



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VINICIUS CAVALCANTE ARAÚJO**

**MANUFATURA ADITIVA E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA: UMA  
REVISÃO DE LITERATURA**

**RUSSAS**

**2021**

VINICIUS CAVALCANTE ARAÚJO

MANUFATURA ADITIVA E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA: UMA  
REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Ceará – Campus Russas, como requisito  
parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton  
Magalhães Pinheiro

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A692m Araújo, Vinicius Cavalcante.  
Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura / Vinicius Cavalcante  
Araújo. – 2021.  
94 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Inovação. 4. Indústria. I. Título.

CDD 620.1

---

VINICIUS CAVALCANTE ARAÚJO

MANUFATURA ADITIVA E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA: UMA  
REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Ceará – Campus Russas, como requisito  
parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por essa e por todas as oportunidades concedidas em minha vida, pela minha saúde e de toda minha família, principalmente nos tempos difíceis atualmente.

Aos meus pais e minha irmã, por sempre me apoiarem e por todo o incentivo dado na minha graduação, por todo o esforço realizado para que nunca me faltasse nada, apesar da distância.

À minha namorada por todo o carinho, companheirismo e paciência, me ajudando e estando sempre comigo, principalmente nessa reta final de curso.

A todos os meus familiares e conhecidos de Russas que me auxiliaram nesse período da faculdade e longe dos meus pais, pois de fato foram minha segunda família.

Aos meus amigos por todos os momentos juntos e toda a ajuda nesses anos de graduação.

Aos meus professores por todos os ensinamentos e apoio dados, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro por me orientar e auxiliar no atual trabalho e nesse momento final da graduação.

## RESUMO

Frente à crescente evolução tecnológica e a consequente competitividade no mercado, tem-se percebido cada vez mais o interesse por parte de grandes e emergentes economias na adoção de novas tecnologias e no incentivo à inovação. Popularmente conhecida como impressão 3D, a manufatura aditiva surge como uma grande possibilidade de suprir essa demanda, estimulando a inovação e a competitividade na fabricação de produtos, enquanto flexibiliza os modelos de negócios. Com isso, e diante da ascensão da manufatura aditiva no mercado percebida nos últimos anos, a tecnologia torna-se um objeto de estudo indispensável não só para engenheiros e estudantes da área, mas de todos. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão de literatura acerca da manufatura aditiva e suas aplicações na indústria, de modo a fornecer uma visão geral sobre o assunto. Para isso, foi realizada uma extensa pesquisa em *websites*, bancos de dados, livros e trabalhos acadêmicos relacionados ao tema proposto. Finalizada a revisão, constatou-se que a manufatura aditiva já é uma realidade para a indústria, investimentos recentes demonstram que a mesma está sendo encarada como algo que pode revolucionar o mercado, e já conta com resultados satisfatórios em suas aplicações. Apesar de suas limitações, percebe-se que a manufatura aditiva caminha para se consolidar no mercado e no cotidiano de todos.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Impressão 3D. Inovação. Indústria.

## ABSTRACT

In view of the growing technological evolution and the consequent competitiveness in the market, the interest of large and emerging economies in the adoption of new technologies and in the incentive to innovation has been perceived more and more. Popularly known as 3D printing, additive manufacturing emerges as a great possibility to supply this demand, stimulating innovation and competitiveness in the manufacture of products, while making business models more flexible. So, and in view of the rise of additive manufacturing in the market perceived in recent years, this technology has become an indispensable object of study not only for engineers and students in the field, but for everyone. The aim of the present study is to present a literature review about additive manufacturing and its applications in the industry, in order to provide an overview on the subject. For this, an extensive research was carried out on websites, databases, books and academic works related to the proposed theme. After the review, it was found that additive manufacturing is already a reality for the industry, recent investments demonstrate that it is being seen as something that can revolutionize the market, and already has satisfactory results in its applications. Despite its limitations, it is clear that additive manufacturing is moving towards consolidating itself in the market and in everyone's daily lives.

**Keywords:** Additive manufacturing. 3D Printing. Innovation. Industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas para realização do trabalho.....	14
Figura 2 - Roteiro dos assuntos abordados na pesquisa .....	16
Figura 3 - SLA-1, primeira impressora 3D a ser comercializada.....	18
Figura 4 - DTM SinterStation 2500.....	18
Figura 5 - Funcionamento da manufatura aditiva.....	23
Figura 6 - Exemplificação das camadas da manufatura aditiva .....	24
Figura 7 - Processo genérico da manufatura aditiva.....	25
Figura 8 - Corpo de guitarra impresso em desenvolvimento .....	27
Figura 9 - Fones de ouvidos impressos e customizados.....	29
Figura 10 - Redução da supply chain devido à manufatura aditiva.....	30
Figura 11 - Objeto sem pós processamento (à direita) e com pós processamento (à esquerda).....	32
Figura 12 - Peça original impressa com o material de suporte (à esquerda), e após a remoção (à direita).....	33
Figura 13 - Categorias de MA em relação à forma do material utilizado .....	38
Figura 14 - Modelo odontológico e aparelhos auditivos impressos por Fotopolimerização em Cuba.....	39
Figura 15 - Funcionamento da Estereolitografia .....	40
Figura 16 - Funcionamento do Processamento Digital de Luz (DLP) .....	41
Figura 17 - Diferenças entre a SLA e DLP na formação das camadas .....	42
Figura 18 - Funcionamento da Fusão em Leito de Pó (PBF) .....	43
Figura 19 - Motor GE9X do Boeing 777x com mais de 300 componentes impressos ..	44
Figura 20 - Impressora Blue Printer M3.....	46
Figura 21 - Funcionamento da Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) .....	47
Figura 22 - Funcionamento da tecnologia Binder Jetting .....	49
Figura 23 - Peça produzida por impressão de areia (à esquerda) e de metal (à direita) .	50
Figura 24 - Funcionamento da tecnologia Jateamento de Material.....	51
Figura 25 - Funcionamento da tecnologia de Laminação em Folha.....	54
Figura 26 - Funcionamento da tecnologia FDM .....	55
Figura 27 – Exemplos de materiais utilizados no processo de extrusão de material.....	57
Figura 28 - Funcionamento da tecnologia DED .....	58

Figura 29 - 16 turbilhadores para turbinas a gás impressos simultaneamente pela Siemens .....	64
Figura 30 - Combustor de turbina a gás produzido por manufatura convencional (à esquerda) e impresso (à direita).....	64
Figura 31 – Primeiro voo do mini avião do projeto THOR (à esquerda) e as peças impressas desmontadas (à direita) .....	65
Figura 32 - Painel externo impresso utilizado no Airbus A320 .....	65
Figura 33 - Cabeçote injetor do foguete Ariane 6 produzido por manufatura aditiva. 66	
Figura 34 - Centro de manufatura aditiva da GKN .....	67
Figura 35 - Roda do Audi lunar quattro, produzida por manufatura aditiva.....	68
Figura 36 - Assentos personalizados produzidos por manufatura aditiva pela Porsche. 68	
Figura 37 - Peça para proteção de roda produzida por manufatura aditiva pela Volkswagen Autoeuropa .....	69
Figura 38 - XB-1, protótipo supersônico da Boom Supersonic .....	69
Figura 39 - Resumo de aplicações da manufatura aditiva na medicina.....	71
Figura 40 - Aplicação da manufatura aditiva durante a pandemia .....	72
Figura 41 - Adaptações para maçanetas produzidas por manufatura aditiva .....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Marcos da manufatura aditiva ao longo do tempo .....	19
Quadro 2 - Resultados obtidos da busca por publicações com ambas as palavras-chave .....	21
Quadro 3 - Exemplo de classificação das categorias da manufatura aditiva antes das padronizações .....	22
Quadro 4 - Categorias de manufatura aditiva e suas traduções .....	22
Quadro 5 – Etapas de pós-processamento comuns na manufatura aditiva.....	34
Quadro 6 - Exemplos de materiais comerciais utilizados na manufatura aditiva.....	35
Quadro 7 - Categorias de manufatura aditiva e seus processos.....	37
Quadro 8 – Principais processos de PBF.....	45
Quadro 9 - Resumo de aplicações da manufatura na indústria.....	62
Quadro 10 - Resumo das últimas tendências da manufatura aditiva.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
CAD	Computer Aided Design
CBMAdi	Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	Directed Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
ISO	International Organization for Standardization
LOM	Laminated Object Manufacturing
MA	Manufatura Aditiva
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
SLA	Stereolithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
SHS	Selective Heat Sintering
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Objetivos</b> .....	13
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	13
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	13
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	14
<b>2.1 Caracterização da pesquisa</b> .....	14
<b>2.2 Coleta de dados</b> .....	15
<b>2.3 Análise dos dados</b> .....	15
<b>3 MANUFATURA ADITIVA</b> .....	17
<b>3.1 Breve histórico</b> .....	17
<b>3.2 Nomenclaturas</b> .....	20
<b>3.3 Conceitos gerais</b> .....	22
<b>3.3.1 Processo genérico da manufatura aditiva</b> .....	24
<b>3.4 Características da manufatura aditiva</b> .....	27
<b>3.4.1 Liberdade Geométrica</b> .....	27
<b>3.4.2 Customização</b> .....	28
<b>3.4.3 Redução da Supply Chain</b> .....	29
<b>3.4.4 Eficiência de material</b> .....	30
<b>3.4.5 Custo</b> .....	31
<b>3.4.6 Qualidade das peças produzidas</b> .....	32
<b>3.4.7 Materiais disponíveis</b> .....	34
<b>3.4.8 Velocidade de operação</b> .....	35
<b>4 CATEGORIAS DE MANUFATURA ADITIVA</b> .....	37
<b>4.1 Fotopolimerização em Cuba</b> .....	38
<b>4.1.1 Estereolitografia (SLA)</b> .....	39
<b>4.1.2 Processamento Digital de Luz (DLP)</b> .....	40
<b>4.2 Fusão em Leito de Pó (PBF)</b> .....	42
<b>4.2.1 Selective Laser Sintering (SLS) - Sinterização Seletiva a Laser</b> .....	45
<b>4.2.2 Selective Heat Sintering (SHS) - Sinterização Seletiva por Calor</b> .....	46
<b>4.2.3 Fusão Seletiva a Laser (SLM) e Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS)</b> .....	46
<b>4.2.4 Electron Beam Melting (EBM) - Fusão por Feixe de Elétrons</b> .....	47
<b>4.3 Jateamento de Aglutinante (BJ)</b> .....	48

<b>4.4 Jateamento de Material (MJ)</b> .....	<b>50</b>
4.4.1 <i>Modo Contínuo</i> .....	52
4.4.2 <i>Drop-on-Demand (DOD)</i> .....	52
<b>4.5 Laminação em Folha</b> .....	<b>52</b>
4.5.1 <i>Laminated Object Manufacturing (LOM) – Manufatura de Objetos Laminados</i> .....	53
4.5.2 <i>Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) – Manufatura Aditiva Ultrasônica</i>	54
<b>4.6 Extrusão de Material</b> .....	<b>55</b>
<b>4.7 Deposição de Energia Direcionada (DED)</b> .....	<b>57</b>
<b>5 MERCADO DA MANUFATURA ADITIVA</b> .....	<b>60</b>
<b>5.1 Aplicações na indústria</b> .....	<b>60</b>
5.1.1 <i>Indústria aeroespacial</i> .....	70
5.1.2 <i>Indústria médica</i> .....	70
5.1.3 <i>Indústria automotiva</i> .....	73
5.1.4 <i>Últimas tendências</i> .....	73
<b>6 DISCUSSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>6.1 Terminologia e padronizações da manufatura aditiva</b> .....	<b>75</b>
<b>6.2 Categorias da manufatura aditiva</b> .....	<b>76</b>
<b>6.3 Vantagens e limitações</b> .....	<b>76</b>
<b>6.4 Aplicações</b> .....	<b>78</b>
<b>6.5 Perspectivas para o futuro</b> .....	<b>79</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>80</b>
<b>8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>82</b>
<b>ANEXO A – RESUMO DAS CATEGORIAS DE MANUFATURA ADITIVA ....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Frente à crescente evolução tecnológica e a conseqüente competitividade no mercado, cresce a demanda por produtos inovadores e novos modelos de negócios. De acordo com um relatório do Fórum Econômico Mundial sobre competitividade global, nas grandes e emergentes economias, a adoção de tecnologias e o incentivo à inovação têm sido prioridades para governos e empresas como fonte de criação de valor, aumento de produtividade e melhoria dos padrões de vida (SCHWAB, 2019). Sob a ótica do desenvolvimento de produtos, a manufatura aditiva (MA) surge como uma grande possibilidade de estimular a inovação e a competitividade enquanto flexibiliza a cadeia logística, e os recentes investimentos na área comprovam isso.

Embora seja uma ideia inovadora, a manufatura aditiva não é tão recente como parece, inicialmente serviu como método para acelerar o desenvolvimento de produtos a partir de protótipos, sendo designada como prototipagem rápida. O que mudou é que a tecnologia deixou de ser apenas para protótipos, e apesar de suas limitações, o número de aplicações cresce cada vez mais. Já em 2013 era apontada como uma das tecnologias que iriam transformar o cotidiano, os negócios e a economia global (MANYIKA *et al.*, 2013).

Popularmente conhecida como impressão 3D, a manufatura aditiva é o processo de fabricação de objetos a partir de modelos virtuais com a geometria que a criatividade permitir, através da deposição de material camada por camada. Além disso, permite que tais objetos possam ser fabricados em um menor número de etapas, sem passar por várias operações de manufatura para se obter o produto final, e de grandes cadeias logísticas para que aquele chegue ao consumidor. Para uma compreensão mais intuitiva de suas vantagens e de seu funcionamento, basta-se fazer um paralelo com as técnicas de manufatura convencionais, que operam retirando material de um bloco maior, ou seja, são técnicas de manufatura subtrativas.

Nas graduações em engenharia mecânica, civil e produção, percebe-se a pouca abordagem das tecnologias de manufatura aditiva, em que o maior foco, ou até toda a parte de manufatura estudada, se concentra nos processos convencionais. Diante disso e da ascensão das técnicas de MA no mercado, além de novos estudos e técnicas sendo desenvolvidas, a tecnologia em questão se torna um objeto de estudo indispensável não só para engenheiros e estudantes da área, mas de todos. O presente trabalho propõe uma revisão das tecnologias de manufatura aditiva por meio de uma pesquisa bibliográfica,

abordando diversos aspectos importantes para compreensão dos potenciais dessa tecnologia para a indústria.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e específicos para melhor compreensão desse tópico.

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Abordar por meio de uma revisão de literatura a manufatura aditiva e suas aplicações na indústria, de modo a fornecer uma visão geral sobre o assunto.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- a) Analisar por meio do estudo do material disponível, a evolução da manufatura aditiva com o tempo;
- b) Apresentar os conceitos da manufatura aditiva, e suas vantagens e limitações em relação à manufatura convencional;
- c) Abordar o princípio de funcionamento das categorias de manufatura aditiva e suas principais variações, bem como os materiais mais utilizados em cada uma e as aplicações recomendadas;
- d) Discutir sobre os impactos da manufatura aditiva na cadeia logística e suas barreiras para consolidação no mercado, e perspectivas para o futuro.

## 2 METODOLOGIA

O seguinte tópico detalha a metodologia de pesquisa usada para o desenvolvimento do trabalho.

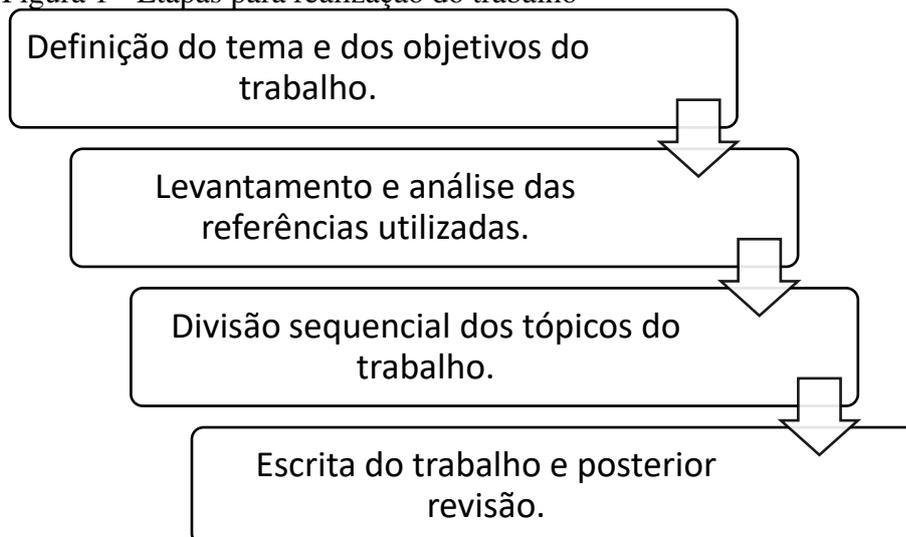
### 2.1 Caracterização da pesquisa

Como visto nos objetivos, o atual estudo propõe uma revisão bibliográfica a fim de aprofundar o assunto abordado. Com isso, o trabalho apresenta teor teórico e a pesquisa se enquadra como básica quanto à natureza, podendo servir, no entanto, como base para futuros estudos de caso ou problemas práticos.

Para o desenvolvimento do trabalho, uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, *websites*, foi realizada, e a partir da leitura e comparação das literaturas permitiu-se mais familiaridade com o tema para descrevê-lo. Assim, quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, visto que o estudo se trata de uma revisão de material já elaborado. O desenvolvimento da pesquisa se deu conforme a Figura 1.

Quanto à abordagem, a pesquisa é qualitativa, pois não se preocupa com representatividade numérica, e sim em compreender e analisar criticamente os dados obtidos.

Figura 1 - Etapas para realização do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.2 Coleta de dados

Para a coleta de dados foram utilizados *websites* de empresas de manufatura aditiva, de universidades e de notícias, dois livros, monografias pertinentes ao tema e os bancos de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Springer Link* para artigos científicos. A escolha do material utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi arbitrária, sem critérios sistemáticos, sendo a partir da análise da literatura, decidir se o material é pertinente para o trabalho ou não. Os livros utilizados foram os de Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Redwood, Schffer e Garret (2017), e foram fundamentais pra uma maior base teórica e aprofundamento ao tema. Na coleta de artigos científicos, a grande maioria foi através do banco de dados *Science Direct*, mostrando inclusive ter muito conteúdo recente sobre manufatura aditiva.

O método de pesquisa dos artigos se deu, inicialmente, por palavras-chave em português e em inglês, tais como “manufatura aditiva”, “impressão 3d” no *Science Direct*, e no primeiro momento buscou-se artigos de revisão sobre a tecnologia. Com o decorrer do trabalho, acrescentou-se às palavras-chave iniciais outros termos como, “manufatura aditiva + estereolitografia”, “manufatura aditiva + avanços recentes” por exemplo, para buscar estudos mais pertinentes ao tópico desejado no momento. Não obtendo sucesso nessa fonte, buscou-se em outros bancos de dados, *websites* de empresas do ramo, universidades, entre outras fontes para complemento do assunto. Embora a maior parte do material analisado foi estrangeiro, buscou-se material nacional em monografias e outros trabalhos acadêmicos.

Para informações sobre aplicações na indústria, além dos métodos de pesquisa citados acima, buscou-se em *websites* de notícias, para se ter uma visão geral da utilização da manufatura no mercado e de algumas aplicações recentes.

## 2.3 Análise dos dados

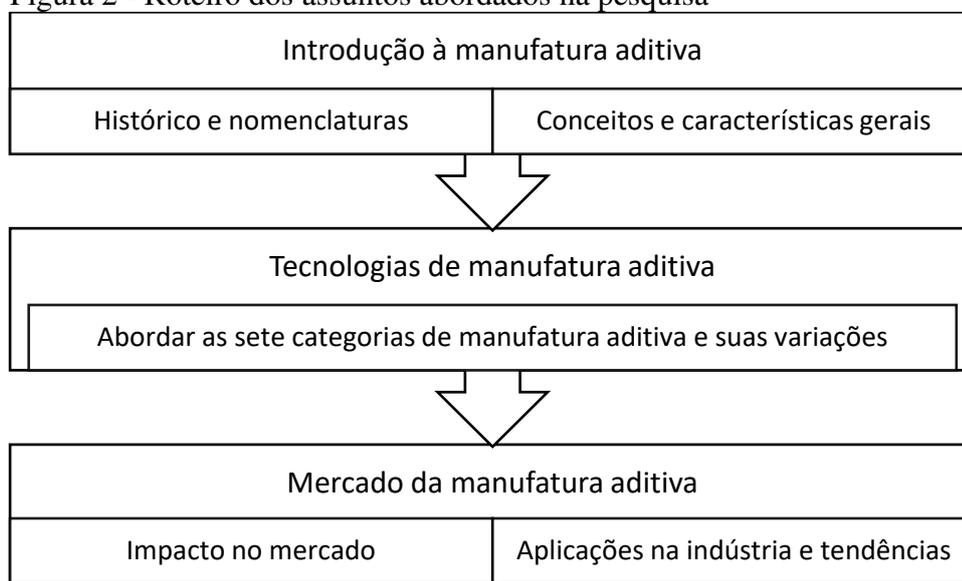
Concluída a coleta de dados, iniciou-se o processo de decisão dos tópicos a serem analisados e de roteirização das informações obtidas, que é visto na Figura 2. Os tópicos foram definidos de forma que facilitem o entendimento do tema, de maneira sequencial.

Segundo Bardin (2011), a análise qualitativa é maleável quanto a seu funcionamento e também na utilização de seus índices, e foi importante para definição

dos tópicos pertinentes aos objetivos do trabalho, em que ao decorrer da leitura e releitura da literatura, a estrutura dos tópicos da pesquisa mudou, conforme maior entendimento sobre o tema.

Inicialmente optou-se, além de revisar as diferentes categorias de manufatura aditiva, por uma abordagem mais detalhada dos materiais disponíveis para os processos de MA e os estudos de materiais futuros. Porém, ao estudar esse assunto percebeu-se uma certa complexidade, requerendo assim uma pesquisa mais avançada ou mais voltada para os materiais aplicados em manufatura aditiva. Diante disso, o foco passou dos materiais utilizados para as aplicações na indústria, e foi positivo para o objetivo do trabalho e para uma compreensão mais intuitiva dos potenciais da tecnologia em questão.

Figura 2 - Roteiro dos assuntos abordados na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizado o processo de roteirização dos tópicos a serem abordados na pesquisa, iniciou-se a escrita do trabalho em introdução, referencial teórico, discussão, considerações finais e referências. O referencial teórico se refere aos capítulos dois, três e quatro, abrangendo a introdução da manufatura aditiva, suas tecnologias e aplicações. Por fim, têm-se a discussão sobre a revisão realizada e as considerações finais sobre o trabalho.

### **3 MANUFATURA ADITIVA**

Neste capítulo é abordado a evolução da manufatura aditiva, apresentando um breve histórico e as mudanças com relação às nomenclaturas utilizadas. Em seguida, alguns conceitos gerais sobre a tecnologia e as principais características da MA são apresentadas.

#### **3.1 Breve histórico**

Veit (2018) resumiu a história da manufatura aditiva em quatro correntes: a primeira corrente é a prototipagem, emergindo no final da década 1980, com aplicações discretas devido ao elevado custo de equipamentos e materiais, e com foco maior no desenvolvimento de protótipos. A segunda fase é destinada às aplicações, na década de 1990 e 2000, principalmente na medicina. Depois disso, o foco foi na expansão de materiais e equipamentos utilizados na manufatura aditiva, e na constante evolução da tecnologia para torná-la mais familiar e presente.

O conceito de manufatura aditiva ou impressão 3D, foi iniciado por Hideo Kodama em 1981, no Instituto de Pesquisa Industrial de Nagoya, Japão. Kodama desenvolveu um modelo que utilizava luz ultravioleta (UV) para endurecer polímeros fotossensíveis e assim obter objetos tridimensionais, porém a tecnologia não foi comercializada (SCHOTTE, 2019).

Posteriormente, mas ainda na década de 1980, Charles Hull se destacou com a invenção da Estereolitografia (SLA), criando modelos a partir da reação de cura de uma resina líquida por meio de raios ultravioletas ou laser (SCHOTTE, 2019). Em 1986, Hull participou da fundação da 3D Systems, empresa pioneira no ramo de impressão 3D e um ano depois, em 1987, a primeira máquina de manufatura aditiva foi comercializada no mundo, a SLA-1, pela própria 3D Systems. Mostrada na Figura 3, a SLA-1 utilizava a tecnologia SLA e com ela tornou-se possível fabricar peças complexas em pouco tempo se comparado aos métodos da época (3D SYSTEMS, 2021).

Figura 3 - SLA-1, primeira impressora 3D a ser comercializada



Fonte: 3D Systems (2021)

No final da década de 80, Scott Crump inventou a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), bastante utilizada nas impressoras 3D a nível amador atualmente. A tecnologia só foi comercializada em 1990, pela Stratasys (CHENNAKESAVA; NARAYAN, 2014). Em 1992, a primeira máquina utilizando a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) foi comercializada pela DTM (GOLDBERG, 2018). Em 2001 a 3D Systems adquiriu a DTM, tomando o controle das tecnologias SLS e SLA no mercado da época. A Figura 4 mostra a DTM SinterStation 2500, uma das primeiras máquinas de Sinterização Seletiva a Laser sob controle da 3D Systems.

Figura 4 - DTM SinterStation 2500



Fonte: 3D Sourced (2020)

O mercado da manufatura aditiva continuou evoluindo, o Quadro 1 apresenta alguns dos principais marcos da manufatura aditiva:

Quadro 1 - Marcos da manufatura aditiva ao longo do tempo

Década de 1980	Hideo Kodama desenvolve o primeiro modelo de Manufatura Aditiva, utilizando raios UV para endurecer polímeros fotossensíveis.
	Charles Hull desenvolve a Estereolitografia e participa da fundação da 3D Systems
	A SLA-1 se torna a primeira máquina de MA comercializada no mundo, pela 3D Systems
	Diversas variações de máquinas usando a tecnologia SL foram comercializadas, surgindo então novas empresas no ramo da manufatura aditiva
Década de 1990	Três novas tecnologias de MA comercializadas: FDM pela Stratasys, SGC pela Cubital Ltd. e LOM pela Helisys
	Sinterização Seletiva a Laser (SLS) surge no mercado pela DTM e outras variações dos processos começam a surgir
	O Instituto de Tecnologia de Massachussetts (MIT) desenvolve e patenteia novas técnicas de impressão 3D
	O Instituto de Medicina Regenerativa Wake Forest utilizou a manufatura aditiva para reproduzir órgãos humanos.
Década de 2000	Surge a primeira impressora 3D de mesa, desenvolvida pela Solidmension, sendo a precursora de uma série de impressoras tridimensionais utilizadas nos dias de hoje
	A manufatura aditiva na medicina segue evoluindo, levando a impressão de um rim funcional em miniatura, utilizando os trabalhos do Instituto de Medicina Regenerativa Wake Forest.
	Em 2005, projeto <i>RepRap</i> surgiu com o objetivo principal de autorreplicação das impressoras 3D. A primeira perna protética funcional foi impressa em 2008 e em 2009 o primeiro vaso sanguíneo, pela Organovo
2010 até hoje	Surge em 2011 o primeiro carro impresso do mundo, pela Urbee. Em 2012 são impressos a primeira arma, e em 2014 a primeira casa
	NASA experimenta a impressão 3D de roupas e alimentos, pesquisadores do MIT conseguem produzir vidro com impressão 3D.

Fonte: Adaptado de Erickson (2019), Goldberg (2018), González (2020) e Greguric (2018)

Percebe-se que apesar de recente, a manufatura aditiva já evoluiu bastante e a tendência é continuar. Como uma forma de acompanhar essa evolução, e ainda obter o histórico da manufatura aditiva, análise das tendências mundiais e aplicações, tem-se o *Wohlers Report*, um relatório anual que já está em sua 25ª edição, exclusivo para a MA e publicado pela *Wohlers Associates*. O presidente da empresa, Terry Wohlers, participou do primeiro Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva (CBMA di), palestrando sobre as tendências mundiais e contribuindo para a disseminação da tecnologia no Brasil.

Quanto às nomenclaturas dos processos de manufatura aditiva, há divergências nos autores. Ao buscar por informações sobre a história da tecnologia, fica claro a tendência de usar a nomenclatura da época em que a patente foi realizada por

determinado processo, ou por variáveis presentes nas máquinas. Entretanto, como será abordado no tópico seguinte, as classificações para os processos foram padronizadas em sete categorias, embora algumas terminologias antigas ainda estejam presentes mesmo em trabalhos mais atuais. Com relação à terminologia “manufatura aditiva”, nem sempre foi o termo utilizado, como será visto a seguir.

### 3.2 Nomenclaturas

Para Pazhamannil e Govindan (2021) manufatura aditiva é o processo de criar objetos, camada por camada, de quaisquer geometrias a partir de um modelo digital. Em trabalhos mais antigos esse conceito é atribuído à prototipagem rápida, como visto em Choi e Samavedam (2002), que define prototipagem rápida ou manufatura em camadas como o processo em que um sólido de forma pré-definida é formado a partir da adição de matéria-prima sucessivamente em camadas.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015) manufatura aditiva é o termo formal para o que é popularmente conhecido como impressão 3D e para o que era chamado de prototipagem rápida. Já para Attaran (2017) a manufatura aditiva é a versão industrial da impressão 3D, em que manufatura aditiva é a tecnologia em si e a prototipagem rápida a aplicação dessa tecnologia.

Inicialmente o termo Prototipagem Rápida foi bastante utilizado para definir um processo em que se criava um protótipo antes de sua comercialização e de maneira rápida, o foco era basicamente fazer um modelo no qual o produto final seria derivado. Entretanto com a evolução das máquinas e das tecnologias envolvidas, o termo passou a ficar ultrapassado, pois a tecnologia não se limitava apenas à produzir um protótipo, visto que a peça final e funcional cada vez mais passava a ser fabricada diretamente das máquinas que antes realizavam apenas a prototipagem (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Logo, percebe-se que essa mudança de nomenclatura para se referir à tecnologia vem da própria evolução das aplicações da MA.

Com o intuito de analisar a recorrência das nomenclaturas nos trabalhos, foi realizada uma pesquisa no banco de dados *Scopus* utilizando o operador booleano “AND” para combinar a palavra-chave *additive manufacturing* com as seguintes: *3d printing*, *rapid prototyping*, *layered manufacturing*, *3d modeling*, *digital manufacturing*, *direct manufacturing*. O operador “AND” é utilizado para realizar uma busca de forma que

resulte em uma intersecção de diferentes conjuntos, resultando em um novo (SAKS, 2005). Assim, os resultados obtidos contêm ambas as palavras-chave simultaneamente, o Quadro 2 apresenta os resultados obtidos na busca:

Quadro 2 - Resultados obtidos da busca por publicações com ambas as palavras-chave

Sintaxe da pesquisa	Nº de Publicações encontradas
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>3d printing</i> )	2836
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>rapid prototyping</i> )	636
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>layered manufacturing</i> )	353
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>3d modeling</i> )	159
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>digital manufacturing</i> )	116
( <i>additive manufacturing</i> ) AND ( <i>direct manufacturing</i> )	36

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa variedade de termos para descrever a manufatura aditiva pode causar confusão para iniciantes na tecnologia. No entanto, percebe-se a tendência na maioria dos trabalhos dos últimos anos pelos termos “manufatura aditiva” e “impressão 3D”, ainda que os termos antigos estejam presentes como visto.

Em 2009 o comitê F42 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) foi criado para guiar o desenvolvimento das padronizações em manufatura aditiva. Na ASTM F2792, o termo “manufatura aditiva” foi definido como padrão e na ASTM F2915 aconteceram padronizações com relação ao formato dos arquivos da tecnologia, permitindo assim a transferência entre diferentes *hardwares* e *softwares* (FRAZIER, 2014).

Em 2015 foi publicada a ISO/ASTM 52900, sucedendo a ASTM F2792 e expandindo mais ainda a padronização da manufatura aditiva. Foi a primeira norma para MA com a *International Organization for Standardization* (ISO), e de grande importância para a tecnologia (SPRINKLE, 2021).

Com relação às categorias de manufatura aditiva, também há divergências nas nomenclaturas. Antes de terem os termos padronizados, os autores costumavam definir as tecnologias de MA apenas com relação a seus processos, conforme eram registradas nas patentes ou por outras variáveis, fazendo com que para um mesmo processo semelhante, vários nomes sejam encontrados nas literaturas. A classificação do Quadro 3 foi retirada de um estudo de 2003, antes da normatização.

Quadro 3 - Exemplo de classificação das categorias da manufatura aditiva antes das padronizações

Nome	Abreviação
<i>Stereolithography</i>	STL
<i>Solid Ground Curing</i>	SGC
<i>Laminated Object Manufacturing</i>	LOM
<i>Fused Deposition Modeling</i>	FDM
<i>Selective Laser Sintering</i>	SLS
<i>3D Printing</i>	3DP

Fonte: Adaptado de Levy, Schindel e Kruth(2003)

Depois das padronizações, a maioria dessas nomenclaturas ainda são utilizadas, mas são consideradas como subtipos das categorias padronizadas, e outras praticamente caíram em desuso como a SGC. A 3DP na época se referia ao processo que hoje é chamado de *Binder Jetting* (BJ), ou Jateamento de Aglutinante.

Com relação às categorias de manufatura aditiva, a ASTM F2792 também padronizou a terminologia dessas categorias em sete, conforme visto no Quadro 4. Quatro delas são utilizadas com maior frequência para fabricar peças metálicas; *Binder Jetting* (BJ), *Powder Bed Fusion* (PBF), *Sheet Lamination e Direct Energy Deposition* (DED); as outras três; *Vat Photopolymerization*, *Material Jetting e Material Extrusion* são utilizadas na maioria das vezes em polímeros e materiais cerâmicos e de maneira indireta em metais (PRAGANA *et al.*, 2021). Essas categorias serão abordadas com mais detalhe posteriormente no trabalho.

Quadro 4 - Categorias de manufatura aditiva e suas traduções

Original	Tradução
<i>Vat Photopolymerization</i>	Fotopolimerização em Cuba
<i>Material Extrusion</i>	Extrusão de Material
<i>Material Jetting</i>	Jateamento de Material
<i>Binder Jetting</i>	Jateamento de Aglutinante
<i>Powder Bed Fusion</i>	Fusão em Leito de Pó
<i>Sheet Lamination</i>	Laminação em Folha
<i>Direct Energy Deposition</i>	Deposição por Energia Direcionada

Fonte: Elaborado pelo autor

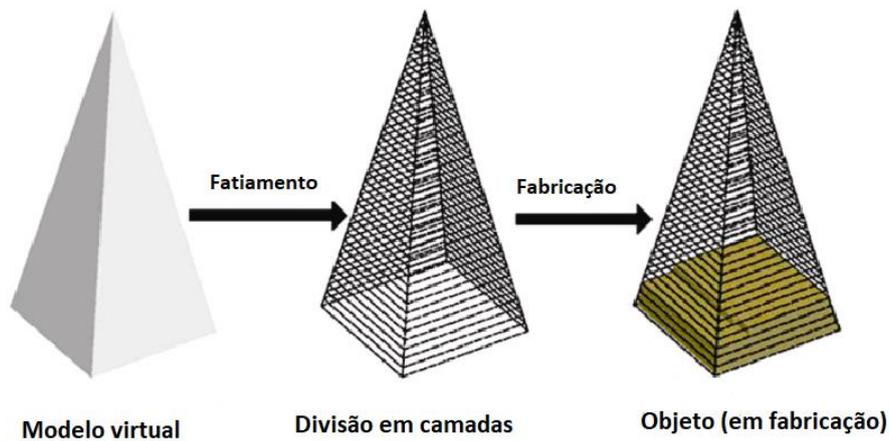
### 3.3 Conceitos gerais

Com relação à definição de manufatura aditiva, os autores convergem em praticamente todos os estudos analisados.

Para Sun *et al* (2021) manufatura aditiva é o processo de fabricação de objetos camada por camada a partir de modelos digitais de geometria tridimensional, sem as restrições dos processos convencionais de forjamento, fundição e usinagem. Em processos convencionais ou redutivos, para fabricação de uma peça com geometria mais complexa, é exigido uma sequência de operações e ferramentas, na manufatura aditiva esse número de operações é reduzido, sendo assim uma fabricação mais direta (KUMAR; SATHIYA, 2020).

Resumidamente, MA é um conjunto de tecnologias que funcionam adicionando material camada por camada, a partir de um modelo digital predefinido. Esse modelo é então “fatiado” em camadas com todas as informações para a máquina de manufatura aditiva iniciar a fabricação do objeto desejado, como exemplificado na Figura 5.

Figura 5 - Funcionamento da manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Quan *et al* (2015)

A ideia é compor um objeto 3D a partir de camadas, em que cada camada é uma fina parcela do modelo virtual, e obviamente quanto mais fina for essa camada, mais aproximado será o objeto físico do modelo computadorizado, como visto na Figura 6. A maneira como essas camadas são feitas e unidas, o tipo de material depositado e o seu respectivo volume, as fontes de energia utilizadas no processo; são variações que diferenciam os tipos de máquinas e as categorias de MA (FRAZIER, 2014; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Figura 6 - Exemplificação das camadas da manufatura aditiva



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015)

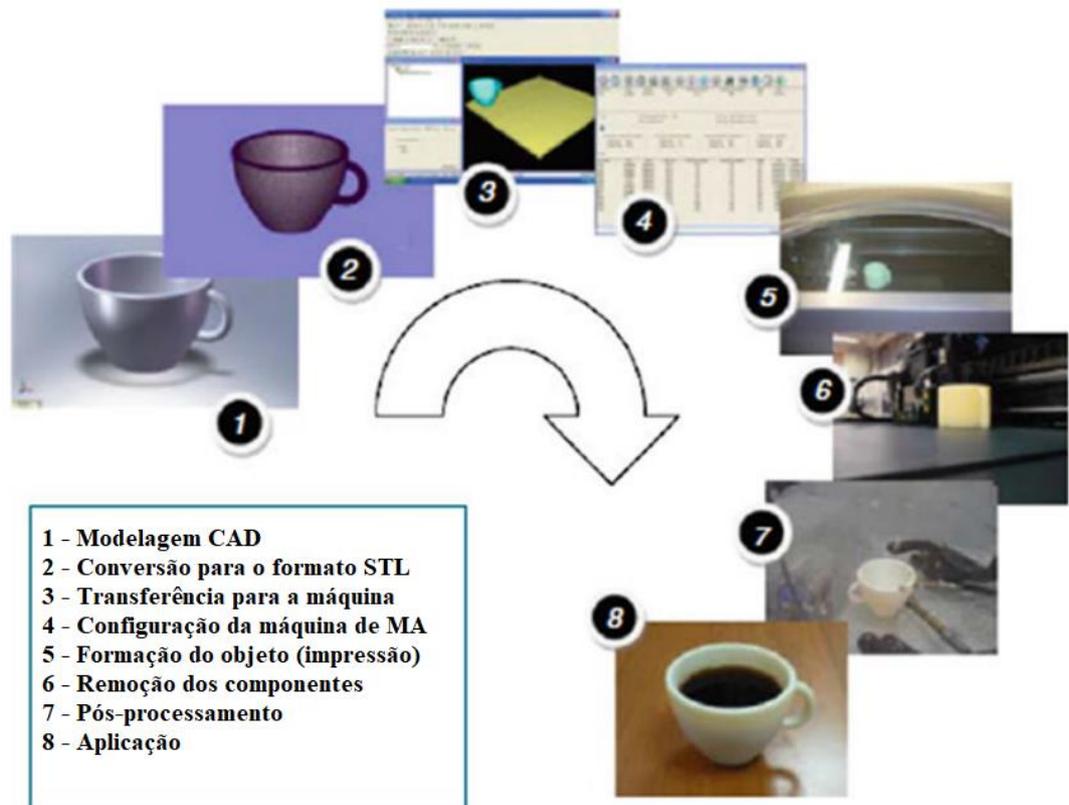
Dentre os materiais utilizados na manufatura aditiva, se destacam os polímeros, metais, materiais cerâmicos e compósitos, sendo escolhidos dependendo da aplicação requerida e da categoria de manufatura aditiva adotada. Com relação aos metais, o mais utilizados incluem o titânio, alumínio e aço inoxidável, devido à crescente procura por materiais mais leves e resistentes, principalmente na indústria aeroespacial (REPORTS AND DATA, 2020).

### ***3.3.1 Processo genérico da manufatura aditiva***

Embora haja diferentes processos de manufatura aditiva, Gibson, Rosen e Stucker (2015) definiram oito passos de um processo genérico de MA, conforme a Figura 7:

- 1 Modelagem CAD;
- 2 Conversão para o formato STL;
- 3 Transferência para a máquina de MA e manipulação do arquivo STL;
- 4 Configuração da máquina de manufatura aditiva;
- 5 Formação do objeto (impressão);
- 6 Remoção dos componentes;
- 7 Pós-processamento;
- 8 Aplicação.

Figura 7 - Processo genérico da manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015)

- a) Modelagem CAD – A modelagem CAD (*Computer Aided Design*) é o primeiro passo nas técnicas de manufatura aditiva. É basicamente conceituar, projetar e assim visualizar o que será fabricado por manufatura aditiva a partir de um *software*. Todos os tipos de MA iniciam a partir de um modelo virtual, que pode ser obtido de diversas maneiras e que irá retratar toda a geometria externa da peça final;
- b) Conversão para o formato STL - É o formato de arquivo mais comum nas máquinas de manufatura aditiva, nesse passo o modelo CAD é convertido em STL, que descreve a superfície fechada do modelo e servirá de base para os cálculos realizados. O arquivo STL, de *stereolithography* ou estereolitografia, descreve o modelo CAD em função apenas de sua geometria, sem cor, materiais, unidades entre outras informações; e funciona aproximando as superfícies do modelo a uma série de faces triangulares. Essas limitações do STL levaram ao

- desenvolvimento do AMF, que basicamente é uma extensão do formato anterior, acrescentando mais informações ao arquivo;
- c) Transferência para a máquina de MA e manipulação do arquivo STL - O arquivo STL recebe as alterações necessárias dependendo das condições de cada operação, e depois é enviado para a máquina de manufatura aditiva;
  - d) Configuração da máquina de manufatura aditiva - Nesse passo a máquina é configurada de acordo com os parâmetros do processo, como por exemplo: material utilizado, fontes de energia, dimensões geométricas, espessura da camada, dentre outras variáveis;
  - e) Formação do objeto físico (impressão) - Acontece de fato a “impressão”, o material é adicionado camada por camada, formando o objeto desejado. Nesse passo não é necessária interação do operador, sendo recomendado apenas um monitoramento visual para garantir que erros básicos não aconteçam;
  - f) Remoção dos componentes - Após a máquina finalizar a operação, a peça deve ser retirada com os devidos cuidados para evitar acidentes e defeitos nos equipamentos;
  - g) Pós-processamento - Nesse momento o objeto formado é manipulado para que esteja pronto para uso. Ocorre a limpeza das peças, remoção de estruturas de suporte de maneira cuidadosa pois podem estar fragilizadas, dentre outras operações necessárias para melhorar propriedades mecânicas ou acabamento superficial;
  - h) Aplicação - As peças obtidas a partir da manufatura aditiva estão prontas para uso. Dependendo dos requisitos de acabamento de sua aplicação, podem ser necessários procedimentos superficiais como pintura, ou montagem para se obter o produto final no aspecto desejado.

### 3.4 Características da manufatura aditiva

Analisando a literatura, diversas vantagens e limitações da manufatura aditiva podem ser percebidas. Por ser uma tecnologia que está evoluindo rapidamente, esse tópico tende a ser alterado constantemente à medida que a tecnologia evolui. Para melhor compreensão desse assunto, foram abordadas as vantagens e limitações como características.

#### 3.4.1 Liberdade Geométrica

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), quanto maior a complexidade geométrica da peça a ser produzida, maior a vantagem da MA em relação à métodos convencionais. A manufatura aditiva permite a produção eficiente de peças com geometrias complexas e de materiais diversos, o que seria difícil em termos de custo e operação, ou até mesmo impossível, se realizadas por métodos convencionais de manufatura. Dessa forma, tem-se muito mais liberdade geométrica quanto à criação de peças, e de acordo com a literatura essa liberdade é um dos principais atrativos da tecnologia. A Figura 8 mostra o corpo impresso de uma Guitarra ODD em desenvolvimento, e exemplifica a liberdade geométrica alcançada com a tecnologia.

Figura 8 - Corpo de guitarra impresso em desenvolvimento



Fonte: Diegel (2011)

### **3.4.2 Customização**

Essa liberdade geométrica resulta em outra vantagem bastante citada nas literaturas: a facilidade de customização. Com isso, tem-se a possibilidade de repor peças defeituosas com facilidade e otimizar os estoques de peças de reposição, diminuir peso e otimizações diversas, fabricar produtos customizados, permitindo assim uma vasta aplicação na indústria de consumo (ATTARAN, 2017; FORD; DESPEISSE, 2016).

Componentes já existentes e funcionais podem ser reprojetados para obter total vantagem dos benefícios da manufatura aditiva e melhorar o rendimento de determinado serviço, como em um exemplo citado por Ford e Despeisse (2016) em que as tecnologias de manufatura aditiva foram utilizadas para reduzir o peso de fivelas de cintos de aviões, melhorar o fluxo de ar e a eficiência térmica de dissipadores e de trocadores de calor em um projeto financiado pelo Reino Unido.

Otimizar um produto diretamente de um modelo digital é um grande destaque da tecnologia, segundo Attaran (2017) mais de 60% dos projetos de manufatura são modificados durante sua fabricação, o que pode resultar em aumentos indesejados em custos e atrasos. Com a manufatura aditiva, essas modificações podem ser realizadas previamente e diretamente do computador, sem muitas dificuldades operacionais no processo.

Como citado, a tecnologia também viabiliza a customização em massa, os varejistas podem projetar e personalizar seus produtos sem um tempo longo de espera e com menos etapas logísticas para que chegue ao consumidor (ATTARAN, 2017). A grande vantagem está relacionada à capacidade de oferecer produtos personalizados e em grandes volumes, com custo semelhante a produtos padronizados de produção em série. Segundo Berman (2012), enquanto peças utilizadas na customização em massa com métodos convencionais são provenientes de vários fornecedores, requerendo assim uma complexa cadeia logística, na manufatura aditiva essas peças podem ser adquiridas em um pequeno número de fornecedores, tornando o processo mais viável.

Na Figura 9, tem-se um exemplo de customização em massa para fones de ouvido, em que o consumidor recebe o produto com o tamanho ajustado à sua orelha e com a cor desejada.

Figura 9 - Fones de ouvidos impressos e customizados



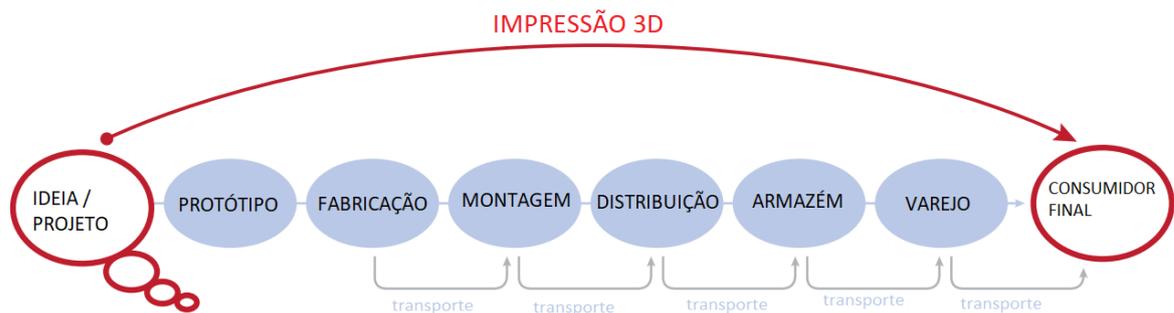
Fonte: Sculpteo (2021)

### 3.4.3 Redução da Supply Chain

Com a alta customização dos produtos e competitividade do mercado, o gerenciamento da *supply chain* ou cadeia logística ou de suprimentos, se torna um dos tópicos mais importantes para as indústrias (YILMAZ, 2020).

A redução da *supply chain* é outro atrativo da MA. *Supply chain* é todo o processo de fabricação de um produto ou fornecimento de um serviço até chegar ao consumidor final, desde o fornecimento de materiais e fabricação dos produtos até sua distribuição e venda (GRIMSHAW, 2020). A redução dessa cadeia decorre com a eliminação de algumas operações para o produto chegar ao consumidor, conforme exemplifica a Figura 10. Com isso tem-se a descentralização da fabricação, o que diminui impactos ambientais e custos relacionados à logística (ATTARAN, 2017).

Figura 10 - Redução da *supply chain* devido à manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Koff e Gustafson (2012)

Um estudo realizado por Khajavi, Partanen e Holmström (2014) analisou economicamente a cadeia logística com a manufatura aditiva para produção de peças de reposição, o estudo concluiu que com a distribuição dos locais de produção de maneira descentralizada têm-se um sistema mais econômico de manufatura com menores custos operacionais e mais flexibilidade.

Com uma cadeia logística reduzida com a MA, locais de produção descentralizados e mais flexíveis, têm-se uma proximidade maior entre fornecedores, produtores e clientes, contribuindo para a redução do desperdício de estoques, seja com peças de reposição ou por produtos obsoletos e não vendidos, aumentando a eficiência de material e reduzindo custos (FORD; DESPEISSE, 2016; MANI; LYONS; GUPTA, 2014).

#### 3.4.4 Eficiência de material

Em métodos tradicionais, a fabricação de peças metálicas muitas vezes requer variados processos de usinagem por exemplo, operações que utilizam grandes quantidades de energia e desperdício de material nas operações de desbaste e formação de cavaco. Com a manufatura aditiva os fabricantes podem produzir sob demanda, assim a quantidade de ferramentas e de material necessário para produção diminui, logo, além de não haver superprodução, há uma economia de energia e de material (THE ENGINEER, 2018).

Devido ao próprio princípio de adição utilizado no processo, tem-se maior eficiência quanto ao uso de material, em métodos de manufatura subtrativos uma grande quantidade de material é removida e muitas vezes não aproveitada, diminuindo a

eficiência do material utilizado, além da redução de estoque em virtude da redução da *supply chain* (MANI; LYONS; GUPTA, 2014).

### 3.4.5 Custo

De acordo com Baumers *et al* (2016), cada vantagem ou limitação genérica resultante da adoção das tecnologias de manufatura aditiva estão associados ao custo, seja positivamente ou não. Segundo Fried (2019), o maior impulsionador de custo na MA é o elevado investimento inicial nas máquinas de impressão 3D. Um estudo de 2014 do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), estimou que os custos iniciais da máquina representam de 45 a 74% do custo total para fabricar um produto por manufatura aditiva, e os custos relacionados à mão de obra representam menos de 10% do custo total (FRIED, 2019).

Devido à tecnologia utilizar materiais de construção em formas reduzidas (pó, filamento, arames), dependendo do material pode-se ter um aumento de custo para obtenção dele em tais formas.

Outro fator limitante se dá ao fato que os processos de manufatura aditiva não são precisos se comparado à métodos convencionais, com relação ao acabamento superficial das peças produzidas, aumentando assim o custo para a produção em larga escala e de peças com grandes dimensões, devido à necessidade de pós-processamento (BERMAN, 2012).

No entanto, como visto no estudo de Kumar e Sthiya (2020), a previsão das propriedades mecânicas e físicas, variáveis ou uniformes, de um objeto inteiro é uma tarefa difícil para métodos tradicionais. Os processos de MA permitem que a equipe de projeto e fabricação deposite com precisão diferentes composições de matéria-prima de modo que se possa prever com significativa precisão as propriedades mecânicas e físicas dos produtos fabricados.

Analisando esse ponto, percebe-se que em estudos mais recentes, devido à evolução da manufatura aditiva, diversos pontos negativos vão se modificando, sendo minimizados e ficando cada vez mais contornáveis, o custo é um deles.

Um atributo chave da manufatura aditiva é sua capacidade de diminuir ou eliminar custos relacionados às ferramentas adicionais como moldes, ferramentas de corte, de lubrificação e suportes (COTTELEER, 2014). Segundo Gao *et al* (2015), embora processos convencionais possam produzir peças com uma certa complexidade

geométrica, como na moldagem por injeção, há uma relação direta entre a complexidade e o custo do molde. Entretanto, na utilização da manufatura aditiva não tem custos adicionais, visto que não há necessidade de ferramentas adicionais, refixações, dentre outros fatores comuns importantes na manufatura convencional (GAO *et al.*, 2015).

#### **3.4.6 Qualidade das peças produzidas**

Uma das limitações comentadas na maioria dos autores é a presença de imperfeições na superfície das peças produzidas, sendo necessário etapas de pós processamento ou de polimento (BUCHANAN; GARDNER, 2019). Segundo Pérez *et al* (2020) a qualidade superficial depende dentre outros fatores da orientação da peça, espessura da camada e orientação da deposição do material, e essas limitações no acabamento estão relacionadas com propriedades térmicas e mecânicas, uma vez que o material esfria rapidamente em várias técnicas de MA, levando à distorções e tensões.

Na Figura 11, a coruja da direita está sem a etapa de pós processamento, percebe-se marcas de camadas provenientes do processo de adição, enquanto na coruja à esquerda tem-se a etapa de pós-processamento de alisamento.

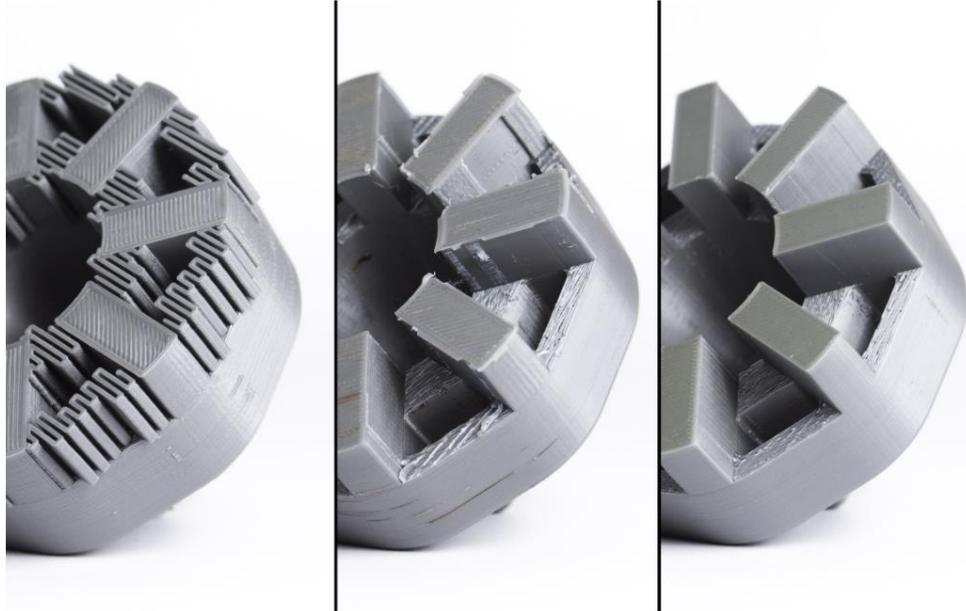
Figura 11 - Objeto sem pós processamento (à direita) e com pós processamento (à esquerda)



Fonte: Sink (2014)

Em alguns processos de manufatura aditiva, o material de suporte da peça precisa ser fabricado simultaneamente para evitar deformações, a Figura 12 mostra um exemplo de pós-processamento de remoção desse material em uma peça.

Figura 12 - Peça original impressa com o material de suporte (à esquerda), e após a remoção (à direita)



Fonte: Armstrong (2020)

Existem diversas formas de pós-processamento, a utilização de qual utilizar irá depender da tecnologia de manufatura utilizada, material, e da aplicação requerida para o objeto impresso. O Quadro 5 resume alguns pós-processamentos utilizados na manufatura aditiva em geral.

Quadro 5 – Etapas de pós-processamento comuns na manufatura aditiva

Pós-processamento	Objetivo
Tratamento térmico	Utilizado em peças metálicas fabricadas por MA, com aplicações que requerem uma performance maior para obter propriedades mecânicas melhores, aliviar tensões internas, reduzir contaminações da superfície entre outros
Remoção do material de suporte	Normalmente os objetos produzidos por manufatura aditiva são fixados a estruturas durante sua fabricação e muitas vezes as estruturas são produzidas simultaneamente à peça, para garantir a forma desejada e evitar empenamentos. Então após a fabricação, tem-se a operação de remover o material de suporte
Remoção de resíduos	Em muitos processos de manufatura aditiva, tem-se o pó e outros materiais remanescentes do material de fabricação no objeto impresso, como nas tecnologias de PBF
Cura UV	Pós-procedimento compatível com tecnologias de manufatura envolvendo a fotopolimerização, para melhorar propriedades em geral e acabamento.
Acabamento superficial	Para aplicações que requerem um melhor acabamento superficial, alisamentos, lixamentos, polimentos e arredondamentos de bordas entre outros, são realizados.
Usinagem	Utilizada como pós-processamento normalmente em peças metálicas que requerem usinagem adicional para remover estruturas de suportes ou sobras deixadas pela máquina, como na tecnologia de Laminação em Folha.
Revestimentos ou infiltrações	Utilizado para tornar componentes produzidos por MA herméticos a gases e líquidos, e também utilizados para aumentar resistência e outras propriedades do material, como no revestimento de epóxi em peças produzidas por Extrusão de Material e Jateamento de Aglutinante
Tingimento	Melhor acabamento estético, podendo ser realizado manualmente ou por equipamentos de tingimento automáticos
Inspeção	Realizada em componentes fabricados por MA para uso mais profissional, etapa que permite a validação da qualidade, precisão dimensional e propriedades mecânicas da peça.

Fonte: Adaptado de Kety (2020) e Greguríc (2021)

### 3.4.7 Materiais disponíveis

A variedade de materiais disponíveis é citada como uma das limitações na literatura (BERMAN, 2012), no entanto em estudos mais atuais como no de Kumar e Sathiya, (2020), fica evidente a evolução nesse aspecto.

No CBMAdi, dia 30 de novembro de 2020, Terry Wohlers apresentou alguns mitos acerca da manufatura aditiva, e relatou que a variedade de materiais disponíveis para a tecnologia aumentou consideravelmente nos últimos anos, e que dispõe de uma boa quantidade nos dias de hoje. Também frisou a importância do pós-processamento nessa tecnologia, e que de fato a manufatura aditiva não entrega produtos prontos para uso, não sendo assim apenas um trabalho de *design* (WOHLERS, 2020).

O Quadro 6 lista alguns materiais comerciais utilizados de maneira direta na manufatura aditiva, segundo Bourell *et al* (2017):

Quadro 6 - Exemplos de materiais comerciais utilizados na manufatura aditiva

Polímeros	Metálicos	Outros
ABS (Acrlonitrila butadieno estireno)	Ligas de alumínio	Chocolate
PC (Policarbonato)	Ligas de cobalto-cromo	Papel
PC/ABS Mistura	Ouro	
PLA (Ácido Polilático)	Ligas de níquel	
Polieterimida (PEI)	Prata	
Acrílico e acrilatos	Aço inoxidável	
Epóxi	Titânico puro	
Nylon 11 e 12	Liga Ti-6Al-4V	
Polímeros com enchimento de vidro/carbono/alumínio	Aços ferramenta	
Poliestireno		
Polipropileno		
Poliéster		
Poli(éter-éter-cetona)		
Termoplástico		
Elastômeros		

Fonte: Adaptado de Bourell et al (2017)

### 3.4.8 Velocidade de operação

Com relação à velocidade de operação, assim como nos custos, há dois lados que devem ser considerados. Uma usinagem CNC de alta velocidade por exemplo, pode remover uma quantidade de material muito mais rápido que uma máquina de manufatura aditiva poderia adicionar essa mesma quantidade, no entanto, na MA o objeto pode ser produzido em um único estágio a depender da qualidade superficial requerida, diferente das máquinas de CNC, que normalmente utilizam vários estágios para a fabricação (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Do outro lado, um dos grandes desafios para a manufatura aditiva é manter o equilíbrio entre a produção de peças com grandes dimensões, grandes volumes, e a velocidade de operação. A maioria dos processos de MA possuem limitações quanto ao acabamento superficial dos objetos produzidos devido à baixa resolução como mencionado acima, o que aumenta o custo de produção de peças grandes e em grandes lotes (KUMAR; SATHIYA, 2020). Além disso, devido ao próprio mecanismo de adição de material, a velocidade de fabricação é considerada um dos maiores desafios para adoção da tecnologia.

#### 4 CATEGORIAS DE MANUFATURA ADITIVA

Este capítulo aborda as principais categorias de manufatura aditiva, apresentando seus princípios de funcionamento e características. O Quadro 7 apresenta as sete categorias de manufatura aditiva e seus principais processos, de acordo com as padronizações da ASTM F2792, posteriormente sucedida pela ISO/ASTM 52900, como já mencionado anteriormente.

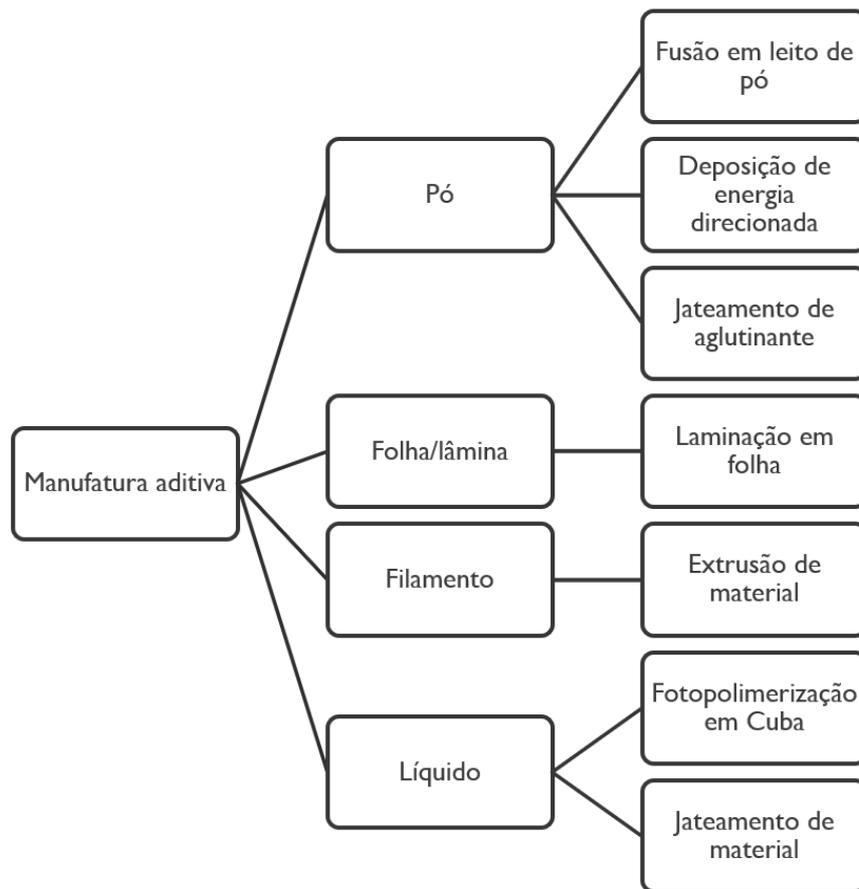
Quadro 7 - Categorias de manufatura aditiva e seus processos

Categorias	Processos
Fotopolimerização em Cuba - <i>Vat Photopolymerization</i>	- Estereolitografia (SLA) - Processamento Digital de Luz (DLP)
Fusão em Leito de Pó - <i>Powder Bed Fusion</i> (PBF)	- Sinterização Seletiva a Laser (SLS) - Sinterização Seletiva por Calor (SHS) - Fusão Seletiva a Laser (SLM) - Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS) - Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)
Jateamento de Aglutinante - <i>Binder Jetting</i> (BJ)	- Jateamento de Aglutinante (BJ)
Jateamento de Material - <i>Material Jetting</i> (MJ)	- Modo contínuo - <i>Drop-on-Demand</i> (DOD)
Laminação em Folha - <i>Sheet Lamination</i> (SL)	- Manufatura por Objetos Laminados (LOM) - Manufatura Aditiva Ultrasônica (UAM)
Extrusão de Material - <i>Material Extrusion</i> (ME)	- Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)
Deposição de Energia Direcionada - <i>Directed Energy Deposition</i> (DED)	- Deposição de Energia Direcionada (DED)

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 13 são mostradas as categorias de MA de acordo com a forma do material utilizado para fabricação dos objetos tridimensionais, podendo ser materiais na forma de pó, folha ou lâmina, filamento e líquido.

Figura 13 - Categorias de MA em relação à forma do material utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1 Fotopolimerização em Cuba

De acordo com ISO/ASTM 52900 (2015), *Vat Photopolymerization* ou Fotopolimerização em Cuba é o processo em que uma resina fotopolimérica líquida é solidificada seletivamente através de uma fonte de luz. Fotopolimerização em Cuba é o termo genérico atribuído a uma série de tecnologias que utilizam esse fenômeno para construir um objeto sólido. Os processos mais comuns dessa categoria são a Esterolitografia (SLA) e o Processamento Digital de Luz (DLP), que utilizam mecanismos similares em sua produção.

Com relação às aplicações, os processos de Fotopolimerização em Cuba são utilizados em uma grande variedade de áreas do mercado, devido à oferta de impressoras SLA/DLP, materiais prontamente disponíveis, acabamento superficial liso e o alto nível de precisão dimensional que essa tecnologia pode alcançar. Algumas aplicações comuns da tecnologia são: na indústria médica, como na fabricação de aparelhos auditivos,

implantes e moldes para procedimentos odontológicos; na produção de protótipos e moldes diversos (CAROLO, 2020).

A Figura 14 mostra um modelo odontológico e uma série de aparelhos auditivos impressos por processos de Fotopolimerização em Cuba.

Figura 14 - Modelo odontológico e aparelhos auditivos impressos por Fotopolimerização em Cuba



Fonte: Redwood, Schffer e Garret (2017)

A seguir serão apresentados os dois principais tipos de Fotopolimerização em Cuba, apresentando suas principais variações.

#### **4.1.1 Estereolitografia (SLA)**

Com visto anteriormente, a Estereolitografia foi desenvolvida por Charles Hull pela 3D Systems, e é considerada a primeira tecnologia de manufatura aditiva.

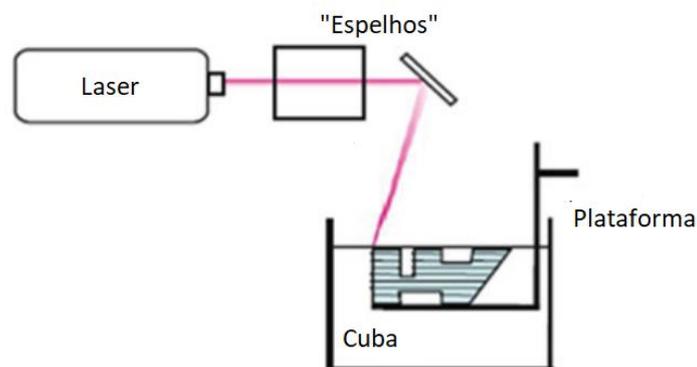
O processo utiliza resinas fotopoliméricas em uma cuba como material para fabricação, e a reação de cura dessa resina líquida a partir do contato de uma luz ultravioleta (UV) ou laser é utilizada para construir peças tridimensionais. O processo

então consiste na reação de cura de uma resina disposta num recipiente, a partir do contato de luz ultravioleta ou laser (KUMAR; SATHIYA, 2020).

A resina líquida é solidificada através de um processo chamado fotopolimerização, esse processo é irreversível e acontece devido a ativação das cadeias de carbono presentes na resina por meio da exposição à luz UV ou laser, criando fortes ligações entre si, solidificando a resina (VAROTSIS, 2021).

Primeiramente, tem-se a construção de um modelo digital utilizando *softwares*, esse modelo é convertido para o formato STL, que irá dividir o modelo em camadas com todas as informações necessárias para o processo de adição. Após isso, um conjunto de espelhos, chamados de galvos, são utilizados para projetar o laser de maneira pontual na resina, e assim iniciar a solidificação da mesma em pontos específicos e pré-estabelecidos por coordenadas (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017). Uma plataforma submersa em um recipiente contendo a resina se movimenta para permitir que as outras camadas sejam curadas. A Figura 15 exemplifica o seu funcionamento.

Figura 15 - Funcionamento da Estereolitografia



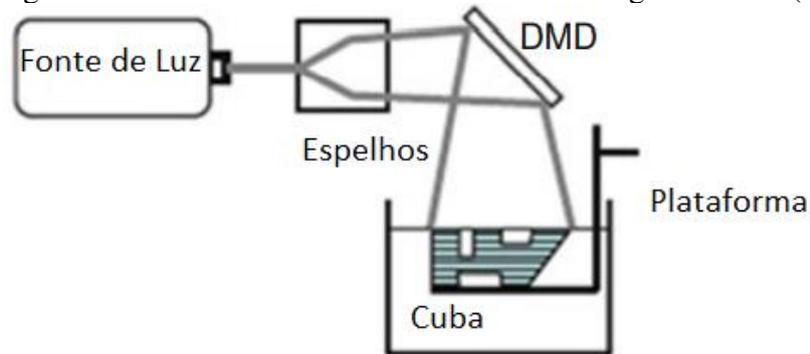
Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015)

#### ***4.1.2 Processamento Digital de Luz (DLP)***

O Processamento Digital de Luz é bastante semelhante à Estereolitografia, alguns autores até não o dividem em processos diferentes, apenas apresentam como variações da Estereolitografia. Nesse processo é utilizado um projetor digital de modo que a imagem de cada camada seja solidificada de uma vez. Dessa forma, cada camada é

formada a partir de pequenos retângulos, chamados de pixels ou voxels (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Figura 16 - Funcionamento do Processamento Digital de Luz (DLP)

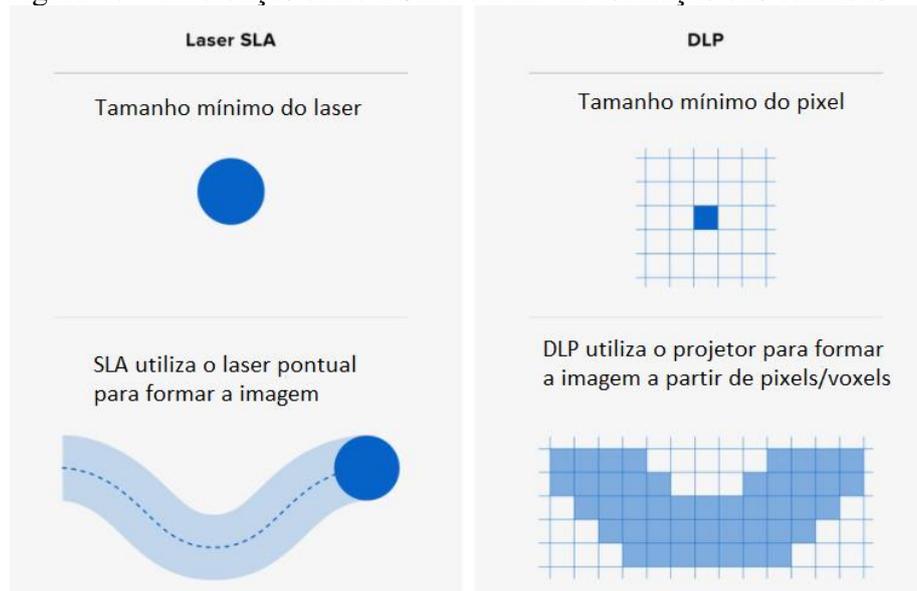


Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015)

Nessa disposição, uma luz incide sobre um Dispositivo Digital de Microespelhos ou *Digital Micromirror Device* (DMD), que atua como um projetor digital e os direciona para a resina líquida conforme mostra a Figura 16. O DMD funciona a partir de um sistema ótico eletromecânico que contém um arranjo de microespelhos de alumínio que controla onde a luz será projetada na resina (LEE, 2008).

Basicamente, a diferença do DLP e da SLA se dá na fonte de luz utilizada para solidificar a resina. Impressoras de Estereolitografia utilizam laser pontual de forma que tem a varredura da camada, enquanto na tecnologia DLP tem-se a projeção de toda a camada simultaneamente em pequenos retângulos, como mostrado na Figura 17 (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Figura 17 - Diferenças entre a SLA e DLP na formação das camadas



Fonte: Adaptado de Formlabs (2021)

Em 2014, a Carbon3D, uma empresa do ramo de impressão 3D, desenvolveu a tecnologia *Continuous Direct Light Processing* (CDLP), também conhecida por *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP), e apresentou um aumento na velocidade de produção da ordem de 100 vezes. O Processamento Digital de Luz Contínuo, é uma técnica baseada na fotopolimerização em cuba que funciona da mesma maneira que o DLP, no entanto tem-se um movimento contínuo da solidificação na direção z (para cima), em que o processo de fabricação camada por camada convencional é substituído pela produção contínua por meio de uma janela permeável de oxigênio (PAZHAMANNIL; GOVINDAN, 2021; REDWOOD, 2021).

#### 4.2 Fusão em Leito de Pó (PBF)

*Powder Bed Fusion* ou Fusão em Leito de Pó produzem peças sólidas usando uma fonte de energia (laser ou feixe de elétrons) para fundir pó, camada por camada, por um caminho predeterminado. A tecnologia é aplicada tanto em polímeros como em metais, em que neste caso ocorre a fusão de partículas de metal. As principais variações nas tecnologias de PBF estão relacionadas às fontes de energia para que o pó seja fundido e os materiais utilizados (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

A aplicação do laser sobre o pó ao invés da resina possui algumas vantagens, o pó antes de ser sinterizado serve como suporte para os pontos em balanço na peça, e o

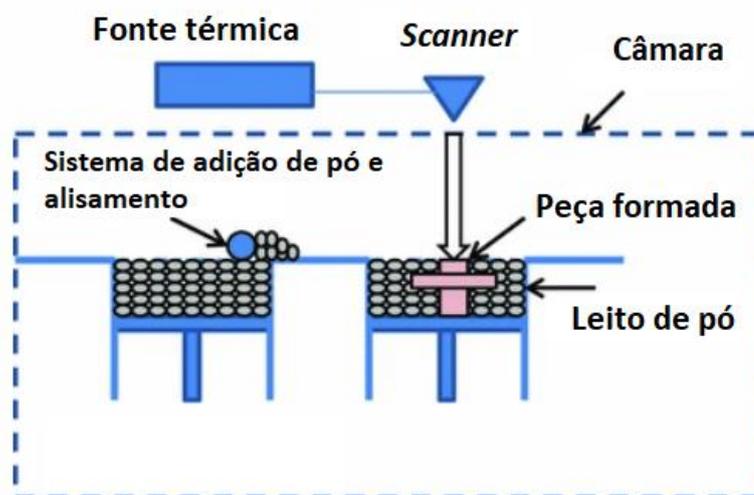
mesmo que não for utilizado pode ser reaproveitado posteriormente em outra fabricação (MONTEIRO, 2015).

As tecnologias de Fusão em Leito de Pó abrangem uma grande variedade de metais, basicamente qualquer metal soldável é considerado um bom candidato a ser processado por PBF. Como exemplo pode-se citar: ligas de titânio, níquel, cobalto-cromo, ligas de alumínio; metais preciosos como prata e ouro; e diversos tipos de aços, sendo mais comum o aço inoxidável e o aço ferramenta (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Materiais com baixa condutividade térmica são mais adequados para o processo de PBF, por serem mais estáveis durante a sinterização ou fusão (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

A Figura 18 representa de forma esquemática um sistema de PBF genérico. Primeiramente o material em pó desejado para o objeto é espalhado na área de trabalho dentro de uma câmara, formando o chamado leito de pó. A seguir a fonte de energia é programada para incidir sobre o leito e fundi-lo na forma desejada, quando uma camada é finalizada, um sistema de rolamento adiciona mais pó e “alisa” a área. Esse processo se repete até o componente tridimensional estar pronto (FRAZIER, 2014).

Figura 18 - Funcionamento da Fusão em Leito de Pó (PBF)



Fonte: Adaptado de Frazier (2014)

Após o processo de impressão estar finalizado, um período de resfriamento é normalmente necessário para permitir que a peça formada alcance uma temperatura uniforme em suas camadas, e suficientemente baixa para manuseio e para que possa ser exposta à temperatura ambiente. Se essa etapa não for realizada corretamente, a peça pode

deformar devido a contrações térmicas. Por fim, a peça é removida do pó e ocorre operações de pós-processamento dependendo da aplicação desejada (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Na câmara onde a fusão do pó acontece, o pó é mantido a uma temperatura logo abaixo do ponto de fusão. Isso acontece para que a potência requerida pela fonte térmica seja menor, para evitar o empenamento da peça e expansão ou contração térmicas não uniformes durante o processo (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Basicamente, todas as tecnologias de PBF possuem pelo menos uma fonte de calor para fundir ou sinterizar as partículas de pó dispostas, um mecanismo que controle essa fusão de forma que ela aconteça da maneira desejada (*scanner* representado na Figura 17), e um sistema de adição e alisamento de pó, para dar sequência ao processo nas próximas camadas por um mecanismo de rolo ou lâmina.

Com relação às aplicações, as tecnologias de Fusão em Leito de Pó abrangem uma boa variedade de materiais e são recomendadas para aplicações funcionais em que se exige uma alta complexidade geométrica e otimização das peças produzidas, como nas indústrias médica, automotiva e aeroespacial. Como exemplo, os motores do Boeing 777x conforme mostra a Figura 19 com cerca de 300 componentes fabricados com tecnologias de Fusão em Leito de Pó, incluindo peças que não poderiam ser fabricadas por métodos convencionais de manufatura (CAROLO, 2020).

Figura 19 - Motor GE9X do Boeing 777x com mais de 300 componentes impressos



Fonte: Carlota (2020)

Analisando a literatura, devido a manufatura aditiva em metais principalmente, ser uma tecnologia relativamente recente, muitos processos novos que estão presentes em estudos mais atuais, são apresentados de maneira diferente e generalizada em estudos anteriores.

Os tipos de PBF são: *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, *Selective Heat Sintering (SHS)*, *Electron Beam Melting (EBM)*: (SINGH; MAHENDER; REDDY, 2020)

Quadro 8 – Principais processos de PBF

Sigla	Nome do processo	Tradução
SLS	Selective Laser Sintering	Sinterização Seletiva a Laser
SLM	Selective Laser Melting	Fusão Seletiva a Laser
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Sinterização Direta a Laser de Metal
SHS	Selective Heat Sintering	Sinterização Seletiva por Calor
EBM	Electron Beam Melting	Fusão por Feixe de Elétrons

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1 *Selective Laser Sintering (SLS) - Sinterização Seletiva a Laser*

Alguns autores tratam as tecnologias SLS, SLM e DMLS como um único processo devido às semelhanças no seu princípio de funcionamento como visto em Monteiro (2015) e Kumar e Sathiya (2020). Buscando autores em que ocorra a diferenciação dos termos, percebe-se a relação de SLS com aplicações a polímeros, e DMLS e SLM à metais.

Desenvolvida na década de 1980 por pesquisadores na Universidade do Texas, a Sinterização Seletiva a Laser segue o mesmo funcionamento descrito na Figura 18, em que a fonte térmica utilizada é o feixe de laser.

A norma ISO/ASTM 52900 (2015) define a SLS como um processo de Fusão em Leito em Pó utilizado para produzir objetos a partir da deposição de pó, usando um ou mais lasers para sinterizar de maneira seletiva as partículas na superfície em uma câmara fechada, camada por camada. O feixe de laser, sendo contínuo ou pulsante, é utilizado para digitalizar e alinhar as partículas em formas e tamanhos pré-determinados de acordo com o requisitado (DESPA; GHEORGHE, 2011).

Após uma camada ser finalizada, um sistema de rolamento deposita uma nova camada de pó sobre o leito e o processo se repete para que a próxima camada seja formada.

#### ***4.2.2 Selective Heat Sintering (SHS) - Sinterização Seletiva por Calor***

O funcionamento da SHS é bastante semelhante ao SLS, mas é utilizado um cabeçote aquecido para fundir pó termoplástico ao invés do laser típico do processo de Sinterização Seletiva a Laser, o que reduz significativamente os níveis de calor e energia necessários. A *Blue Printer M3* mostrada na Figura 20, é uma impressora 3D comercializada pela primeira vez em 2014, que utiliza a tecnologia SHS (HALTERMAN, 2015; LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021a).

Figura 20 - Impressora *Blue Printer M3*



Fonte: Halterman (2015)

#### ***4.2.3 Fusão Seletiva a Laser (SLM) e Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS)***

As tecnologias de SLM e DMLS funcionam de maneira semelhante à SLS, sendo que aquelas são utilizadas para produção de peças metálicas. Na DMLS não ocorre a fusão completa do pó, apenas o aquecimento para que ocorra fusão a nível molecular, sendo assim possível produzir ligas metálicas com diferentes composições e pontos de fusão. Já na SLM, o laser é utilizado para fundir totalmente o pó metálico para produzir

peças homogêneas com um único elemento, e assim temperatura de fusão única (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

As peças produzidas por SLM e DMLS possuem boas propriedades mecânicas, com aplicações nas indústrias automotiva e aeronáutica, medicina, dentre outros (SINGH; MAHENDER; REDDY, 2020).

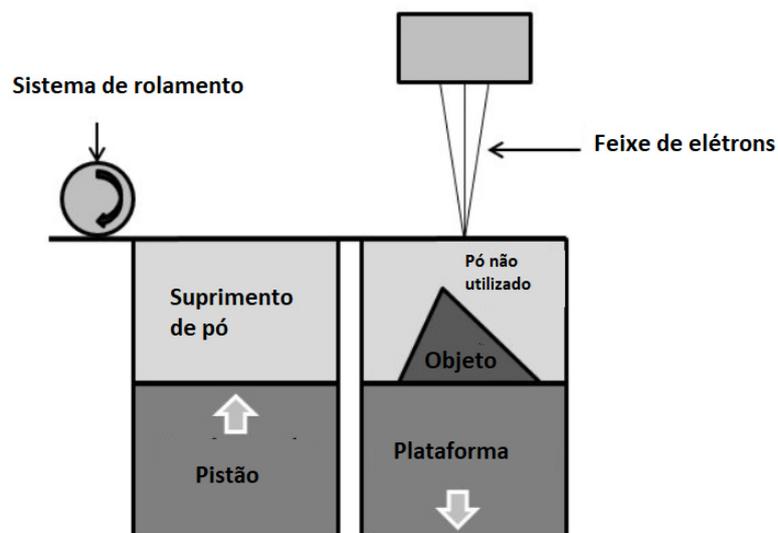
Em comparação à PBF em polímeros; a alta condutividade térmica, tensão superficial, tendência à oxidação, refletividade do pó metálico ao laser; tornam o processo bem mais complexo quando se aplicado em metais. O uso de lasers com melhor absorvidade pelo pó metálico, gás inerte na câmara para minimizar a oxidação são alguns elementos chave para a produção de peças metálicas através da fusão do pó (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

#### 4.2.4 Electron Beam Melting (EBM) - Fusão por Feixe de Elétrons

Diferentemente das tecnologias anteriores de PBF, a EBM utiliza feixe de elétrons de alta energia para fundir o pó metálico.

A Figura 21 representa de forma esquemática o funcionamento da Fusão por Feixe de Elétrons. Percebe-se que o princípio é o mesmo que em todos os processos de Fusão em Leito de Pó já apresentados.

Figura 21 - Funcionamento da Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)



Fonte: Adaptado de Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris (2016)

A utilização do feixe de elétrons confere ao processo uma densidade maior de energia, proporcionando uma velocidade de impressão maior, quando comparada à processos como SLM e DMLS. Entretanto as peças produzidas possuem um acabamento superficial e resolução inferiores e tamanho das partículas do pó maiores. Outra diferença é no ambiente em que ocorre a operação, na EBM a fusão do material ocorre à vácuo, diferente do gás inerte da SLM, e o processo só pode ser usado em materiais condutores (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

A geração de feixe de elétrons costuma ser mais eficiente que a geração de feixe de laser. Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), quando uma tensão é aplicada a um sistema com feixe de elétron, a maior parte da energia elétrica é convertida para a geração do feixe. Já na geração do feixe de laser uma boa quantidade de energia é perdida na forma de calor, embora isso não deva ser uma grande vantagem futuramente devido aos avanços tecnológicos, como por exemplo os lasers de fibra óptica.

Um dos aspectos mais promissores na EBM é a capacidade de mover o feixe de elétrons quase que instantaneamente (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Futuros avanços na tecnologia podem aumentar ainda mais a velocidade de impressão da EBM em comparação à SLM/DLMS, diferenciando assim as aplicações com relação à essas tecnologias, em que não exigem tanto acabamento e sim velocidade.

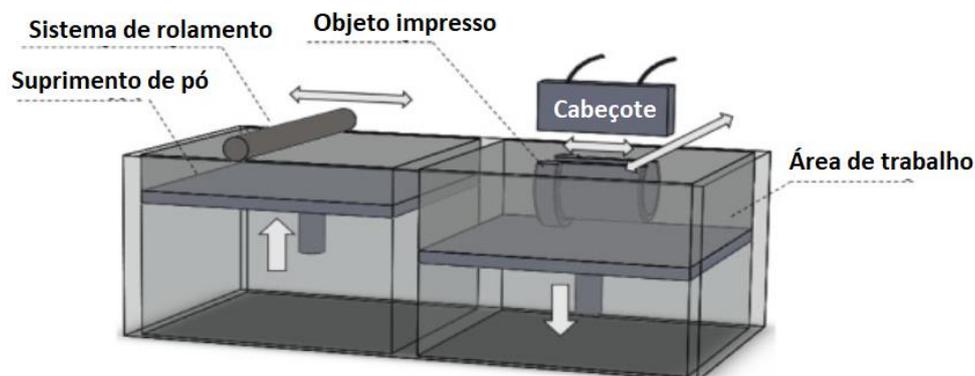
### **4.3 Jateamento de Aglutinante (BJ)**

Desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) no começo da década de 1990, o nome original para BJ era *Three-Dimensional Printing* (3DP) e foi licenciada para mais de cinco empresas para comercialização (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A impressão por *Binder Jetting* ou Jateamento de Aglutinante utiliza dois materiais; material em pó e um aglutinante líquido que servirá como “adesivo” entre as camadas de pó, unindo-as para obter a forma desejada. Para isso é utilizado um cabeçote de impressão que se move horizontalmente nos eixos x e y e deposita o material aglutinante sobre leito de pó disposto na área de trabalho (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021b). Os materiais em pó podem ser à base de cerâmica (por exemplo vidro ou gesso) ou metal (REDWOOD, 2021). De maneira semelhante aos processos de Fusão em Leito de Pó, um sistema de rolamento espalha o pó para que a próxima camada seja construída.

A Figura 22 ilustra o funcionamento da manufatura aditiva por jato de aglutinante.

Figura 22 - Funcionamento da tecnologia *Binder Jetting*



Fonte: Adaptado de Ziaee e Crane (2019)

Após cada camada ser impressa, a plataforma é movida para baixo a uma distância da espessura da camada desejada para que as próximas camadas sejam produzidas, da mesma maneira que nos processos anteriores de manufatura aditiva apresentados.

Uma grande vantagem da BJ em relação à outras tecnologias de manufatura aditiva é que o processo ocorre à temperatura e atmosfera ambiente, evitando problemas relacionados à oxidação, tensão residual e mudanças de fase. Com isso, o pó não utilizado é altamente reciclável. Em contrapartida, as peças produzidas possuem densidade relativa aproximadamente 50% menor, maior rugosidade superficial, menor resolução quando comparadas à técnicas de PBF por exemplo (MOSTAFAEI *et al.*, 2020).

Com isso, etapas de pós processamento com o uso de infiltrantes ou operações secundárias são necessários para melhorar as propriedades mecânicas das peças produzidas. Uma variedade de infiltrantes podem ser selecionados, a depender da propriedade mecânica desejada (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Segundo Redwood, Schffer e Garret (2017), as técnicas de MA por Jateamento de Aglutinante podem ser classificadas em duas categorias:

- a) impressão de areia - método de baixo custo para produção de peças de arenito ou gesso. Duas aplicações comuns são:
  - produção de peças totalmente coloridas, utilizando uma base de gesso em conjunto com o líquido aglutinante no cabeçote de impressão;

- produção de moldes pra fundição, a principal vantagem dessa tecnologia é alta complexidade geométrica a um custo relativamente baixo;

b) impressão de metais - para produção de peças metálicas, o pó metálico é unido com um aglutinante polimérico. Peças com geometrias complexas podem ser produzidas, no entanto peças metálicas funcionais só podem ser obtidas com processos secundários após a impressão, para melhorar suas propriedades mecânicas.

A Figura 23 apresenta uma peça produzida por impressão de areia e outra de metal.

Figura 23 - Peça produzida por impressão de areia (à esquerda) e de metal (à direita)



Fonte: Greguríc (2019)

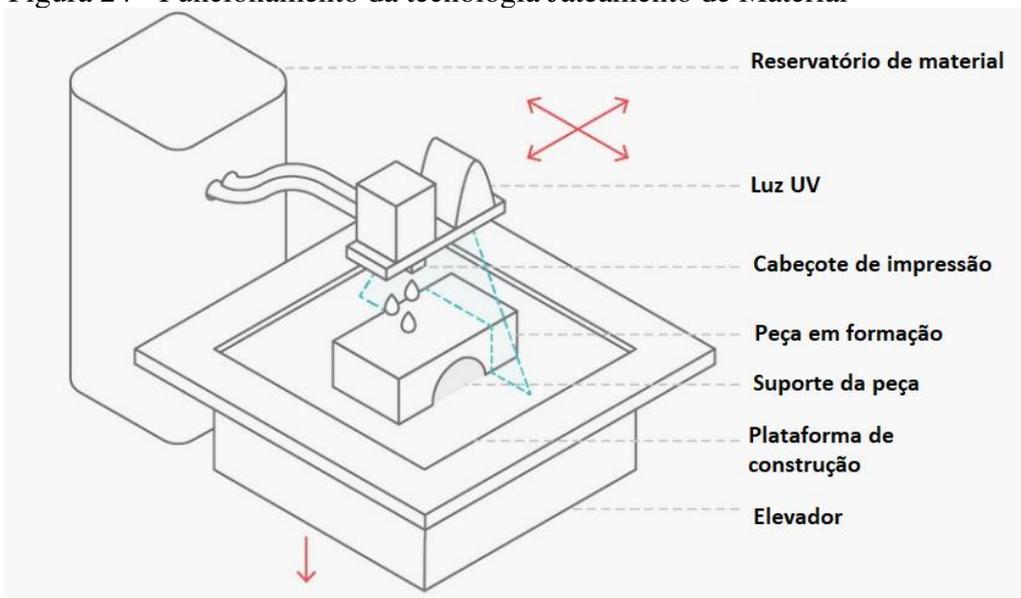
Com relação às aplicações, em comparação às técnicas de PBF, a diferença se dá, basicamente, no custo e nas propriedades mecânicas das peças produzidas. As propriedades mecânicas e a precisão dimensional nas peças produzidas por Fusão em Leito de Pó são melhores, entretanto o seu custo pode ser até dez vezes maior. Logo essa relação entre custo e propriedades mecânicas deve ser bem avaliada na escolha do processo a ser utilizado (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

#### 4.4 Jateamento de Material (MJ)

*Material Jetting* ou Jateamento de Material é o processo em que ocorre a deposição seletiva de material na forma de gotículas, normalmente fotopolímeros e termoplásticos, através de um cabeçote de impressão, para a fabricação de objetos

tridimensionais. O bico do cabeçote ejeta pequenas gotículas à medida que se move horizontalmente pela plataforma de construção. Após a deposição do material, este é solidificado com uma luz UV ou temperatura ambiente, conforme exemplifica a Figura 24 (SANTOS, 2018; YARAGATTI; PATNAIK, 2020).

Figura 24 - Funcionamento da tecnologia Jateamento de Material



Fonte: Adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017)

Diferentemente da maioria das tecnologias de manufatura aditiva, em que a construção das camadas é feita de forma pontual, varrendo a seção da camada para se construir um objeto, MJ deposita o material em linha e de maneira rápida. Essa deposição em linha permite que vários objetos possam ser fabricados simultaneamente sem qualquer prejuízo na velocidade de produção, desde que dispostos em linha (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Um grande atrativo do MJ é a capacidade de processar materiais diferentes em uma só peça, obtendo assim diferentes propriedades mecânicas. Uma desvantagem é ter que imprimir simultaneamente o suporte da peça para que esta não perca sua forma durante o processo de solidificação (SANTOS, 2018).

Essa capacidade de processar materiais diferentes e com alta precisão, confere à tecnologia uma ampla gama de aplicações, como por exemplo fabricação de ferramentas e moldes de injeção, protótipos, modelos de órgãos dentre outros (CAROLO, 2020).

Os principais métodos de deposição do material são: modo contínuo e o *drop-on-demand* (DOD).

#### **4.4.1 Modo Contínuo**

No modo contínuo é produzido um fluxo pressurizado de fluido que é quebrado em gotículas após a deposição do material, através de um elemento piezoelétrico. Ao estimular esse elemento a altas frequências, o fluxo forma gotículas contínuas, com tamanho e espaçamento uniformes. As gotículas são seletivamente carregadas conforme atravessam um eletrodo que é incorporado ao cabeçote de impressão. Com isso, são utilizadas placas defletoras de alta tensão para interferir no movimento das gotículas, direcionando-as para se obter a forma desejada do objeto a ser impresso (TAMEZ; TAHA, 2020).

#### **4.4.2 Drop-on-Demand (DOD)**

As impressoras DOD possuem dois jatos de impressão; um para depositar o material do objeto desejado e outro para o suporte do objeto (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

As gotículas são produzidas diretamente a partir do bico do cabeçote e são depositadas apenas quando necessário e não de maneira contínua, através de uma variação de pressão por meio de atuadores térmicos ou piezoelétricos (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021c).

Se comparado ao Modo Contínuo, a impressão baseada em DOD se destaca mais em aplicações industriais modernas visto que esse método permite melhor reprodutibilidade e produção em massa com menor desperdício de material (TAMEZ; TAHA, 2020).

### **4.5 Laminação em Folha**

A ISO/ASTM 52900 (2015) define Laminação em Folha ou *Sheet Lamination* como o processo no qual lâminas ou folhas de material são unidos para formar uma peça.

Os processos de Laminação em Folha são classificados em *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021d).

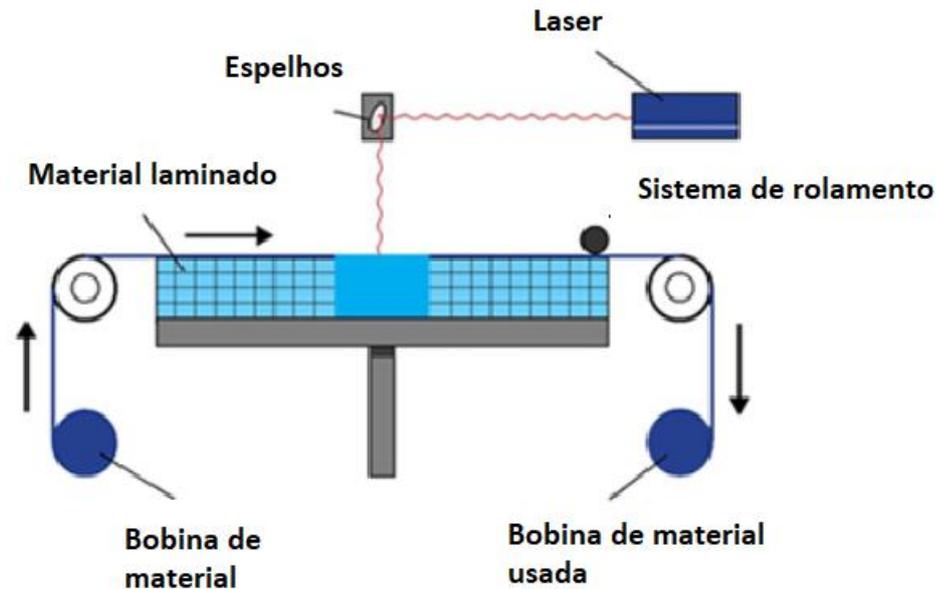
#### ***4.5.1 Laminated Object Manufacturing (LOM) – Manufatura de Objetos Laminados***

Comercializada em 1991, LOM foi uma das primeiras técnicas de manufatura aditiva a surgir no mercado e combina técnicas aditivas e subtrativas para construir um objeto camada por camada. Seu funcionamento se dá com o corte camada por camada de folha de papel por meio de um laser ou ferramenta de corte, cada uma dessas folhas representam uma camada do modelo virtual do objeto desejado. A junção se dá com a aplicação de pressão e calor, através de um revestimento de adesivo térmico (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; WONG; HERNANDEZ, 2012).

A configuração mais popular dessa tecnologia utiliza como material de construção o papel, colado usando um adesivo à base de polímero. Entretanto, qualquer material em forma de folhas ou fitas que possa ser cortado com precisão com um laser ou uma ferramenta de corte, e que possa ser unido, pode ser utilizado nessa tecnologia (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A formação do objeto tridimensional se dá então pelo corte sequencial do material e a união deste por meio de um adesivo. O corte é realizado através de um laser e o material cortado é posicionado logo abaixo da zona de corte por meio de uma plataforma, as folhas são fornecidas ao sistema por meio de bobinas como mostrado na Figura 25. Um sistema de rolamento é utilizado para revestir e colar o material na camada anterior por meio de adesivos, em que o corte do material pode ser realizado antes ou depois da colagem. À medida que as folhas são posicionadas, coladas e depositadas por baixo da zona de corte, a plataforma é rebaixada para dar espaço às folhas seguintes (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021d; SANTOS, 2018).

Figura 25 - Funcionamento da tecnologia de Laminação em Folha



Fonte: Adaptado de Loughborough University (2021d)

LOM é geralmente utilizada para fabricação rápida de protótipos, tendo em vista a dificuldade do processo em produzir peças com geometrias complexas e por requerer processos subtrativos em conjunto, se comparada a outras técnicas de manufatura aditiva (CAROLO, 2020).

#### 4.5.2 Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) – Manufatura Aditiva Ultrasônica

O funcionamento da UAM é semelhante ao LOM, porém utiliza folhas de metal como material de construção, e a ligação é realizada por meio de soldagem ultrasônica. O processo requer usinagem CNC para remoção do material indesejado para obter a forma requerida, que pode acontecer antes ou depois da adição camada por camada. Os metais utilizados no processo incluem alumínio, cobre, aço inoxidável e titânio (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021d).

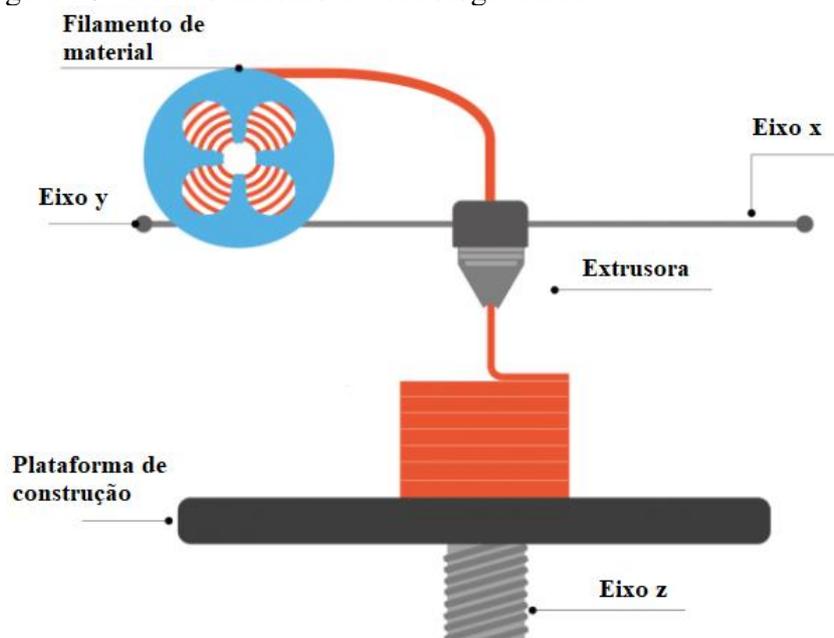
Analisando a literatura, percebe-se a tendência de unificar a tecnologia de Laminação em Folha apenas à LOM, em que qualquer material pode ser utilizado. Com o requisito que o material esteja na forma de folha e que o mesmo seja unido de alguma forma à camada anterior, para que o mecanismo camada por camada permaneça.

## 4.6 Extrusão de Material

A impressão por Extrusão de Material é a mais comum encontrada comercialmente devido à sua acessibilidade e geralmente é utilizado polímeros como material de construção (SANTOS, 2018).

Na impressão por Extrusão de Material é utilizado material termoplástico na forma de filamento, que é empurrado através de um bocal aquecido, fundindo o material e extrudando-o, camada por camada, como mostrado na Figura 26. O material é depositado na plataforma de construção, por meio de mecanismos que movimentam o bocal no eixo y e x em um caminho predeterminado. O filamento de material fundido e extrudado resfria e solidifica para formar o objeto desejado. A técnica normalmente é chamada de *Fused Deposition Modeling* (FDM), termo registrado pela Stratasys, ou *Fused Filament Fabrication* (FFF) (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Figura 26 - Funcionamento da tecnologia FDM



Fonte: DruckWege 3d Printing (2020)

O filamento de material é aquecido a uma temperatura pouco acima do seu ponto de fusão para que logo após depositado e extrudado, se solidifique formando a camada da peça a ser produzida (VEIT, 2018).

Segundo Pallarolas (2013), a principal desvantagem dessa tecnologia é a velocidade de construção, que devido à alta inércia dos cabeçotes fazem com que a

velocidade de impressão obtida pela tecnologia seja geralmente inferior à outros métodos de manufatura aditiva.

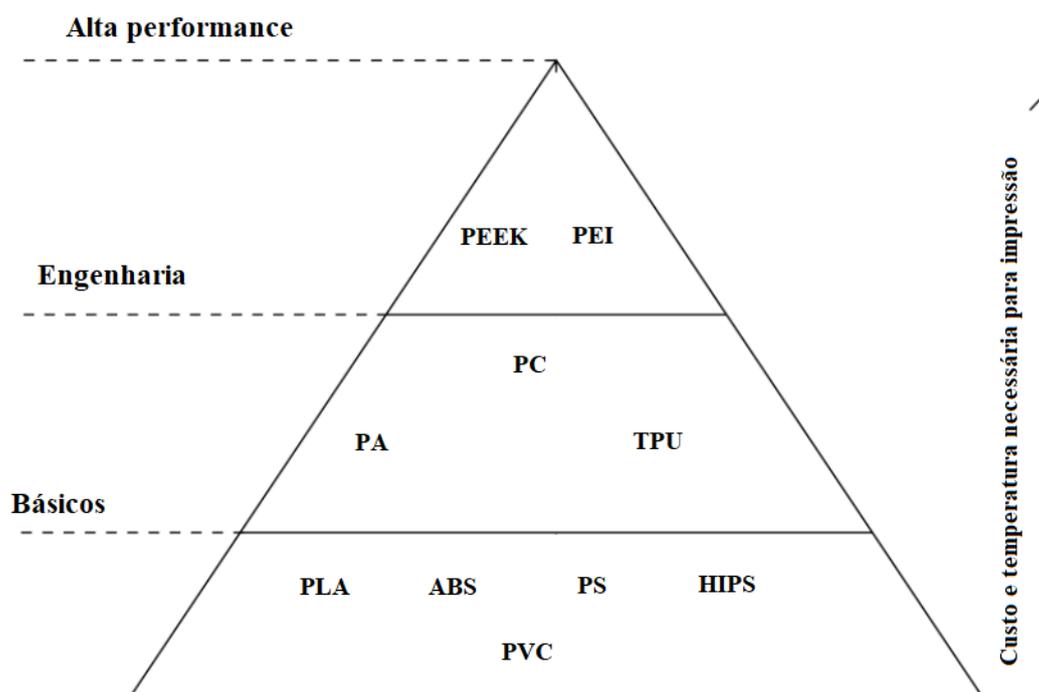
Devido a seu princípio de funcionamento, com o aquecimento, extrusão e posterior resfriamento do material, tensões internas podem ser um problema levando a empenamentos ou encolhimentos da peça, sendo muitas vezes necessário adaptações para contornar esses fatores (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017). Segundo Kazmer e Colon (2020), outras desvantagens incluem a resistência limitada das peças; alta anisotropia; baixa resolução, acabamento superficial e eficiência energética; dentre outras limitações típicas de métodos de manufatura aditiva.

Se comparada a outras técnicas de manufatura aditiva, a Extrusão de Material é um processo menos preciso. No entanto, a acessibilidade econômica da tecnologia, a portabilidade das impressoras e a vasta gama de materiais compatíveis e acessíveis, a torna o processo mais popular para impressão 3D a nível amador. Na indústria, a Extrusão de Material é normalmente utilizada para produzir protótipos não funcionais ou objetos que irão passar por outras operações (SIEMENS, 2021a).

Os materiais mais utilizados são os polímeros termoplásticos, como acrilona butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), policloreto de vinila (PVC), policarbonato (PC), poliuretano termoplástico (TPU), poliestireno normal (PS) e de alto impacto (HIPS), poliamidas alifáticas (PA ou Nylon), e materiais de alto desempenho como poli(éter-éter-cetona) (PEEK) e polieterimida(PEI) (3D EXPERIENCE, 2021). Segundo Redwood, Schffer e Garret (2017), quanto melhor as propriedades mecânicas do material, maior será a temperatura exigida de trabalho e mais difícil será o processo.

Como mostrado na Figura 27, os materiais podem ser divididos em materiais de alta performance, de engenharia e os mais básicos, e quanto mais elevado na pirâmide o material estiver, maior o custo e dificuldade para impressão, porém, melhores serão as propriedades das peças produzidas.

Figura 27 – Exemplos de materiais utilizados no processo de extrusão de material



Fonte: Adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017)

Segundo Redwood, Schffer e Garret (2017), as impressoras FDM ou que utilizam o processo de extrusão de material, servem como uma forma econômica de prototipagem e para produção de peças funcionais normalmente não comerciais. Algumas aplicações comuns são a fabricação de moldes, carcaças para componentes eletrônicos e acessórios diversos a nível amador, embora evoluções venham acontecendo de forma a expandir suas aplicações na indústria.

#### 4.7 Deposição de Energia Direcionada (DED)

Na Deposição de Energia Direcionada, as peças são formadas à medida que o material é depositado na área de trabalho, diferente das tecnologias de PBF por exemplo, em que o material é colocado previamente para depois ocorrer a fusão. Isso ocorre concentrando um laser de alta potência em um substrato, para criar uma poça de fusão na qual o material será injetado simultaneamente, induzindo-o à fusão à medida que entrar em contato com ela (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

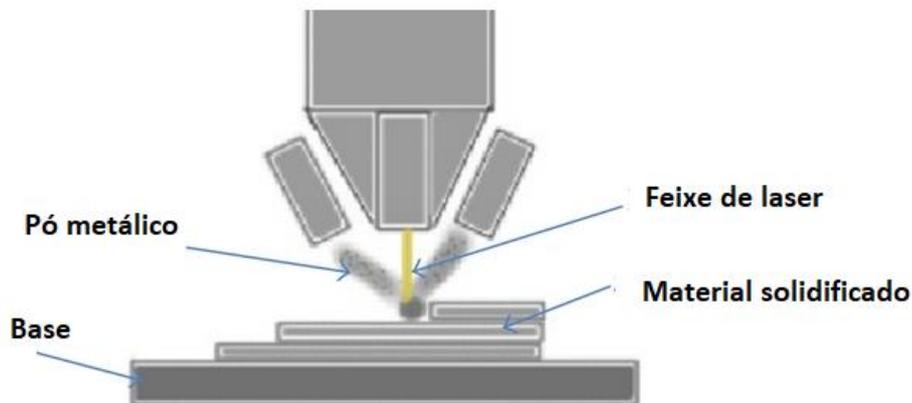
Uma série de organizações desenvolveram máquinas de DED utilizando lasers e material em pó, logo várias terminologias podem ser encontradas para essa

tecnologia: *Direct Light Fabrication* (DLF), *Direct Metal Depositing* (DMD), *Laser Freeform Fabrication* (LFF), *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) dentre outras (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A terminologia LENS é uma das mais presentes na literatura.

Nesse processo é utilizado o material na forma de pó ou arame, que é aspergido com um gás inerte sobre o foco de um feixe de laser de alta potência (PALLAROLAS, 2013). O sistema DED faz uso de um braço robótico, permitindo que o material possa ser depositado em várias direções, conferindo maior liberdade de movimentação e de formas geométricas se comparada a outras técnicas de manufatura aditiva (SANTOS, 2018).

Como representando na Figura 28, o orifício central do cabeçote direciona o feixe de laser no substrato e cria as poças de fusão, enquanto os orifícios adjacentes depositam o material, formando a camada.

Figura 28 - Funcionamento da tecnologia DED



Fonte: Adaptado de Wong e Hernandez (2012)

Embora possa ser aplicada em outros materiais como polímeros e materiais cerâmicos, a tecnologia é predominantemente utilizada em metais, como aço inoxidável, ligas à base de níquel, titânio e de cobre, aços ferramenta, alumina dentre outros (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; WONG; HERNANDEZ, 2012).

O método para criar as poças de fusão geralmente são laser, feixe de elétrons ou arco de plasma, e o uso do material na forma de pó ou arame vai depender da aplicação desejada. Ao utilizar o arame tem-se uma taxa de deposição maior e grandes volumes de construção, no entanto é menos preciso e requer mais operações posteriores de

acabamento e usinagem, se comparado aos processos utilizando material em pó (FRAZIER, 2014).

Com relação às aplicações, a tecnologia DED é normalmente utilizada para reparo e manutenção de componentes estruturais, embora também possa ser utilizada para fabricar peças novas (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021e). Devido à sua capacidade de depositar materiais em diversas direções, não utilizando a gravidade por como auxiliar, a tecnologia é potencialmente útil para aplicações espaciais (CAROLO, 2020).

## 5 MERCADO DA MANUFATURA ADITIVA

O *Mckinsey Global Institute*, unidade de pesquisa econômica e de negócios da Mckinsey & Company, empresa de consultoria empresarial, emitiu em 2013 um relatório que já apontava a manufatura aditiva como uma das 12 tecnologias mais inovadoras do mercado mundial até 2025 (MANYIKA *et al.*, 2013).

De acordo com um estudo global sobre tendências da manufatura aditiva da MarkerBot, 74% das empresas entrevistadas planejam investir em impressão 3D em 2021. O estudo apontou ainda que 50% delas planejam investir até US\$100 mil (GS1 BRASIL, 2020a). No Brasil, uma pesquisa realizada pelo Fórum Econômico Mundial apontou que em 2022, 49% das empresas brasileiras devem investir em tecnologias de manufatura aditiva (GS1 BRASIL, 2020b).

Segundo um relatório recente da *Reports and Data* (2020), estima-se que o mercado global da manufatura aditiva cresça a uma taxa de 14,4%, de US\$8,35 bilhões em 2019 para US\$23,75 bilhões em 2027. O estudo ainda obteve os seguintes resultados:

- a) com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 16,1%, projeta-se que a indústria médica seja um dos setores com crescimento mais rápido das aplicações de manufatura aditiva;
- b) na indústria de manufatura, espera-se que em 2027 a manufatura aditiva tenha uma participação de 33,2%;
- c) a América do Norte obteve a maior participação do mercado de MA em 2019, com 43%. No período estudado, as estatísticas obtidas no relatório sugerem um impacto das indústrias de MA na economia da América do Norte de US\$ 3,1 trilhões, aproximadamente 19% do PIB. Os Estados Unidos com 37,2%, lideram em termos de participação no mercado da tecnologia, sendo a indústria aeroespacial o grande destaque;
- d) estima-se que até 2050 a manufatura aditiva possa ajudar a economizar cerca de 90% da matéria-prima utilizada na indústria aeroespacial.

### 5.1 Aplicações na indústria

Segundo Lettori *et al* (2020), as aplicações que impulsionam as vantagens da manufatura aditiva são divididas em cinco categorias:

- a) componentes estruturais em que se objetiva maximizar a rigidez enquanto diminui o peso;
- b) produtos que precisam de uma geometria complexa e específica para otimizar sua aplicação, como aumentar eficiência fluidodinâmica de componentes;
- c) produção de ferramentas rápidas para testes ou para produzir outras peças, como por exemplo moldes;
- d) produtos em que é exigido alta personalização, como em produtos biomédicos, odontológicos dentre outros;
- e) protótipos para realização de testes, avaliar dimensões.

Inúmeros setores da indústria podem se beneficiar dessas aplicações da MA, o Quadro 9 apresenta alguns desses setores e aplicações.

Quadro 9 - Resumo de aplicações da manufatura na indústria

Indústria	Aplicações
Automotiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de protótipos e componentes de automóveis com geometrias complexas em menos operações, com isso tem-se maior velocidade no desenvolvimento de produtos.</li> <li>• Redução do peso dos automóveis</li> <li>• Fabricação de peças de reposição e acessórios diversos</li> <li>• Otimização de sistemas de refrigeração de carros de alta performance.</li> </ul>
Aeroespacial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de protótipos, componentes de aeronaves e satélites, peças de reposição.</li> <li>• Redução de peso das aeronaves</li> <li>• Produção de baixos volumes de maneira econômica,</li> <li>• Componentes otimizados como bicos injetores de combustível para turbinas de aviação mais duráveis e mais leves; câmara de combustão de motores de foguetes com maior confiabilidade, eficiência e robustez.</li> </ul>
Arquitetura e de construção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de concreto para construção convencional, de materiais diversos e concretos de alto desempenho.</li> <li>• Fabricação de componentes estruturais diversos, com maior personalização, e menores tempos de entrega.</li> </ul>
Alimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viabilidade de produzir alimentos no espaço, camada por camada.</li> <li>• Chocolates, doces, alimentos planos como biscoitos, massas podem ser utilizados na manufatura aditiva.</li> </ul>
Indústria de consumo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de roupas, cosméticos, produtos de higiene, acessórios, sapatos, armações de óculos de titânio, de materiais diversos e personalizados</li> <li>• Melhor resposta ao mercado e tendências atuais, customização em massa facilitada.</li> </ul>
Medicina/Farmacêutico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de implantes personalizados como aparelhos auditivos, odontológicos, próteses robóticas</li> <li>• Reconstrução de ossos e partes do corpo</li> <li>• Fabricação de equipamentos cirúrgicos e correlatos</li> <li>• Protótipos de órgãos para auxiliar em cirurgias e diagnósticos</li> <li>• Produção de equipamentos médicos diversos</li> </ul>

Fonte: Adaptado de AMFG (2020);Attaran (2017); Bomberger e Kelly (2017); Tofail *et al* (2018).

Diante disso, empresas em variados segmentos da indústria estão se movimentando para integrar as tecnologias de manufatura em suas produções.

A Alpargatas, empresa brasileira de calçados e artigos esportivos, utiliza desde 2007 técnicas de impressão 3D para fazer projetos de solado da linha Mizuno. Outras multinacionais como a Fiat, MAN e ThyssenKrupp já contabilizam ganhos com a aplicação da tecnologia (ÉPOCA, 2017).

A General Electrics (GE) adquiriu quatro empresas especializadas em manufatura aditiva, em 2012 as empresas Morris Technologies e Rapid Quality Manufacturing, e em 2016 a Arcam AB e 75% da Concept Laser (ALMEIDA, 2017).

Em 2016 a Siemens AG adquiriu 85% da Material Solutions Ltd., uma empresa que utiliza a tecnologia SLM para produzir peças de superliga de níquel para turbinas a gás, componentes de aço e de titânio para sistemas aeroespaciais e automotivos de alto desempenho (BROOKS, 2016). Segundo a empresa, para a área da energia, espera-se aproveitar ainda mais das vantagens da tecnologia e qualificar um total de 200 componentes por manufatura aditiva até 2025 (SIEMENS, 2021b).

Na produção de componentes de turbinas a gás por exemplo, a Siemens aparece como um grande exemplo dos benefícios da manufatura aditiva como mostrado na Figura 29, produzindo até 16 turbilhonadores para turbinas em uma máquina de manufatura aditiva apenas, reduzindo a complexidade para obtenção desses equipamentos (AMFG, 2020). Já no combustor de turbinas a gás, como mostrado na Figura 30, à esquerda é representado o combustor produzido por manufatura convencional, composto de 13 componentes, 18 soldas e revestimento térmico, requerendo um prazo de 26 semanas para ser produzido. À direita tem-se o mesmo combustor fabricado por PBF, em uma única peça integrada, com prazo de produção de três semanas (ARC ADVISORY GROUP, 2018).

Figura 29 - 16 turbilhadores para turbinas a gás impressos simultaneamente pela Siemens



Fonte: AMFG (2020)

Figura 30 - Combustor de turbina a gás produzido por manufatura convencional (à esquerda) e impresso (à direita)



Fonte: Arc Advisory Group (2018)

A Airbus é outra empresa que está junto com as tecnologias de manufatura aditiva a um bom tempo. Em 2016, foi apresentado o projeto THOR (*Testing High-Tech Objectives in Reality*) que mostrou o potencial da tecnologia ao produzir um mini avião funcional quase inteiro por manufatura aditiva, representado na Figura 31 (ALMEIDA, 2017).

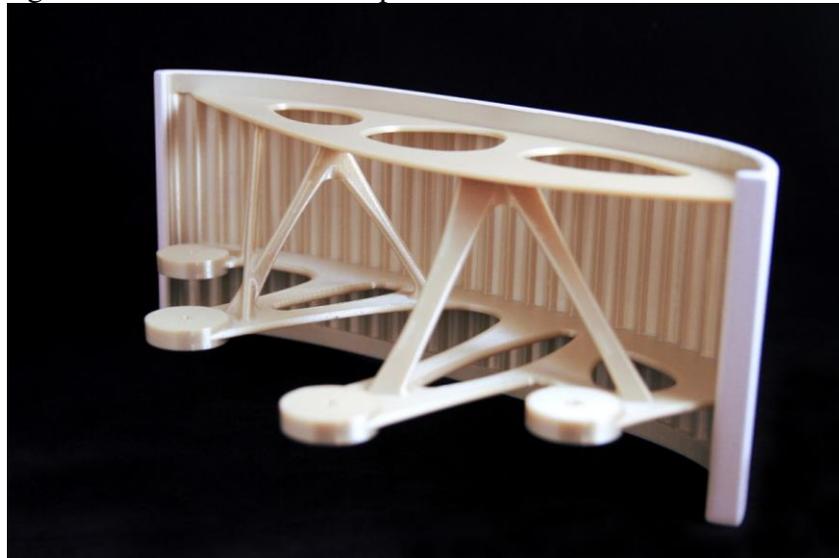
Figura 31 – Primeiro voo do mini avião do projeto THOR (à esquerda) e as peças impressas desmontadas (à direita)



Fonte: Airbus (2016)

A partir de 2018, a Airbus tem instalado em suas aeronaves comerciais A320, painéis externos produzidos por manufatura aditiva, utilizando a tecnologia FDM e conseguindo uma redução no peso desses componentes em 15% (AMFG, 2020). A Figura 32 mostra o painel produzido.

Figura 32 - Painel externo impresso utilizado no Airbus A320



Fonte: Airbus (2018)

Em parceria com a Safran, a Airbus também utiliza a manufatura aditiva no desenvolvimento do foguete *Ariane 6*, na fabricação de seu cabeçote injetor. Normalmente um cabeçote injetor de um foguete é composto por dezenas ou mesmo centenas de componentes, separadamente produzidos e montados. Na produção do *Ariane*

6, foi utilizado um modelo de cabeçote de liga de níquel que exigia 248 componentes se fosse produzido tradicionalmente, com a manufatura aditiva o mesmo cabeçote foi produzido com um único componente impresso. Na produção foi utilizada a tecnologia SLM, e reduziu o tempo de três meses para 35 horas, e uma redução de custos de 50%. A Figura 33 mostra o cabeçote injetor do foguete *Ariane 6* fabricado por manufatura aditiva (AMFG, 2020).

Figura 33 - Cabeçote injetor do foguete Ariane 6 produzido por manufatura aditiva



Fonte: EOS (2021)

Em 2017 a GKN Aerospace e o Laboratório Nacional de Oak Ridge assinaram um contrato de cinco anos com o objetivo de desenvolver peças de titânio em larga escala para a indústria aeroespacial, a Figura 34 mostra o centro instalado. De acordo com a empresa, o primeiro foco foi desenvolver um processo de manufatura aditiva através da fusão de fios de metal com laser, visando criar um protótipo de uma máquina que irá fabricar estruturas complexas de aeronaves de médio e grande porte em titânio (GKN AEROSPACE, 2017). Em 2019, a GKN Aerospace já tinha componentes fabricados por manufatura aditiva atuando em aeronaves comerciais, militares, helicópteros, jatos executivos e espaciais (GKN AEROSPACE, 2019).

Figura 34 - Centro de manufatura aditiva da GKN Aerospace



Fonte: GKN Aerospace (2017)

Em 2017 a McLaren Racing utilizou tecnologias de manufatura aditiva para produzir peças para seu carro de corrida. Peças como suporte de linha hidráulica, carregador flexível de rádio localização Harness, dutos de refrigeração de freio de fibra de carbono e a aba da asa traseira (IT FORUM, 2017). Em 2021 a 1016 Industries anunciou o modelo Ferrari F8, com seu *body kit* em fibra de carbono produzido por manufatura aditiva (YEUNG, 2021).

Em 2018, o grupo Volkswagen, conglomerado alemão com diversas marcas, abriu um centro de impressão 3D em Autostadt, e está cada vez mais presente no mercado da manufatura aditiva. Um dos focos principais dessa nova instalação é resultado de uma parceria com a HP e a GKN Powder Metallurgy, para uso da nova tecnologia da HP utilizando *Binder Jetting* em metais (SHER, 2018). Diversas marcas pertencentes ao conglomerado como a Volkswagen, Audi, Bugatti e Porsche, já utilizam tecnologias de MA em suas linhas de produção.

A Volkswagen na fabricação do I.D R Pikes Peak, seu carro elétrico de corrida, utilizou um modelo com diversos componentes produzidos por manufatura aditiva. A Audi com a produção de tubos de conexão de água para motor W12 e de componentes como as rodas de seu automóvel projetado para andar na lua mostrada na Figura 35, o Audi lunar quattro. Bugatti com o desenvolvimento de uma pinça de freio de titânio produzida por manufatura aditiva (VOLKSWAGEN, 2018).

Figura 35 - Roda do Audi lunar quattro, produzida por manufatura aditiva



Fonte: Volkswagen (2018)

Porsche com a fabricação de alavancas de embreagem do Porsche 959 e com o novo conceito apresentado em 2020 para assentos de carros esportivos personalizados produzidos por manufatura aditiva conforme mostra a Figura 36 (BOISSONNEAULT, 2020; VOLKSWAGEN, 2018).

Figura 36 - Assentos personalizados produzidos por manufatura aditiva pela Porsche



Fonte: Boissonneault (2020)

A Volkswagen Autoeuropa utiliza a manufatura aditiva na produção de ferramentas de montagem, a Figura 37 mostra a peça para proteção da roda produzida. Segundo Redwood, Schffer e Garret (2017), a transição da empresa para as técnicas de MA resultou em uma economia de 90% em custos e tempo de produção das ferramentas.

Figura 37 - Peça para proteção de roda produzida por manufatura aditiva pela Volkswagen Autoeuropa



Fonte: Vries (2017)

A startup Boom Supersonic, responsável por projetar o novo avião supersônico comercial XB-1 mostrado na Figura 38, utilizou a manufatura aditiva e conseguiu reduzir drasticamente o custo e o tempo de fabricação de peças para seu novo protótipo. De acordo com Basetto (2020), os dutos utilizados para testes dos motores da aeronave levariam até sete semanas e custariam cerca de US\$ 9.000 para serem fabricados por métodos convencionais de manufatura. Com a utilização de impressoras FDM da Stratasys, foi possível fabricar os dutos em 14 horas por US\$ 150, resultando em uma economia de 98% (BASETTO, 2020).

Figura 38 - XB-1, protótipo supersônico da Boom Supersonic



Fonte: Basetto (2020)

Em 2020 outras empresas como a Zortrax e a Braskem expandiram seus portfólios para tecnologias de manufatura aditiva. Na expansão da Braskem, empresa brasileira produtora de resinas termoplásticas, inclui pó, filamentos e pellets à base de polipropileno (PP) (REPORTS AND DATA, 2020). De acordo com a Braskem (2020), o PP se mostrou atraente às tecnologias de manufatura aditiva devido à sua reciclabilidade, resistência ao impacto e estabilidade dimensional da matéria-prima. No período da pandemia, a empresa brasileira também contribuiu para a produção de 5.000 escudos faciais por manufatura aditiva, com a doação de seus filamentos de polipropileno (BRASKEM, 2020).

Percebe-se então que diversas empresas estão adotando as tecnologias de manufatura aditiva, e seu potencial justifica esses investimentos. Em alguns setores da indústria a manufatura aditiva está mais presente, e serão abordados a seguir.

### ***5.1.1 Indústria aeroespacial***

Para Gibson, Rosen e Stucker (2015), algumas características essenciais da indústria aeroespacial são encontradas com as aplicações da manufatura aditiva, como por exemplo peças mais leves, resistentes a altas temperaturas, com geometrias complexas, produção econômica de volumes pequenos e peças de reposição digitais em virtude da longa vida útil da maioria das aeronaves. O peso é um dos principais fatores na indústria aeroespacial, quanto mais leve o componente menos energia é necessária para que voe. Materiais como titânio, alumínio, carbono e compósitos reforçados dentre outros materiais com boa relação resistência/peso são frequentemente utilizados para aplicações aeroespaciais, e vêm sendo cada vez mais incorporados à manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

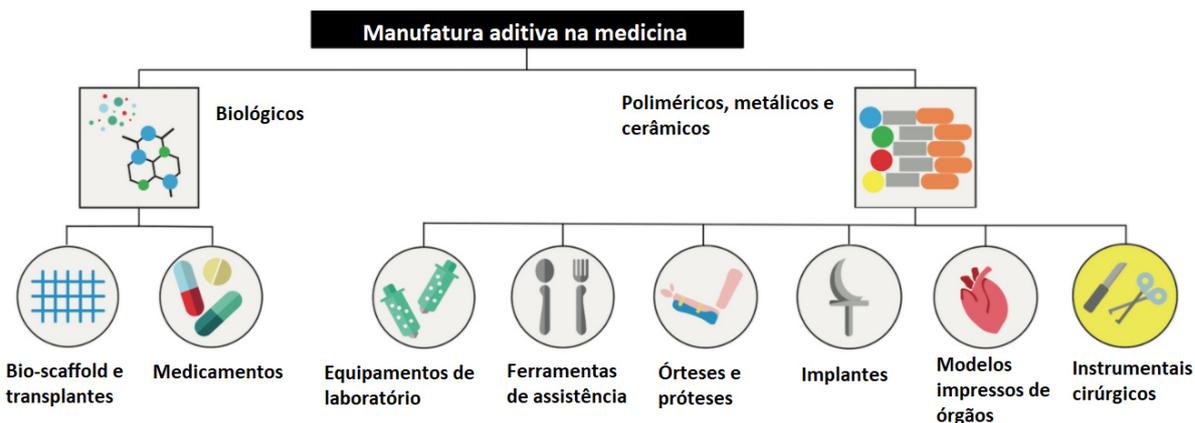
### ***5.1.2 Indústria médica***

As tecnologias de manufatura aditiva têm sido aplicadas na medicina quase desde o seu surgimento com a prototipagem rápida. Levando em consideração que a manufatura aditiva evoluiu paralelamente com os softwares CAD, a medicina também evoluiu com os inúmeros equipamentos médicos capazes de reproduzir imagens, como nos exames de tomografia computadorizada, raio x, ressonância magnética, ultrassonografia dentre outros. Com isso, o que originalmente era usado apenas para fins

diagnósticos por imagem, a medicina encontrou na manufatura aditiva a possibilidade de reproduzir essas imagens em modelos físicos tridimensionais reais para diversas outras utilidades (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A Figura 39 apresenta algumas aplicações da manufatura na medicina, de acordo com o tipo de material utilizado.

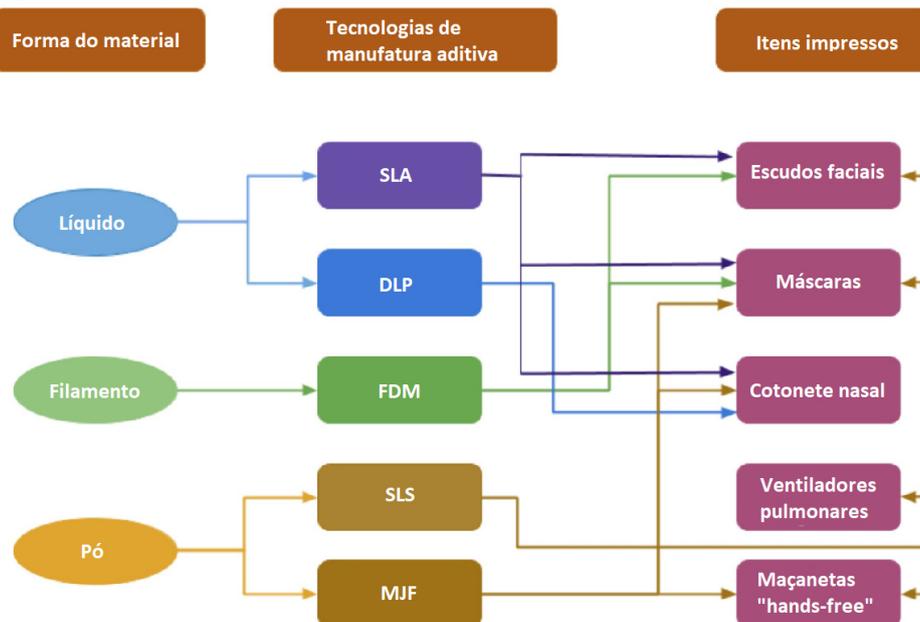
Figura 39 - Resumo de aplicações da manufatura aditiva na medicina



Fonte: Adaptado de Culmone, Smit e Breedveld (2019)

Diante do cenário mundial afetado pela pandemia do COVID-19, crise econômica, isolamento social e o crescente aumento no número de casos positivos, cresceu a necessidade por equipamentos de proteção individual para profissionais da saúde, ventiladores pulmonares e outros equipamentos essenciais para combater a doença. Diante dessa necessidade, a manufatura aditiva se mostrou importante nesse período emergencial no combate ao vírus, a Figura 40 mostra algumas aplicações da manufatura aditiva nesse período.

Figura 40 - Aplicação da manufatura aditiva durante a pandemia



Fonte: Adaptado de Tareq *et al*(2021)

A tecnologia MJF mencionada na imagem se refere à *Multi Jet Fusion*, desenvolvida pela HP e teve sua primeira impressora comercializada em 2016. Se trata de uma técnica de Fusão em Leito de Pó (PBF) recente em que cada camada é depositada sobre a anterior ainda fundida, permitindo que as camadas se unam completamente e proporcionando mais detalhes na impressão (KAUPPILA, 2021).

As maçanetas *hands-free* são dispositivos fixados nas maçanetas, de modo que permita que a porta seja aberta com o antebraço ou cotovelo. A Figura 41 exemplifica seu funcionamento.

Figura 41 - Adaptações para maçanetas produzidas por manufatura aditiva



Fonte:Fiello (2020)

### **5.1.3 Indústria automotiva**

As vantagens da manufatura aditiva também são de grande valia na indústria automotiva, de maneira semelhante à aeroespacial, a possibilidade de inovação, componentes mais leves e eficientes, eficiência de material, redução da *supply chain* e o alto desempenho obtido através de projetos de MA podem ser o diferencial no mercado.

Quando a manufatura aditiva surgiu, a indústria automotiva foi uma das pioneiras a utilizar suas tecnologias, juntamente com as indústrias aeroespacial e médica. Porém o uso era muito restrito a criar protótipos, sem resistência e durabilidades necessárias para produzir peças funcionais, e diferente da aeroespacial, tem a limitação da tecnologia diante dos grandes volumes de produção da indústria automotiva. Ficava evidente a necessidade de evoluir muito para a tecnologia se consolidar e impactar de vez na indústria nesse setor.

Embora ainda possua muitas limitações no setor automotivo, atualmente a manufatura aditiva cada vez mais deixa de ser apenas uma técnica para criar protótipos, em que os fabricantes de automóveis possam usar para fabricar peças finais, e isso vale para todas as aplicações. Assim, as tecnologias de manufatura aditiva desempenham um papel importante na promoção da competitividade entre as empresas e no avanço da tecnologia como um todo (BEAMLER, 2018).

Segundo Giffi, Gangula e Illinda (2014), a BMW utilizou técnicas de manufatura aditiva para produzir ferramentais manuais de testes e montagem. As peças produzidas eram 72% mais leves que as ferramentas tradicionais, e essa aplicação, mesmo sendo apenas em ferramentas para testes, resultou numa redução de 58% nos custos gerais e 92% no tempo de projeto.

### **5.1.4 Últimas tendências**

O Quadro 10 resume as tendências apresentadas no estudo realizado por Pérez *et al* (2020) sobre os recentes avanços na manufatura aditiva.

Quadro 10 - Resumo das últimas tendências da manufatura aditiva

Últimas tendências na manufatura aditiva	
Processos híbridos	Máquinas que combinam tecnologias de manufatura aditivas e subtrativas estão surgindo nos últimos anos, diminuindo assim as limitações individuais dos processos.
Novos materiais e multimateriais	O surgimento de novos materiais que podem ser utilizados em MA como por exemplo biomateriais e multimateriais, permitindo diversas aplicações na medicina e nas mais diversas áreas
Impressão 4D	Termo atribuído a estruturas produzidas por manufatura aditiva que se modificam com o tempo, como por exemplo, componentes com automontagem, autorreparação dentre outros.
Controle e monitoramento	Desenvolvimento de processos que monitoram a qualidade das peças produzidas por MA.
Otimização dos processos	Diversos parâmetros influenciam na qualidade final dos objetos impressos, e tem-se observado um grande foco em otimizar esses parâmetros.
Micromanufatura	Manufatura aditiva aplicada em microescala para aplicações específicas.
Novas tecnologias	Diversas novas tecnologias têm surgido no mercado, como por exemplo a <i>Multi Jet Fusion</i> (HP), <i>Digital Light Synthesis</i> (Carbon) dentre outras.
Aquisição de dados	É a representação de informações do mundo real em um computador, de modo que possam ser manipulados. Com vasta aplicação na medicina e engenharia reversa, tem-se observado grande evolução nessa área.
Sustentabilidade	Um dos temas mais discutidos mundialmente, e embora o principal motivador para adoção da MA ser econômico, diversas pesquisas mostram o potencial e possibilidades de reduzir impactos ambientais com a tecnologia, uso de materiais recicláveis dentre outros.

Fonte: Adaptado de Pérez et al (2020)

Manufatura Híbrida é uma designação utilizada para processos que combinam diferentes tecnologias como forma de superar suas limitações individuais e assim se beneficiar de ambas. Na hibridização da manufatura aditiva com técnicas de manufatura convencionais pode-se aumentar a aplicabilidade da tecnologia e ser uma solução para superar limitações relacionadas à produtividade, defeitos metalúrgicos, falta de precisão, acabamento superficial dentre outros (PRAGANA *et al.*, 2021).

## **6 DISCUSSÃO**

No seguinte tópico são discutidos os assuntos pertinentes tratados no trabalho, de acordo com o maior conhecimento obtido sobre o tema durante a pesquisa. Serão abordados as terminologias, as categorias, vantagens e limitações, aplicações e perspectivas para o futuro da manufatura aditiva.

### **6.1 Terminologia e padronizações da manufatura aditiva**

Durante a pesquisa, ficou claro que no surgimento da manufatura aditiva, com o desenvolvimento da Estereolitografia no início dos anos 1980, a ideia central da tecnologia era produzir protótipos. De maneira autoexplicativa, o termo atribuído à tecnologia naquela época e até muito tempo depois, foi prototipagem rápida. Nessa terminologia a tecnologia limitava-se à representação física de modelos não funcionais que seriam posteriormente fabricados por métodos convencionais e assim destinados às suas respectivas aplicações. Com a evolução das técnicas de MA, percebeu-se a possibilidade de produzir peças finais por meio da tecnologia e não apenas protótipos, invalidando a terminologia da época, e assim o termo “manufatura aditiva” foi designado, conforme visto nas normas apresentadas. Aditiva, pois a ideia é produzir objetos adicionando material camada por camada, em contraste com as técnicas convencionais, em que ocorre remoção de material de um bloco maior para se obter o desejado, ou seja, a subtração de material, sendo relacionada na literatura muitas vezes por manufatura subtrativa. Analisando a literatura percebeu-se que essa mudança de nomenclatura surgiu justamente da necessidade de expandir as aplicações da tecnologia, tendo em vista as constantes evoluções e aplicações mostradas no decorrer do trabalho.

Outro fator que vale a pena ser comentado em relação às padronizações, diz respeito às categorias da manufatura aditiva. Durante a coleta de dados e a roteirização dos tópicos, ficou evidente a dificuldade de separar as tecnologias de MA em categorias bem definidas e diferenciadas, o que pode dificultar o entendimento dos processos. Apesar das padronizações, muitos autores utilizam nomenclaturas diferentes para um processo, mas que no fim se referem à mesma coisa. Como visto, a tendência por utilizar os termos registrados em patentes ainda é bem comum em alguns autores, outros já adotam os termos padronizados, subdividindo as categorias como foi realizado no atual trabalho.

Além disso, por ser uma tecnologia relativamente recente, e com um crescimento muito rápido nos últimos anos no mercado, várias novas tecnologias vem surgindo, o que dificulta ainda mais essa classificação. Sendo necessário uma abordagem mais voltada para os recentes avanços da tecnologia para uma melhor compreensão de todos os processos disponíveis atualmente.

Entretanto, embora diversas novas tecnologias tenham surgido no mercado, na maioria dos casos o conceito é semelhante aos já conhecidos e abordados nas literaturas. O atual trabalho seguiu a classificação das padronizações da ASTM e buscou preferencialmente literaturas que a seguissem também, para melhor compreensão do assunto para descrevê-lo.

## **6.2 Categorias de manufatura aditiva**

Todas as diferentes tecnologias de manufatura aditiva, apesar de seguirem o mesmo princípio de adição de material camada por camada, possuem variações importantes como: fonte de energia para fusão do material (laser, feixe de elétrons, arco elétrico entre outros); processos físicos diferentes para a junção das camadas; tipo de material utilizado e sua forma (pó, filamento, arame, folha, líquido); estrutura necessária na máquina; material auxiliar (aglutinantes e revestimentos); dentre outras variações. Essas diferenças devem ser consideradas e analisadas para melhor aproveitamento de suas aplicações. O Anexo A fornece uma visão geral das sete categorias de manufatura aditiva e principais características.

## **6.3 Vantagens e limitações**

Com relação às vantagens da manufatura aditiva, fica evidente a partir da revisão da literatura, que a redução do número de processos para se obter o produto final é um dos principais atrativos da tecnologia. Isso ocorre em parte devido eliminação de ferramentais e procedimentos operacionais sequenciais comuns na manufatura convencional, à característica de produzir objetos diretamente de modelos virtuais e da forma geométrica que desejar, de modo a possibilitar a inovação e competitividade do mercado com novos produtos e funcionalidades, fabricando o que a criatividade permitir.

Com a produção a partir de modelos virtuais, inúmeros procedimentos inerentes à fabricação podem ser considerados desde o início, diretamente do

computador, diminuindo o tempo geral de desenvolvimento do projeto e também de modificações, incluindo reparos e otimizações. Como mostrado em algumas aplicações na indústria, mesmo quando a MA foi aplicada apenas em ferramentas de teste ou mesmo protótipos, obteve um grande benefício, tanto em redução do tempo de produção como de custos, devido à essa possibilidade de analisar todo o processo virtualmente.

Outro desencadeador da redução do número de operações e uma consequência do apresentado acima é a descentralização da produção e assim tornar menos complexa a cadeia logística. Com essa simplificação, tem-se uma maior proximidade entre fornecedores, produtores e clientes, gerando impactos positivos tanto econômicos, ambientais, na eficiência de material utilizado e com relação ao tempo de resposta do mercado. Os modelos de negócios, com isso, tendem cada vez mais para o *Business to Consumer* (B2C) do que *Business to Business* (B2B), ou seja, produtores vendendo mais para o consumidor final, e não para outras empresas venderem seus produtos, e assim diminuindo a cadeia logística e aumentando a margem de lucro. De modo que o produtor e o vendedor sejam unificados e que possam reagir às tendências de mercado mais rapidamente e o consumidor possa adquirir o que deseja, da forma que deseja, estando mais próximo de quem o vende.

Entretanto, no decorrer do trabalho algumas características da manufatura se destacaram negativamente. Pelo próprio princípio de funcionamento de adicionar material camada por camada, limitações com relação às dimensões da peça aparecem, visto que quanto maior a peça, mais material deve ser adicionado e maior será o tempo de produção, e peças maiores requerem máquinas e estruturas maiores de impressão 3D. Outras limitações também se destacam: os custos iniciais elevados; falta de padronizações e um certo desconhecimento ainda sobre a tecnologia; a dificuldade de aplicar a tecnologia em grandes volumes de produção, principalmente com relação à velocidade de produção; presença de tensões superficiais e empenamentos; anisotropia; desalinhamento das camadas, sendo necessário em praticamente todas as técnicas de MA o pós-processamento para melhor acabamento e propriedades mecânicas; a forma da matéria-prima utilizada, geralmente as técnicas de manufatura aditiva utilizam material em formas reduzidas como pó, o que aumenta os custos relacionados; e embora a gama de materiais disponíveis estejam aumentando (metais, cerâmicos, polímeros, biomateriais, multimateriais, compósitos), ainda é um fator limitante citado em muitos autores, requerendo mais pesquisas e investigações nesse aspecto.

Como visto, as tecnologias de manufatura aditiva simplificam a produção de peças complexas, e quando se é aplicado em metais essa vantagem se destaca ainda mais, em virtude da gama de aplicações possíveis. Assim, é interessante conhecer os processos disponíveis e utilizados em metais para melhor compreensão de suas aplicações na engenharia.

#### **6.4 Aplicações**

Com relação as aplicações, pela própria natureza do setor aeroespacial, com a produção de volumes baixos comparados a outros setores da indústria e peças com geometrias complexas para melhor performance, a indústria aeroespacial é uma das mais beneficiadas com a tecnologia. O fator peso crucial na eficiência dos componentes do setor é um grande impulsionador na aplicação das tecnologias de manufatura aditiva, aliado uma boa resistência encontrada em materiais como tungstênio e outros materiais com boa relação resistência e peso. De maneira semelhante, diversas aplicações podem ser justificadas simplesmente pela redução do peso e melhoria na performance dos componentes, como na indústria automotiva, na arquitetura e nos bens de consumo.

Na indústria médica, o grande crescimento observado se dá também devido aos avanços da medicina como um todo, e da necessidade de evolução. A alta personalização proporcionada pelas técnicas de MA são de grande valor na área médica, principalmente em relação a próteses, aparelhos odontológicos, auditivos, instrumentais cirúrgicos, entre outros. Se mostrou útil também, e desde o surgimento da tecnologia, no uso educacional para auxiliar em cirurgias e diagnósticos, com a fabricação de modelos de órgãos. Buscando informações sobre a aplicação das técnicas na medicina, no período atual de isolamento social as técnicas também se mostraram úteis na fabricação de máscaras, escudos faciais, cotonetes nasais, abrigos e enfermarias emergenciais e abriu portas para aumentar ainda mais a aplicação da MA no setor. Não foi abordado no trabalho a manufatura aditiva de biomateriais pois requer um estudo mais específico, mas é uma área em expansão.

A nível nacional, percebeu-se uma carência, ainda, de grandes aplicações da manufatura aditiva se comparado a outros países, principalmente da América do Norte e Europa.

## 6.5 Perspectivas para o futuro

Para o mercado, a pesquisa mostrou o grande potencial de crescimento da manufatura aditiva, e se os principais fatores limitantes forem contornados espera-se um potencial ainda maior. Produzir peças com geometrias complexas e aparências inovadoras em menos operações, e com a possibilidade de combinar cores e materiais diferentes para se obter diferentes propriedades físicas, tornam a tecnologia muito atrativa com relação a fabricação. No entanto, o maior desafio ainda é unir essas vantagens para uma produção não apenas de protótipos, mas de peças funcionais e que sejam viáveis para a produção de grandes lotes e outras aplicações nos mais variados setores da indústria.

Com isso, não se espera que a manufatura aditiva substitua por completo a manufatura convencional, pelo menos não em pouco tempo, a tendência é cada vez mais as duas tecnologias andem juntas, de modo a se aproveitar dos benefícios de ambas. O otimismo vem do enorme interesse das grandes empresas em fazer com que a manufatura aditiva seja o futuro da indústria, e os crescentes investimentos na área demonstram isso. Esforços estão sendo realizados nos últimos anos para que cada vez mais produtos com melhores aspectos físicos e funcionais possam ser produzidos por manufatura aditiva, e a tecnologia possa se consolidar de vez no mercado. Por agora, conclui-se que adoção da manufatura aditiva por completo em uma empresa, deve ser justificado com o aproveitamento ao máximo de suas vantagens sobre a manufatura convencional, para que seja viável economicamente e em termos de produção.

Sobre o próximo passo, de acordo com estudos sobre as tendências na manufatura aditiva, percebe-se que a manufatura híbrida vem ganhando espaço e sendo cada vez mais estudada, já como uma tentativa de contornar as limitações da MA. Novas tecnologias surgindo, aprimoramento de processos para controle de qualidade das peças, até a chamada impressão 4D, mostram que a evolução tecnológica na manufatura aditiva tem pressa para acontecer. O assunto sustentabilidade é algo em foco em todo o mundo, e o lado sustentável da tecnologia também é outro objeto de estudo frequente observado na literatura e que nos próximos anos espera-se observar cada vez mais aplicações da manufatura aditiva não apenas visando a economia, mas também a sustentabilidade.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manufatura aditiva já é uma realidade para a indústria, uma ideia que começou com uma simples produção de protótipos, hoje já é estudada e encarada como algo que pode revolucionar o mercado, e já conta com resultados satisfatórios em suas aplicações.

A realização da pesquisa bibliográfica foi motivada pela ascensão da manufatura aditiva nos últimos anos, e pela falta de informação sobre o tema no curso de graduação de engenharia mecânica, civil e produção. Faz-se necessário estudar e compreender seus potenciais, não só por profissionais e estudantes de engenharia, mas em várias áreas de estudo. Em virtude disso, o trabalho apresentou uma revisão geral da tecnologia e contribuiu para melhor compreensão do tema, de suas características e aplicações na indústria.

Foi abordado um breve histórico, mostrando a evolução das técnicas aditivas ao longo do tempo, assim como suas diferentes terminologias. As principais tecnologias de manufatura aditiva foram apresentadas de acordo com a classificação das normas, explicando seus princípios de funcionamento e variações presentes. A falta de padronização ainda observada na literatura e os inúmeros novos processos que surgem devido ao crescimento da tecnologia, foram fatores que dificultaram a revisão desse tópico.

Depois, uma série de aplicações na indústria foi apresentada, mostrando a corrida por parte das empresas em incluir a manufatura aditiva em seus projetos, principalmente no setor aeroespacial. Fica evidente que a manufatura aditiva contribui para o avanço da tecnologia de maneira geral, e que impulsiona a criatividade dos produtores e conseqüentemente a competitividade no mercado.

Diante do apresentado, percebe-se que apesar das limitações, a manufatura aditiva caminha para se consolidar no mercado e no cotidiano de todos, e a indústria está se esforçando para isso.

## **8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Futuros estudos podem ser realizados para ampliar os conhecimentos obtidos na atual pesquisa, como:

- a) revisão dos materiais disponíveis para a tecnologia, abordando suas propriedades mecânicas, detalhando a que aplicações são destinados e recomendados de acordo com suas propriedades, pós-processamentos utilizados na indústria, além de investigar futuros materiais em estudo por parte da comunidade científica;
- b) revisão dos recentes avanços e novos processos relacionados à manufatura aditiva, em especial os processos híbridos;
- c) pesquisar no mercado nacional o quanto de manufatura aditiva está sendo realizada, as empresas que estão utilizando e o nicho dos consumidores;
- d) realizar estudos de caso em empresas que adotaram as técnicas de manufatura aditiva, a fim de observar os impactos dessa aplicação em termos de valores.

## REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS. **Nossa História**, c2021. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/our-story>. Acesso em: 12 dez. 2020.

ADDITIVE manufacturing can reduce industry's environmental impact. **The Engineer**, 2018. Disponível em: <https://www.theengineer.co.uk/additive-manufacturing-can-reduce/>. Acesso em 7 jan. 2021

AIRBUS. **Airbus tests high-tech concepts with an innovative 3D-printed mini aircraft**, 2016. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/06/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft.html>. Acesso em: 23 fev. 2021.

AIRBUS. **BRIDGING the gap with 3D printing**, 2018. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/04/bridging-the-gap-with-3d-printing.html>. Acesso em 25 fev. 2021.

ALMEIDA, S. M. C. D. **Estudo sobre Perspetiva de Aplicação de Tecnologia de Manufatura Aditiva ao Setor Aeronáutico**. Dissertação (Mestrado). Universidade da Beira Interior. Engenharia Aeronáutica, 2017.

AMFG. **Industrial Applications of 3D Printing: The Ultimate Guide**, c2020. Disponível em: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/>. Acesso em: 22 fev. 2021.

ARMSTRONG, C. Post processing for FDM printed parts. **3D Hubs**, 2021. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>. Acesso em: 12 jan. 2021.

ATTARAN, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business Horizons**, v. 60, n. 5, p. 677-688, 2017.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Almedina, 2011.

BASETTO, Murilo. Como a impressão 3D no novo avião supersônico XB-1 reduziu em 98% o custo de uma peça. **AeroIn**, 2020. Disponível em: <https://www.aeroIn.net/impressao-3d-aviao-supersonico-xb-1/>. Acesso em: 2 mar. 2021.

BAUMERS, M.; DICKENS, P.; TUCK, C.; HAGUE, R. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. **Technological forecasting and social change**, v. 102, p. 193-201, 2016.

BEAMLER. **Business cases: 3D printing in the automotive industry**, 2018. Disponível em: <https://www.beamler.com/3d-printing-in-the-automotive-industry/>. Acesso em 3 mar. 2021.

BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, p. 389-405, 2016.

BOISSONNEAULT, Tess. Porsche unveils 3D printed automotive seats with custom comfort. **3D Printing Media Network**, 2020. Disponível em: <https://www.3dprintingmedia.network/porsche-3d-prints-bespoke-automotive-bucket-seats/>. Acesso em: 1 mar. 2021

BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G. *et al.* Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 66, n. 2, p. 659-681, 2017.

BRASKEM. **Braskem lança portfólio para impressão 3D na América do Sul**, 2020. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/paratletismo-noticia-detalle/braskem-lanca-portfolio-para-impressao-3d-na-america-do-sul>. Acesso em: 28 fev. 2021.

BROMBERGER, J.; KELLY, R. Additive manufacturing: A long-term game changer for manufacturers. **McKinsey & Company**, 2017.

BROOKS, Robert. GE, Siemens Invest, Re-Commit to Metal Manufacturing. **Foundry**, 2016. Disponível em: <https://www.foundrymag.com/melt-pour/article/21928887/ge-siemens-invest-recommit-to-metal-manufacturing>. Acesso em: 23 fev. 2021

BUCHANAN, C.; GARDNER, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. **Engineering Structures**, v. 180, p. 332-348, 2019.

CARLOTA, V. Boeing 777X's first flight with more than 300 3D printed parts. **3D Natives**, 2020. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/boeing-777x-300-3d-printed-parts-290120205/#!>. Acesso em: 4 fev. 2021.

CAROLO, Lucas. The 7 Main Types of Additive Manufacturing. **All3DP**, 2020. Disponível em: <https://all3dp.com/2/main-types-additive-manufacturing/>. Acesso em: 21 jan. 2021

CHENNAKESAVA, P.; NARAYAN, Y. S. Fused deposition modeling-insights. **International Conference on Advances in Design & Manufacturing ICAD&M**, v. 14, p. 1345-1350, 2014.

CHOI, S.; SAMAVEDAM, S. Modelling and optimisation of rapid prototyping. **Computers in industry**, v. 47, n. 1, p. 39-53, 2002.

COTTELEER, M.J. 3D opportunity for production, Additive manufacturing makes its (business) case. **Deloitte Review**, 2014. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/deloitte-review/issue-15/additive-manufacturing-business-case.html>. Acesso em: 10 jan. 2021.

CULMONE, C.; SMIT, G.; BREEDVELD, P. Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 461-473, 2019.

DESPA, V.; GHEORGHE, I. G. Study of selective laser sintering: a qualitative and objective approach. **Scientific Bulletin of Valahia University Materials and Mechanics**, v. 6, p. 150-155, 2011.

DIEGEL, Olaf. Odd Guitar Construction. **ODD Guitars**, 2011. Disponível em: <https://www.oddguitars.com/construction.html>. Acesso em 1 jan. 2021.

EOS. **Ariane Group Future Ariane Propulsion Module Simplified**, c2021. Disponível em: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications/aerospace-additive-manufacturing-for-ariane-injection-nozzles>. Acesso em: 25 fev. 2021.

ERICKSON, Angelle. The History of 3D Printing: A 3D Printing Timeline. **Computer Aided Technology**, 2019. Disponível em: <https://www.cati.com/blog/2019/02/history-of-3d-printing/>. Acesso em: 14 dez. 2020.

FIELD, Madeleine. Slowing Coronavirus Spread with 3D-Printed Hands-Free Door Openers. **Materialise**, 2020. Disponível em: <https://www.materialise.com/en/blog/slowing-coronavirus-spread-3d-printed-hands-free-door-openers>. Acesso em: 2 mar. 2021

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of cleaner Production**, V. 137, p. 1573-1587, 2016.

FORMLABS. **SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers**, c2021. Disponível em: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>. Acesso em: 28 jan. 2021.

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and performance**, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

FRIED, Simon. Additive Manufacturing Cost Drivers: 4 Key Considerations. **Nano Dimension**, 2019. Disponível em: <https://www.nano-di.com/blog/2019-additive-manufacturing-cost-drivers-4-key-considerations>. Acesso em: 9 jan. 2021

FUSED Deposition Modeling. **Druckwege 3D Printing**, [2020?]. Disponível em: <https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>. Acesso em: 15 fev. 2021.

GAO, W. *et al.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, p. 65-89, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GIFFI, C. A.; GANGULA, B.; ILLINDA, P. 3D opportunity in the automotive industry. **Additive manufacturing hits the road: Deloitte University Press**, 2014.

GKN AEROSPACE. **GKN Aerospace And Oak Ridge National Laboratory Join Forces On Additive Manufacturing**, 2017. Disponível em: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2017/gkn-aerospace-and-oak-ridge-national-laboratory-join-forces-on-additive-manufacturing/>. Acesso em: 23 fev. 2021

GKN AEROSPACE. **GKN Aerospace Opens World's Largest Additive Manufacturing Pilot Production Cell At Oak Ridge National Laboratory**, 2019. Disponível em: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2019/gkn-aerospace-opens-worlds-largest-additive-manufacturing-pilot-production-cell-at-oak-ridge-national-laboratory/>. Acesso em: 23 fev. 2021

GOLDBERG, Diana. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). **Redshift by Autodesk**, 2018. Disponível em: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>. Acesso em: 14 dez. 2020.

GONZÁLEZ, Carlos M. Infographic: The History of 3D Printing. **The American Society of Mechanical Engineers**, 2020. Disponível em: <https://www.asme.org/topics-resources/content/infographic-the-history-of-3d-printing>. Acesso em: 14 dez. 2020.

GREGURÍĆ, Leo. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?. **All3DP**, 2018. Disponível em: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>. Acesso em: 14 dez. 2020.

GREGURÍĆ, Leo. What Is Binder Jetting? – 3D Printing Simply Explained. **All3DP**, 2019. Disponível em: <https://all3dp.com/2/what-is-binder-jetting-3d-printing-simply-explained/>. Acesso em: 10 fev. 2021.

GREGURÍĆ, Leo. 3D Printing Post-Processing: 10 Easy Techniques. **All3DP**, 2021. Disponível em: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>. Acesso em: 14 jan. 2021

GRIMSHAW, Jack. What is supply chain? A definitive guide. **Supply Chain Digital**, 2020. Disponível em: <https://www.supplychaindigital.com/supply-chain-2/what-supply-chain-definitive-guide>. Acesso em 16 fev. 2021

GS1 BRASIL. **74% das empresas planejam investir em impressão 3D em 2021**, 2020a. Disponível em: <https://noticias.gs1br.org/74-das-empresas-planejam-investir-em-impressao-3d-em-2021/>. Acesso em 24 fev. 2021

GS1 BRASIL. **Impressão 3D: como essa tecnologia tem sido aplicada?**, 2020b. Disponível em: <https://noticias.gs1br.org/impressao-3d-como-essa-tecnologia-tem-sido-aplicada/>. Acesso em: 24 fev. 2021.

HALTERMAN, T. Blueprinter M3 - Powerful & Quiet Selective Heat Sintering 3D Printer is Unveiled. **3D Print**, 2015. Disponível em: <https://3dprint.com/70242/blueprinter-m3/>. Acesso em: 7 fev. 2021.

INDÚSTRIA recorre mais à impressão 3D, e uso da tecnologia cresce 30%. **Época Negócios Globo**, 2017. Disponível em:

<https://epocanegocios.globo.com/Economia/noticia/2017/02/industria-recorre-mais-impressao-3d-e-uso-da-tecnologia-cresce-30.html>. Acesso em 24 fev. 2021

ISO/ASTM 52900. **Additive manufacturing - General principles - Terminology**, 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. Acesso em 26 jan. 2021.

KAUPPILA, Ille. Multi Jet Fusion (MJF) 3D Printing – Simply Explained. **All3DP**, 2021. Disponível em: <https://all3dp.com/1/multi-jet-fusion-mjf-3d-printing-simply-explained/>. Acesso em: 2 mar. 2021.

KAZMER, D. O.; COLON, A. Injection printing: additive molding via shell material extrusion and filling. **Additive Manufacturing**, v. 36, 2020.

KETY, S. POST-PROCESSING, the last step in the manufacturing process. **3D Adept Media**, 2020. Disponível em: <https://3dadept.com/post-processing-the-last-step-in-the-manufacturing-process/>. Acesso em 14 jan. 2021.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. **Computers in industry**, 65, n. 1, p. 50-63, 2014.

KOFF, W.; GUSTAFSON, P. 3D Printing and the Future of Manufacturing. **CSC Leading Edge Forum**, 2012.

KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, v. 159, p. 1-42, 2020.

LEE, B. Introduction to  $\pm 12$  degree orthogonal digital micromirror devices (dmds). **Texas Instruments**, 2008.

LETTORI, J. *et al.* Additive manufacturing adoption in product design: an overview from literature and industry. **Procedia Manufacturing**, v. 51, p. 655-662, 2020.

LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J.-P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. **CIRP annals**, 52, n. 2, p. 589-609, 2003.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing Binder Jetting**, c2021b. Disponível em:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>. Acesso em: 13 fev. 2021.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing Directed Energy Deposition**, c2021e. Disponível em:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>. Acesso em: 22 fev. 2021.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing Material Jetting**, c2021c. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>. Acesso em: 14 fev. 2021.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing Powder Bed Fusion**, c2021a. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>. Acesso em: 7 fev. 2021.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing Sheet Lamination**, c2021d. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>. Acesso em: 16 fev. 2021.

MANI, M.; LYONS, K. W.; GUPTA, S. Sustainability characterization for additive manufacturing. **Journal of research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 119, p. 419-428, 2014.

MANYIKA, J. *et al.* **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**. McKinsey Global Institute San Francisco, 2013.

MATERIAL Extrusion – FDM. **3D Experience**, 2021. Disponível em: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>. Acesso em: 19 fev. 2021

MCLAREN F1 Racing adota manufatura aditiva da Stratasys para melhorar desempenho dos carros em 2017. **It Forum**, 2017. Disponível em: <https://itforum.com.br/noticias/mclaren-formula-1-racing-adota-manufatura-aditiva-da-stratasys-para-melhorar-desempenho-dos-carros-em-2017/>. Acesso em: 26 fev. 2021

MONTEIRO, M. T. F. **A Impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Do Estado De Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Design, 2015.

MOSTAFAEI, A. *et al.* Binder jet 3D printing–Process parameters, materials, properties, and challenges. **Progress in Materials Science**, 2020.

PALLAROLAS, E. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. Monografia (Graduação). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2013.

PAZHAMANNIL, R. V.; GOVINDAN, P. Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

PRAGANA *et al.* Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 2, 2021.

PÉREZ, M.; CAROU, D.; RUBIO, E. M.; TETI, R. Current advances in additive manufacturing. **Procedia Cirp**, v. 88, p. 439-444, 2020.

QUAN, Z.; WU, A.; KEEFE, M.; QIN, X. *et al.* Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges. **Materials Today**, v. 18, n. 9, p. 503-512, 2015.

REDWOOD, Ben. Additive manufacturing technologies: An overview. **3D Hubs**, 2021. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>. Acesso em: 30 jan. 2021.

REDWOOD, B.; SCHFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook: technologies, design and applications**. 3D Hubs, 2017.

REPORTS AND DATA. **Additive Manufacturing Market Analysis By Material Type (Metals, Thermoplastics, Ceramics, Others), By Metal Type (Titanium, Stainless Steel, High-Performance Alloys, Aluminum, Precious Metals, Others), By Polymer Type, By Ceramics Type, By Process, By End-use, And Segment Forecasts To 2027**, 2020. Disponível em: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/additive-manufacturing-market>. Acesso em 2 fev. 2021.

SAKS, F. D. C. **Busca booleana: Teoria e prática**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Paraná. Gestão da Informação, 2005.

SANTOS, F. P. **Futuras Tecnologias Aplicadas À Arquitetura: Do Digital Para O Material**. Tese (Mestrado). Universidade de Coimbra. Departamento de Arquitetura, 2018.

SCHOTTE, Greg. A Brief History of Additive Manufacturing. **TriMech Blog**, 2019. Disponível em: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>. Acesso em: 12 dez. 2020

SCHWAB, Klaus. The Global Competitiveness Report 2019. **World Economic Forum**, 2019.

SCULPTEO. **Why is 3D Printing best suited for mass-customization?** c2021. Disponível em: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-business/why-is-3d-printing-best-suited-for-mass-customization/>. Acesso em: 1 jan. 2021

SHER, Davide. Inside the Volkswagen 3D printing center at the Autostadt. **3D Printing Media Network**, 2018. Disponível em: <https://www.3dprintingmedia.network/inside-the-volkswagen-3d-printing-center-at-the-autostadt/>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SIEMENS Additive Manufacturing at Hannover Fair. **Arc Advisory Group**, 2018. Disponível em: <https://www.arcweb.com/blog/siemens-additive-manufacturing-hannover-fair>. Acesso em 1 mar. 2021

SIEMENS. **Nossa História, Material Extrusion**, c2021a. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/material-extrusion/53981>. Acesso em: 15 fev. 2021

SIEMENS. **RAPID Advances in 3D Printing**, c2021b. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/additivemanufacturing/additive-manufacturing.html>. Acesso em: 23 fev. 2021.

SINGH, D.D; MAHENDER, T.; REDDY, A.V. Powder bed fusion process: A brief review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

SINK, Andrew. Building an Acetone Vapor Bath for Smoothing 3D-Printed Parts. **Sink Hacks**, 2014. Disponível em: <http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>. Acesso em 12 jan. 2021.

SPRINKLE, Tim. The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing. **ASTM International**, c2021. Disponível em: <https://sn.astm.org/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html>. Acesso em: 20 dez. 2020.

SUN, C. *et al.* Additive manufacturing for energy: A review. **Applied Energy**, v. 282, 2021.

TAMEZ, M. B. A.; TAHA, I. A Review of Additive Manufacturing Technologies and Markets for Thermosetting Resins and their Potential for Carbon Fiber Integration. **Additive Manufacturing**, v. 37, 2020.

TAREQ, M. S.; RAHMAN, T.; HOSSAIN, M.; DORRINGTON, P. Additive manufacturing and the COVID-19 challenges: An in-depth study. **Journal of Manufacturing Systems**, 2021.

THE Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2021. **3D Sourced**, 2020. Disponível em: [https://www.3dsourced.com/3d-printers/history-of-3d-printing/#1984\\_-\\_87\\_Early\\_History\\_of\\_3D\\_printing\\_invention\\_of\\_Stereolithography](https://www.3dsourced.com/3d-printers/history-of-3d-printing/#1984_-_87_Early_History_of_3D_printing_invention_of_Stereolithography). Acesso em 4 jan. 2021.

TOFAIL, S. A.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S. *et al.* Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials today**, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

VAROTSIS, A.B. Introduction to SLA 3D printing. **3D Hubs**, 2021. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>. Acesso em: 24 jan. 2021.

VEIT, D. R. **Impactos da manufatura aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos**. Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2018.

VOLKSWAGEN. **Brake Calipers and Wheels? Now from a 3D printer!**, 2018.

Disponível em: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2018/12/brake-calipers-and-wheels-now-from-a-3d-printer.html#>. Acesso em: 28 fev. 2021.

VRIES, C. Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. **Ultimaker**, 2017. Disponível em:

<https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed>. Acesso em: 1 mar. 2021.

WOHLERS, Terry. Worldwide Trends in Additive Manufacturing. **Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva**, 1º., 2020. Disponível em:

<https://eventos.congresse.me/cbmadi>. Acesso em: 30 nov. 2020.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. **International scholarly research notices**, v. 2012, 2012.

YARAGATTI, N.; PATNAIK, A. A review on additive manufacturing of polymers composites. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

YEUNG, Jeff. 1016 Industries Debuts Its First-Ever Permanent 3D-Printed Body Kit for the Ferrari F8. **Hypebeast**, 2021. Disponível em: <https://hypebeast.com/2021/2/1016-industries-3d-printed-carbon-fiber-ferrari-f8-kit>. Acesso em: 27 fev. 2021.

YILMAZ, Ö. F. Examining additive manufacturing in supply chain context through an optimization model. **Computers & Industrial Engineering**, v. 142, 2020.

ZIAEE, M.; CRANE, N. B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 781-801, 2019.

## ANEXO A – RESUMO DAS CATEGORIAS DE MANUFATURA ADITIVA

Categoria	Fotopolimerização em Cuba	Fusão em Leito de Pó (PBF)	Jateamento de Aglutinante (BJ)	Jateamento de Material (MJ)
Descrição	Tem-se a formação de objetos tridimensionais a partir da reação de cura de uma resina fotopolimérica líquida em um recipiente, através da exposição a uma fonte de luz, normalmente laser ou UV. As principais variações presentes nessa categoria estão na forma como a camada é solidificada, no processo DLP a camada é formada de uma só vez por meio de um dispositivo DMD.	Tem-se a produção de peças usando uma fonte de calor (laser ou feixe de elétrons) para fundir material em pó, camada por camada, por um caminho predeterminado. Um mecanismo de reposição de pó atua permitindo que as outras camadas sejam formadas. As principais variações estão relacionadas à fonte de calor utilizada e ao material utilizado no processo.	Ocorre a formação de objetos utilizando aglutinante para unir material em pó na forma desejada. Apesar de ser classificada apenas como um processo (BJ) e não dividida em diferentes tipos como nos processos anteriores, possui variações com relação ao material utilizado.	Tem-se a deposição de gotículas de material através de um cabeçote, camada por camada, para formar o objeto desejado. O material é solidificado com laser pelo mesmo cabeçote. A deposição pode ser contínua ou sob demanda.
Tipos	SLA, DLP.	SLS, SHS, SLM, DMLS, EBM.	BJ	Modo contínuo, DOD
Materiais	Plásticos e resinas fotopoliméricas no estado líquido.	Materiais diversos na forma de pó, os mais comuns são metais e polímeros.	Materiais metálicos, cerâmicos e polímeros na forma de pó.	Polímeros e plásticos.
Aplicações recomendadas	Devido à superfície lisa e da elevada precisão das peças produzidas, essa tecnologia é comumente utilizada para aplicações médicas, como na produção de aparelhos auditivos e odontológicos, além de protótipos diversos e moldes.	Aplicações em que exigem uma alta complexidade geométrica e boas propriedades mecânicas, como nas indústrias aeroespacial, médica e automotiva.	Comumente utilizada para fabricação de moldes, modelos coloridos e peças metálicas funcionais. Possui propriedades mecânicas inferiores se comparada à fusão de leito em pó, porém, geralmente possui um custo menor.	Geralmente utilizado na fabricação de ferramentas e moldes de injeção, protótipos, modelos de órgãos impressos dentre outras aplicações semelhantes.

Categoria	Laminação em Folha	Extrusão de Material	Deposição de Energia Direcionada (DED)
Descrição	Processo no qual lâminas ou folhas de material são unidos para formar uma peça, seu funcionamento se dá com o corte camada por camada de materiais na forma de laminas (folha) por meio de um laser ou ferramenta de corte, cada uma dessas folhas representam uma camada do modelo virtual do objeto desejado.	É utilizado filamento material que é empurrado através de um bocal aquecido, fundindo o material e extrudando-o, camada por camada, formando o objeto desejado. Categoria normalmente referida como FDM.	As peças são formadas à medida que o material é depositado na área de trabalho, devido a um cabeçote que concentra um laser de alta potência em um substrato, para criar uma poça de fusão na qual o material em pó ou arame será injetado simultaneamente ao laser.
Tipos	LOM, UAM	FDM ou FFF	DED
Materiais	Praticamente qualquer material que pode ser enrolado em forma de folha, comumente utilizado papel, plástico e metais.	Geralmente são utilizados materiais polímeros e plásticos.	Predominantemente aplicado em metais.
Aplicações recomendadas	Geralmente utilizado para protótipos ou peças com geometrias mais simples ou componentes que irão passar por outros processos de usinagem para serem aplicados.	Tecnologia de manufatura aditiva mais popular a nível amador devido à sua acessibilidade. Aplicações diversas em protótipos, carcaças de componentes eletrônicos, acessórios e peças funcionais normalmente não comerciais.	Processo normalmente utilizado para reparar ou restaurar peças estruturais, embora também utilizada para fabricar peças, e tem se tornado cada vez mais presentes em processos de manufatura híbrida. Com isso, aplicações na indústria aeroespacial têm aumentado nos últimos anos.

Fonte: Elaborado pelo autor