



## **Manufatura aditiva híbrida de metais (MAHM), aplicações e características, tipos de aços e propriedades mecânicas: Uma revisão sistemática da literatura**

Marco Aurélio Feriotti<sup>1</sup>, Alexandre Formigoni<sup>2</sup>

**Resumo** - A manufatura aditiva (MA) é um dos pilares da Indústria 4.0, onde a automação para criar fábricas inteligentes é o alvo principal. A hibridização de processos é uma das principais estratégias para implementar um sistema mais flexível, eficiente e ambiente de manufatura interconectado. Atualmente, diferentes pesquisas estão focadas na hibridização da MA de metais e manufatura subtrativa (MS), essa tecnologia é denominada manufatura aditiva híbrida de metais (MAHM). Muito destas técnicas consistem na integração de processos aditivos *Directed Energy Deposition* (DED) e *Powder Bed Fusion* (PBF) com usinagem comando numérico por computador (CNC) subtrativa dentro de uma máquina-ferramenta multi-eixo. Progressos recentes nos métodos de MAHM permitem a fabricação de peças com geometria complexa, ao mesmo tempo, em que alcançam qualidade comparáveis ou superiores às fabricadas por métodos convencionais. As tecnologias atuais de MAHM são capazes de processar uma seleção maior de metais, incluindo materiais utilizados em molde de aço como H13 e P20. Na indústria de moldagem por injeção, os fabricantes de moldes estão implementando tecnologias de MA metálicas na fabricação de moldes. O principal desafio enfrentado atualmente pelos fabricantes de moldes é imprimir moldes de aço com propriedades mecânicas comparáveis com os fabricados convencionalmente. Neste contexto, o presente artigo trata-se de uma revisão sistemática da literatura (RSL), elaborada com auxílio da ferramenta *Parsifal*, tendo como bases de busca a *Scopus* e *Web of Science*, o objetivo foi investigar a literatura científica para verificar as aplicações da MAHM no setor metal mecânico, avaliar suas características, identificar os principais tipos de aços utilizado no processo, averiguar suas propriedades mecânicas e os resultados obtidos. Finalmente, a revisão resume o estado atual da aplicação da MAHM e as perspectivas futuras na fabricação de moldes.

**Palavras-chave:** MAHM, Aplicação e Características, Tipos de Aços e Propriedades Mecânicas.

**Abstract** - Additive manufacturing (AM) is one of the pillars of Industry 4.0, where automation to create smart factories is the main target. Process hybridization is one of the key strategies to implement a more flexible, efficient system and interconnected manufacturing environment. Currently, different research is focused on the hybridization of AM of metals and subtractive manufacturing (SM), this technology is called hybrid additive manufacturing of metals (HAMM). Many of these techniques consist of the integration of Directed Energy Deposition (DED) and Powder Bed Fusion (PBF) additive processes with subtractive computer numerical control (CNC) machining within a multi-axis machine tool.

Recent advances in HAMM methods allow the fabrication of parts with complex geometry while achieving quality comparable or superior to those made by conventional methods. Current HAMM technologies are now capable of processing a wider selection of metals, including materials used in steel mold such as H13 and P20. In the injection molding industry, mold makers are implementing metallic AM technologies in mold making. The main challenge faced by mold makers today is to print steel molds with mechanical properties comparable to those manufactured conventionally. In this context, the present work is a systematic review of the literature (SRL), elaborated with the aid of the Parsifal tool, having as search bases the Scopus and Web of Science, the objective was to investigate the scientific literature to verify the applications of the HAMM in the metal-mechanic sector, evaluate its characteristics, identify the main types of steels used in the process, verify their mechanical properties and the results obtained. Finally, the review summarizes the current state of HAMM application and future prospects in mold making.

**Keywords:** HAMM, Application and Characteristics, Types of Steels and Mechanical Properties.

## 1 Introdução

A manufatura híbrida (MH) é uma designação usada para processos que combinam diferentes tecnologias como forma de superar suas limitações individuais e se beneficiar de suas vantagens intrínsecas.

As indústrias manufatureiras exigem processos eficientes que proporcionem uma redução nos custos de fabricação e tempo necessários para ganhar competitividade enquanto cumprem padrões de qualidade. Assim, os sistemas de fabricação híbrida estão se tornando uma solução industrial para a fabricação e reparação de peças de alta complexidade voltadas para diversos setores (CORTINA *et al.*, 2018).

A combinação de MA e usinagem CNC é um exemplo de processo híbrido que é de particular interesse, pois, em geral, os sistemas MA têm vantagem ao produzir geometrias complexas a partir de materiais difíceis de processar, no entanto, em comparação com acabamento no processo subtrativo, a qualidade da superfície resultante e a precisão dimensional são geralmente significativamente inferiores (BASINGER *et al.*, 2018).

No entanto, a integração total de ambos os processos é uma tarefa complexa que ainda deve ultrapassar muitas dificuldades, pois, tanto os processos aditivos baseados em laser quanto os processos de usinagem precisam superar desafios a fim de melhorar seu desempenho e a qualidade das peças fabricadas (CORTINA *et al.*, 2018).

Neste contexto, este artigo tem como objetivo verificar as aplicações da manufatura aditiva híbrida de metais no setor metal mecânico, avaliar suas características, identificar os principais tipos de aços utilizado no processo, averiguar suas propriedades mecânicas e os resultados obtidos.

O método adotado foi a utilização da ferramenta *Parsifal* para revisar sistematicamente a literatura científica, por meio de pesquisas bibliométricas realizadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, as palavras chaves

foram “*Hybrid Additive Manufacturing*” e “*Metal Additive Manufacturing*”, e o período foi delimitado de 2018 ao ano atual de 2022 devido a recentes publicações sobre os avanços desta tecnologia.

Espera-se que os resultados obtidos possam dar uma importante contribuição para o campo de pesquisas que abordem metodologia da aplicação da MAHM para auxiliar as empresas na adoção dessa tecnologia.

## **2 Referencial Teórico**

Nessa seção, apresenta-se um resumo de literatura sobre a teoria abordando os assuntos principais do tema problema de pesquisa. Sendo assim, este referencial foi baseado em citações extraídas de autores e publicações relevantes para a fundamentação teórica deste artigo.

### **2.1 Manufatura Aditiva Híbrida de Metais (MAHM)**

A combinação de processos aditivos e subtrativos em uma única máquina híbrida é especialmente adequada para a fabricação de materiais de baixa usinabilidade, como aços liga resistentes ao calor e materiais de alta dureza, que são amplamente utilizados em várias indústrias (CORTINA *et al.*, 2018).

Um sistema de manufatura aditiva-subtrativa à base de pó utilizando deposição a laser e fresagem CNC é chamado de manufatura híbrida, um feixe de laser cria uma poça de fusão em uma superfície, à medida que o pó é injetado na poça de fusão. A deposição segue caminhos de varredura prescritos para criar a geometria da peça desejada. As operações de fresamento usinam a peça dentro da tolerância dimensional (JACKSON *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de estações de trabalho para processos híbridos inclui desafios associados à integração de hardware e software. Esses postos de trabalho devem incluir um magazine de ferramentas com cabeçotes MA, ferramentas de fresagem e medição, entre outros (DÁVILA *et al.*, 2020a).

A deposição de metal a laser é amplamente reconhecida como uma técnica de fabricação aditiva usada para aplicações de reforma e reparo, juntamente com restauração estrutural e geométrica (PATHANIA *et al.*, 2021).

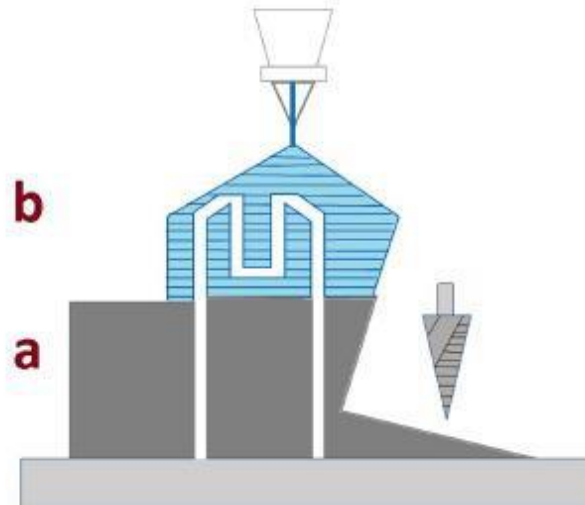
### **2.2 Aplicações e Características da MAHM**

A combinação de ambas as tecnologias, MA e usinagem CNC, em uma única máquina é, portanto, vantajosa, pois permite construir produtos prontos para uso com uma máquina híbrida *all-in-one*, o que maximiza os pontos fortes de cada tecnologia. Dessa forma, componentes complexos que originalmente não são possíveis de serem usinados devido à restrições de acessibilidade são agora acessíveis (CORTINA *et al.*, 2018).

Alguns exemplos da aplicação de processos de PBF para a produção de peças funcionais são implantes dentários e ósseos, aerofólios ou pás de turbina com canais de resfriamento incorporados, sendo assim capaz de prestar serviço às indústrias aeroespacial, energética e médica, entre outras (CORTINA *et al.*, 2018).

A Figura 1 ilustra a aplicação da MHAM em que o parte do substrato (a) pode ser fabricada pela manufatura subtrativa tradicional, e a parte

superior (b) com sistema interno de canais de refrigeração por MA de metal (POPOV; FLEISHER, 2020).



**Figura 1** – Ilustração da manufatura híbrida aditiva de metal.

**Fonte:** Adaptado de Popov e Fleisher (2020).

Processos de derretimento a laser (SLM), derretimento de feixes de elétrons (EBM) e processos de DED têm sido amplamente aplicados em pesquisas acadêmicas e sistemas desenvolvidos para aplicações industriais (AHN, 2021).

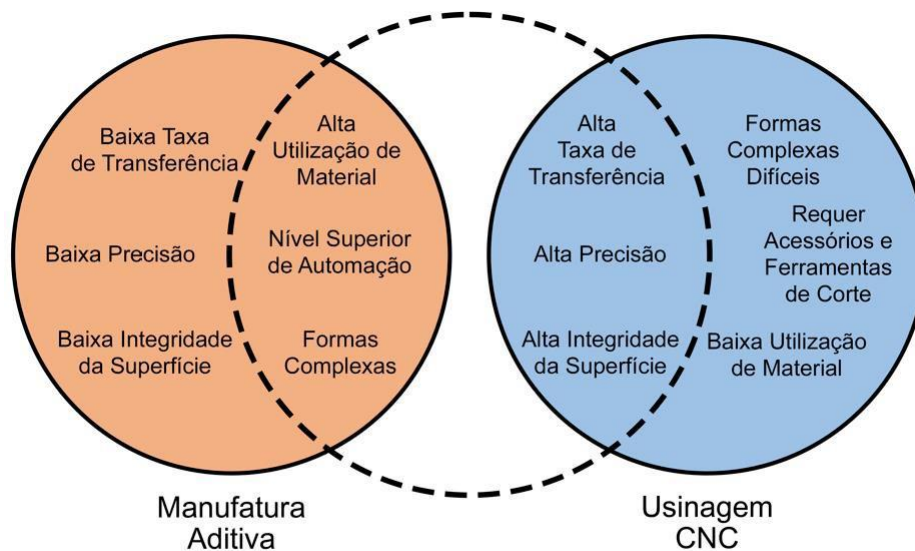
Uma das principais aplicações da MHAM é na manutenção e reparo de componentes existente (SEFENE; HAILU; TSEGAW, 2022).

A integração das MA e MS, inclui projeto auxiliado por computador (CAD), manufatura (CAM), inspeção (CAI) e engenharia (CAE). Todas essas ferramentas devem ser combinadas sinergicamente para obter um processo híbrido eficiente, que depende principalmente de estratégias eficientes do caminho da ferramenta (DÁVILA *et al.*, 2020b).

A manufatura aditiva híbrida de 5 eixos adiciona versatilidade aos tradicionais sistemas MA baseados em 2,5 eixos e permite a capacidade de produzir peças sem estruturas de suporte (XIAO; JOSHI, 2020).

Geralmente as peças MA precisam de algum pós-processamento, por exemplo usinagem, tratamento térmico ou tratamento de superfície. A MA híbrida, como uma integração dos processos de MA com algumas tecnologias de pós-processamento, visa combinar suas capacidades de forma sinérgica e, assim, produzir componentes funcionais com geometrias complexas, propriedades mecânicas e integridade superficial aprimorada (JIMÉNEZ *et al.*, 2021).

A Figura 2 mostra as vantagens do MA híbrido como uma combinação de processos de usinagem aditiva e CNC.



**MANUFATURA HÍBRIDA**  
**Figura 2** – Vantagens da MA híbrida.  
 Fonte: Adaptado de Jiménez, *et al.* (2021)

### 2.3 Tipos de Aço e Propriedades Mecânicas

Atualmente, diversos tipos de aço inoxidável, aço ferramenta, ligas de cobalto-cromo, titânio e suas ligas, ligas de alumínio, ligas de níquel e alguns metais preciosos, como prata pura e ouro, têm sido processados com sucesso pela MA (AFKHAMI *et al.*, 2019).

O Ti-6Al-4V e Inconel 718 são as duas ligas comumente utilizadas em aplicações críticas como estruturas de aeronaves e turbinas a gás. O Ti-6Al-4V é a liga de titânio comercial mais utilizada, caracterizada por sua alta relação resistência-peso e excelente resistência à corrosão. Esse material foi rigorosamente estudado para processamento DED (ZHAI *et al.*, 2019).

O PBF apresenta o maior potencial para ferramentas em trabalho a quente e moldagem por injeção. Um maior número de metais em pó está sendo projetado para diferentes aplicações em ferramentas com menores custos de matéria-prima e processamento, bem como, a melhoria adicional de produtividade, rugosidade de superfície aprimorada e qualidade garantida são algumas das metas pesquisadas (ASNAFI, 2021).

A porosidade e descontinuidade da superfície na MA metálica em sua condição construída, é um fator prejudicial que afeta seu desempenho sob carga cíclica, ou seja, fadiga e desgaste a abrasão. Diversos estudos na literatura têm investigado o efeito da condição superficial sobre o comportamento de fadiga e desgaste a abrasão dos materiais MA (YADOLLAHI *et al.*, 2018).

Um estudo abrangente da não homogeneidade da microestrutura foi realizado em diferentes áreas e orientações. Por exemplo: dentro da estrutura da poça de fusão, juntamente com a direção de construção, e através do plano paralelo às camadas depositadas. Essa falta de homogeneidade da microestrutura é considerada uma das principais causas que podem resultar em um material anisotrópico (MAAMOUN *et al.*, 2018).

Parâmetros do processo de MA precisam ser otimizados para produzir ferramentas capazes de aumentar a resistência ao desgaste e deformação da peça. É importante evitar porosidades na peça fabricada para obter uma camada densa através do controle de parâmetro dos processos (SAHU; MAHAPATRA, 2020).

Os desenvolvimentos dos parâmetros de processos, se concentraram no aprimoramento das propriedades da superfície sem alterar a massa do material. Isso levou à técnica de deposição de metal a laser categorizada nos processos de MA (NAIDOO *et al.*, 2020).

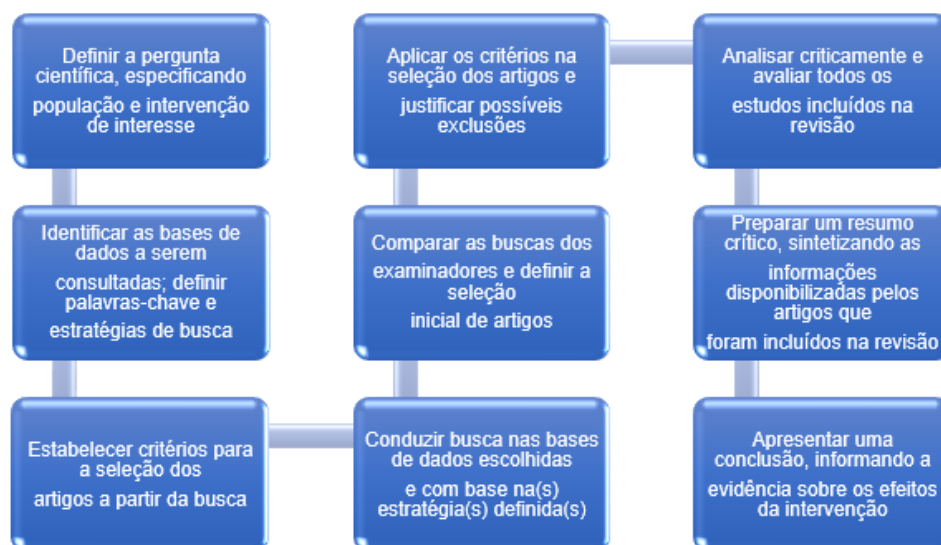
### 3 Método

A metodologia utilizada na execução desse artigo foi a revisão sistemática da literatura (RSL) que, segundo Sampaio, Mancini (2007), assim como outros tipos de estudo de revisão, a RSL é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema. Esse tipo de investigação disponibiliza um resumo das evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada.

A ideia fundamental de uma RSL é que esta seja replicável, o que significa que outro pesquisador possa replicar o processo e chegar ao mesmo conjunto de evidências e à mesma conclusão. Uma revisão sistemática inclui uma busca exaustiva de bancos de dados designados (LINNENLUECKE; MARRONE; SINGH, 2020).

#### 3.1 Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

É importante que os pesquisadores desenvolvam um protocolo de pesquisa que inclua os seguintes itens: como encontrar estudos, critérios para inclusão e exclusão de artigos, definição de resultados de interesse, verificação da precisão dos resultados, determinação da qualidade, pesquisa e análise de as estatísticas usadas, conforme ilustrado na Figura 3 (SAMPAIO; MANCINI, 2007).



**Figura 3** – Descrição geral sobre o protocolo de pesquisa da RSL.



**Fonte:** Adaptado de Sampaio, Mancini (2007)

Para a coleta de dados, seguindo as diretrizes do método RSL, foi elaborado um protocolo de revisão sistemática com o auxílio do *Parsifal*, uma ferramenta com base na web desenvolvida para apoiar pesquisadores na tarefa de realizar revisões sistemáticas da literatura. Durante a fase de planejamento, esta ferramenta facilita a elaboração de questões de pesquisa, permite a seleção de bases de pesquisa e armazena critérios de inclusão e exclusão, além de fornecer um mecanismo para especificar critérios de avaliação de qualidade e gerar *strings* de busca, mantém registrado todos os dados coletados, tornando o protocolo RSL fácil de replicar.

O *Parsifal* é dividido nos seguintes protocolos:

- Análise
- Planejamento
- Condução
- Declaração

### 3.1.1 Análise

Diante do exposto, o protocolo da RSL foi utilizado para identificar as aplicações da manufatura aditiva híbrida de metais, por meio de pesquisas existentes, abordando as suas características, os tipos de aços utilizados e suas propriedades mecânicas, contribuindo desta forma para estudos futuros acerca desta abordagem. A análise dos dados se deu de forma descritiva.

### 3.1.2 Planejamento

O primeiro passo foi a realização do planejamento. Nesta etapa, verificou-se a real necessidade de uma revisão sistemática, desenvolveu-se um protocolo de avaliação e definiu-se as seguintes questões de pesquisa:

- Quais as aplicações dessa tecnologia no setor metal mecânico?
- Quais são as principais características do processo da manufatura aditiva em aço?
- Quais são os tipos de aços atomizados disponíveis para manufatura aditiva?
- Quais as principais propriedades mecânicas desse aço?
- Quais foram os resultados obtidos com a aplicação da manufatura aditiva em aço?

A Quadro 1 define os termos usados no PICRC para a separação das palavras-chave utilizadas para criar a *string* de pesquisa.

#### Quadro 1 – Termos usados no PICRC

População	Artigos publicados em revistas acadêmicas e periódicos ou apresentados em congressos
Intervenção	Manufatura aditiva em aço
Comparação	Aços utilizados, aplicação, características e propriedades mecânicas
Resultado	Visão geral da aplicação do aço atomizado na manufatura aditiva
Contexto	Academias, Artigos científicos, Estudo de caso

**Fonte:** Autores extraído do *Parsifal* (2022)

As palavras-chave sugeridas pelo protocolo utilizadas para busca nas bases de dados foram “*Additive Manufacturing*”, “*Hybrid Additive Manufacturing*” e “*Metal Additive Manufacturing*”, a *string* gerada automaticamente pelo *Parsifal* foi: “*Additive Manufacturing*” OR “*Hybrid Additive Manufacturing*” OR “*Metal Additive Manufacturing*”.

Com relação às bases de dados, foi utilizado para esta pesquisa as bases disponíveis no Portal de Periódicos da Capes em virtude de sua ampla variedade e os critérios de filtros conforme descritos no Quadro 2.

**Quadro 2** – Bases de dados e critérios de filtros

Base de dados	Portal de periódicos CAPES ( <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i> )
Tipo de documentos	Artigos de Conferência e de Revisão
Campo de busca	Título do artigo, Resumo, Palavras-chave
Áreas de pesquisa	Ciência de materiais; Materiais de engenharia; Metalurgia e Engenharia metalúrgica
Limitar resultados	Ano: 2018 a 2022 Tipo de documento : Artigos Idioma: Inglês

**Fonte:** Autores (2022)

Os critérios de inclusão e exclusão observados na seleção dos artigos a serem analisados estão descritos no Quadro 3.

**Quadro 3** – Critérios de seleção

Inclusão	Critérios de Seleção	
	Inclusão	Exclusão
Aborda sobre Aplicação		Documento aborda outro tipo de material
Aborda sobre Características		Documento aborda processo MA por soldagem
Aborda sobre Tipos de aços		Documentos duplicados
Aborda sobre Propriedades Mecânicas		Documentos fora das áreas da Engenharia, Metal Mecânica
		Documentos fora do escopo da MA metal
		Estudos anteriores a 2018
		Apenas citações
		Trabalho não acadêmico

**Fonte:** Autores (2022)

Como primícia da verificação da qualidade dos artigos pesquisados, foi definida uma lista de questões descritas a seguir:

Q1 - O artigo apresenta no título ou resumo uma dessas palavras: *Hybrid Additive Manufacturing*, *AM*, *Steel*, *Metal Additive Manufacturing*, *AM Metal*, *Mechanical properties*?



Q2 - O(s) autor(es) desse artigo está entre os 10 mais relevantes sobre o tema?

Q3 - O artigo apresenta aplicação da manufatura aditiva de aço na fabricação de peças?

Q4 - O artigo apresenta as principais características do processo da manufatura aditiva em aço?

Q5 - O artigo apresenta tipos de aços atomizados disponíveis para manufatura aditiva?

Q6 - O artigo apresenta as propriedades mecânicas desse aço?

Q7 - Este artigo apresenta os resultados obtidos com a aplicação da manufatura aditiva em aço?

Q8 - Este artigo apresenta a aplicação da manufatura aditiva nas áreas da Engenharia e Metal Mecânico?

Para a avaliação da qualidade dos estudos, foi definido um conjunto de respostas às questões acima, e atribuída pontuação conforme a Tabela 1.

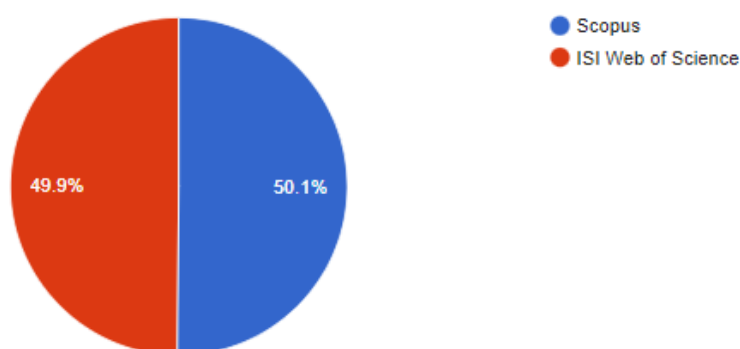
**Tabela 1** – Respostas e pontuação de avaliação

Descrição	Peso
Sim	1,0
Parcialmente	0,5
Não	0,0
Pontuação máxima	8,0
Pontuação de corte	5,0

Fonte: Autores (2022)

### 3.1.3 Condução

Nesta segunda etapa, foi efetuada a busca nas bases de dados em julho de 2022 e retornaram um total de 722 documentos, proporcionalmente divididos entre as bases *WoS* e *Scopus* conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.

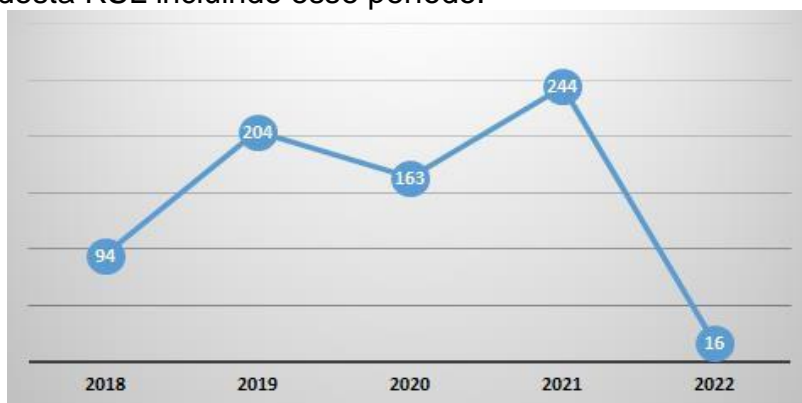


**Figura 4** – Gráfico da proporcionalidade do resultado das buscas

Fonte: Autores extraído do *Parsifal* (2022)

Por meio de uma análise bibliométrica foi possível avaliar o número de publicações por ano no período de 2018 a 2022. Na Figura 5 é possível verificar uma curva ascendente a partir do ano 2020. Embora o ano de 2022 ainda esteja vigente, observa-se o crescimento das pesquisas relacionadas ao tema da

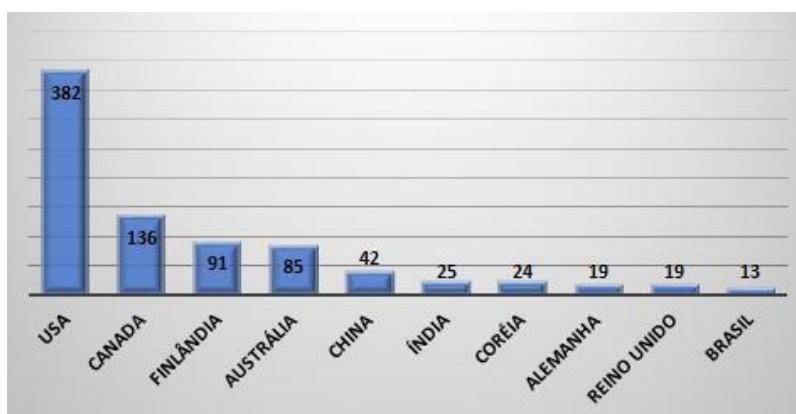
MAHM no primeiro trimestre, esse fato contribuiu e justificou o interesse na execução desta RSL incluindo esse período.



**Figura 5** – Número de publicações no período 2018 - 2022

Fonte: Autores (2022)

Nesta análise bibliométrica foi verificado também os 10 países com maior número de publicações demonstrados na Figura 6.



**Figura 6** – Gráfico com os 10 países com maior número de publicações

Fonte: Autores (2022)

A bibliometria foi utilizada para fazer o levantamento dos autores de acordo com o número de publicações, citações e o índice h. Identificou-se os 10 autores de maior relevância usando como critério o índice h, conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2** – Autores mais relevantes de acordo com índice h

Autor	Nº Publicações	Índice h	Citações
Kumar S. A.	65	16	753
Popov V.V.	16	16	818
Yadollahi A.	43	14	3914
Ahn D. G.	29	12	456
Cortina M.	20	11	1255
Davila J. L.	17	8	328
Afkhami S.	20	7	259
Jackson M.	8	4	100
Basinger K.	7	3	38
Sefene E. M.	14	2	43

**Fonte:** Autores (2022)

Após o levantamento dos dados, os artigos selecionados nas buscas foram importados para o *Parsifal* para serem analisados. Foi executada uma busca por artigos duplicados e foram separados 190 documentos, retornando 532 documentos.

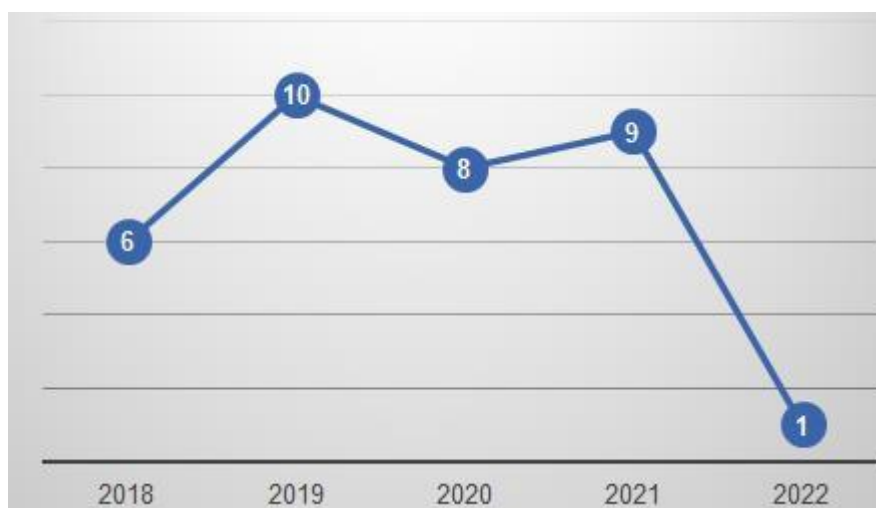
O próximo passo foi a avaliação primária dos artigos, aplicando os critérios de seleção de inclusão e exclusão, feita por meio de uma leitura dos títulos, resumos e palavras-chave com objetivo de segregar os artigos fora do escopo da pesquisa. Nesta etapa foram aceitos 268 artigos.

Por último foi realizada a leitura da introdução, dos resultados e discussões e das considerações finais dos artigos aplicando as questões para a qualificação e separando pelos critérios de inclusão. Neste último passo foram qualificados 34 artigos.

### 3.1.4 Declaração

No contexto pelo qual a MAHM foi abordada nos estudos analisados nesta RSL, uma avaliação a partir dos resultados obtidos possibilitou a identificação de 4 aspectos principais nos artigos qualificados:

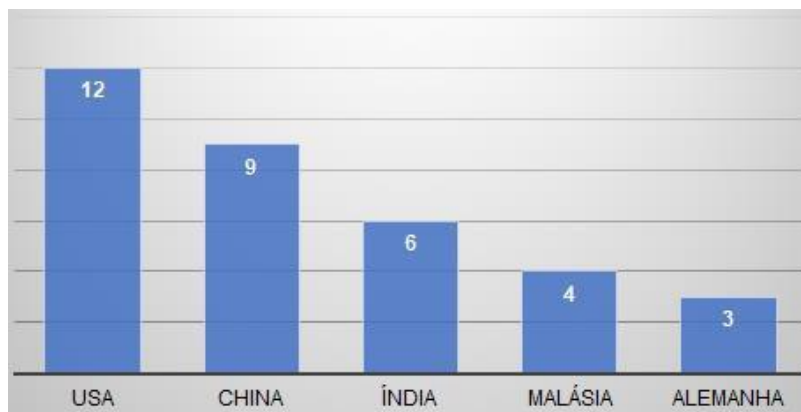
1 - Desenvolvimentos recentes em MAHM aumentaram o interesse dos pesquisadores e a publicação de artigos, conforme pode-se observar na evolução da linha do tempo na Figura 7.



**Figura 7** – Número de publicações na linha do tempo

Fonte: Autores (2022)

2 – A MAHM está se tornando um tema mundialmente importante de interesse em pesquisas e publicações, os EUA é um dos países que lidera o número de publicações de acordo com exposto na Figura 8.



**Figura 8** – Número de publicações por países

Fonte: Autores (2022)

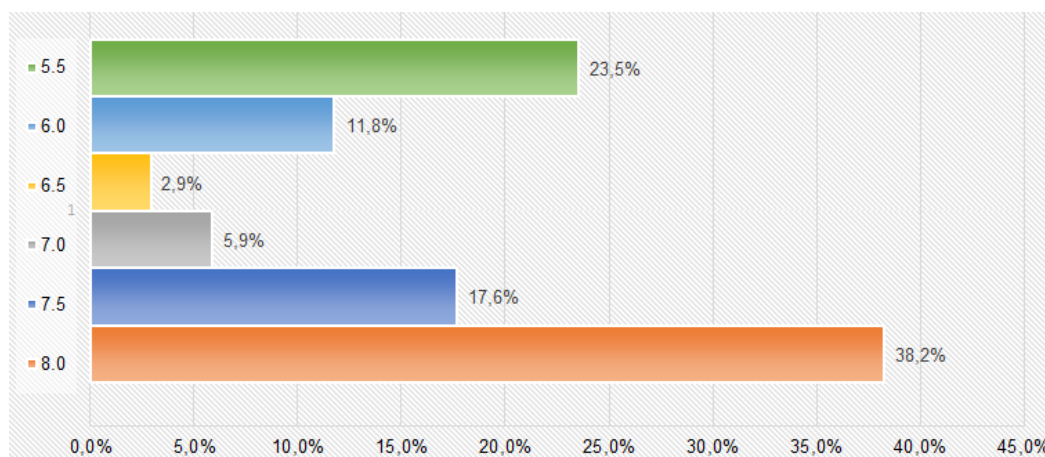
3 – Na Figura 9 observa-se que o campo das propriedades mecânicas está entre os mais pesquisados e abordados nos artigos que foram criteriosamente selecionados nesta RSL.



**Figura 9** – Avaliação da seleção dos critérios de inclusão

Fonte: Autores (2022)

4 – Graficamente é representada na Figura 10 a pontuação atribuída as questões de qualidade de acordo com a sua relevância para esta RSL.



**Figura 10** – Gráfico da atribuição da pontuação das questões

Fonte: Autores (2022)

#### 4 Resultados e Discussão

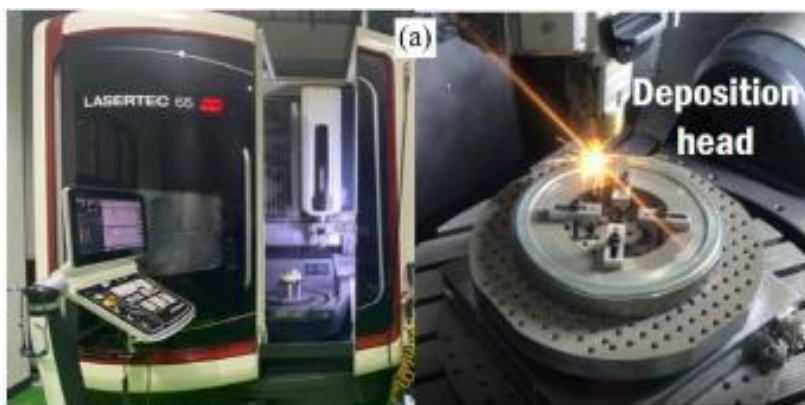
Os processos DED têm várias características vantajosas na sua aplicação, conforme descrito na Quadro 4, como a entrada de calor relativamente menor, menos distorção, menor taxa de diluição, excelente liga metálica, excelente desempenho mecânico, geometria relativamente de maior precisão, adequação para automação total e controle da precisão térmica, em termos de reparo, restauração e remanufatura de produtos (AHN, 2021).

#### Quadro 4 – Características das aplicações da DED

Aplicação	Propósito
Reparação, restauração e remanufatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redução de lead time, custo e emissão de GHG</li> <li>Reciclagem de materiais e peças usadas</li> <li>Produção de peças descontinuadas</li> <li>Melhoria de propriedades e funcionalidades</li> </ul>
Revestimento poroso	<ul style="list-style-type: none"> <li>Espuma metálica</li> <li>Melhoria da biocompatibilidade</li> <li>Melhoria do BTF</li> </ul>
Materiais e estruturas sob medida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controle das propriedades do material</li> <li>Melhoria da resistência ao desgaste e corrosão, bem como a vida útil</li> <li>Redução do custo do material</li> </ul>
Gerenciamento térmico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controle de distribuições de temperatura</li> <li>Características de resfriamento uniformes e rápidos</li> <li>Redução de tempo de ciclo de resfriamento</li> <li>Melhoria da qualidade do produto</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Ahn (2021)

A maioria dos trabalhos de pesquisa e sistemas desenvolvidos relacionados ao processo MAHM foram focados na combinação de DED com processos de usinagem, conforme demonstrado na Figura 11 (AHN, 2021).



**Figura 11** – Manufatura aditiva híbrida de metal

Fonte: Ahn (2021)

As características e a melhoria que pode ser obtida no acabamento superficial de componentes fabricados aditivamente por pós-processamento através de operações de usinagem são demonstradas na Figura 12. Diferentes abordagens para combinar de forma perfeita e sinérgica as capacidades das tecnologias MA a laser à base de pó com processos de usinagem pós-processamento foram implementadas (JIMÉNEZ *et al.*, 2021).



**Figura 12** – Manufatura aditiva híbrida de metal

Fonte: Adaptado de Jiménez *et al.* (2021)

Na Quadro 5 é apresentado um resumo das soluções MA híbridas e são analisadas e discutidas as diferentes combinações de processos, suas principais vantagens e limitações são destacadas (JIMÉNEZ *et al.*, 2021).

**Quadro 5** – Resumo das características da MA híbrida



Manufatura Híbrida	Tecnologia Manufatura Aditiva	Pós-processamento	Vantagens	Limitações e desafios
MA + usinagem	LPBF	Usinagem	Geometrias complexas e bom acabamento de superfície	Precisa de inspeções de peças, integração de software, otimização de parâmetros, oxidação (fora de câmara AM). Os rebaixos não podem ser
	DLD	Usinagem	Ganhos de produtividade e bom acabamento de superfície	
MA + tratamento térmico	LPBF	Refusão a laser	Microestrutura melhorada, tensões residuais e superfície reduzidas, rugosidade e propriedades de superfície aprimoradas	Precisa de otimização de parâmetros.
	DLD	Refusão a laser	Superfícies lisas e topografias isotrópicas	Precisa de otimização de parâmetros.
MA + tratamento de superfície	LPBF	Polimento a laser	Rugosidade da superfície reduzida	A otimização do processo é necessária para evitar a oxidação Os resultados são altamente dependentes da energia do laser Integração de processos na mesma máquina.
	DLD	Polimento a laser	Rugosidade da superfície reduzida	
	DLD	Peening	Microestrutura refinada e tensões residuais de compressão benéficas	

**Fonte:** Adaptado de Jiménez *et al.*, (2021)

Dado o enorme potencial na aplicação da MA metálica, a qualificação e a certificação são fundamentais para garantir a adoção bem-sucedida por diversos setores e acelerar o progresso da padronização.

A primeira norma de princípio de qualificação (ISO/ASTM 52942:2020), num total de sete padrões são propostos e estão em desenvolvimento, conforme descrito na Quadro 6, que abrange os campos industriais de MA, operações das máquinas para processos específicos e as aplicações (CHEN *et al.*, 2022).

**Quadro 6** – Resumo dos padrões ISO/ASTM AM publicados relacionados ao metal AM (ASTM *International* 2020; ISO 2020)

Tópico	Publicado padrões ISO/AM ativos	
	Código	Título simplificado com reflexão sobre o escopo padrão
Terminologia	ISO/ASTM 52900:2015	Princípios gerais – Terminologia
	ISO/ASTM 52921:2013	Coordenar sistemas e metodologias de teste
Princípio geral	ISO 17296-2:2015	Princípios gerais – Parte 2: Visão geral das categorias de processos e matéria-prima
	ISO 17296-3:2014	Princípios gerais – Parte 3: Principais características e métodos de teste correspondentes
	ISO/ASTM 52950:2021	Princípios gerais – Parte 4: Visão geral do processamento de dados
	ISO/ASTM 52901:2017	Princípios gerais – Requisitos para peças AM compradas
Materiais e processos	F2924-14	Ti6Al4V com PBF
	F3001-14	Ti6Al4V ELI (Extra Low Interstitial) com PBF
	F3049-14	Guia para caracterizar propriedades de pós metálicos usados para processos AM
	F3055-14a	Liga de níquel (UNS N07718) com PBF
	F3056-14	Liga de níquel (UNS N06625) com PBF
	F3184-16	Liga de aço inoxidável (UNS S31603) com PBF
	F3187-16	Guia para DED de metais
	F3213-17	Especificação padrão para Co28Cr6Mo via PBF
	F3301-18a	Especificação padrão para peças metálicas térmicas pós-processamento feitas via PBF
	F3302-18	Especificação padrão para ligas de titânio via PBF
	F3318-18	Especificação para AlSi10Mg com PBF-LB
	ISO/ASTM 52930:2021	Implantação/operação e qualificação de desempenho (QI/OQ/PQ) de equipamentos PBF de feixe a laser para fabricação de produção
	ISO/ASTM 52904-19	Prática para o processo PBF metálico para atender aplicações críticas
	ISO/ASTM 52907:2020	Métodos para caracterizar pós metálicos
Projetar	F3413-19	Guia para design – DED
	ISO/ASTM 52910-18	Design – Requisitos, diretrizes e recomendações
	ISO/ASTM 52911-1-19	Design – Parte 1: PBF baseado em laser de metais
Métodos de teste	F2971-13	Prática padrão para relatar dados para amostras de teste preparadas pela AM
	F3122-14	Guia para avaliação de propriedades mecânicas de materiais AM metálicos
	ISO/ASTM 52902-19	Artefatos de teste – Avaliação de capacidade geométrica de sistemas AM
Princípio de qualificação	ISO/ASTM 52942:2020	Operadores de máquinas qualificadas de máquinas PBF de metal laser e equipamentos usados em aplicações aeroespaciais
Dados	ISO/ASTM 52915:2020	Especificação para formato de arquivo AMF (AMF) versão 1.2

**Fonte:** Adaptado de Chen *et al.*, (2022)

A MA metal pode ser categorizada em subcategorias cujos atributos relativos e típicos em termos de velocidade do processo, precisão e volume de construção estão listados na Quadro 7 (SRINIVASAN, 2021).

### **Quadro 7 – Atributos de vários sistemas de forma de MA metal**

	Processo	Forma de material	Fonte de energia/calor	Velocidade	Precisão	Tamanho
Cama de pó	Fusão de cama de pó laser	Pó	Laser	Média	Alto	Média
	Fusão de camada de pó de feixe de elétrons	Pó	Feixe de Elétrons	Média	Alto	Média
Deposição	Deposição de energia direcionado	Pó	Laser	Média	Média	Alto
	Spray frio	Pó	Energia cinética	Alto	Média	Alto
Consolidação	Derretimento do feixe de elétrons	Arame	Feixe de Elétrons	Alto	Baixo	Alto
	Moldagem por injeção de metal	Pó	Agrotinante/ Matriz	Alto	Média	Baixo
	Jato de agrotinante	Pó	Pós-consolidação Agrotinante Pós-consolidação	Média	Média	Média

**Fonte:** Adaptado de Srinivasan (2022)

A Quadro 7 também inclui outras técnicas de fabricação de formato quase líquido, como moldagem por injeção de metal (MIM), trata-se de um processo de sinterização e consolidação de pó.

Na MA metal diversos tipos de aço inoxidável, aço ferramenta (H13 e P20), ligas de cobalto-cromo, titânio e suas ligas, ligas de alumínio, ligas de níquel e alguns metais preciosos, como prata pura e ouro, têm sido processados com sucesso.

Embora exista uma variedade de aços, as características de fadiga de poucos deles foram estudadas até agora. A Quadro 8 resume uma lista dos aços investigados em estudos de fadiga e suas características típicas (AFKHAMI *et al.*, 2019).

### **Quadro 8 – Aços investigados para a avaliação das características de fadiga de materiais AM.**

Nome do aço de acordo com:				Descrição
Comercial	EOS	UNS	Outros	
316L	316L	S31673	ENI.4401	Um aço inoxidável austenítico dúctil com alta resistência à corrosão e uma ampla gama de aplicações nas indústrias automotiva, aeroespacial, alimentícia e química
18Ni-300	MS1	K93120	ENI. 2709	Um aço maraging endurecível com boa usinabilidade e condutividade térmica. Este aço utiliza microestrutura martensítica e endurecimento por idade para ganhar suas propriedades mecânicas. Geralmente é usado como aço ferramenta para fabricação de matrizes e indústria aeroespacial
15-5 PH	PH1	S15500	-	Um aço martensítico endurecido por precipitação com alta resistência, alta dureza e excelente resistência à corrosão. É usado para fabricar peças de máquinas pesadas e protótipos funcionais.
630	17-4 PH	S17400	17Cr-4Ni; AISI630; ENI.4542	Um aço martensítico endurecido por precipitação com boa resistência à corrosão. Geralmente é usado para instrumentos médicos e outras peças de resistência à corrosão com boas características mecânicas
300M	-	K44220	4340M	Uma versão modificada do aço AISI 4340 com maiores teores de silício, vanádio, carbono e molibdênio. Geralmente é usado na indústria aeroespacial devido à sua alta resistência, boa tenacidade à fratura e ductilidade.
H-13	-	T20813	DIN 1.2344	Um aço para ferramentas de trabalho a quente de carbono temperado e temperado. É frequentemente usado em moldagem por injeção e extrusão a quente.
Marlok* C1650	-	-	-	Um aço ferramenta maraging endurecido por precipitação. É frequentemente utilizado na fundição de alumínio devido às suas propriedades térmicas e mecânicas superiores.

**Fonte:** Adaptado de Afkhani *et al.*, (2019)

Devido à complexidade do processo de MA metal, os fabricantes de sistemas desenvolveram conjuntos de condições de processamento otimizadas para alguns metais em pó existentes. A Quadro 9 define os modelos de máquinas e fabricantes específicos para um ou mais tipos de metais em pó para a MA (ASNAFI, 2021).

**Quadro 9 – Configuração de modelos de máquinas e fabricantes**

Fabricante	Modelo	Al	Co	Cu	Fe	Ni	Ti	W
3D Systems	DMP Factory 500 PrinterModule		Por solicitação			Ligas de níquel	Por Solicitação	
	DMP Factory/Flex 350	AlSi7Mg0.6, AlSi10Mg	CoCrF75	-	Maraging Steel, 17-4PH, 316L	Ni625, Ni718	Ti Gr1, Ti Gr5, Ti Gr23	-
	DMP Flex 100	-	CoCr	-	17-4PH, 316L	-	-	-
	ProX DMP 300	AlSi12	CoCr	-	Maraging Steel, 17-4PH	-	-	-
	ProX DMP 200	AlSi12	CoCr	-	Maraging Steel, 17-4PH, 316L	-	-	-
Additive Industries	MetalFAB1	AlSi10Mg, ScalmAlloy®	-	-	Aço ferramenta 1.2709, 316L	IN718	Ti6Al4V	-
Concept Laser	X Line 2000R	AlSi10Mg	Produtividade Balanceada	-	-	Níquel 718	Ti6Al4V, Grade 23	-
	M Line Factory	A205	CoCrMo	-	-	Níquel 718CL	-	-
	M2 Multilaser	AlSi10Mg, AlSi7Mg	CoCrMo	-	Maraging M300, 17-4PH, 316L	Nickel 625, Nickel 718	Ti6Al4V, Grade 23	-
EOS	EOS M 400-4	AlSi10Mg	-	-	MS1, 316L	HX, IN718	Ti64, Ti64ELI	
	EOS M 400	AlSi10Mg	-	-	MS1, 316L	IN718	Ti64	
	EOS M 300-4	AlSi10Mg	-	-	MS1, 316L	IN718		
	EOS M 290	AlSi10Mg	MP1	-	MS1, CX, PH1, 17-4PH, 316L	HX, IN625, IN718	Ti64, Ti64ELI, TiCP Grade 2	
	EOS M 100	-	SP2	-	316L	-	Ti64	W1
SLMSolutions	SLM@NXG XII 600	AlSi10Mg (Sem limitação)			Sem limitação	IN718 (Sem limites)	Sem limitação	
	SLM@800				Maraging 1.2709, 316L (1.4404), 15-5PH (1.4545), 17-4PH (1.4542), Invar 36®		Ti6Al4V	
	SLM@500	AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3	CoCr28Mo6, SLM@ MediDent	CuSn10, CuNi2SiCr		HX, IN625, IN718, IN939	ELI (Grade 23), TA15, e Ti (Grade 2)	-
	SLM@280							
	SLM@125							
Renishaw	RenAM 500Q/S							
	RenAM 500E							
	RenAM 500M	AlSi10Mg	CoCr	-	Maraging M300, 316L	IN625, IN718	Ti6Al4ELI	-
	AM 400 AM 250							
Trumpf	TruPrint 1000	Sim para todos, exceto W+ ligas de metais preciosos + metais amorfos						
	TruPrint 2000	Yes to all except Cu and W+ amorphous metals						
	TruPrint 3000	Sim para todos, exceto Co, Cu e W						
	TruPrint 5000	Sim para todos, exceto Co, Cu e W						

Fonte: Adaptado de Asnafi (2021)

As opções de metais em pó vêm crescendo desde 1995. No entanto, esse número de opções ainda é muito pequeno, comparado ao número de materiais disponíveis para uso na manufatura convencional.

A deposição de metal a laser é amplamente reconhecida como uma técnica de fabricação aditiva usada para aplicações de reforma e reparo, juntamente com restauração estrutural e geométrica, porém, as propriedades

mecânicas precisam ser levadas em consideração para garantir a qualidade final do processo.

Neste sentido, a alta energia de laser incidente e uma estratégia de varredura de comprimento de trilha constante exibem boas propriedades mecânicas. Em contraste, martensita e microestrutura homogênea são obtidas com baixa energia incidente, como pode ser observado na Quadro 10 (PATHANIA *et al.*, 2021).

**Quadro 10** – Tipo de aço, potência do laser e suas propriedades mecânicas

Material Substrato	Material Usado	Potência do Laser (W)	Processo	Propriedades Mecânicas
Titânio	Ti6Al4V	600	DLMD	-
Ti6Al4V	Ti6Al4V	1500	DLMD	20% de aumento de dureza
MetoClad e Ti6Al4V	MetcoClad718 e Ti6Al4V	550	Revestimento a Laser	-
Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si	TiNi-Ti revestimento composto	400	Revestimento a Laser	A resistência ao desgaste melhorou cerca de 70% do substrato e a dureza também foi significativamente melhorada
Ti6Al4V	Ti6Al4V com 0.4% traços de boro	1600	Revestimento a Laser	30% de aumento de dureza
Ti6Al4V	Ti6Al4V	700	Deposição de metal a laser	Dureza e resistencia a fadiga melhorado no revestimento
Ti6Al4V	Ti6Al4V	210-1100	Revestimento a Laser	Alta dureza alcançada

**Fonte:** Adaptado de Pathania, *et al.* (2021)

Há um efeito da tensão residual, acabamento superficial e defeitos de microestrutura que ocorrem nas propriedades mecânicas de um material durante a técnica de deposição de metal a laser que precisam ser consideradas na estratégia da varredura e nos parâmetros durante o processo.

## 5 Considerações finais

Este artigo teve como objetivo identificar as aplicações da manufatura aditiva híbrida de metais, suas características, os tipos de aços e suas propriedades mecânicas, a partir de uma revisão sistemática da literatura identificou 722 artigos publicados nos últimos cinco anos, alcançou por meio de protocolos específicos 268 artigos sendo selecionados 34 artigos como objetos de pesquisa deste artigo.

A partir de uma variedade de estudos, inferiu-se que:

- O processo híbrido da MA metal combinando os processos DED e manufatura subtrativa pode superar as desvantagens do pós-processamento adicional, através da realização de multitarefa num sistema integrado.

- O desenvolvimento de estações de trabalho para processos híbridos inclui desafios associados a integração de hardware e software.
- . Diferentes metais em pó estão sendo projetados para diversas aplicações em ferramentas com menores custos de matéria-prima e processamento, dentre eles H13 e P20.
- Resultados experimentais indicam que a redução da rugosidade superficial dos materiais MA melhorará sua resistência à fadiga e ao desgaste a abrasão.

Devido a restrições práticas, este artigo não pode fornecer uma revisão abrangente sobre a MAHM, pois, atualmente há trabalhos limitados de pesquisa, e a sua aplicação ainda está em desenvolvimento.

Espera-se que esta pesquisa contribua para uma compreensão mais profunda sobre a MAHM e suas aplicações, porém, ainda existem algumas lacunas de conhecimento no campo de estudo.

Neste sentido, sugere-se futuras pesquisas para:

- Desenvolvimento de novos processos e sistemas MAHM;
- Desenvolvimento de software para sistemas MAHM (incluindo programas para geração de caminhos);
- Retrofit de máquina-ferramenta;
- Análises termomecânicas para estimar a deposição e estratégias;

## Referências

AFKHAMI, S. *et al.* Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. **International Journal of Fatigue**, v. 122, p. 72–83, maio 2019.

AHN, D.-G. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 8, n. 2, p. 703–742, mar. 2021.

ASNAFI, N. Application of Laser-Based Powder Bed Fusion for Direct Metal Tooling. **Metals**, v. 11, n. 3, p. 458, 10 mar. 2021.

BASINGER, K. L. *et al.* Development of a modular computer-aided process planning (CAPP) system for additive-subtractive hybrid manufacturing of pockets, holes, and flat surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 5–8, p. 2407–2420, maio 2018.

CHEN, Z. *et al.* A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 17, n. 2, p. 382–405, 3 abr. 2022.

CORTINA, M. *et al.* Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. **Materials**, v. 11, n. 12, p. 2583, dez. 2018.



DÁVILA, J. L. *et al.* Hybrid manufacturing: a review of the synergy between directed energy deposition and subtractive processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 110, n. 11–12, p. 3377–3390, out. 2020a.

DÁVILA, J. L. *et al.* Hybrid manufacturing: a review of the synergy between directed energy deposition and subtractive processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 110, n. 11–12, p. 3377–3390, out. 2020b.

JACKSON, M. A. *et al.* Energy Consumption Model for Additive-Subtractive Manufacturing Processes with Case Study. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 4, p. 459–466, ago. 2018.

JIMÉNEZ, A. *et al.* Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 114, n. 1–2, p. 63–96, maio 2021.

LINNENLUECKE, M. K.; MARRONE, M.; SINGH, A. K. Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. **Australian Journal of Management**, v. 45, n. 2, p. 175–194, 1 maio 2020.

MAAMOUN, A. H. *et al.* Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 234–247, maio 2018.

NAIDOO, L. C. *et al.* Material characterization and corrosion behavior of hybrid coating Ti–Al–Si–Cu/Ti–6Al–4V composite. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 51, n. 6, p. 766–773, jun. 2020.

PARSIFAL. Disponível online em:< <https://parsif.al/>> Acesso em:04 julho 2022.

PATHANIA, A. *et al.* Reclamation of titanium alloy-based aerospace parts using laser-based metal deposition methodology. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4886–4892, 2021.

POPOV, V. V.; FLEISHER, A. Hybrid additive manufacturing of steels and alloys. **Manufacturing Review**, v. 7, p. 6, 2020.

SAHU, A. K.; MAHAPATRA, S. S. Performance analysis of tool electrode prepared through laser sintering process during electrical discharge machining of titanium. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 3–4, p. 1017–1041, jan. 2020.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Brazilian Journal of Physical Therapy**, v. 11, p. 83–89, fev. 2007.

SEFENE, E. M.; HAILU, Y. M.; TSEGAW, A. A. Metal hybrid additive manufacturing: state-of-the-art. **Progress in Additive Manufacturing**, 31 jan. 2022.

SRINIVASAN, D. Challenges in Qualifying Additive Manufacturing for Turbine Components: A Review. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 74, n. 5, p. 1107–1128, maio 2021.

XIAO, X.; JOSHI, S. Process planning for five-axis support free additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 36, p. 101569, dez. 2020.

YADOLLAHI, A. *et al.* Fatigue life prediction of additively manufactured material: Effects of surface roughness, defect size, and shape. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 41, n. 7, p. 1602–1614, jul. 2018.

ZHAI, Y. *et al.* Understanding the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V and Inconel 718 alloys manufactured by Laser Engineered Net Shaping. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 334–344, maio 2019.