. Piter Gargarella e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Profa. Dra. Lidiane Cristina Costa

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que me apoiaram e estiveram do meu lado em todos os caminhos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família pelo apoio em todos os momentos, por serem meu porto seguro e por fazerem parte da pessoa que me tornei.

Agradeço também meus amigos que, mesmo em período de pandemia, se mostraram presentes e contribuíram com as minhas conquistas até aqui.

Um agradecimento especial à Prof(a) Dr(a) Lidiane Cristina Costa, por me orientar e me ensinar tanto nos anos de graduação.

Agradeço também a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e aos professores que lá ensinam, por me mostrarem um mundo acadêmico muito rico e diferente do que eu tinha presenciado até o momento.

RESUMO

A manufatura aditiva compreende uma importante tecnologia com potencial de inovar os meios de produção atuais através da sustentabilidade, da possibilidade de impressão de peças complexas, da personalização dos produtos de acordo com a preferência do consumidor e da possibilidade de impressão remota de peças. Entretanto, muitos desafios da área tecnológica e de materiais, tais como assegurar a propriedade intelectual dos arquivos digitais, redução do tempo de produção, adequação das normas com alta gama de processos criados, atingir a equidade de gênero na manufatura aditiva, entre outros. Tais desafios precisam ser vencidos para que esta técnica seja amplamente aplicada no contexto da indústria 4.0. Para solucionar tais desafios, muitas inovações nas áreas de equipamentos, materiais e aplicações estão sendo realizadas. Alguns destaques de inovações são desenvolvimento de novos materiais, como desenvolvimento de ligas metálicas, uso de celulose, sílica e silicatos na manufatura aditiva. Já na área de aplicações, fabricação de peças para aeronáutica e automobilismo via impressão 3D, uso em conjunto da engenharia de tecidos e manufatura aditiva na área médica, impressão local de peças de reposição, desenvolvimento de softwares e outras ferramentas para auxiliar a produção de peças via manufatura aditiva. Assim, através da revisão da literatura, este trabalho teve como objetivo expor os desafios e as inovações na manufatura aditiva no setor industrial. A literatura mostra que o futuro da manufatura aditiva é promissor, porém ainda tem-se muito a ser desenvolvido para que esta técnica se torne protagonista no mundo industrial.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Inovações. Desafios.

ABSTRACT

Additive manufacturing is an important technology with a potential to innovate the production methods through its characteristics such as sustainability, possibility to print complex parts, customization of the product and possibility to print parts in situ. However, many technological and material challenges, such as secure intellectual property of the digital designs, reduction of the production time, adaptation of standards, reach gender equity for additive manufacturing, etc. Such challenges need to be faced so that technique can be widely used in the industry 4.0 environment. In order to solve such challenges, many innovations in equipment, materials and applications are being carried out. Some highlights in innovation are the development of new materials, such as metal alloys, cellulose, silica and silicates used in additive manufacturing. In the applications area, fabrication of aeronautical and automotive parts with 3D printing, tissue engineering and additive manufacturing for medical use, local printing of spare parts, software development and other tools are being carried out to help the parts production with additive manufacturing. Therefore, through this bibliographic review, this work has as objective to display the challenges and the innovations of additive manufacturing in the industrial area. The literature shows that the additive manufacturing field is promising, however much has to be developed so that this technique becomes a key player in the industrial sector.

Keywords: Additive manufacturing. Innovation. Challenges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mercados de aplicação da manufatura aditiva	14
Figura 2 - Representação da impressão 4D	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens sustentáveis da manufatura aditiva considerando o ciclo de vida do produto	6
Tabela 2 - Aplicações atuais e futuras da manufatura aditiva	14
Tabela 3 - Distinções entre impressão 3D e 4D	22

LISTA DE ABREVIATURAS

etc. et cetera

LISTA DE SIGLAS

3D - Três dimensões

4D - Quatro dimensões

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno

ASTM - American Society for Testing Materials

DDM - Demand driven manufacturing

DLP - Direct Light Processing

DMLS - Direct Metal Laser Sintering

DSP - Digital spare parts

EBFF - Electron Beam Freeform Fabrication

EBM - Electron Beam Melting

FDM - Fused Deposition Modeling

FFF - Fused Filament Fabrication

FGM - Functionally Graded Materials

FSL - Fusão Seletiva por Laser

GE - General Eletrics

IoT - Internet of Things

MIT - Massachusetts Institute of Technology

NASA - National Aeronautics and Space Administration

OLEDs - Organic Light Emitting Diodes

PCL - Policaprolactona

PLA - Poliacido láctico

PPE - Produção de equipamentos de proteção pessoal

PVA - Poliacetato de vinila

PVDF - Fluoreto de polivinilideno

PU - Poliuretano

RNLA - Exército Real dos Países Baixos

SLA - Stereolithography

SLS - Sinterização seletiva a laser

TPEs - Elastômeros termoplásticos

WPAAM - Wire Pulse Arc Additive Manufacturing

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2 Dióxido de carbono

Al Alumínio

Fe Ferro

Cr Cromo

Ti Titânio

Si Silício

Mg Magnésio

Nb Nióbio

Al_2O_3 Alumina

ZrO_2 Zircônia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. VISÃO GERAL DA MANUFATURA ADITIVA	2
2.1. MATERIAIS UTILIZADOS	3
2.2. IMPACTOS SOCIAIS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS	5
3. INOVAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA	9
4. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS DA MANUFATURA ADITIVA	28
5. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35
GLOSSÁRIO	42

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, representa uma técnica inovadora e emergente no mercado. Ela é caracterizada pela produção de peças via deposição de camadas de materiais, utilizando como base um *design* digital. [1] Desde a sua criação em 1984, muitos processos e materiais foram desenvolvidos. [2]

O grande potencial desta técnica em complementar, ou substituir por inteiro a manufatura comum (subtrativa), fez com que muitos pesquisadores voltassem seus estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias e novos materiais para a utilização da impressão 3D. [1] Além disso, a manufatura aditiva contribui positivamente em âmbitos econômicos, sociais e ambientais com a redução do impacto ambiental causado pela indústria, já que tem uma considerável redução de desperdício de materiais e pode fazer parte da economia circular, utilizando materiais recicláveis como matéria prima. [1]

A manufatura aditiva representa um papel importante na indústria 4.0 devido às características de rápida prototipagem, fácil customização de peças e produção facilitada de geometrias complexas. Alguns autores defendem que a manufatura aditiva será protagonista da próxima revolução industrial. Porém, apesar do grande potencial tecnológico e inovador da manufatura aditiva, muitos desafios devem ser superados para que a forma de produção industrial atual tenha grande contribuição da impressão 3D. Para solucionar as barreiras atuais, inovações estão sendo desenvolvidas nas áreas de materiais, equipamentos e aplicações. [3]

O objetivo deste trabalho, portanto, foi realizar uma revisão de literatura sobre as inovações na área de manufatura aditiva e discutir os desafios futuros na implantação desta técnica no setor industrial, a fim de incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias.

2. VISÃO GERAL DA MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, ou impressão 3D como também pode ser chamada, representa uma tecnologia em ascensão, cuja criação foi dada por Charles Hull em 1984. Na época, a técnica denominada de Estereolitografia (SLA), era muito cara e não abrangia muitas áreas do mercado. Uma patente desta técnica foi atribuída a Charles em 1986. [2]

No final dos anos 80, algumas outras técnicas foram criadas e patenteadas, com a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Modelagem por Deposição de Fundido (FDM). Em 1993, o MIT - *Massachusetts Institute of Technology* - desenvolveu a tecnologia “3 Dimensional Techniques”, cuja impressão utilizava também o eixo Z, além dos tradicionais bidimensionais X e Y. [2]

Muitas inovações na técnica de manufatura aditiva foram feitas até o dia de hoje, incluindo a possibilidade de impressão de variados tipos de materiais, desenvolvimento de novos materiais, desenvolvimento de softwares, modelos de impressoras, etc. Atualmente, a manufatura aditiva é considerada uma técnica com capacidade de substituir ou complementar a manufatura subtrativa comum, possibilitando a flexibilidade e a personalização de produtos. Hoje, a impressão 3D é vista como essencial na indústria 4.0, com o compromisso de revolucionar a manufatura atual. [2]

Manufatura aditiva é definida pela norma ASTM F2792-12a como uma técnica de produção de objetos sólidos através de um modelo digital 3D através da deposição sucessiva de camadas de material sólido ou fundido. [1] [5] Algumas das técnicas de manufatura aditiva mais utilizadas atualmente são: *Laser Metal Deposition, Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Solid based systems, Fused Deposition Modeling (FDM), Electron Beam Freeform Fabrication (EBFF), Wire Pulse Arc Additive Manufacturing (WPAAM), Liquid-Based Systems, Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP)*. [4]

Dentre as vantagens da manufatura aditiva é possível citar a ausência de ferramentas de usinagem, manufatura geralmente em uma única etapa, baixo ou nulo descarte de matéria prima, manufatura de peças com geometria complexa, diminuição de custos com *supply chain* quando comparado à manufatura comum, processo mais sustentável quando considerado todo o ciclo de vida de produção, entre outras. [6]

Embora a manufatura aditiva apresente várias vantagens, o processo ainda está em desenvolvimento e tem algumas desvantagens, como: gasto maior de energia em alguns processos - principalmente processos de impressão de materiais metálicos, a taxa de produtividade é baixa pois o processo de manufatura é lento - e dependendo da técnica, apresenta custos altos de produção, principalmente para materiais poliméricos devido a baixa produtividade quando comparado a manufatura comum, alto gasto de energia, entre outros. [6] Entretanto, vale ressaltar que em alguns processos de fabricação a manufatura aditiva apresenta um custo benefício melhor quando comparado com a manufatura comum, principalmente para algumas peças metálicas complexas, já que sem a impressão 3D seriam necessárias várias etapas de fabricação ou até mesmo seria impossível a fabricação de tais peças sem a manufatura aditiva.

2.1. MATERIAIS UTILIZADOS

O tipo de material utilizado na impressão 3D depende da aplicação final e da técnica do produto. Os materiais poliméricos são muito utilizados em manufatura aditiva para fabricação de peças com geometria complexa. Além de terem a vantagem do baixo custo e da baixa densidade, a manufatura aditiva geralmente dispensa a necessidade de um pós processamento da peça. Esse tipo de material é utilizado em manufatura aditiva em áreas como produtos médicos, biomateriais, engenharia de tecidos, produtos ortopédicos, etc. Alguns dos polímeros mais utilizados na manufatura aditiva são o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e o PLA (Poliácido láctico). Entretanto, vale ressaltar que muitos polímeros estão ganhando o mercado da impressão 3D nos dias atuais, como o PC (Policarbonato) por exemplo. [7] [5]

O processo de manufatura aditiva mais utilizado em polímeros é a técnica FDM. Para tal, o polímero precisa ter uma viscosidade suficiente para que possa ser empurrado através do cabeçote de impressão, aderir na camada depositada e que seja depositado sem perder sua forma. Portanto, a temperatura de amolecimento do material, a temperatura da atmosfera de impressão e a taxa de alimentação são variáveis críticas para o processo. Faz-se necessário, então, entender o comportamento dos polímeros sob fluxo, através de caracterização reológica do filamento, para avaliar a qualidade final da peça impressa. [5]

Já para os materiais metálicos, a grande vantagem da utilização da manufatura aditiva advém da possibilidade de produzir peças com geometrias complexas. Dentre os metais e ligas utilizados em manufatura aditiva é possível citar: ligas de cobalto, ligas de alumínio, ligas de níquel, aços inoxidáveis, ligas de titânio, etc. Aplicações como biomateriais, produtos dentários, peças que compõem aviões e automóveis utilizam a tecnologia de manufatura aditiva para fabricação. [7]

Os materiais cerâmicos são muito utilizados em aplicações na área de biomateriais e engenharia de tecidos, na produção de *scaffolds*, próteses dentárias, ossos, etc. A utilização de manufatura aditiva para produtos de cerâmica avançada pode possibilitar a fabricação de peças sem rachaduras e/ou poros, diferentemente da manufatura comum. As áreas de aplicação destes produtos impressos variam desde construção civil até aeronáutica e aplicações dentárias. As cerâmicas mais utilizadas em manufatura aditiva são a alumina, a zircônia e os biovidros. [7]

Um dos principais métodos de impressão 3D para metais e cerâmicas é a técnica SLS. Nesta técnica, realiza-se o aquecimento dos pós abaixo da temperatura de fusão do material, seguida de uma nova deposição de material e aquecimentos sucessivos. Nesse processo, o tamanho das partículas do pó devem estar entre 10 a 50 microns, assim como para a técnica de SLM. [7]

Os materiais compósitos representam uma grande porcentagem de materiais que são utilizados em manufatura aditiva, em aplicações estruturais, arquitetônicas, aeroespaciais, biomateriais, etc. A versatilidade dos compósitos combinado com a flexibilidade da tecnologia da manufatura aditiva resultam em produtos com ótimas

propriedades mecânicas que melhoram a performance das peças no ramo industrial. [7]

Wohlers et. al descreve que a indústria da manufatura aditiva crescerá nos próximos anos, com a previsão de superar U\$ 15,8 bilhões (aproximadamente 80 bilhões de reais) em movimentações no setor industrial mundial. [8] Faz-se necessário entender, portanto, os impactos sociais, ambientais e econômicos desta técnica.

2.2. IMPACTOS SOCIAIS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

O impacto social que resulta da aplicação da manufatura aditiva advém da utilização de uma máquina que não causa danos ao funcionário que a utiliza, resultando em uma maior segurança e saúde dos trabalhadores. [3] Entretanto, alguns outros desafios da manufatura aditiva impactam negativamente os trabalhadores, como por exemplo o uso dos pós metálicos. Devido ao pequeno tamanho das partículas do pó utilizado em algumas técnicas, o manuseio do material pode ser complicado e pode ocasionar complicações respiratórias aos trabalhadores.

O impacto social desta técnica também pode ser visto pelo ponto de vista de produção de bens customizável para a sociedade, fornecendo uma melhor qualidade de vida para a população. [3] A facilidade de se comprar uma impressora 3D de baixo custo e ter a possibilidade de imprimir objetos em sua própria casa tem um impacto social positivo, tornando mais próxima a relação da população com a inovação.

O impacto econômico, por sua vez, obtido pelo uso da manufatura aditiva resulta da eficiência do *design* da peça e em não precisar de um processo de usinagem após a manufatura. Segundo Mehrpouya et al. (2019), o impacto econômico também advém do menor tempo ocioso entre o design e a manufatura propriamente dita, representando um menor custo de produção devido a otimização de tempo. Até 2025, a utilização da manufatura aditiva na indústria pode acarretar

uma economia com transporte de U\$ 56 a 219 bilhões, enquanto que componentes são fabricados *in situ* através do envio de arquivos digitais da peça. [3]

Considerando que a manufatura aditiva utiliza menor quantidade de material na fabricação de peças, possui um descarte de material reduzido, um menor *supply chain* e menos custos de maquinário. Mehrpouya et al. (2019) defende ainda que a indústria pode economizar até 370 bilhões de dólares em 2025 com o uso da impressão 3D. Atrelado a isso, o custo de produção e da tecnologia da impressão 3D tem a tendência de ser menor nos próximos anos, viabilizando a introdução desta técnica em cada vez mais setores do mercado. [3]

Segundo Florén et al. (2020), as novas tecnologias disruptivas da manufatura aditiva serão elementos importantes na economia circular e sustentável. O autor defende em sua pesquisa que a manufatura aditiva distribuída pode criar uma economia circular através de um loop fechado de ciclo de materiais, utilizando materiais recicláveis como matéria prima, respeitando os bens de consumo industriais. [1]

Com o aumento da manufatura aditiva, o aumento de filamento plástico também é esperado de aumentar significativamente. Santander et al. (2020) defende a utilização de filamento plástico reciclado através de extrusoras *open-source* para solucionar o problema da poluição de plásticos no futuro. Segundo ele, a reciclagem de plástico é fundamental para a estratégia de economia circular e pode reduzir até 50% da emissão de emissões de CO_2 quando comparados ao uso de filamentos de plásticos virgens. Na Tabela 1 é possível verificar algumas vantagens da manufatura aditiva considerando as etapas do ciclo de vida do produto. [9]

Tabela 1 - Vantagens sustentáveis da manufatura aditiva considerando o ciclo de vida do produto (adaptado de [10]).

Ciclo de vida do produto	Vantagens
<i>Design</i>	Durabilidade, funcionalidade aprimorada, capacidade de atualização, eficiência de recursos, reutilização

Produção	Redução de uso de energia, eficiência de recursos
Uso	Baixo peso, eficiência operacional, funcionalidade, durabilidade, menor tempo de reparo
Fim do ciclo	Possibilidade de usar produtos reciclados como <i>input</i> , remanufatura, capacidade de atualização

Entretanto, é importante ressaltar que as características reológicas do filamento polimérico reciclado para a impressão devem ser avaliadas, já que o processo de reciclagem pode acarretar em uma degradação do material, influenciando nas propriedades mecânicas e reológicas do polímero pós-reciclado. Desta forma, pode se fazer necessário o uso de aditivos de processo para que o filamento apresente uma viscosidade suficiente para a impressão.

Algumas metodologias estão sendo estudadas com a finalidade de estimar os impactos econômicos, sociais e ambientais da manufatura aditiva. Yosofi et al. (2018), por exemplo, desenvolveu uma metodologia de estudo com múltiplos critérios combinando pontos de vista técnicos, ambientais e econômicos da manufatura aditiva. Entretanto, acredita-se que ainda todas as variáveis do processo não são exatas ou não são todas conhecidas e mensuráveis, o que resulta em uma necessidade maior de estudo do processo para ter-se medidas mais concretas sobre os impactos desta técnica. [11]

Thao Le et al. (2017), por outro lado, estudou uma metodologia para entender os impactos da manufatura híbrida - combinação da manufatura aditiva com a manufatura subtrativa. O processo de impressão 3D estudado foi o EBM, que mostrou consumir uma grande quantidade de energia, o que resulta em um alto impacto ambiental. Entretanto, ainda que o EBM consuma uma grande quantidade de energia, a pesquisa mostrou que a combinação do EBM com manufatura subtrativa ainda é mais sustentável que a produção da peça por manufatura comum, ainda mais quando considerado que a peça fabricada por manufatura híbrida não obteve descarte de material. [12]

Uma outra metodologia foi estudada por Tang et al. (2016) para reduzir o impacto ambiental da manufatura aditiva, mas desta vez por meio da otimização do design da peça. Concluiu-se que com a flexibilidade do design que a manufatura aditiva possui, é possível diminuir gastos com energia e reduzir o impacto ambiental desta técnica. Ainda mais, Tang et al. (2016) defende que a metodologia desenvolvida pode ajudar na seleção do processo de manufatura aditiva que cause menos impactos ambientais. [13]

Além do processo EBM, existem outros processos de manufatura aditiva que utilizam muita energia elétrica e acabam impactando negativamente o ambiente. Segundo Nagarajan e Haapala (2018), o processo de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) consome uma grande quantidade de energia. O autor defende, então, que alguns dos desafios a serem enfrentados para melhorar o impacto ambiental desta técnica são encontrar soluções de geração de energia limpa, reduzir a perda na transmissão de energia elétrica, reduzir a energia utilizada para processar o material, entre outros. [14]

A fim de superar os desafios de melhorar os impactos ambientais, econômicos e sociais, e potencializar os impactos positivos da manufatura aditiva, muitas inovações estão sendo desenvolvidas na área de tecnologia e na área de engenharia de materiais.

3. INOVAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA

As inovações no campo da manufatura aditiva estão focadas em 3 principais áreas: materiais, equipamentos e novos campos de aplicação. [3]

No campo de pesquisa e desenvolvimento de materiais, aqueles com biocompatibilidade correspondem aos que mais possuem pesquisas sendo desenvolvidas. Além disso, materiais compósitos e metais são outros pontos focais de pesquisas na área de manufatura aditiva atual, buscando desenvolver produtos com ótimas propriedades mecânicas. [3]

Na área dos materiais metálicos, por sua vez, estão sendo desenvolvidas ligas de alta entropia, ligas magnéticas, vidros metálicos, compósitos metálicos com diferentes microestruturas, metais com arquiteturas nanoestruturadas, etc. [8]

Ligas de alumínio modificadas com escândio estão sendo desenvolvidas para o mercado aeroespacial, pois estas apresentam melhores propriedades de resistência à tração e dureza gerada pelo refino de grão devido a inserção do escândio.[16] Uma liga reciclada de alumínio formadora de fase quasi-cristalina foi estudada por Araújo (2020), com composição Al-Fe-Cr-Ti, utilizando uma das técnicas de manufatura aditiva chamada Fusão Seletiva por Laser (SLM). Obteve-se amostras com boas propriedades de compressão e tração através da utilização do pó metálico. [22] Por outro lado, Santos Junior (2021) mostra em sua pesquisa que ligas de alumínio e silício são amplamente utilizadas nos setores automobilístico e aeroespacial, sendo a liga Al-Si-Mg a mais utilizada devido às suas ótimas propriedades mecânicas adquiridas. Ainda mais, o autor descreve alguns elementos de liga como níquel, zinco e zircônio que estão sendo estudados para aumentar a resistência mecânica das ligas de Al-Si. [23]

Outro material que tem sido desenvolvido para a indústria aeronáutica são ligas de magnésio com potencial de diminuir a massa estrutural dos aviões. Outras ligas que vêm sendo estudadas são as ligas de titânio e superligas de níquel ou cobalto, que estão sendo desenvolvidas para compor componentes de turbinas a gás, cuja temperatura de trabalho é considerada alta. Tais ligas possuem uma

tensão de ruptura maior com o aumento da temperatura de serviço, o que se explica pela presença de uma fase secundária na microestrutura do material. Ligas metálicas amorfas também têm sido estudadas devido às suas excelentes características mecânicas, elétricas e magnéticas. [16]

Com o intuito de facilitar a produção de peças metálicas via impressão 3D, a BASF - empresa química alemã - desenvolveu um filamento de compósito metálico com matriz de aço inoxidável 316L reforçado com polímero, denominado Ultrafuse 316L®. Este material possibilita a produção de peças metálicas, como por exemplo ferramentas e acessórios, utilizando qualquer impressora FFF. Com isso, tem-se um custo reduzido de produção e uma maior facilidade de fabricação, já que utiliza-se uma impressora de baixo custo com tecnologia consolidada no mercado. [20]

Compostos intermetálicos também estão sendo desenvolvidos, sendo TiAl e NbSi os compostos em destaque nesta área. Os compostos com TiAl se tornaram atrativos para o mercado aeroespacial, pois apresentam um alto módulo elástico, alta resistência à fluência, baixa densidade e alta resistência à tração. Os compostos de NbSi, por sua vez, se destacam por sua ultra-alta-temperatura de fusão e baixa densidade, assim como boas propriedades mecânicas em temperaturas de trabalho acima de 1200°C. [16]

No campo dos materiais poliméricos, Li et al. (2019) argumenta que os polímeros puros não conseguem alcançar as demandas crescentes de propriedades mecânicas e, desta forma, faz-se necessário fazer uma aditivação da resina. [16] Por outro lado, resinas fotossensíveis com propriedades otimizadas de bioatividade, di-eletricidade, condutividade, entre outras, representam um campo de estudo grande para a manufatura aditiva de implantes e estruturas com possibilidade de memória de forma. Pós poliméricos também vem sendo estudados, principalmente o grupo das poliamidas, dos polímeros commodities e dos TPEs para aplicações funcionais.[17]

Tintas com alta viscosidade têm sido estudadas, devido a sua versatilidade e a possibilidade de serem usadas na impressão de multimateriais. Algumas pesquisas vêm estudando o PVA como um novo tipo de tinta para a impressão 3D.

[16] Tintas para o mercado biomédico e para o mercado eletrônico também vêm sendo desenvolvidas. [17]

Outro material interessante que vem sendo muito estudado na manufatura aditiva é a celulose, segundo o MIT, com o potencial de ser uma alternativa reciclável e biodegradável. [3]

Já os materiais cerâmicos, muitos estudos têm sido desenvolvidos em sistemas cerâmicos de Al_2O_3 e $Al_2O_3 - ZrO_2$, porém a fragilidade das cerâmicas e a alta porosidade têm sido um desafio na impressão 3D. Para tentar superar estes obstáculos, alguns pesquisadores têm testado pré-aquecer a cerâmica durante o processo de deposição de camadas. [16] Por outro lado, a sílica e os silicatos vêm sendo estudados na manufatura aditiva como possíveis substitutos da alumina e da zircônia, pois apresenta um bom custo benefício e boas propriedades no uso na biomedicina.

Outros materiais cerâmicos avançados vêm sendo estudados para aplicação em manufatura aditiva, tais como: carbeto de silício, carbeto de tungstênio, carbeto de boro, nitreto de silício, nitreto de alumínio, entre outros, porém a alta dureza e altas temperaturas de sinterização destas cerâmicas estão sendo desafiadores para o sucesso da impressão destes materiais. [18] As cerâmicas com estruturas celulares também têm sido estudadas para a utilização em manufatura aditiva devido às suas características de baixa densidade, alta dureza, além de algumas propriedades funcionais como eletromagnetismo podem ser alcançadas com a impressão 3D. [24]

No campo das biocerâmicas, pó de Biosilicate® cristalino representa um material vitrocerâmico com grande potencial na manufatura aditiva de peças complexas. Elsayed et al. (2020) estudou o potencial deste material para a produção de *scaffolds* com grande quantidade de poros (50 a 80% em volume) para a aplicação na engenharia de tecidos. Concluiu-se que é possível obter peças com excelentes relações de tensão-densidade ajustando as temperaturas de queima e a topografia dos *scaffolds*. [21]

Outro campo muito estudado na área de desenvolvimento de materiais para a manufatura aditiva são os compósitos. Compósitos com matriz metálica vem sendo desenvolvidos com alumínio, titânio, cobalto e ferro para diferentes aplicações. [16] Chen et al. (2021), por exemplo, estudou em sua pesquisa um compósito intercamadas com matriz de tungstênio e ferro para a indústria nuclear, utilizando a técnica de *Laser Metal Deposition*. Ele concluiu que é possível obter estes compósitos com alta resistência e ductilidade via manufatura aditiva sem utilização de técnicas com alto gasto de energia e tempo. [25]

Compósitos de matriz polimérica ABS com dióxido de titânio representam um material promissor com boas propriedades mecânicas, com uma alta resistência à tração. Além disso, compósitos de PLA reforçados com fibra de carbono estão sendo estudados para aplicações aeroespaciais, devido a baixa densidade do material. [16] Além disso, compósitos com matriz de PLA e PCL reforçados com biocargas, como a hidroxiapatita, são potenciais composições para aplicação na engenharia de tecidos. [19]

Já os compósitos mais pesquisados com matriz cerâmicas são os que têm matriz de carbono reforçados com fibras de carbono, matriz de carbetto de silício reforçado com fibras de carbono e até matriz de carbetto de silício com fibra de carbono reforçado com carbetto de silício. [18]

Por sua vez, para as impressoras 3D se tornarem mais competitivas comparadas às tecnologias convencionais, os fabricantes destes equipamentos estão trabalhando para reduzir o custo e aumentar a precisão dos equipamentos. [3] Geralmente, as impressoras de materiais metálicos e cerâmicos têm um alto custo de investimento e um alto custo de produção, devido ao alto gasto de energia e tempo elevado de fabricação. Por conta disso, faz-se necessário desenvolver equipamentos com melhor custo benefício para legitimar a disseminação da manufatura aditiva no setor industrial.

Além disso, as impressoras 3D devem ampliar suas capacidades e serem mais rápidas e mais autônomas, e com algumas ferramentas como por exemplo recipientes para materiais fotossensíveis, e bocais de extrusão ou deposição de

materiais. [3] [15] A empresa Crealty, conhecida no mercado pelas suas impressoras de baixo custo, desenvolveu a nova impressora 3D chamada Ender 3 S1, que possibilita a impressão de materiais flexíveis, como o PU. Com o bico extrusor 30% mais leve, também é possível imprimir peças mais rapidamente comparado com as outras impressoras da marca. [44] Essa nova impressora possibilita um desenvolvimento maior de produtos via manufatura aditiva a um baixo custo, podendo trazer vantagens para alunos, pesquisadores, pequenas empresas e até para pessoas imprimirem peças em suas próprias casas.

Já no campo de aplicações, muito tem se estudado e desenvolvido em variados mercados. [3] Segundo Jiménez et al. (2019), alguns dos setores onde serão mais aplicados a manufatura aditiva são aeroespacial, automotivo, médico e na arquitetura. [15] Na figura 1 e na tabela 2 são apresentados os setores do mercado e o desenvolvimento esperado para cada um destes setores.

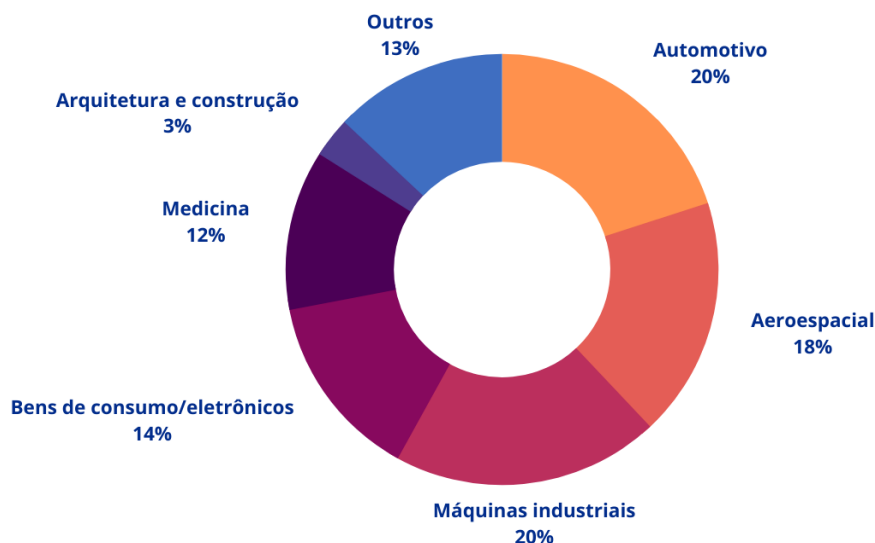


Figura 1 - Mercados de aplicação da manufatura aditiva (adaptado de [8]).

Como dito anteriormente, uma das áreas com maior potencial de crescimento em manufatura aditiva é a área dos automóveis, devido às inovações na área metalúrgica que forneceram ótimas propriedades mecânicas às peças impressas. [28] Segundo Vafadar et al. (2021), a manufatura na indústria automotiva cresceu

em média 3,6% nos últimos anos. Como exemplo, a BMW, fabricante de carros alemã, utiliza tecnologias de manufatura aditiva para fabricar componentes aplicados em seus carros. Dentre os componentes do modelo i8 Roadster fabricados por impressão 3D, é possível citar um deles como exemplo: a guia de janela, fabricada via *Jet Fusion Metal*. A justificativa da adoção do processo de impressão 3D é a redução da densidade da peça em até 44% e aumento da dureza quando comparada à mesma peça injetada. [8]

Tabela 2 - Aplicações atuais e futuras da manufatura aditiva (adaptado de [26]).

-	Futuro imediato	Desenvolvimentos prováveis	Cenários futuros
Aeroespacial	Redução de peso da aeronave; partes com volume reduzido	Impressão de asas inteiras de aeronaves; aplicação em serviços de exploração do espaço	Impressão no campo de batalha; Impressão de uma aeronave inteira; self-healing em veículos militares
Automotivo	<i>Design</i> e prototipagem; customização pós venda; restauro de veículos	Especialista em impressão de componentes com baixo peso;	Veículos inovadores possibilitados pela impressão 3D
Medicina	Próteses e implantes; instrumentos médicos	Produção farmacêutica; utilização de tecidos e órgãos simples em transplantes; medicina em nanoescala	Impressão de órgãos complexos
Manufatura geral	Rápido design e prototipagem; manufatura especialista em pequeno volume;	Impressão de partes eletrônicas embutidas; produtos inovadores com partes impressas; impressão 3D coexistindo com manufatura tradicional	Linhas de produção com impressoras 3D
Supply Chain	Empresas de impressão que atingem nichos de mercado	Utilização de materiais reciclados; demanda crescente de pó de titânio e outros materiais de alimentação	Desafios de impressão off-shore; reorganização de modelos de negócios; fornecimento direto: envio do design e não do produto
Comercial	Debates de problemas com propriedade intelectual	Boom de startups de manufatura aditiva	Ajuste de valores de commodities como resultado da mudança de padrões de produção; realocação de capital para novas indústrias

Outras fabricantes de automóveis como a Audi, Bugatti e Honda têm produzido também algumas peças de seus veículos via manufatura aditiva visando adquirir peças mais leves e com propriedades mecânicas iguais ou superiores às peças produzidas via manufatura convencional. Segundo Vafadar et al. (2021), a Bugatti desenvolveu uma pinça de freio 40% mais leve para seus veículos, utilizando a técnica FSL com uma liga de titânio, alumínio e vanádio. [8] Como é possível observar, as empresas que estão investindo em inovações veiculares são aquelas cujos veículos têm maior preço de venda, pois é possível incluir o valor da inovação no preço do produto, além de gerar valor ao consumidor desta categoria. Acredita-se que, no futuro, com a disseminação de técnicas mais baratas da manufatura aditiva seja possível encontrar inúmeras peças impressas em veículos populares também.

A aplicação da impressão 3D em veículos pode representar um impacto ambiental significativo para este setor. As empresas fabricantes de automóveis são desafiadas a implementar novos métodos de produção e novas tecnologias mais sustentáveis, além de produzir veículos com menor potencial poluente. Desta forma, a manufatura aditiva consegue trazer uma redução do impacto ambiental através da produção de peças para veículos comerciais. [27] Além disso, a impressão 3D pode ajudar a validar a funcionalidade e estética de designs de motores dos veículos, facilitando testes de customização. [15]

A indústria aeroespacial, por sua vez, foi uma das pioneiras na adoção da manufatura aditiva devido às características de desenvolver geometrias complexas com variados tipos de materiais. [8] Ainda mais, este é o mercado onde a redução na densidade das peças produzidas por manufatura aditiva, em comparação com a manufatura atual, é de extrema relevância. Segundo Jiménez et al. (2019), esse mercado requer produtos com altas performances mecânicas e térmicas, além de peças com massa reduzida. [15] Alguns fabricantes de aeronaves como a *General Electric Aviation* (GE Aviation) e Airbus utilizam a manufatura aditiva em variados componentes, em busca de melhor eficiência de seus meios de transporte. Segundo Vafadar et al. (2021), o motor impresso 3D pela GE Aviation mostrou uma melhora de 15% na eficiência no desempenho da aeronave. Ainda mais, a indústria

aeroespacial em geral se beneficia com uma redução de custos de até 45%, e uma redução da massa de até 35%, devido às peças fabricadas via manufatura aditiva. [8] Jiménez et al. (2019) defende também que a manufatura aditiva se tornará uma solução interessante para reparos e manutenção de aeronaves. [15]

Outra área de desenvolvimento deste setor está sendo estudada pela NASA, que é a impressão de prédios em Marte. Estão sendo estudados locais no planeta Terra para a execução de testes, além de materiais duráveis para a construção das casas dos astronautas. A grande vantagem é a utilização de poucas impressoras para produzir diversas infraestruturas requeridas, reduzindo a quantidade de peças que teriam que ser levadas a outro planeta. [15]

A medicina e a odontologia representam um mercado onde a manufatura aditiva já é utilizada e tem muita perspectiva de crescimento. A classificação de aplicações de manufatura aditiva para a área médica pode ser separada pelas seguintes áreas: modelos médicos, implantes, ferramentas, dispositivos de assistência médica, biomanufatura. A biomanufatura, por sua vez, é definida pela combinação de manufatura aditiva e engenharia de tecidos, onde os materiais utilizados devem ser compatíveis e ativos biologicamente. Salmi (2021) apresenta um exemplo da biomanufatura utilizando o raio-x de um paciente para modelar digitalmente um implante de quadril a ser impresso, levando em conta todas as singularidades da estrutura óssea do paciente. [30] Segundo Jiménez et al. (2019), uma das grandes vantagens de utilizar a manufatura aditiva na área médica é a possibilidade de obter modelos 3D através de exames médicos do paciente, como raio-x, tomografias, etc.

O próximo passo da inovação da manufatura aditiva é a bioimpressão, que é a impressão de células e tecidos vivos. Espera-se que essa tecnologia seja muito valiosa para transplantes de órgãos e tecidos humanos, tornando mais difícil a rejeição do órgão pelo corpo do paciente. A produção de *scaffolds* também representa um futuro promissor no setor da impressão 3D em medicina, já que eles servem para a regeneração de tecidos humanos e são facilmente produzidos por manufatura aditiva. [15]

Outro ramo de desenvolvimento, segundo Vafadar et al. (2021), é o que vem sendo feito por algumas empresas europeias que estão desenvolvendo dispositivos ortopédicos com ligas de titânio, como gaiolas e implantes customizados para a coluna vertebral. [8] Salmi (2021) expõe em sua pesquisa que os materiais mais utilizados em impressão 3D na área médica são os termoplásticos, fotopolímeros e metais (principalmente ligas de titânio). [30]

A manufatura aditiva também teve um grande impacto em 2020 no combate da pandemia de COVID-19 pelo mundo. Mueller et al. (2020) destaca a grande importância que a manufatura aditiva representou na campanha alemã de combate à pandemia através da utilização da técnica de FDM na produção de equipamentos de proteção pessoal (PPE). Os sistemas de saúde não conseguiram comportar a alta demanda de equipamentos PPE e, então, empresas, universidades e outras organizações começaram a ajudar a produzir tais equipamentos através da manufatura aditiva. Tais equipamentos foram distribuídos para médicos e enfermeiros e até para campos de refugiados. Dentre os equipamentos impressos, é possível citar o suporte da face shield. Isso só foi possível devido ao baixo custo de material e da impressora FFF (*Fused Filament Fabrication*), e também da disseminação de conhecimento de manufatura aditiva. [28]

Um dos principais benefícios citados por Mueller et al. (2020) foi a adaptabilidade da manufatura aditiva, resultando na rápida resposta à tomada de decisão da equipe de produção. Entretanto, uma desvantagem citada é a falta de padrão entre todos os produtos produzidos. [28] Kunovjanek e Wankmuller (2020) também concluem isso em sua pesquisa, onde destaca que há uma falta de padrões e normas para a produção via manufatura aditiva dos equipamentos médicos que foram produzidos durante a pandemia. [29] Muito provavelmente isso se explica pela rápida resposta que o mercado fabricante teve que apresentar devido à alta e nova demanda da pandemia, entretanto as normas não responderam de forma tão rápida, o que ocasionou uma falta de padrões entre os produtos médicos fabricados nesta ocasião. Finalmente, Mueller et al. (2020) e Kunovjanek e Wankmuller (2020) concluem que, superando os desafios, a manufatura aditiva

pode se tornar a solução da produção em massa de produtos customizáveis. [28] [29]

Já no campo da construção civil e da arquitetura, a manufatura aditiva está possibilitando a criação de formatos de estruturas complexas com massa reduzida e com tempo de produção otimizado. [8] Uma ponte de aço inoxidável de 12,5 metros foi construída em Amsterdã utilizando manufatura aditiva. Ela foi desenvolvida por uma startup de tecnologia holandesa, chamada MX3D, juntamente com alguns *designers*. Essa criação mostra como a manufatura aditiva pode alterar significativamente o modo de construção de infraestruturas. [31] Por outro lado, é preciso avaliar melhor, através de estudos, testes e projetos de viabilidade, se aplicações como estas de criar pontes e grandes estruturas serão financeiramente viáveis.

A manufatura aditiva pode se tornar, também, uma ferramenta muito interessante na fabricação de maquetes de alta qualidade e com grande quantidade de detalhes para arquitetos e *designers*. [15]

Embora casas construídas via manufatura aditiva não consigam ser totalmente funcionais ainda, há uma grande quantidade de empresas utilizando a manufatura aditiva como um método auxiliar nas construções para otimização de tempo e de material. Os materiais utilizados neste caso são majoritariamente o concreto e materiais naturais, porém materiais *eco-friendly* também podem ser utilizados. Um dos grandes potenciais desta técnica é a construção de casas com valor acessível para pessoas com baixa renda, já que o custo do metro quadrado cai de 75 dólares para 27 dólares ao utilizar uma impressora 3D na construção. [32]

O grupo Arup, que trabalha com consultoria internacional de engenharia, desenvolveu um nó de topógrafo de aço inoxidável 75% mais leve que o convencional, através da impressão 3D. Além disso, outros benefícios que a manufatura aditiva apresenta para estes campos é a produção local de componentes de obras, sem necessitar de atrasos e, conseqüentemente, aumento de custos da obra. [8] Entretanto, nesse ponto é preciso avaliar se o custo de ter à

disposição uma impressora 3D, materiais e funcionários capacitados para trabalhar com manufatura aditiva em obras é financeiramente viável.

A fabricação de resistores, circuitos e outros componentes eletrônicos são outro mercado afetado pela manufatura aditiva. A utilização de materiais inteligentes e impressão 3D acarreta a fabricação de produtos com dimensão pequena e com altas propriedades elétricas e eletrônicas. Segundo Vafadar et. al (2021), a companhia europeia Robert Hofmann desenvolveu uma micro-antena metálica que gerou 95% de redução de peso e 20% de redução de custo, além de reduzir o tempo de produção de 11 para 2 meses. [8] Jiménez et al. (2019) também aborda outras aplicações da manufatura aditiva na deposição de materiais condutores via impressão de circuitos passivos para a fabricação de OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*), por exemplo. [15]

Segundo Vafadar et al. (2021), outro mercado potencial para a manufatura aditiva é o mercado de óleo e gás, estimando uma economia de custos de até 30 bilhões de dólares, segundo o fórum econômico mundial. Essa economia advém da redução dos tempos de espera e da maior eficiência de *supply chain* deste mercado. A GE utiliza hoje em dia a manufatura aditiva, para produzir por exemplo válvulas com geometrias complexas e com estruturas ocas e curvadas para utilizar em diferentes aplicações no campo de energia. De forma similar, a Siemens está produzindo diversos produtos para a indústria de energia e de óleo e gás, dentre elas componentes de turbinas compostas de ligas de níquel, bocais de combustíveis, componentes de turbinas a gás, componentes de turbinas eólicas, etc. A manufatura aditiva pode facilitar a produção de plataformas *offshore* para este setor, produzindo componentes leves e eficientes. Entretanto, o autor ressalta que ainda são necessários estudos estratégicos de viabilidade técnica devido a complexidade deste setor em particular. [8]

Com o intuito de otimizar o processo de manufatura aditiva e verificar a sustentabilidade deste, Rojek et al. (2021) desenvolveu um *software* baseado em Inteligência Artificial para avaliar a quantidade de poluição gerada pelos sistemas de impressão 3D. Para essa medição, foram imputados dados de densidade dos

materiais, tecnologia da impressão, entre outros. Foi desenvolvido, então, o próprio sistema de rede neural artificial com a hipótese de que a sustentabilidade dos processos de impressão 3D podem ser auxiliados com tecnologias tais como inteligência artificial e inteligência computacional. Concluiu-se que muito ainda precisa ser desenvolvido para entender ao certo quais são todas as variáveis do processo que influenciam a impressão 3D, mas que *softwares* podem e devem ser utilizados para complementar estudos de sustentabilidade e ajudar a reduzir o impacto ambiental causado pela impressão 3D, mesmo sendo menor que a manufatura comum. [33]

Com o intuito também de otimizar o processo de manufatura aditiva, mas neste caso na questão de seleção de materiais, Rojek et al. (2020) utilizou redes neurais artificiais com algoritmos genéricos para selecionar o material com o maior módulo de resistência à tração para um esqueleto de mão impresso 3D. Com o uso de redes neurais, conseguiu-se selecionar o PLA para a aplicação, além de otimizar os parâmetros de impressão para o esqueleto que desejava produzir. [34]

Com a propagação da tecnologia de manufatura aditiva esperada nos próximos anos, um grande desafio surge: assegurar a propriedade intelectual dos arquivos digitais. Arquivos estes que são de peças de fabricantes multinacionais que possuem “segredos de fábrica”, ou que não desejam que suas peças sejam facilmente impressas em qualquer impressora por qualquer pessoa sem nenhum custo. Dessa forma, Kurpjuweit et al. (2021) propõe o uso da criptografia *blockchain* na manufatura aditiva para rastrear e monitorar os arquivos digitais, controlando a manipulação de dados. [35] A tecnologia de registros distribuídos, chamada *blockchain*, é utilizada hoje em dia no mercado de criptomoedas. Segundo a revista Exame:

“O blockchain armazena periodicamente informações de transações em lotes, chamados blocos. Esses blocos recebem uma impressão digital chamada hash – um código matemático único – e são interligados em um conjunto em ordem cronológica, formando uma linha contínua de blocos – uma corrente (daí o termo “chain”). Se alguém tentar fazer alguma mudança

em um dos blocos passados, ele não é reescrito. Mas pode ser enviada uma nova transação, que será analisada e incluída em um novo bloco de informações.” [36]

Dessa forma, a criptografia *blockchain* pretende ser um elemento catalisador da adoção segura da técnica de manufatura aditiva, com a esperança de acelerar a descentralização da manufatura aditiva.

A utilização da computação em nuvem em conjunto com IoT (*Internet of Things* - Internet das coisas) visa desenvolver modelos de produção para manufatura aditiva, que independem do material e da impressora utilizada. Segundo Mehrpouya et al. (2019), a digitalização dos processos de manufatura está relacionada com o conceito de máquinas controladas por computadores, a manufatura aditiva representa o melhor alvo para a manufatura em nuvem. Essa tecnologia tem como premissa também levar para o consumidor produtos mais customizados e personalizados através da coleta de dados do mercado. [3]

A análise de *big data* na manufatura aditiva também pode contribuir para que este processo de manufatura se integre ao conceito de indústria 4.0, melhorando a eficiência energética dos processos e a qualidade dos produtos. [3] A análise inteligente e em tempo real dos dados coletados pode fornecer informações valiosas para a tomada de decisão da indústria, como otimizar processos ou até melhorar a estratégia de negócio. [15]

Um novo conceito de manufatura aditiva foi criado pelo Professor Tibbits em 2013, chamado de impressão 4D ou impressão em 4 dimensões. Segundo Mondal e Tripathy (2021), esse conceito pode ser descrito pela fórmula: $impressão\ 4D = impressão\ 3D + tempo$, demonstrado na Figura 2. Esse conceito representa as mudanças que podem ocorrer nos materiais impressos 4D com o tempo, mudanças na estrutura, função e formato das peças. [37]

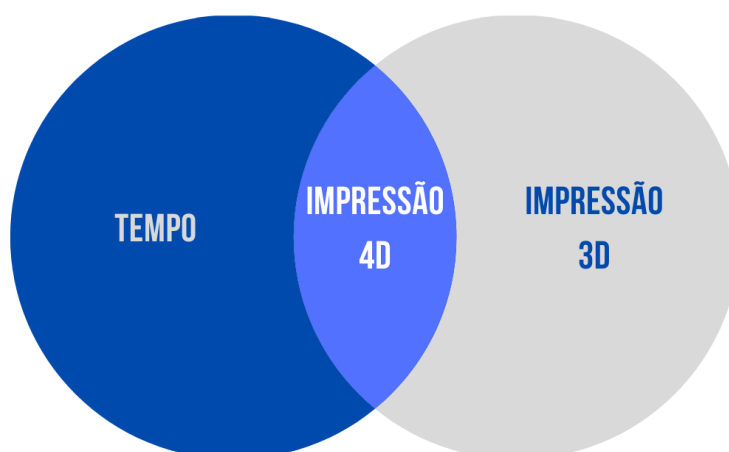


Figura 2 - Representação da impressão 4D. [37]

Este conceito de manufatura aditiva promete a junção de materiais inteligentes com propriedades específicas e *designs* digitais programados para possibilitar que a peça impressa tenha uma mudança de forma com o tempo. Com isso, a impressão 4D visa alterar a impressão 3D em termos de estrutura, formato e propriedades da peça. As principais características dos dois tipos de manufatura aditiva estão descritas na Tabela 3 a seguir. [37]

Tabela 3 - Distinções entre impressão 3D e 4D (adaptado de [37]).

Comparação	Impressão 3D	Impressão 4D
Abordagem da manufatura	Estrutura formada pela deposição de camadas utilizando material em tinta 2D	Um passo a mais que a 3D com a programação da propriedade de mudança de forma
Materiais utilizados	Metais, cerâmicas, termoplásticos, nanomateriais e biomateriais	Materiais inteligentes
Programação da mudança de forma	Sem etapa de programação envolvida	Preparação termomecânica, impressão de multimateriais para criar diferentes tensões térmicas e mecânicas
Flexibilidade de forma	Forma estruturas rígidas	Caracterizado pela mudança da estrutura flexível sob estímulo de energia externa
Áreas de aplicação	Engenharia, eletrônica, medicina, automotiva, robótica, aeroespacial	Adiciona elementos dinâmicos em todas as aplicações da impressão 3D, mais empregado em aplicações biomédicas

Comparando com a impressão 3D comum, a impressão 4D apresenta algumas vantagens, dentre elas a mudança de formato devido a flexibilidade da peça com a aplicação de energia externa como calor, luz ou outra fonte energética. A impressão 4D pode ser pensada como uma impressão 3D de materiais inteligentes. Dessa forma, a grande dependência da impressão 4D é a correta escolha do material inteligente a ser utilizado, para que seja efetiva a mudança de formato de um estado para outro com o correto estímulo energético. Atualmente, as tecnologias utilizadas na impressão 4D são FDM, SLA, SLS e *polyjet*. [37]

As peças impressas 4D mudam de forma através das variações de coeficiente de expansão térmica e algumas outras propriedades que se alteram com a incidência de uma fonte de energia. Para a correta avaliação da mudança de forma, faz-se necessário programar designs digitalmente, com auxílio de modelos matemáticos. Alguns dos materiais inteligentes que podem ser utilizados nesta técnica são os materiais piezoelétricos (como o fluoreto de polivinilideno - PVDF) materiais com memória de forma (como hidrogéis contendo polietilenoglicol, outros polímeros e ligas metálicas com memória de forma) e metais e semicondutores (como compósitos de carbono, zinco e lítio). [37]

Acredita-se que a impressão 4D pode revolucionar vários processos que são utilizados hoje em dia. Alguns setores começaram a testar essa tecnologia, sendo o mais promissor deles o setor médico, e tem-se a intenção de explorar mais esta tecnologia nos outros setores do mercado. [37]

Segundo Mehrpouya et al. (2019), a manufatura aditiva híbrida é considerada a próxima geração da manufatura aditiva. Os desafios tecnológicos para impressão de peças micro e até nanométricas deverão ser enfrentados nos próximos anos, já que a precisão de impressão deve ser relativamente alta. Os melhores resultados atingidos para a fabricação de peças micro e nanométricas correspondem a processos que combinaram dois tipos de manufatura: a aditiva e a subtrativa. O conceito de manufatura híbrida visa utilizar a manufatura aditiva como primeiro processo, e depois passar pela manufatura subtrativa para melhorar a finalização e polimento da peça. Ainda mais, esse conceito defende que todos os processos

devem ser controlados por *softwares*, de forma a ficar uma produção automatizada, como se fosse apenas uma máquina trabalhando. [3]

A impressão de *spare parts*, ou peças de reposição, representa um campo de atuação da manufatura aditiva. Atualmente, o mercado de peças de reposição enfrenta alguns problemas, dentre eles: disponibilidade de peças, tempo e custo de produção e envio. O estoque de peças de reposição deve ser muito bem planejado, para que os custos de estoque não sejam altos demais, mas ao mesmo tempo tenha algumas peças chave para reposição. [38]

Para solucionar os problemas enfrentados pelas empresas fabricantes de peças de reposição, foi criado o conceito de impressão 3D de peças de reposição, também chamado de *digital spare parts* (DSP). Esse conceito argumenta a redução do estoque, do custo e do tempo de manufatura de peças de reposição através da impressão local das peças através de arquivos enviados digitalmente pelas empresas fabricantes. Além disso, o DSP evita outro problema de peças de reposição: peças obsoletas ou peças fora de linha. Com a impressão local, não se tem o problema de ter um estoque cheio de peças obsoletas ou a falta de peças “fora de linha”, basta simplesmente ter o arquivo digital da peça e imprimi-la. Esse conceito pode ser aplicado em diversas áreas da indústria e com variados tipos de materiais, afetando toda a cadeia de logística de produção. [38] Entretanto, é necessário desenvolver um projeto estratégico para avaliar a viabilidade técnica e financeira de se ter uma máquina de impressão 3D, matéria prima e profissionais com conhecimento da técnica para realizar a fabricação das peças. Além disso, é preciso verificar custos e prazos de entregas da matéria prima, e se ainda sim vale a pena fabricar localmente.

Uma vantagem adicional da utilização da impressão local é a sustentabilidade deste processo levando em conta o ciclo de vida da peça, que contribui com menor quantidade de emissões de poluentes devido a otimização de transportes. Ott et al. (2019) desenvolveu um modelo conceitual para avaliação de custos de diferentes estratégias de manufatura de peças de reposição, que ajuda a tomada de decisão de empresas fabricantes. Ele defende que as implicações dos

custos logísticos e dos benefícios da sustentabilidade do processo de impressão 3D devem continuar sendo estudados, especialmente a correlação entre a redução de transporte com a emissão de poluentes e a redução do tráfego devem ser considerados para entender o real impacto sustentável da impressão 3D local. Ainda mais, ele defende que a descentralização da produção pode conter muitos obstáculos a serem vencidos, principalmente no aspecto tecnológico. [39]

Como dito anteriormente, faz-se necessário entender, com mais estudos e pesquisas, se os custos logísticos e a poluição do transporte da matéria prima e do equipamento de impressão para o local da aplicação compensam em relação a compra de peças de reposição prontas. Como o custo da impressão local pode ser muito alto, pode-se considerar que a impressão local de peças críticas para a operação é vantajoso, já que a parada completa da operação seria mais custoso.

Ainda mais, o conceito DSP também pode resolver problemas de peças de reposição para localidades geograficamente complicadas para a entrega de produtos. Nesses casos, usualmente são enviadas uma quantidade de peças de reposição periodicamente. Entretanto, se alguma peça falhar neste meio tempo e não tiver peças de reposição no estoque, os equipamentos ficam parados. Com a impressão 3D local, esses problemas se resolvem e tem-se a garantia de funcionamento dos equipamentos independente do estoque de peças. Além disso, o custo de inventário e de logística são reduzidos. Dentre algumas organizações que estão testando essa solução, é possível destacar os Fuzileiros Navais Americanos (*US Marine Corps*) localizados na costa do Japão, a Marinha Americana, a Estação Espacial Internacional (NASA) e o Exército Real dos Países Baixos (RNLA) localizados em Mali. [40]

Segundo Westerweel et al. (2020), o RNLA tem tido resultados benéficos ao utilizar a impressão 3D local com uma redução de 47% dos custos operacionais dentre 14 componentes de 3 sistemas críticos utilizados por eles. Além disso, 72% do espaço de estoque foi reduzido, o que indica uma facilidade maior do RNLA operar em localidades remotas e de difícil acesso. Dessa forma, este estudo classifica a impressão 3D local como uma opção atrativa para diversas

organizações nos campos de mineração, óleo e gás, indústrias de transporte internacional, etc. [40] Acredita-se que para as aplicações em lugares remotos com dificuldade de transporte haja uma viabilidade técnica e financeira para o DSP, já que os custos de ficar com equipamentos parados e prazos longos de entrega podem acarretar em grandes prejuízos.

Entre tantas vantagens da impressão 3D local de peças de reposição, tem-se algumas desvantagens do uso deste conceito. Uma delas é que as peças impressas podem apresentar menores propriedades mecânicas e químicas quando comparadas às peças fabricadas via manufatura comum, especialmente as peças fabricadas com materiais metálicos. Porém, no caso de peças críticas cujas impressas 3D não foram homologadas junto a aplicação, ainda sim estas serviriam como solução temporária até a substituição de uma peça de reposição que se ajuste melhor ao produto. Com isso, o equipamento em questão continuaria sendo utilizado e não ficaria parado devido a falta de peças. [40]

Muitas inovações nos campos de materiais e aplicações foram descritas, com o intuito de superar os desafios da implementação da manufatura aditiva no setor industrial. Porém, faz-se necessário refletir se as inovações desenvolvidas conseguem abranger uma escala maior de produção, ou seja, se as inovações conseguem alavancar a manufatura aditiva para que ela consiga alcançar a produção em massa.

Em alguns casos, acredita-se que as inovações foram pensadas para grandes produções, outras porém foram pensadas em prototipagem. Inovações como a criptografia blockchain, softwares, IoT e *Big Data* são conceitos de mais fácil escalabilidade e replicabilidade. A criptografia blockchain, por exemplo, já é usualmente aplicada no grande mercado de bitcoins, teria que ser somente ajustada à área de manufatura aditiva. Por outro lado, alguns desenvolvimentos como a biomanufatura e construção civil de grandes estruturas são mais difíceis de serem desenvolvidos em grande escala, já que dependem de muitas variáveis de processo, tecnológicos, de materiais, custo, profissionais capacitados, entre outros. Dessa forma, acredita-se que a manufatura aditiva em grande escala ocorra mais

rapidamente em alguns setores do mercado, como os setores automobilístico e aeronáutico, do que outros, como a construção civil e a medicina.

Entretanto, muito ainda precisa ser desenvolvido e validado no ambiente industrial. Portanto, com objetivo de salientar e retomar os principais desafios dessa área, a próxima seção aborda os obstáculos atuais e perspectivas futuras da manufatura aditiva.

4. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS DA MANUFATURA ADITIVA

Os desafios industriais onde a manufatura aditiva mais precisa se desenvolver atualmente são (em ordem decrescente): tecnologias mais confiáveis, novos materiais, redução de custo, tecnologias e materiais sustentáveis, tecnologias de fácil operação, treinamentos e educação, software. [41] [10] Entretanto, como foi discutido anteriormente, muitas inovações tecnológicas e na engenharia de materiais estão sendo desenvolvidas para superar tais desafios citados, a fim de instaurar cada vez mais a manufatura aditiva no setor industrial.

Outros importantes desafios a serem vencidos também pela manufatura aditiva são: as imperfeições, tempo de produção e limitações de tamanho. As imperfeições da sobreposição das camadas da impressão podem influenciar negativamente nas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, na performance dos impressos. [3]

Alguns autores defendem que a manufatura aditiva será protagonista da próxima revolução industrial. Porém, apesar do grande potencial tecnológico e inovador da manufatura aditiva, muitos desafios devem ser superados para que a forma de produção industrial atual tenha grande contribuição da impressão 3D. Um dos grandes desafios tecnológicos da manufatura aditiva, segundo Mehrpouya et al. (2019), é a redução do custo de produção. [3] O alto custo de produção, por sua vez, depende da técnica e do material utilizados. O alto gasto de energia, tempo longo de produção, custo alto da máquina de impressão são alguns fatores que podem encarecer o processo. Porém, há divergências quando consideramos peças complexas ou alguns processos, onde é possível produzir uma alta quantidade de peças em um curto período de tempo, cujo custo benefício do processo compensa economicamente em relação a outros tipos de manufaturas não aditivas.

Além disso, outros desafios como a redução do tempo de manufatura e uma maior autonomia do processo são obstáculos que os pesquisadores dos próximos anos terão que resolver, conforme já mencionado [3] A autonomia do processo, por sua vez, acredita-se que pode ser alcançada através da integração da impressora com outros equipamentos através do conceito de IoT, utilizando também *Big Data* e

softwares inteligentes. Através dessa integração, a impressora seria capaz de estabelecer os parâmetros ótimos de impressão e depender menos dos operadores de máquinas. Com uma maior autonomia, a manufatura aditiva conseguiria atingir níveis maiores de produção, chegando até a produção em massa de produtos.

Um desafio social da manufatura foi apresentado por Sculpteo (2021) em sua pesquisa, que contou com 1900 participantes de 86 países diferentes. Segundo os dados apresentados, 87% das pessoas que utilizam a manufatura aditiva são homens e somente 13% são mulheres. [41] Um grande questionamento por trás disso surge, que é: Porque a questão de gênero está tão desequilibrada nesta área? Quais são os desafios que as mulheres enfrentam neste campo? Ou quais as facilidades que os homens apresentam? Este número reflete também a realidade das universidades que estão formando estes colaboradores? Sabe-se que no ambiente da engenharia, tanto nas universidades quanto no mundo corporativo, há ainda uma maior quantidade de homens do que mulheres, apesar de uma maior gama de mulheres adentrarem neste ramo nos últimos anos. Todavia, cabe ressaltar que uma reflexão em torno desta questão de gênero na manufatura se faz necessário e, ainda mais, sugere-se refletir como é possível mudar esta realidade indo ao encontro de uma equidade de gêneros na manufatura aditiva.

Ainda mais, Sculpteo (2021) em sua pesquisa tentou entender quais os desafios da utilização da técnica de manufatura aditiva nas indústrias. Para isso, foi realizada a seguinte pergunta aos funcionários de empresas que utilizam manufatura aditiva: “Quais são as barreiras para expandir o uso de impressora 3D na sua empresa?” As respostas foram majoritariamente: orçamento e falta de oportunidades. [41] É possível refletir que essa falta de oportunidades pode estar vinculada com a falta de preparo e treinamentos da equipe sobre as técnicas da manufatura aditiva, mas seria interessante perguntar a tais funcionários o que, na visão deles, resolveria o problema de falta de oportunidades.

Chong et al. (2018) salienta que um desafio é a educação e treinamentos dos profissionais para a manufatura aditiva na indústria 4.0. O autor defende que as universidades devem implementar abordagens cross-multidisciplinares, que incluem

várias facetas de aprendizado e modos de ensino (tradicional e online), para preparar os estudantes para o mercado de trabalho. [42] Além de incluir o aprendizado da técnica da manufatura aditiva, poderia ser incluído também projetos de inovação na área de manufatura aditiva nas universidades, encorajando os alunos a pesquisarem os desafios da técnica e terem ideias tanto na área de materiais quanto na área de equipamentos, de forma também a ressaltar o vasto campo de desenvolvimento que a manufatura aditiva contém.

Um dos desafios enfrentados tecnologicamente pela impressão 3D local de peças de reposição, por sua vez, é a necessidade de disponibilizar todas as peças em arquivos digitais com informações e especificações adicionais do material a ser utilizado, além de configurações e parâmetros utilizados para a fabricação da peça a fim de garantir a reprodutibilidade e alta qualidade das peças. [38] Muitos produtos não têm sua documentação digitalizada, o que dificulta a adoção da manufatura aditiva digital para peças de reposição. [1] Além disso, caso as peças precisem passar por um processo de usinagem após a impressão, a máquina de usinagem deverá ficar localizada no mesmo local que a impressora 3D, para compensar o custo benefício da manufatura local. [38] Alguns outros desafios desta técnica são a utilização de diferentes tipos de materiais, a limitação de treinamentos de suporte para funcionários e adequação do modelo de negócio adotado pelas indústrias. [1] O custo dos equipamentos de impressão 3D também devem ser levados em conta, já que o alto custo pode inviabilizar a compra do equipamento e, portanto, impossibilitar a impressão local de peças de reposição.

O grande desafio enfrentado pelo campo médico, especialmente no campo de impressão de órgãos e tecidos humanos, é a viabilidade técnica, alta qualidade e alta performance requerida das peças impressas. Segundo Shapira e Dvir (2021), os protocolos de fabricação de peças impressas para a área médica estão longe de ter a capacidade de gerar órgãos e tecidos transplantáveis. Isso se deve à complexidade da composição dos órgãos e tecidos, que são formados de inúmeros tipos de células, materiais e arquiteturas. A engenharia de tecidos precisa se desenvolver muito ainda até conseguir alcançar o nível de complexidade do corpo

humano, tanto no sentido de materiais a serem impressos quanto a tecnologia de impressão. [43]

A propriedade intelectual, como já abordado anteriormente, representa outro desafio tecnológico da manufatura aditiva. Kunovjanek e Wankmuller (2020) defendem em sua pesquisa os direitos de propriedades intelectuais é um dos fatores barrando a manufatura aditiva de conquistar sua ampliação na indústria, já que o receio de replicar algo ilegalmente é um sentimento recorrente para quem utiliza a impressão 3D. Na pandemia de COVID-19 mais de 68% dos produtos de saúde impressos correspondiam a designs compartilhados. [29]

Outro desafio é a falta de normas e padrões para atender todo o leque de possibilidades, técnicas e produtos que a manufatura aditiva tem. [8] Existem sim muitas normas para esta técnica, porém o aumento das possibilidades de produção cresce exponencialmente, o que gera um atraso e uma dificuldade de atualizar as normas para acompanhar todos os novos processos. Isso implica em uma falta de controle, tolerâncias e repetibilidade das peças impressas.

Outro desafio, agora no campo de materiais, é a impressão de múltiplos materiais que, por sua vez, possibilitaria a inserção de forma mais fácil da manufatura aditiva na indústria, dado que a utilização de múltiplos materiais geraria inúmeros tipos de produtos impressos. Dessa forma, outro importante desafio tecnológico é desenvolver técnicas e impressoras capazes de imprimir diferentes tipos de materiais em um processo integrado, rápido e barato. [3]

Segundo Mehrpouya et al. (2019), as propriedades que demandaram mais no desenvolvimento de novos materiais são: biocompatibilidade, propriedades mecânicas, propriedades de impressão, biomimetismo e degradação. [3] Florén et al. (2020) defende em sua pesquisa que para que a manufatura aditiva seja considerada viável e confiável, será necessário um suporte importante dos materiais a serem utilizados. [1] Dessa forma, entende-se que a evolução dos materiais deve andar em conjunto com a evolução da tecnologia, pois só assim serão criadas

peças confiáveis e com grande capacidade de substituir às produzidas por manufatura comum.

Ainda mais, Mehrpouya et al. (2019) conclui em seu trabalho que o futuro da manufatura aditiva vai se concentrar no desafio de desenvolver materiais multifuncionais - *Functionally Graded Materials* (FGM) - além de combinação de metais e cerâmicas para a produção de materiais menos frágeis, entre outros que vão auxiliar a produção de peças complexas inovadoras. [3]

Kumar et al. (2020) apresenta outras barreiras a serem vencidas pelos materiais a serem utilizados em manufatura aditiva, e são elas: formação de vazios e características mecânicas e microestruturais anisotrópicas. [7] A formação de vazios entre as camadas impressas diminui a performance mecânica da peça, já que as superfícies das camadas não ficam totalmente conectadas e a peça pode falhar em serviço antes do esperado. [7] [15] Mueller et al. (2020) aponta também que, na maioria dos casos, as peças impressas 3D apresentam propriedades mecânicas inferiores às peças produzidas por outro tipo de manufatura devido a essa adesão não completa entre as camadas impressas. [28] Já as características anisotrópicas se dão pela natureza da técnica da manufatura aditiva, onde a deposição de camadas gera diferentes propriedades dependendo da direção de solicitação. Essas características podem ser desejadas pelo fabricante ou não, e em caso negativo, o grande desafio é como produzir peças isotrópicas pela manufatura aditiva. [7]

Na área médica, como citado anteriormente, na impressão de órgãos e tecidos, os materiais deverão ter a capacidade de manter a estrutura celular e ter a capacidade de proliferação de células. Dessa forma, deverão ser desenvolvidos materiais cujas características atendam as especificações de um corpo humano e de uma impressora 3D. [3] Além disso, materiais com propriedades antialérgicas, biodegradáveis, recicláveis e resistentes mecanicamente quando em contato com tecidos humanos são outras demandas requeridas pela área biomédica. [34] Materiais compósitos podem ser a solução para variados desafios enfrentados pela manufatura aditiva. O desenvolvimento de biomateriais com diferentes

composições, por exemplo, já é um campo muito estudado pelos pesquisadores da engenharia de materiais, mas acredita-se que muito tem a se desenvolver nessa área, principalmente para atender as especificações descritas anteriormente. [3]

O desenvolvimento de materiais inteligentes para a manufatura aditiva podem alavancar essa forma de produção no mundo industrial. [3] Os materiais desenvolvidos para a manufatura aditiva ainda são considerados poucos quando comparados aos materiais desenvolvidos para outros tipos de manufatura. [17] Entretanto, será necessário resolver obstáculos químicos e físicos para a utilização de materiais inteligentes. Para isso, a utilização de agentes modificadores de viscosidade, agentes sacrificadores, agentes cross-linking, entre outros que, combinados com os materiais inteligentes, constituirão produtos inovadores no mercado. [3] Acredita-se que o desenvolvimento de novos materiais aumentará com o aumento da demanda da manufatura aditiva, conforme os desafios da implementação desta técnica no setor industrial forem superados.

Faz-se necessário ressaltar, porém, que tais desenvolvimentos de materiais devem levar em conta as características necessárias para impressão das principais técnicas utilizadas. No caso dos polímeros, os materiais desenvolvidos devem ter comportamento reológico de tal forma que os filamentos tenham viscoelasticidade o suficiente para serem puxados pelos rolos e depositados camada a camada sem que haja uma perda da forma da peça, além de fornecer a adesão entre as superfícies das camadas. Já para os materiais metálicos e cerâmicos, os materiais desenvolvidos devem apresentar a possibilidade de serem produzidos pós com tamanho de partícula micrométrica, de acordo com as especificações das técnicas utilizadas.

Por fim, constata-se que muitos desafios terão de ser superados para a inserção da manufatura aditiva no mercado industrial, desafios tanto tecnológicos quanto na área de materiais. É importante ressaltar que como é o potencial desta técnica de se tornar a protagonista da próxima revolução industrial, estimula-se pesquisadores, engenheiros e estudantes a se envolverem nesta área com um vasto campo para ser ainda desenvolvido.

5. CONCLUSÃO

A revisão da literatura aponta que a manufatura aditiva corresponde a uma técnica de produção que está revolucionando a forma de fabricação de equipamentos na era moderna. Acredita-se que a através da manufatura aditiva muitos obstáculos e fabricações antes impossíveis se tornarão possíveis. Neste trabalho foram listados algumas inovações na área da manufatura aditiva, em questão de materiais que estão sendo desenvolvidos, e áreas de aplicação, dentre elas: automobilística, aeroespacial, médica, construção civil, entre outras. Alguns destaques nas inovações são a fabricação de peças via manufatura aditiva para os setores aeronáutico e automobilístico, uso conjunto da engenharia de tecidos e manufatura aditiva na área médica, impressão local de peças de reposição, desenvolvimento de softwares e outras ferramentas para auxiliar a produção de peças via manufatura aditiva. Além disso, novos materiais estão sendo desenvolvidos, como ligas metálicas, uso de celulose, sílica e silicatos na manufatura aditiva.

Além disso, alguns desafios e perspectivas futuras foram apresentados, tais como assegurar a propriedade intelectual dos arquivos digitais, redução do tempo de produção, adequação das normas com alta gama de processos criados, atingir a equidade de gênero na manufatura aditiva, desenvolvimento de peças com boas propriedades mecânicas, redução de vazios em peças cerâmicas, entre outros. Tanto na área tecnológica quanto na área de materiais, entende-se que há muitas alternativas ainda para serem estudadas e desenvolvidas.

Por fim, este trabalho teve como intenção demonstrar o potencial da técnica de manufatura aditiva e incentivar os profissionais da engenharia de materiais, e de outras áreas, a se envolverem e se entusiasmarem com os avanços da manufatura aditiva.

REFERÊNCIAS

- [1] FLOREN, H. et al. Additive manufacturing technologies and business models—a systematic literature review. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 1, p. 136-155, 15 out. 2020. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/1741-038X.htm>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- [2] ISHENGOMA, F. R.; MTAHO, A. B. 3D Printing: Developing Countries Perspectives. **International Journal of Computer Applications**, v. 104, ed. 11, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1410.5349>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- [3] MEHRPOUYA, M. et al. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. **Applied Sciences**, v. 9, n. 18, p. 3865, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/18/3865>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- [4] SRINIVASAN, D. et al. 3D Printing Manufacturing Techniques, Materials, and Applications: An Overview. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 2021. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2021/5756563/>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- [5] SANCHEZ, L. C. **Avaliações e correlações das propriedades reológicas, mecânicas e de cinética de cristalização de polímeros utilizados em processo de impressão 3d por FFF**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
- [6] INGARAO, G.; PRIARONE, P. C. A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive-and subtractive-based manufacturing approaches. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, p. 1219-1229, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612520303832>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- [7] KUMAR, R.; KUMAR, M.; CHOCHAN, J. S. Material-specific properties and applications of additive manufacturing techniques: A comprehensive review. **Bulletin**

of Materials Science, v. 44, n. 3, p. 1-19, 2021. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12034-021-02364-y>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[8] VAFADAR, A. et al. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1213>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[9] SANTANDER, P. et al. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104531, 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919304379>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[10] MACHADO, C. G. et al. Additive manufacturing from the sustainability perspective: Proposal for a self-assessment tool. **Procedia CIRP**, v. 81, p. 482-487, 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119304287>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[11] YOSOFI, M.; KERBRAT, O.; MOGNOL, P.. Framework to combine technical, economic and environmental points of view of additive manufacturing processes. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 118-123, 2018. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117308612>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[12] PARIS, H. et al. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. **Journal of cleaner production**, v. 164, p. 508-523, 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617313732>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[13] TANG, Yunlong; MAK, Kieran; ZHAO, Yaoyao Fiona. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive

manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1560-1572, 2016.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616307120>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[14] NAGARAJAN, H. PN; HAAPALA, K. R. Characterizing the influence of resource-energy-exergy factors on the environmental performance of additive manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 48, p. 87-96, 2018.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612518301250>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[15] JIMÉNEZ, M. et al. Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. **Complexity**, v. 2019, 2019. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/9656938/>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[16] LI, N. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 35, n. 2, p. 242-269, 2019.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030218301786>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[17] TAN, L. J.; ZHU, W.; ZHOU, K. Recent progress on polymer materials for additive manufacturing. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 43, p. 2003062, 2020. Disponível em:

Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202003062>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[18] LAKHDAR, Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials.

Progress in Materials Science, v. 116, p. 100736, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642520301006>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[19] BACKES, E. H. **Desenvolvimento de biocompósitos de Poli (ácido**

lático)/biocargas para impressão 3d de scaffolds para engenharia de tecidos ósseos. 2020. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

[20] MULLER, C. **BASF Ultrafuse 316L:** Metal filament for industrial 3D printing. Disponível em:
https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/group-companies/BASF_New-Business-GmbH/news/press-releases/2019/p-19-07-23_Ultrafuse.html. Acesso em: 11 abr. 2022.

[21] ELSAYED, H. et al. Suitability of Biosilicate® glass-ceramic powder for additive manufacturing of highly porous scaffolds. **Ceramics International**, v. 47, n. 6, p. 8200-8207, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220335148>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[22] ARAÚJO, A. P. M. **Manufatura aditiva da liga reciclada Al-Fe-Cr-Ti formadora de fase quasicristalina.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

[23] SANTOS JUNIOR, C. E. **Overview of Al-Si alloys for additive manufacturing and prospects.** 2021. Dissertação (Bacharel em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

[24] ZHANG, X. et al. Additive manufacturing of cellular ceramic structures: from structure to structure-function integration. **Materials & Design**, p. 110470, 2022. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127522000910>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[25] CHEN, H. et al. Additive manufacturing of W–Fe composites using laser metal deposition: Microstructure, phase transformation, and mechanical properties. **Materials Science and Engineering: A**, v. 811, p. 141036, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509321003051>. Acesso

em: 11 abr. 2022.

[26] KELLENS, K. et al. Environmental dimensions of additive manufacturing: mapping application domains and their environmental implications. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S49-S68, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12629>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[27] BURKHART, M.; AURICH, J. C. Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. **Procedia Cirp**, v. 29, p. 408-413, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115005156>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[28] MUELLER, T. et al. Eight weeks later—the unprecedented rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic—a case study, lessons learned, and implications on the future of global decentralized manufacturing. **Applied Sciences**, v. 10, n. 12, p. 4135, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/12/4135>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[29] KUNOVJANEK, M.; WANKMÜLLER, C. An analysis of the global additive manufacturing response to the COVID-19 pandemic. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2020. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-07-2020-0263/full/html>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[30] SALMI, Mika. Additive manufacturing processes in medical applications. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 191, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/1/191>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[31] VOLA, M. **Amsterdam’s robot printed footbridge welds steelwork with state-of-the-art technology**. Disponível em: <https://www.arup.com/projects/mx3d-bridge>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[32] CHERDO, L. **The 13 best construction 3D printers in 2022**. Disponível em: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/house-3d-printer-construction/>.

Acesso em: 11 abr. 2022.

[33] ROJEK, I. et al. Optimization of Extrusion-Based 3D Printing Process Using Neural Networks for Sustainable Development. **Materials**, v. 14, n. 11, p. 2737, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/11/2737>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[34] ROJEK, I. et al. AI-optimized technological aspects of the material used in 3D printing processes for selected medical applications. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5437, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/23/5437>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[35] KURPJUWEIT, S. et al. Blockchain in additive manufacturing and its impact on supply chains. **Journal of Business Logistics**, v. 42, n. 1, p. 46-70, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jbl.12231>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[36] EXAME. Redação. **Como funciona a tecnologia blockchain?** Disponível em: <https://exame.com/future-of-money/como-funciona-a-tecnologia-blockchain/>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[37] MONDAL, K.; TRIPATHY, P. K.. Preparation of Smart Materials by Additive Manufacturing Technologies: A Review. **Materials**, v. 14, n. 21, p. 6442, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/21/6442>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[38] KRETZSCHMAR, N. et al. Evaluating the readiness level of additively manufactured digital spare parts: An industrial perspective. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1837, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/10/1837>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[39] OTT, K.; PASCHER, H.; SIHN, W.. Improving sustainability and cost efficiency for spare part allocation strategies by utilisation of additive manufacturing technologies. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 123-130, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306237>. Acesso em:

11 abr. 2022.

[40] WESTERWEEL, B. et al. Printing spare parts at remote locations: Fulfilling the promise of additive manufacturing. **Production and Operations Management**, v. 30, n. 6, p. 1615-1632, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/poms.13298>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[41] SCULPTEO. **The State of 3D Printing**: 2021 Edition. Disponível em: <https://info.sculpteo.com/hubfs/downloads/The%20State%20of%203D%20Printing%202021.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[42] CHONG, S. et al. Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 3960, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/3960>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[43] SHAPIRA, A.; DVIR, T.. 3D tissue and organ printing—hope and reality. **Advanced Science**, v. 8, n. 10, p. 2003751, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202003751>. Acesso em: 11 abr. 2022.

[44] CREALITY. **Ender - 3 S1**: Bringing your ideas to life. Disponível em: <https://www.creality.com/products/creality-ender-3-s1-3d-printer>. Acesso em 25 abr. 2022.

GLOSSÁRIO

Big data - dados gerados pelo rastreamento de informações

Blockchain - cadeia de blocos/tecnologia de criptografia

Designers - Desenhista/projetista

Design - Concepção física e funcional de um produto/desenho/projeto

Digital spare parts - Peças de reposição digitais

Direct Light Processing - Processamento de luz direta

Direct Metal Laser Sintering - Sinterização Direta de Metal a Laser

Eco-friendly - Ecologicamente correto

Electron Beam Freeform Fabrication - Fabricação de formas livres via feixe de elétrons

Electron Beam Melting - Fusão por feixe de elétrons

Functionally Graded Materials - Materiais multifuncionais

Fused Deposition Modeling - Modelagem por deposição de fundido

Fused Filament Fabrication - Fabricação via Filamento Fundido

Input - Entrada

In situ - Em campo

Internet of Things - Internet das coisas

Jet Fusion Metal - Fusão a jato de metal

Laser Metal Deposition - Deposição de metal a laser

Liquid-Based Systems - Sistemas à base de líquidos

Offshore - Situado longe da costa/alto-mar

Open-source - Acesso aberto

Organic Light Emitting Diodes - Diodos orgânicos emissores de luz

Polyjet - Polijato

Scaffolds - Esqueletos/estruturas de sustentação

Selective Laser Sintering - Sinterização seletiva a laser

Selective Laser Melting - Fusão seletiva a laser

Software - Programa

Solid based systems - Sistemas de base sólida

Spare parts - Peças de reposição

Stereolithography - Estereolitografia

Supply chain - Cadeia de suprimentos

US Marine Corps - Fuzileiros Navais Americanos

Wire Pulse Arc - Arco de pulso de arame