

# A EVOLUÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA APLICADA A METAIS

## *THE EVOLUTION OF ADDITIVE MANUFACTURE APPLIED TO METALS*

BOUÇAS, José Augusto da Cunha<sup>1</sup>  
CAMPOS, Luiz Claudio Rego<sup>2</sup>

**Resumo:** Esta pesquisa é bibliográfica por conter nomes de autores e estudiosos famosos, conforme Gil, dois mil e dezessete e também documental, pois, embora siga os “mesmos passos da pesquisa bibliográfica,” inclui-se a Norma ASTM F dois mil e setecentos e noventa e dois – doze a. A Introdução apresenta o tema: A evolução da manufatura aditiva aplicada a metais, enfatizando que o referido processo de fabricação é usado nos setores aeronáutico, aeroespacial e automobilístico, em próteses dentárias e joias como também em peças com maior complexidade, para fabricação de componentes que, pela especificidade, precisam ter pouco peso, alta resistência mecânica e geometria complexas. O objetivo geral é demonstrar a contribuição da manufatura aditiva de metais nos dias atuais e objetivos específicos: a) relatar a melhoria da peça que se dá pelo pós-processamento; b) relatar vantagens e desvantagens com destaque na sustentabilidade e c) expor tendências e previsões do mercado. O Estado da Arte relata breve histórico da manufatura aditiva de metais, resume a descrição do processo, descreve a Técnica *Direct Energy Deposition (DED)* e a Técnica *Powder Bed Fusion (PBF)* e demonstra de forma sucinta a comparação entre o método substrativo e a manufatura aditiva. O subitem dois três descreve sobre o pós-processamento com foco na melhoria da peça, seguindo com o tratamento térmico e o acabamento superficial – rugosidade, cujo método e precisão de construção da peça são motivos de melhoria. Relata-se também sobre a prensagem isostática a quente e as variedades de ligas, demonstrando-se as vantagens como por exemplo, menor desperdício de material. Soma-se ainda, a eficiência e a criação de peças complexas as quais antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais e as desvantagens: baixo volume de produção, alto custo de material, velocidade de deposição e necessidade do pós-processamento nas peças. O Resultado e Discussão expõe conceitos e práticas de estudiosos, previsões do mercado e a evolução da procura. Nas Considerações Finais responde-se ao questionamento da pesquisa desejando-se que este trabalho contribua para o campo de conhecimentos de áreas afins, pois de certo, não se encerra em si mesmo.

**Palavras-chave:** Evolução. Manufatura. Aditiva. Metais.

**Abstract:** This research is bibliographical because it contains the names of famous authors and scholars, according to Gil, two thousand and seventeen, and also documentary because, although it follows the “same steps as bibliographical research,” it includes ASTM Standard F two thousand seven hundred and ninety-two - twelve a. The Introduction presents the theme: The evolution of additive manufacturing applied to metals, emphasizing that this manufacturing process is used in the aeronautical, aerospace and automotive sectors, in dental prostheses and jewelry, as well as in more complex parts, for the manufacture of components which, due to their specific nature, need to be light in weight, have high mechanical resistance and complex geometry. The specific objectives are: a) to report on the improvement of the part through post-processing; b) to report on the advantages and disadvantages, with an emphasis on sustainability and c) to present market trends and forecasts. The State of the Art gives a brief history of metal additive manufacturing, summarizes the description of the process, describes the Direct Energy Deposition (DED) technique and the Powder Bed Fusion (PBF) technique and briefly demonstrates the comparison between the substrative method and additive manufacturing. Sub-item two-three describes post-processing with a focus on improving the part, followed by heat treatment and

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica - Universidade Santa Úrsula - jose.boucas@souusu.com.br

<sup>2</sup> Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho - Especialista em Engenharia Ambiental - Universidade Santa Úrsula - luizclaudio.campos@usu.edu.br

surface finish - roughness, whose method and precision of construction of the part are reasons for improvement. ) and the Powder Bed Fusion (PBF) technique and briefly demonstrates the comparison between the subtractive method and additive manufacturing. Sub-item two-three describes post-processing with a focus on improving the part, followed by heat treatment and surface finish - roughness, whose method and precision of construction of the part are reasons for improvement. There is also a report on hot isostatic pressing and the varieties of alloys, showing the advantages such as less material waste. In addition, the efficiency and creation of complex parts that were previously difficult or impossible to manufacture using traditional methods and the disadvantages: low production volume, high material costs, speed of deposition and the need for post-processing on the parts. The Results and Discussion present the concepts and practices of scholars, market forecasts and the evolution of demand. The Final Considerations answer the research question and hope that this work contributes to the field of knowledge in related areas, as it is certainly not self-contained.

**Keywords:** Evolution. Manufacturing. Additive. Metals.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente estudo traz o tema: “A evolução da manufatura aditiva aplicada a metais” e demonstrará a relevância do assunto para os dias atuais, tendo em vista a manufatura aditiva de metais estar presente em diversos processos de fabricação, como por exemplo, no setor aeronáutico, aeroespacial e automobilístico, em próteses dentárias e joias como também em peças com maior complexidade, para fabricação de componentes que, pela especificidade, precisam ter pouco peso, alta resistência mecânica e geometria complexas.

O problema de pesquisa está assim fundamentado: Qual a importância da evolução da manufatura aditiva aplicada a metais? E a discussão está relacionada às etapas necessárias no pós-processamento da técnica para se obter uma peça com a qualidade desejável, como também à quantidade de metais utilizáveis, como os aços de alta resistência. Este processo está alinhado com a sustentabilidade e destaca-se que equipamentos mais acessíveis à tecnologia de manufatura aditiva têm despontado, não só como uma promissora ferramenta de prototipagem rápida, mas como uma tecnologia perfeitamente habilitadora para uma manufatura personalizada.

O engenheiro mecânico Rami Khalil (2019), cita que esta terminologia MAM inclui termos, definições de termos, descrições de termos, nomenclatura e acrônimos associados a tecnologias de fabrico aditivo, com o intuito de padronizar a terminologia utilizada por utilizadores de manufatura aditiva aplicada a metais, produtores, investigadores, educadores, imprensa/mídia e outros e a norma ASTM F2792-12<sup>a</sup>, classifica os processos de manufatura aditiva, já que muitos processos acabam levando o nome da empresa que os desenvolvem, citando ainda que o subcomitê responsável fará as revisões a cada 3 (três) anos para determinar se atende ao declarado e que estas serão feitas quando surgirem necessidades específicas.

O Objetivo Geral é demonstrar a contribuição da manufatura aditiva de metais nos dias atuais, tendo como Objetivos Específicos: a) relatar a melhoria da peça que se dá pelo pós-processamento; b) relatar vantagens e desvantagens com destaque na sustentabilidade e c) expor tendências e previsões do mercado.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Breve histórico da manufatura aditiva de metais

Schotte, (2019), cita que em 1981, no Japão, e mais precisamente no Instituto de Pesquisas de Nagoya, é onde estão origens da manufatura aditiva ou impressão conhecida como 3D, cujo processo era o desenvolvimento de um modelo para se obter objetos tridimensionais que utilizava luz ultravioleta (UV) para endurecer polímeros fotossensíveis, mas na época a tecnologia não foi comercializada.

Na mesma década, Charles Hull lançou a invenção da Estereolitografia (SLA), cujos modelos criados partem da ura de uma resina líquida por meio de raios UV ou laser. Hull ainda teve participação na fundação da *3D Systems* - empresa pioneira de impressão 3D que comercializou a primeira máquina de manufatura aditiva a SLA-1, em 1987. A SLA-1 (**Figura 1**), utilizava a tecnologia SLA, possibilitando a fabricação de peças complexas, em pouco tempo, se comparada à fabricação com outros métodos da época. (3D SYSTEMS, 2021).

**Figura 1** -Primeira máquina de MA comercializada pela SLA-1

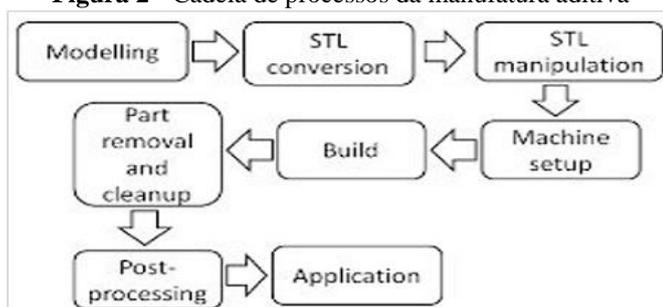


Fonte: 3D Systems (2021)

#### 2.1.1 Descrição resumida do processo

Na **Figura 2** adiante está demonstrada referida cadeia.

**Figura 2 -** Cadeia de processos da manufatura aditiva



Fonte: <https://www.includehelp.com/additive-manufacturing/process-chain.aspx>

### “Cadeia de processos da manufatura aditiva

Da descrição do CAD ao resultado físico, a AM envolve várias etapas. O processo varia de acordo com o produto. É provável que produtos menores e mais simples usem AM apenas para fins de visualização, enquanto produtos maiores e mais complexos podem incorporar AM em vários estágios e iterações ao longo do processo de desenvolvimento. Além disso, nos estágios iniciais de desenvolvimento do produto, peças ásperas podem ser necessárias, e a AM é geralmente usada devido à sua rápida capacidade de fabricação. À medida que as peças avançam no processo, elas podem precisar de limpeza e pós-processamento (como revestimento e lixamento) antes de serem usadas. Nesse sentido, a prototipagem rápida é útil devido à complexidade das formas que podem ser criadas sem envolver ferramentas.

#### **Etapa 1: CAD**

Modelos CAD que descrevem completamente a geometria externa são necessários para todas as peças AM. Qualquer software profissional de modelagem sólida CAD pode ser usado para criar isso, mas o produto final deve ser um modelo sólido ou de superfície 3D. Para criar essa imagem, equipamentos de engenharia reversa (por exemplo, laser e varredura óptica) também podem ser usados.

#### **Etapa 2: Conversão para STL**

Após a conclusão do modelo digital, o formato de arquivo STL (*Standard Tessellation Language*) deve ser usado para criar a estereolitografia. Quase todos os sistemas CAD suportam esse formato, que é como as máquinas AM se comunicam. O arquivo STL serve como base para calcular as fatias do modelo.

#### **Etapa 3: Transferir para a máquina**

Na terceira etapa, o arquivo STL é transmitido para a máquina AM. Como resultado desta etapa, é possível ajustar a construção para que ela seja posicionada e dimensionada corretamente. Um computador controla a máquina AM. A máquina AM é controlada pelo computador, esse computador gera apenas a instrução necessária na forma de códigos G e códigos M com base nos parâmetros de processo fornecidos. Ele gera instruções automaticamente, caso seja necessária alguma correção para o melhoramento da peça a ser construída, ela pode ser corrigida.

#### **Passo 4: Configuração**

Antes do início da construção, o equipamento deve ser montado. As configurações podem constituir potência, velocidade, espessura da camada e outros vários parâmetros relacionados a restrições de material e processo, etc.

#### **Etapa 5: criar**

A quinta etapa é a construção real do modelo CAD, derretendo camada por camada. Este processo pode ser semi ou totalmente automatizado, mas muitas vezes é realizado algum monitoramento online, para que a máquina não fique sem material ou que ocorra algum erro de software.

#### **Etapa 6: remoção da peça**

Uma vez que a peça é fabricada, ela deve ser removida do processo, o que normalmente é feito manualmente. Isso pode exigir interação com a máquina, que pode ter intertravamentos de segurança para garantir, por exemplo, que as temperaturas de operação sejam suficientemente baixas ou que não haja peças móveis ativas.

#### **Etapa 7: pós-processamento**

Após a construção, a peça pode precisar de algum pós-processamento antes de ser completamente concluída. É claro que, dependendo do material e do processo AM usado, algumas peças podem precisar de usinagem, limpeza, polimento, remoção de estruturas de suporte, prensagem isostática a quente (HIP) e tratamentos térmicos.

#### **Etapa 8: Aplicação**

Nesta fase, a peça pode estar pronta para uso. No entanto, também pode precisar de alguns tratamentos adicionais, como pintura ou montagem com outros componentes antes de ser totalmente utilizável. Por exemplo, eles podem exigir primer e pintura para fornecer uma textura e acabamento de superfície aceitáveis. Os tratamentos podem ser trabalhosos e demorados se os requisitos de acabamento forem muito exigentes. Eles também podem ser obrigados a ser montados com outros componentes mecânicos ou eletrônicos para formar um modelo ou produto final.” (<https://www.includehelp.com/additive-manufacturing/process-chain.aspx>).

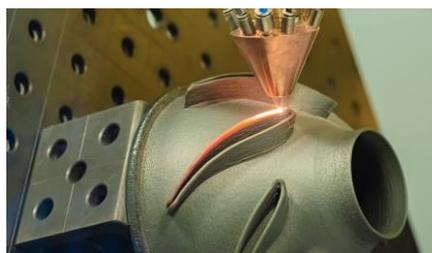
### **2.1.2 Especificações das técnicas**

#### **Técnica *Direct Energy Deposition (DED)***

Referida técnica é feita pela deposição por energia direta – DED, (**Figura 3**), que é tipicamente formada por um braço multieixo que, através de um bocal/queimador funde o material metálico e o deposita sobre uma superfície. É um processo que possui duas técnicas *3D cladding* (revestimento) e *3D welding* (soldagem). (Yakout *et al.*, 2018, *apud* Gomes e Barbosa, 2020).

Os autores também postulam que a primeira técnica consiste em utilizar um pó metálico, o qual é fundido por um feixe de laser ou uma tocha de plasma, sendo esse método mais utilizado para reparar peças ou adicionar metal a peças fabricadas. Essa técnica é também conhecida como *shaped metal deposition* - SMD e utiliza arames metálicos em vez de pó, cujo arame é derretido e se liga às camadas anteriores através do processo de soldagem, sendo uma forma promissora para a utilização em componentes que exijam resistência estrutural, pois, produz peças com alta resistência e há grande quantidade de materiais que podem ser empregados. Em contrapartida, possui como desvantagem à pouca acuracidade geométrica e o controle difícil da “poça” de solda. (Idem).

**Figura 3 - DED**



Fonte: <https://www.3dnatives.com/en/pbf-vs-ded-which-metal-3d-printing-process-should-you-choose-140320234/#!>

### **Técnica *Powder Bed Fusion (PBF)***

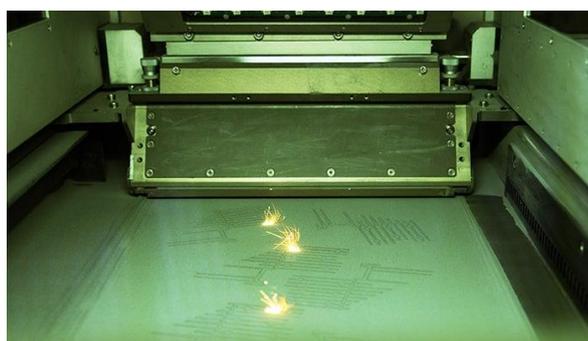
O *Powder Bed Fusion* – PBF, (**Figura 4**), é um dos meios de processamento por manufatura aditiva mais versáteis e antigos, sendo utilizado para a produção de peças obtidas por materiais poliméricos, compósitos, cerâmicos e metálicos, sendo capaz de utilizar diferentes fontes energéticas na manufatura. Em respeito aos materiais metálicos, qualquer metal que pode ser soldado é considerado um bom candidato para processamento por PBF. Metais nobres como ouro e prata, ligas de titânio e níquel também têm forte aplicação por este meio. (Gibson *et al.*, 2021).

Neste método a matéria-prima de pó metálico é deposita em camadas finas sobre uma “cama” e dispersa por uma lâmina ou rolamento móvel. Após a deposição, sobre o pó é incidido uma fonte de energia, geralmente laser ou feixe de elétrons, que funde ou sinteriza as partículas de metal (Redwood; Shöffler; Garret, 2017, *apud* Ladeira e Callichio, 2022), consolidando os planos que sobrepostos vão formar a peça desejada.

A divisão do PBF se dá pelo tipo de energia utilizado na tecnologia. Os métodos dominantes na manufatura aditiva de metais são *Selective Laser Melting (SLM)* e *Electron Beam Melting (EBM)*, que usam, respectivamente, laser de alta intensidade, e feixe de elétrons (Zhang *et al.*, 2017, *apud* Ladeira e Callichio, 2022 ).

É importante ressaltar que na literatura sobre o PBF, especialmente em respeito a procedimentos com o uso de laser, existem diversas designações para o mesmo processo, como por exemplo, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Selective Laser Sintering (SLS)* *Direct Laser Metal Sintering (DLMS)*, *Direct Metal Printing (DMP)*, *LaserCusing*, entre outros. Isso se dá devido a pequenas variações de parâmetros, matérias-primas utilizadas e o nome designado pelas próprias empresas produtoras. A tecnologia permanece a mesma em todos esses processos. (Ladeira e Callichio, 2022).

**Figura 4 - PBF**



Fonte: <https://www.3dnatives.com/en/pbf-vs-ded-which-metal-3d-printing-process-should-you-choose-140320234/#!>

A Figura 5, adiante, demonstra uma comparação entre os 2 (dois) método: BPF e DED:

**Figura 5** - Comparação entre os processos BPF e DED

**Table 1.** General comparison of PBF and DED processes.

Criteria	Powder Bed Fusion (PBF)	Direct Energy Deposition (DED)
Build speed [cm <sup>3</sup> /h]	up to 170	up to 2000
Max. build size (X; Y; Z) [mm]	(0.8; 0.4; 0.5)	(4.0; 2.0; 1.0)
Accuracy	0.05/25	0.25/25
Min. thickness [mm]	0.2	1.0
Surface quality [µm]	Ra 10	Ra 20
Design Freedom	High	Low
Applications	Rapid prototyping High end parts	Repairing parts Adding features (i.e., ribs and lugs)

The values presented on this table are merely references and were based on manufacturers information and press research. Depending on the part, process and material, these values can change.

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/General-comparison-of-PBF-and-DED-processes\\_tbl1\\_334041292](https://www.researchgate.net/figure/General-comparison-of-PBF-and-DED-processes_tbl1_334041292)

### 2.1.3 Sucinta comparação entre método substrativo e manufatura aditiva

Gomes e Barbosa (2020), postulam em seu artigo que, para os dias atuais, a proposição de se construir um protótipo pelos métodos tradicionais de fabricação, conhecidos como substrativos, ou pelos métodos modernos conhecidos como aditivos, tanto um quanto outro, são simples de serem realizados e demonstram que seu objetivo é a apresentação das técnicas mais utilizadas em manufatura aditiva em metais aplicadas na indústria de tecnologia mecânica, quais sejam: aeronáutica, aeroespacial e automobilística, com alinhamento às inovações, expectativas, mas também às dificuldades encontradas pelas técnicas na fabricação de componentes, os quais precisam de grande resistência e possíveis aplicações no futuro. Nas considerações finais os autores citam que as novas tecnologias disruptivas de manufatura aditiva podem vir a integrar efetivamente as indústrias e os processos produtivos, como apoio ao desenvolvimento da manufatura avançada e integrando definitivamente a produção industrial mundial de modo permanente. A seguir na **Figura 6**, a comparação entre manufatura substrativa (A) e manufatura aditiva (B):

**Figura 6** - Comparação entre manufatura substrativa (A) e manufatura aditiva (B)



Fonte: Wohlers, 2019.

## 2.2 Pó metálico

A utilização do pó metálico (**Figura 7**), adequado na MA esta diretamente relacionada à qualidade das peças produzidas, pois, composição, tamanho e formato das partículas são determinantes, podendo-se destacar também a distribuição do tamanho das partículas, densidade aparente, taxa de fluxo, compressibilidade, atividade de sinterização e pureza e os processos utilizados para produção do pó metálico também influenciam nas propriedades das peças, dos quais os mais utilizados são:

- Atomização de gás (mais utilizado, utiliza um banho de metal fundido, que é forçado através de um bico, sendo em seguida desintegrado com um fluxo de gás inerte, como argônio e nitrogênio. O fluxo de gás inerte faz com que o metal fundido solidifique e as partículas esféricas são recolhidas no fundo da câmara);
- Atomização por plasma (usado geralmente para a produção de metais reativos de alta pureza com elevados pontos de fusão);
- Atomização por água.

Em relação ao custo, em se falando de pó metálico dentro do processo de produção de uma peça, pode girar em torno de 30% do custo total e alguns fatores contribuem para referida queda de valor, quais sejam:

- Demanda e oferta crescente do mercado;
- Avanços tecnológicos;
- Concorrência no setor;
- Custo da matéria prima (flutuações de preços dos metais e insumos).

**Figura 7 - Pó metálico**



Fonte: <https://am-material.com/pt/news/unveiling-the-factors-and-strategies-in-additive-manufacturing-metal-powder-price/>

## 2.3 Pós processamento com foco na melhoria da peça

Laleh *et al.*, (2022), citam no seu trabalho que o tratamento térmico pós-processamento é frequentemente necessário para modificar a microestrutura e/ou aliviar tensões residuais para alcançar propriedades comparáveis ou superiores às dos equivalentes fabricados convencionalmente, mas as condições ideais de tratamento térmico ainda não foram definidas para a maioria das ligas AM e estão se tornando outra questão atual da pesquisa AM devido à sua importância industrial e citam que o objetivo é revisar criticamente o conhecimento atual e discutir a influência do tratamento térmico pós-AM na microestrutura, propriedades mecânicas e comportamento de corrosão das principais categorias de metais AM, incluindo aço, superligas à base de Ni, ligas de Al, ligas de Ti. e ligas de alta entropia. Esta revisão esclarece diferenças significativas entre o tratamento térmico de metais AM e seus equivalentes CM. As principais fontes de diferenças incluem heterogeneidade microestrutural, defeitos internos e tensões residuais. Os autores postulam ainda que a compreender a influência de tais diferenças beneficiará a indústria ao obter metais AM com desempenho consistente e equilibrado superior em comparação com metais AM e CM já construídos.

Souza (2023), relata em seu artigo que um dos principais métodos é o *Directed Energy Deposition* – DED, pois, esse método combina a entrega de material e energia para deposição simultânea, camada por camada, e ao final a formação da peça. Contudo, os componentes fabricados por este método apresentam baixa precisão dimensional e baixa qualidade superficial, necessitando do pós-processamento.

### 2.3.1 Tratamento térmico

A dinâmica de aquecimento e resfriamento rápido referente ao processo de manufatura aditiva nos metais resulta em microestruturas heterogêneas e no acúmulo de tensões internas. O pós-processamento é frequentemente necessário para modificar a microestrutura e aliviar as tensões residuais. A necessidade de empregar cada uma dessas etapas depende do material, tecnologia de AM e aplicação da peça. O conhecimento das características microestruturais são importantes para determinar as propriedades finais do material e incluem tamanho e morfologia do grão, contorno do grão, homogeneidade química (distribuição de elementos de liga) e presença de fases secundárias indesejadas, poros e tensões residuais.

As variáveis de temperatura, tempo de imersão e velocidade de resfriamento vão ditar as mudanças desejadas na peça. Entre elas pode-se ter transformação polimórfica (mudança da estrutura cristalina), homogeneização da microestrutura, (exemplo: dissolve-se as fases

secundárias indesejadas mitigando-se a microsegregação), mudança de fases constituintes (precipitação de fases secundárias), controle do tamanho do grão e alívio de tensões.

Alguns exemplos de tratamentos realizados em metais na MA:

- Alívio de tensão-projetada para aliviar a tensão residual que permaneceu no processo de fabricação. A etapa de resfriamento deve ser controlada para evitar gradientes térmicos prejudiciais;
- Solubilização;
- Têmpera;
- Envelhecimento;
- Revenido.

De acordo com o relatório de *Wohlers* (2021), as etapas de pós-processamento representam aproximadamente 27% de quaisquer custos de processamento de MA de metal.

Em Artigo publicado pela *Science Direct*, o aço maraging grau 300, que é um material ultraresistente obtido a partir do envelhecimento por matriz martensítica, foi analisado após a produção de uma peça por MA e foram comparadas algumas propriedades com uma peça obtida através da manufatura convencional.

O método de construção foi por fusão a laser seletiva e homogeneizadas a 820 °C e além de uma ótima resistência mecânica também foi esperado uma ductilidade boa capaz de absorver deformações, uma característica importante em materiais submetidos a cargas intensas e ciclos de fadiga, como uma turbina de avião, trem de pouso. (Idem).

Entretanto, devido à heterogeneidade da precipitação desses elementos de liga na matriz a ductilidade obtida na MA após o tratamento térmico de envelhecimento, que varia conforme a liga feito na faixa de 500 °C por um período de até quatro horas, não foi satisfatória. A peça atingiu a resistência desejada mas não a ductilidade. (Ibidem).

Com isso foram realizados agrupamentos dos elementos com temperaturas e tempo de exposição diferentes das usuais, com o objetivo de aumentar a quantidade de austenita na matriz martensítica e assim melhorar a ductilidade. Após a homogeneização foi feito um tratamento térmico de revenimento com temperaturas de 610 °C e 650 °C por 30 minutos. (Ibidem).

Nesses casos foi constatado uma transformação gradual e significativa de martensita em austenita, com alta estabilidade térmica que seria um cenário ideal para promover a ductilidade. Já, quando a temperatura utilizada foi 690 °C houve uma transformação excessiva da fase austenita e conversão indesejada do material em martensita durante o resfriamento. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860418308030>)

Em 2023, a especificação ASTM F3607-22 foi emitida e abrange a produção do aço maraging por fusão em leito de pó, que garante que as peças tenham os requisitos mínimos e propriedades desejadas.

((<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/114817/5861e759d08c4c9baef1258e63cd247f/ASTM-F3607-22.pdf>)).

A **Figura 8**, na página seguinte, mostra orientação de controle de condição de material:

**Figura 8 -** Orientação de controle de condição de material

**TABLE 1 Guidance for Controls by Material Condition**

Conditions	Thermal Post-Process	Manufacturing Plan Required	Powder Use Controlled	Powder Contamination Controlled	Post-Processing Controlled	Consolidated Material Chemistry Controlled	Microstructure Controlled	Mechanical Properties Controlled	Quality Program Required
AGED	Aging	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
SA	Solution Annealed	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
HIP	Hot Isostatic Pressed	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
AB	none	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes

3



**TABLE 2 Chemical Composition Requirements (wt. %) (Specification A579/A579M, grade 73)<sup>A</sup>**

Material	As-built Material
Aluminum, Al	0.050–0.15 %
Boron, B	≤ 0.001 %
Carbon, C	≤ 0.030 %
Cobalt, Co	8.0–9.5 %
Iron, Fe	65.1–68.8 %
Manganese, Mn	≤ 0.10 %
Molybdenum, Mo	4.6–5.2 %
Nickel, Ni	18–19 %
Phosphorus, P	≤ 0.010 %
Silicon, Si	≤ 0.10 %
Sulfur, S	≤ 0.010 %
Titanium, Ti	0.50–0.80 %

**TABLE 3 Minimum Tensile Requirements for as Delivered Condition<sup>A</sup>**

Condition	Tensile Strength MPa (ksi), X, Y and Z Directions	Yield Strength MPa (ksi), X, Y and Z Directions	Elongation (%), X, Y and Z Directions
AB <sup>B</sup>	1050 (152)	800 (116)	10
SA <sup>B</sup>	1050 (152)	800 (116)	10
AGED <sup>C</sup>	1930 (280)	1895 (275)	2
SA/AGED <sup>C</sup>	1930 (280)	1895 (275)	2
HIP	not specified	not specified	not specified

<sup>A</sup> A gauge length corresponding to ISO 6892-1 may be used when agreed upon by the part supplier and purchaser.

<sup>B</sup> Mechanical properties were taken from research literature.

Fonte: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/114817/5861e759d08c4c9baef1258e63cd247f/ASTM-F3607-22.pdf>

### 2.3.2 Acabamento superficial - rugosidade

A rugosidade na MA esta relacionada diretamente ao método e a precisão de construção da peça, sendo que a rugosidade da superfície é uma medida da variação na topologia da superfície de uma peça e os requisitos de engenharia para a maioria das peças incluem especificações de rugosidade da superfície. A rugosidade afeta a estética da peça (por exemplo, brilhante ou fosca) e o comportamento mecânico, como iniciação de trincas, resistência ao desgaste, vida à fadiga, acoplamento, vedação, rolamento e dinâmica de fluidos.

Processos baseados em pós metálicos, morfologia (tamanho e formato) e a qualidade da matéria-prima afetam a rugosidade da superfície, pois eles podem ficar presos na parte externa

da peça. Logo a qualidade do pó é um fator importante evitando aglomerar, impedindo o fluxo e a distribuição adequada, visto que a orientação da superfície em relação ao processo de impressão também desempenha um papel importante. Outros fatores que também podem influenciar são a energia aplicada, velocidade de impressão, taxa de resfriamento.

Como os processos de AM de metal produzem superfícies relativamente ásperas é necessário um pós-processamento secundário. Esse requisito tem um grande impacto no tempo e no custo total de produção e parâmetros no tempo e custo total de produção. (<https://manufactur3dmag.com/surface-roughness-a-guide-to-metal-additive-manufacturing-by-digital-alloys/>)

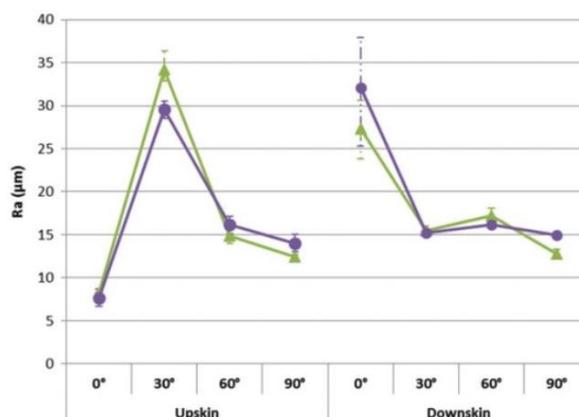
Antes de se considerar o uso de diferentes técnicas de acabamento é preciso ter em mente a qualidade superficial desejada.

Entre os métodos pode-se destacar:

- Jateamento
- Tamboreamento
- Polimento eletrolítico de plasma
- Usinagem via CNC

Abaixo, a **Figura 9** mostra um exemplo de rugosidade da superfície PBF como uma função da orientação da superfície (medida em graus para a horizontal para superfícies voltadas para cima ("upskin") e para baixo ("downskin")). (<https://www.additiva3d.com.br/blog-voce-conhece-esses-tres-tipos-de-pos-processamento-utilizados-na-manufatura-aditiva>)

**Figura 9** -Exemplo de rugosidade da superfície PBF



Above: PBF surface roughness as a function of surface's orientation in print process/Image Credit: Digital Alloys

Fonte: *Digital Alloys*

### 2.3.3 Isostatic Pressing (HIP)

A prensagem isostática a quente (HIP) é um processo pelo qual uma peça é colocada

em um recipiente fechado e submetida à alta temperatura e pressão do gás simultaneamente por um determinado tempo e geralmente usa-se o argônio como meio de pressão, demonstrada na **Figura 10**:

**Figura 10-** Imagem esquemática simplificada de equipamentos e processos HIP

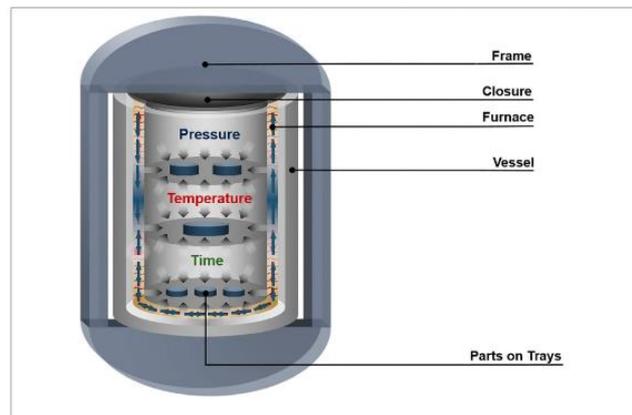


Fig. 1 A simplified schematic picture of the Hot Isostatic Pressing equipment and process

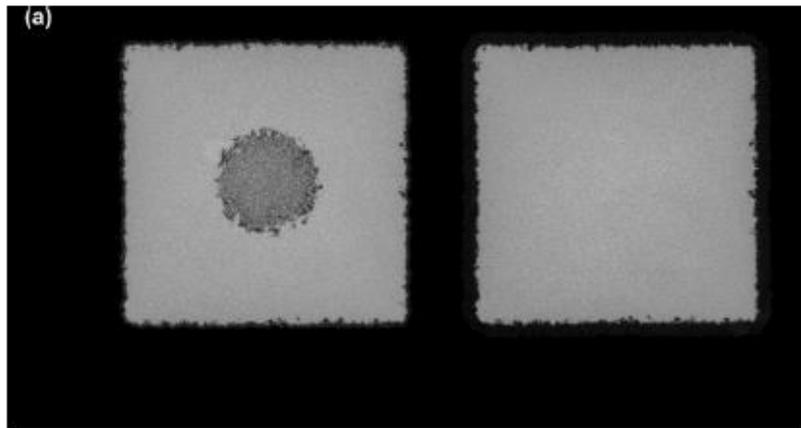
Fonte: <https://www.linkedin.com/pulse/p%25C3%25B3s-processamento-na-impress%25C3%25A3o>

Este método tem sido usado por muitos anos em metalurgia do pó e metais fundidos para a solidificação, fechamento de poros e homogeneização da microestrutura de vários metais, sendo usado em materiais MA, principalmente em (fusão por feixe de elétrons e leito de pó a laser), resultando em melhor resistência a fadiga e melhora na ductilidade, devido às propriedades benéficas de redução da porosidade e homogeneização da microestrutura.

Ademais, este processo foi amplamente aceito e é usado como um processo crucial em componentes com aplicações altamente exigentes, como componentes aeroespaciais e implantes médicos, sendo que seus parâmetros devem ser escolhidos apropriadamente para o material (por exemplo, se a pressão não for alta o suficiente para o material dado, os poros não fecharão). É importante ressaltar que quaisquer poros conectados à superfície (mesmo através de rachaduras), não serão fechados devido à penetração de gás confinante nesses poros abertos durante o processo, logo a superfície necessita ser hermética, sendo que o processo pode resultar na densidade relativa de 100%.

*Du Plessis; Macdonald (2020)*, demonstraram através de um experimento com cubos de liga de titânio, a eficiência do HIP com poros de diversos tamanhos e em diferentes posições, desde que não conectados com a superfície, conforme **Figuras 11 e 12**:

**Figura 11 - Poro em liga de titânio**



Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420305637>

**Figura 12 - Redução de porosidade**

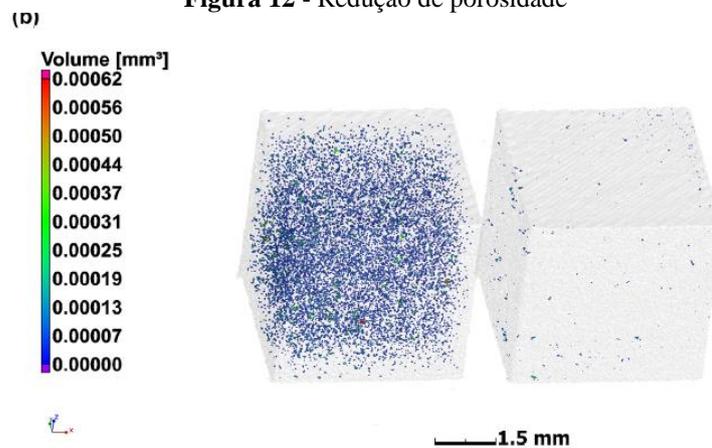


Fig. 4. Porosity at 0.6 % due to lack of fusion at low power, before and after HIP (left and right in each case). Almost all pores are closed, except a small number near the surface – presumably connected to the surface.

Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420305637>

## 2.4 Variedade de ligas existentes e aplicações

**Aço Maraging** (ultra alta resistência devido a suas propriedades mecânicas)

Utilização: Componentes aeroespaciais e sujeitos a desgaste elevado, peças de alto desempenho.

**Figura 13 - Aço maraging**



Fonte: 3DSystems

**Liga de Titânio** (alta resistência, baixo peso e excelente biocompatibilidade para aplicações médicas)

Utilização: Componente leves e resistentes para aplicações aeroespaciais, aplicações industriais, implantes médicos, prótese dentária.

**Figura 14** - Liga de titânio



Fonte: 3DSystems

**Aço Inoxidável** (alta resistência a corrosão e peças que podem ser desgastadas, soldadas, revestidas se necessário)

Utilização: Indústria química, farmacêutica, máquinas de alimentação, indústria de processo.

**Figura 15** - Aço inoxidável



Fonte: 3DSystems

**Ligas de alumínio** (ligas de boa condutividade térmica, alta resistência a corrosão e boas propriedades mecânicas)

Utilização: Componentes de altas relações de resistência-peso nos setores aeroespacial, automobilístico maquinário de transporte.

**Figura 16 - Liga de alumínio**



Fonte: 3DSystems

**Ligas de cobalto-cromo** (peças industriais com alta resistência a corrosão e desgaste que também requerem resistência a altas temperaturas)

Utilização: Ferramentas e dispositivos médicos, moldes e fundições, aplicações industriais.

**Figura 17 - Liga de cobalto**



Fonte: 3DSystems

Outros materiais disponíveis:

- Aços para ferramentas
- Cobalto-cromo
- Superliga de níquel
- Cobre
- Metais refratários

## **2.5 Vantagens e Desvantagens da manufatura aditiva em metais**

### **2.5.1 Vantagens da MA em relação à manufatura convencional**

#### **2.5.1.1 Sustentabilidade com eficiência de material**

A MA permite um menor desperdício de material durante a fabricação da peça e consequentemente torna-se menos agressivo ao ambiente. Segundo Singamneni *et al.*, (2019), a razão de eficiência pode chegar próximo de 100% em áreas como a aeronáutica, quando numa

razão de quantidade inicial e final na manufatura convencional ficava próxima de 15:1 até 20:1, o que indica uma alta taxa de desperdício de material.

Wiltgen (2019), relata que a explícita economia de matéria-prima conseguida através de inserção na quantidade necessária para a confecção de uma peça é obtida através da integração da manufatura aditiva como indústria de fabricação, a qual permite a criação de peças complexas que antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais, com destaque na sustentabilidade, conforme **Figura 18**, a seguir:

**Figura 18** - Sustentabilidade na manufatura aditiva



Fonte: [scholar.google.com.br/scholar\\_url?url=https://www.fateccruzeiro.edu.br/revista/index.php/htec/article/download/354/236&hl=pt-BR&sa=X&ei=O\\_7xZorAM-7Ey9YPmIHswAE&scisig=AFWwaeZnMVjRHkKcKE7Runj-8LhJ&oi=scholarrr](https://scholar.google.com.br/scholar_url?url=https://www.fateccruzeiro.edu.br/revista/index.php/htec/article/download/354/236&hl=pt-BR&sa=X&ei=O_7xZorAM-7Ey9YPmIHswAE&scisig=AFWwaeZnMVjRHkKcKE7Runj-8LhJ&oi=scholarrr)

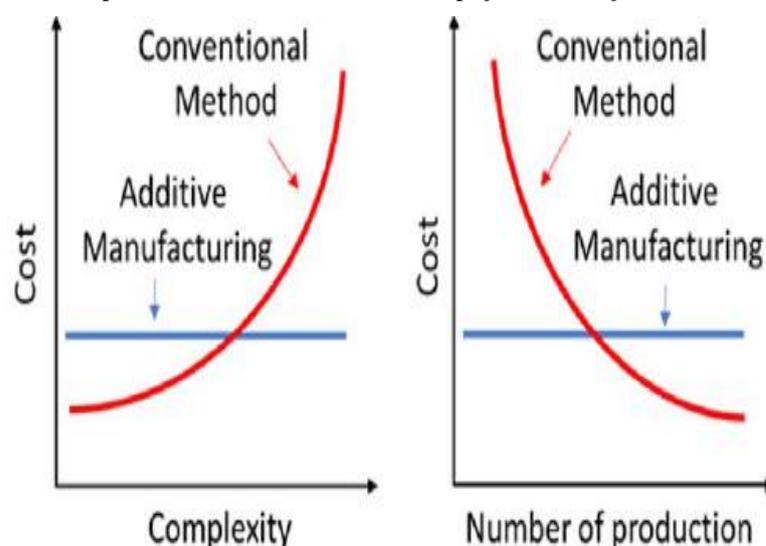
### 2.5.1.2 Eficiência de recurso

Muitas vezes na manufatura convencional é necessária a utilização de recursos auxiliares como: moldes, incertos de corte, mandris, pinças, dispositivos de fixação, entre outros. A MA não necessita desses recursos adicionais, ou quando necessários é bem menor a quantidade. Essa questão gera uma melhora na dinâmica da cadeia de produção conforme comentado por Prakash, Nancharaih e Rao, (2018).

### 2.5.1.3 Possibilidade de geometrias complexas

Possui essa característica devido à sua natureza tecnológica de adição de camadas, permitindo a redução de massa, customização, incorporações de funções em um determinado componente. Nesse sentido, a complexidade e a customização estão intimamente ligadas ao volume de produção e inerentemente ligadas ao custo.

**Gráfico 1** - Custo x complexidade e o custo x número de peças, em relação a manufatura convencional



Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/362943126\\_Additive\\_manufacturing\\_by\\_digital\\_light\\_processing\\_a\\_review/download](https://www.researchgate.net/publication/362943126_Additive_manufacturing_by_digital_light_processing_a_review/download)

#### 2.5.1.4 Flexibilidade de produção

A produção pode ser sincronizada com a demanda do produto e a necessidade do cliente, possibilitando uma redução da cadeia de suprimentos e das peças, evitando a necessidade de estoques e melhorando gargalos da produção.

Calderaro *et al.*, (2020) relatam que o crescimento da manufatura aditiva modificou os processos produtivos, a cadeia de suprimentos, a manutenção e o desenvolvimento no sistema global e continuamente as organizações vêm adotando essa técnica. Embora haja no mercado diversas tecnologias para esta técnica, ainda “não há diretrizes, benchmarking ou ferramentas” para dar suporte com relação à escolha adequada e que após “a revisão sistemática da literatura” houve evidências de falta de proposições “durante o desenvolvimento do produto e processo.”

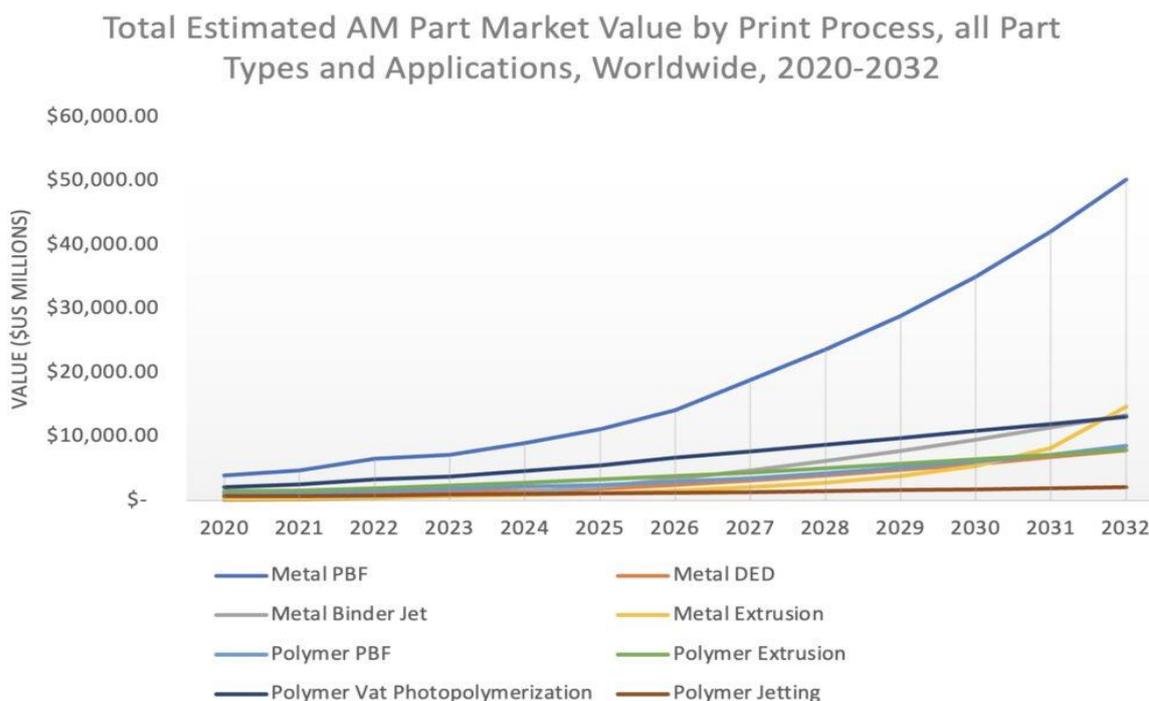
#### 2.6 Desvantagens da MA em relação à manufatura convencional

- Baixo volume de produção
- Alto custo de material
- Velocidade de deposição
- Necessidade do pós-processamento nas peças

#### 2.7 Tendências e previsões de mercado - evolução da procura e investimentos na ma (incluindo todos materiais ou metal/não metal)

No **Gráfico 2**, seguinte, a demonstração de peças impressas em 3D que devem atingir US\$ 18,8 bilhões em valor em 2023, com crescimento previsto em US\$ 119 bilhões em 2032, conforme dados da *AM Research*.

**Gráfico 2** - Estimativa de crescimento em 2023 de US\$ 18,8 bilhões e US\$ 119 bilhões em 2032



Fonte: <https://additivemanufacturingresearch.com/news/3d-printed-parts-expected-to-reach-18-8b-in-value-in-2023-grow-to-119b-in-2032-according-to-new-data-from-am-research/>

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa é bibliográfica, pois, está pautada em livros, artigos e publicações de autores e estudiosos do assunto, conforme Gil (2017) e também documental, pois, embora siga os “mesmos passos da pesquisa bibliográfica,” está incluída norma específica que regulamenta o assunto. (Idem).

A formulação do problema e definição do objetivo geral da pesquisa estão traçados para a organização de uma leitura intencional de todo o material bibliográfico utilizado, buscando-se compreender o processo da evolução da manufatura aditiva aplicada a metais.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o pós-processamento com foco na melhoria da peça, Laleh *et al.*, (2022), citam no seu trabalho que o tratamento térmico pós-processamento é frequentemente necessário para

modificar a microestrutura e/ou aliviar tensões residuais para alcançar propriedades comparáveis ou superiores às equivalentes fabricados convencionalmente. Contudo, as condições ideais de tratamento térmico ainda não foram definidas para a maioria das ligas AM e estão se tornando outra questão atual da pesquisa devido à sua importância industrial. Os autores objetivam no seu artigo a revisão crítica e o conhecimento atual para discussão da influência do tratamento térmico pós-AM na microestrutura, propriedades mecânicas e comportamento de corrosão das principais categorias de metais AM. Incluem no processo aço, superligas à base de Ni, ligas de Al, ligas de Ti. e ligas de alta entropia. Esta revisão esclarece diferenças significativas entre o tratamento térmico de metais AM e seus equivalentes CM. As principais fontes de diferenças incluem heterogeneidade microestrutural, defeitos internos e tensões residuais. Os autores postulam ainda que compreender a influência de tais diferenças beneficiará a indústria ao obter metais AM com desempenho consistente e equilibrado superior em comparação com metais AM e CM já construídos.

Souza (2023), relata em seu artigo que um dos principais métodos é o *Directed Energy Deposition* – DED, pois, esse método combina a entrega de material e energia para deposição simultânea, camada por camada, e ao final a formação da peça. Contudo, os componentes fabricados por este método apresentam baixa precisão dimensional e baixa qualidade superficial, necessitando do pós-processamento.

Quanto às vantagens da MA em relação à manufatura convencional há uma boa percepção quanto à sustentabilidade com eficiência de material, pois, a MA permite um menor desperdício de material durante a fabricação da peça e conseqüentemente torna-se menos agressivo ao ambiente.

Singamneni *et al.*, (2019), postulam que a razão de eficiência pode chegar próximo de 100% em áreas como a aeronáutica, quando numa razão de quantidade inicial e final na manufatura convencional ficava próxima de 15:1 até 20:1, o que indica uma alta taxa de desperdício de material.

Wiltgen (2019), relata que a explícita economia de matéria-prima conseguida através de inserção na quantidade necessária para a confecção de uma peça é obtida através da integração da manufatura aditiva como indústria de fabricação, a qual permite a criação de peças complexas que antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais, com destaque na sustentabilidade.

Quanto à eficiência de recurso, os autores Prakash, Nancharaih e Rao, (2018), citam que muitas vezes na manufatura convencional é necessária a utilização de recursos auxiliares como: moldes, incertos de corte, mandris, pinças, dispositivos de fixação, entre outros. A MA não

necessita desses recursos adicionais, ou quando necessários é bem menor a quantidade, visto que essa questão gera uma melhora na dinâmica da cadeia de produção.

Outro fator importante é a possibilidade de geometrias complexas, pois, possui essa característica devido à sua natureza tecnológica de adição de camadas, permitindo a redução de massa, customização, incorporações de funções em um determinado componente. Nesse sentido, a complexidade e a customização estão intimamente ligadas ao volume de produção e inerentemente ligadas ao custo, como está demonstrado no **Gráfico 1**, anterior.

Como vantagem, conta-se ainda com a flexibilidade de produção, visto que pode ser sincronizada com a demanda do produto e a necessidade do cliente, possibilitando uma redução da cadeia de suprimentos e das peças, evitando a necessidade de estoques e melhorando gargalos da produção.

Destarte, Calderaro *et al.*, (2020), enfatizam que o crescimento da manufatura aditiva modificou os processos produtivos, a cadeia de suprimentos, a manutenção e o desenvolvimento no sistema global e continuamente as organizações vêm adotando essa técnica. Embora haja no mercado diversas tecnologias para esta técnica, ainda “não há diretrizes, benchmarking ou ferramentas” para dar suporte com relação à escolha adequada e que após “a revisão sistemática da literatura” houve evidências de falta de proposições “durante o desenvolvimento do produto e processo.”

Relativamente às desvantagens da MA em relação à manufatura convencional, tem-se: baixo volume de produção, alto custo de material, velocidade de deposição e necessidade de pós-processamento nas peças.

Quanto às tendências e previsões de mercado, a evolução da procura e investimentos na ma, incluindo todos materiais ou metal/não metal, estão expostas no **Gráfico 2** também anterior, com previsão de atingir US\$ 18,8 bilhões em valor em 2023, com crescimento previsto em US\$ 119 bilhões em 2032, conforme dados da *AM Research*.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho é oriundo de pesquisa bibliográfica e responde ao questionamento: Qual a importância da evolução da manutenção aditiva aplicada a metais? Verificou-se a importância do uso da mam, primeiramente por se constatar mais vantagens do que desvantagens na sua aplicação, conforme já descrito no item **4. RESULTADO E DISCUSSÃO**, o que responde também ao Objetivo Geral deste trabalho.

Mais especificamente, a manufatura aditiva aplicada a metais tem seus princípios alinhados com a indústria 4.0, a interação entre o mundo físico e virtual e referido método permite um diferencial na fabricação, pois, permite a possibilidade de customização, agilidade e versatilidade dos produtos com modelos desenhados em softwares 3D, tornando uma vantagem competitiva.

O processo também é alinhado com a sustentabilidade já que utiliza toda matéria prima, evitando o desperdício, favorecendo o meio ambiente e reduzindo custos. A gama de materiais utilizados e a padronização do processo está tendo atualizações constantes, à medida em que os estudos evoluem a man ganha projeção, não como um processo que visa substituir a manufatura convencional, mas sim no aspecto de agregar e aumentar as possibilidades do projeto, sendo proveitosa em determinadas situações e podendo também atuar em conjunto com a manufatura convencional.

O custo com a matéria prima e o maquinário do processo está baixando, tornando o mercado mais atuante pela concorrência de grandes empresas e a produção nesses setores vem aumentando. A tendência é pelo aumento significativo da demanda nos próximos anos o que deve acelerar bastante esse processo.

Finalmente, deseja-se que esta pesquisa possa contribuir para pesquisas na área de conhecimentos afins, esperando-se também maior crescimento na literatura sobre o assunto.

## REFERÊNCIAS

**AM RESEARCH. Manufatura aditiva. Evolução entre os processos utilizados na fabricação dos metais. Disponível em** <https://additivemanufacturingresearch.com/> Acesso set 2024.

\_\_\_\_\_. **Manufatura aditiva. Oportunidade de mercado.** Disponível em: <https://additivemanufacturingresearch.com/about-us/>. Acesso set 2024.

\_\_\_\_\_. **Manufatura aditiva. Procura e investimentos.** Disponível em: <https://additivemanufacturingresearch.com/news/3d-printed-parts-expected-to-reach-18-8b-in-value-in-2023-grow-to-119b-in-2032>. Acesso: set 2024.

CALDERARO, D. R., LACERDA, D. P., & VEIT, D. R. 2020. *Selection of additive manufacturing technologies in productive systems: a decision support model. Gestão & Produção*; 2020, 27(3), e5363. <https://doi.org/10.1590/0104-530X5363-20>

**DIGITAL METAL. DM P2500 – 3D metal printing at its best.** Disponível em: <https://digitalmetal.tech/>/. Acesso em: 2 set 2024.

DU PLESSIS, A.; MACDONALD, E. *Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure*. 2020. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/306190/1-s2.0-S2214860420X00030/1-s2.0-S2214860420305637/ma>. Acesso set 2024.

GENERAL ELECTRIC. *Arcam EBM Q20plus*. c2021. Disponível em: [https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-07/EBM\\_QPlus20\\_Bro\\_A4\\_EN\\_v1.pdf](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-07/EBM_QPlus20_Bro_A4_EN_v1.pdf). Acesso em: 30 ago 2024.

GENERAL ELECTRIC. *Concept Laser X Line 2000R*. c2021. Disponível em: [https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-04/DMLM\\_X%20Line\\_Bro\\_8\\_US\\_EN\\_v1.pdf](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-04/DMLM_X%20Line_Bro_8_US_EN_v1.pdf). Acesso em: 30 ago 2024.

GIBSON, I.; ROSEN, David; BRENT, Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. 3. ed. Cham: Springer, 2021. 685 p.

GIL, A. Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Ed. Atlas, 6ª Edição, SP: 2017.

GOMES, João F. B.; BARBOSA, Luís Filipe de Faria P. W. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas**. Disponível em: Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-24, jun. 2020

HULL, Charles. **Tecnologia 3D**. Disponível em <https://www.google.com/search?q=HULL%2C+Charles.+Tecnologia+3D.&oq=HULL%2C+Charles.+Tecno>. Acesso: set 2024

KHALIL, Rami. **Norma ASTM F2792-12<sup>a</sup>**. Disponível em: <https://www.engramikhalil.com/documents/am-standardiz>. Acesso set 2024.

LADEIRA, Igor José D. E CALLICHIO, Leonardo. **Manufatura aditiva de materiais metálicos: métodos, procedimentos e produtos**. 2022. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/items/35f131a0-830c-4ec9-9fa8-38a0f74f8727>. Acesso set 2024.

LALEH, M.; SADEGUI, I.; REVILAA, R. I.; CHAO, Q.; RAGHIDADI, N.; HUGHES, A.; XU, W.; DE GRAEVE, I.; QIAN, M.; GIBSON, I.; TAN, M. *Heat treatment for metal additive manufacturing*. 2022. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642522001323>. Acesso set 2024.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAI, T.; SUBBA RAO, V.V. *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview*. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785317329152>. Acesso: set 2024.

SMARTTECH ANALYSIS. Pesquisa. **Manufatura aditiva. Produção anual de componentes até 2031**. Disponível em <https://additivemanufacturingresearch.com/news/metal-additive-manufacturing-tech>. Acesso set 2024.

SCHOTTE, E. **Artigo**. Disponível em <https://repositorio.ufc.br/2019>. Acesso: set 2024.

SINGAMNENI, S.; YIFAN, LV.; HEWITT, Andrew. *Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review*. 2019. Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/331482685\\_Additive\\_Manufacturing\\_for\\_the\\_Aircraft\\_Industry\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/331482685_Additive_Manufacturing_for_the_Aircraft_Industry_A_Review). Acesso set 2024.

SOUZA, Adriel, M. **Pós processamento de peças metálicas produzidas por manufatura**. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18163/tde-16052023-092134/pt-br.php#referencias>. Acesso set 2024.

3D SYSTEMS. Disponível em [https://www.uniontech3d.com/electronic-3d-printing.html?gad\\_source=](https://www.uniontech3d.com/electronic-3d-printing.html?gad_source=). Acesso set 2024.

WILTGEN, Filipe. Disponível em:

File:///C:/Users/mange/Downloads/Poster\_COBEF\_2019\_Prototipagem\_Rpida\_Wiltgen.pdf,. Acesso: set 2024.

WOHLERS ASSOCIATES. *Additive manufacturing and 3d printing*. [S. l.]: Disponível em: <http://wohlersassociates.com>. Acesso em: set 2024.