



REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

**MANUFATURA ADITIVA DE MATERIAIS METÁLICOS: UMA ABORDAGEM DE PRODUÇÃO
CENTRADA NO CLIENTE**

**ADDITIVE MANUFACTURING OF METALLIC MATERIALS: A CUSTOMER-CENTRIC
PRODUCTION APPROACH**

Anderson Tadeu de Santi Barbosa de Almeida^{1, i}
Gustavo Braz de Cristo Souza^{2, ii}
Vitor de Oliveira Botelho^{3, iii}

Data de submissão: (25/11/2023) Data de aprovação: (02/12/2024)

RESUMO

A Indústria 4.0 demanda alta personalização e produção sob demanda, impulsionando a busca por tecnologias de fabricação flexíveis e eficientes. A Manufatura Aditiva (MA) de materiais metálicos emerge como uma solução promissora, permitindo a criação de peças complexas e personalizadas, antes, muitas vezes inviáveis com métodos tradicionais. No entanto, a adoção da MA enfrenta desafios relacionados a custos, tempos de produção e limitações em relação aos materiais e processos disponíveis. Este estudo tem como objetivo identificar as principais contribuições e limitações da MA de metais na personalização de produtos na Indústria 4.0. Utilizando uma revisão sistemática da literatura, seguindo os passos da metodologia PRISMA, foram analisados artigos científicos sobre MA de metais, indústria 4.0 e customização. A análise da literatura revelou que a MA de metais oferece vantagens significativas para a personalização, incluindo a fabricação de peças complexas e a produção sob demanda. No entanto, as limitações em termos de custo e tempo de produção, bem como a gama limitada de materiais e os desafios de pós-processamento, foram destacadas. Os resultados desta revisão sistemática indicam a necessidade de avanços tecnológicos para superar as limitações atuais e viabilizar a ampla adoção da MA na personalização de produtos metálicos na Indústria 4.0. O estudo contribui para uma compreensão mais aprofundada das potencialidades e desafios dessa tecnologia, informando decisões estratégicas na indústria. No capítulo 1 é feita uma breve introdução sobre o tema, no capítulo 2 é apresentada a metodologia do estudo, no 3 é feita uma revisão da literatura, em seguida no capítulo 4 são mostrados os resultados e discussões e por fim, no capítulo 5 as conclusões.

Palavras-chave: manufatura aditiva; customização; Indústria 4.0.

¹ Doutorando em Engenharia de Produção na Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: anderson.santi@ufabc.edu.br

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação na Faculdade Salvador Arena (CEFSA). E-mail: brasa2009@gmail.com

³ Mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: botelhovitor.oliveira@gmail.com

ABSTRACT

Industry 4.0 demands high levels of customization and on-demand production, driving the search for flexible and efficient manufacturing technologies. Additive manufacturing (AM) of metallic materials emerges as a promising solution, enabling the creation of complex and customized parts previously infeasible or impractical with conventional methods. However, the adoption of AM faces challenges related to cost, production lead times, and limitations concerning available materials and processes. This study aims to identify the key contributions and limitations of metallic additive manufacturing in product customization within the context of Industry 4.0. Employing a systematic literature review following the PRISMA methodology, scientific articles on metallic additive manufacturing, Industry 4.0, and customization were analyzed. The literature review revealed that metallic additive manufacturing offers significant advantages for customization, including the fabrication of complex parts and on-demand production. Nevertheless, limitations in terms of cost and production lead times, as well as the limited range of materials and post-processing challenges, were highlighted. The results of this systematic review indicate the need for technological advancements to overcome current limitations and enable the widespread adoption of additive manufacturing for metallic product customization in Industry 4.0. This study contributes to a more comprehensive understanding of the potential and challenges of this technology, informing strategic industrial decision-making. The study is structured as follows: Chapter 1 provides a brief introduction to the topic; Chapter 2 presents the study's methodology; Chapter 3 offers a literature review; Chapter 4 presents the results and discussion; and Chapter 5 concludes the study.

Keywords: additive manufacturing; customization; Industry 4.0.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de MA surgiram como alternativas promissoras de técnicas de fabricação. As técnicas convencionais de fabricação envolvem corte e remoção de material por procedimentos mecânicos para obter o produto final. Considerando que, peças discretas de material metálico, em qualquer forma, são combinadas ponto por ponto e camada por camada para a fabricação do produto final em processos de MA, conceitos de customização de produtos podem ser desenvolvidos através de técnicas como no caso da prototipagem rápida com metais (Canciglieri *et al.*, 2015). Portanto, desenvolvimento de uma tecnologia de produção combinando ambos os métodos, ou seja, o convencional para partes comunizadas do produto e técnicas aditivas para as partes customizadas, é significativamente interessante para a indústria. A manufatura híbrida é uma designação usada para processos que combinam diferentes tecnologias, como uma combinação de MA e métodos convencionais, como forma de superar suas limitações individuais e se beneficiar de suas vantagens intrínsecas. 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).

Assim, este artigo deseja cobrir os aspectos operacionais da prototipagem rápida de metais, apresentando um sistema de produção que começa a se desenhar com o objetivo de cada vez mais customizar produtos, baseado no conceito da Indústria 4.0.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Indústria 4.0

De acordo com o estudo Acatech (Schuh *et al.*, 2020), o “*Industrie 4.0 Maturity Index*”, muitas organizações ainda carecem de um entendimento básico dos principais aspectos da Indústria 4.0. Por exemplo, as empresas geralmente restringem incorretamente a Indústria 4.0 à digitalização ou automação total. Além disso, em vez de buscar um senso coletivo de mudança, eles se concentram em mudanças isoladas que têm pouco ou nenhum efeito. Para que as possíveis vantagens da Indústria 4.0 sejam percebidas, essas mudanças devem ser aplicadas a todos os setores, seja no relacionamento com o consumidor, entendendo suas necessidades (envolvendo ferramentas de análise comportamental) ou na automatização de processos industriais.

Segundo o estudo, a principal característica dessa nova era é a velocidade com que as mudanças podem ocorrer. Quanto mais rápidas forem as mudanças organizacionais para atender às atuais necessidades do mercado, mais rápido estarão inseridas nesse novo contexto. Essas mudanças também estão relacionadas ao tempo de produção e entrega. Empresas eficientes que se adaptaram às novas tecnologias podem produzir melhor, mais rapidamente, com maior qualidade e entregar produtos em menos tempo.

2.2 Manufatura aditiva

Quando falamos de um processo de MA, estamos falando de uma fabricação avançada em que objetos, peças, são produzidas diretamente de uma informação digital, ou seja, de um modelo 3D, projetado com o auxílio de um software e um computador através da adição de materiais camada por camada. Se difere de uma manufatura tradicional que está relacionada com remoção de materiais de uma peça bruta, como a usinagem, ou obtidas através de processos que empregam algum tipo de energia, como forjamento e fundição. Através da MA, uma peça com um formato complexo pode ser fabricada como um objeto único, ou seja, não necessariamente em escala, o que dá a ideia de customização, o que no passado não era possível de ser pensado. Antes, peças mais complexas eram normalmente divididas em partes menores, mais fáceis de serem fabricadas e depois montadas em um processo de unificação das partes individuais. Dessa forma, o processo envolve além de intensivo uso de mão-de obra, mas também desperdícios de materiais, tanto para a fabricação das partes individuais, como na montagem do conjunto, considerando que esses materiais usados nessa montagem são eliminados em uma MA. A massa líquida do produto também acaba sendo afetada com o uso de materiais utilizados para a montagem das partes individuais, o que pode ser um fator impactante em algumas situações em que a massa é um fator relevante, como no caso da indústria automotiva, onde massa maior representa maior consumo de combustível. A tecnologia de MA, por outro lado, pode produzir uma peça diretamente de um modelo digital, como de um software CAD 3D, independentemente da complexidade, produzindo dessa forma peças únicas ou até mesmo em série.

As tecnologias de MA, hoje em dia, são as mais variadas, mas para esse estudo, tomamos como base principalmente as que envolvem a deposição de metais como sinterização direta a laser de metal (DMLS), fusão por feixe de elétrons (EBM), *Binder Jetting*, fusão seletiva a laser (SLM), sinterização seletiva a laser (SLS) e deposição de metal a laser

(LMD) (Scott *et. al.*, 2012). O projetista de um determinado produto, não precisa se preocupar com a capacidade de produção do mesmo, ele deve estar apenas preocupado com a funcionalidade da peça que está projetando. Inicialmente, o processo de MA era utilizado apenas para fazer protótipos de produtos e muitas vezes com materiais que nem eram a base do produto final, justamente por conta dessa limitação na escolha de materiais que poderiam ser utilizados nas impressoras de MA daquele momento (Kruth, Leu, Nakagawa, 1998; Wohlers e Caffrey, 2013; Liou *et. al.*, 2007). Há atualmente uma série de indústrias que estão implementando essa tecnologia revolucionária de fabricação (Mahamood *et. al.*, 2013), como as indústrias aeroespaciais, automobilísticas e biomédicas (Hopkinson, Dickens, 2001; Hou *et. al.*, 2001; Hao, Dadbakhsh, 2009; Petrovic *et. al.*, 2011) e cada vez mais os setores que estão aderindo aumenta conforme a tecnologia evolui.

Neste artigo, algumas dessas tecnologias de MA são revisitadas e detalhadas, com o objetivo de lançar luz sobre as possibilidades de processo produtivo, descrever os sistemas de operação, assim como conhecer as vantagens, limitações e áreas de aplicação.

2.2.1 Processo baseado em materiais em pó

Essa classe de tecnologia de MA usa a energia de um feixe de elétrons ou laser para fundir ou derreter materiais em pó para a fabricação de peças (Shirazi *et. al.*, 2015; Dickson, 2015). As tecnologias de fabricação de aditivos nesta classe incluem sinterização direta a laser de metal (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS), fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting* - EBM), fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* - SLM), sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* - SLS) e deposição de metal a laser (*Laser Metal Deposition* - LMD) e *Binder Jetting*. Cada uma dessas tecnologias é descrita nesta seção.

2.2.1.1 Sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* - SLS)

Essa tecnologia de MA também está baseada numa produção através de material em pó, entretanto, nesse processo há um espalhamento do pó e uma subsequente compactação. Se caracteriza por ter um sistema de laser, um sistema automático de alimentação da camada do material em pó e um sistema computadorizado que fará todo o controle do processo (Bouk e Kaal, 2015). Esse processo de sinterização seletiva a laser utiliza um substrato para a produção da peça, que é fixado numa plataforma e depois nivelado. A câmara de fabricação é selada e contém uma quantidade reduzida de oxigênio, devido a existência do gás inerte, como argônio, que funcionará como um protetor do processo, que é alimentado na câmara. Uma camada fina do material em pó é depositada no substrato por um mecanismo de estratificação.

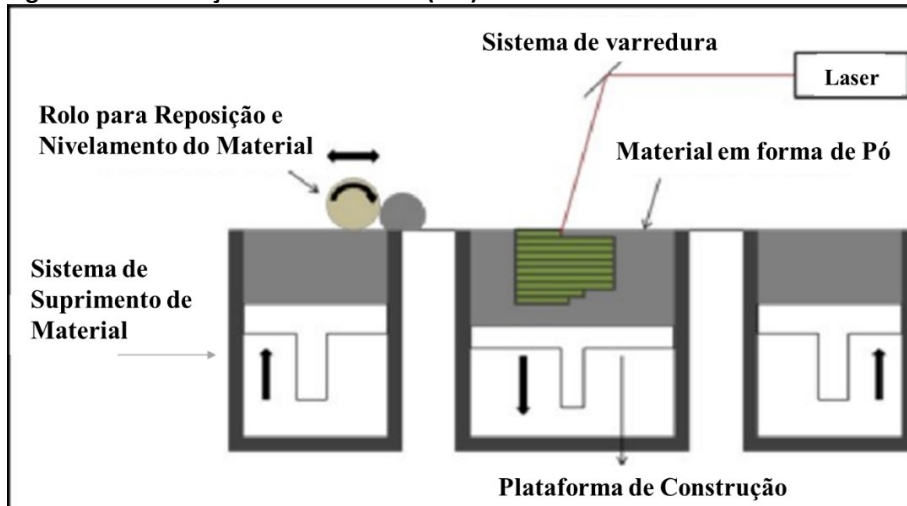
Em seguida, um feixe de laser faz a varredura da superfície de pó, conforme modelo definido por um software de CAD, formando dessa forma, camadas do produto que será produzido. Então, esse processo de espalhamento e sinterização com o laser é repetido, camada por camada, até que a peça final seja concluída (Niu e Chang, 2000; Peterson e Kalz, 2013; Telenko e Seepersad, 2010). Esta tecnologia permite a utilização de uma grande variedade de materiais, entretanto, os mais comuns são: metal-polímero, parafina, cera e ainda vários tipos de ligas de aço, nylon, polímeros e carbonatos. As vantagens de utilizar esse processo de sinterização seletiva a laser são:

- as peças podem ser produzidas a partir de uma grande variedade de materiais;
- uma geometria complexa é possível desde que o pó não sinterizado possa ser removido com facilidade.

As desvantagens da sinterização seletiva a laser são:

- o equipamento é bastante caro;
- as peças ficam porosas e as superfícies com rugosidade;
- se ocorrer distorção térmica em peças de polímero, causará encolhimento e deformação das peças.

Figura 1 - Sinterização seletiva a laser (SLS)



Fonte: Adaptado de Chua, Leong e Lim (2010)

2.2.1.2 Sinterização direta a laser de metal (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS)

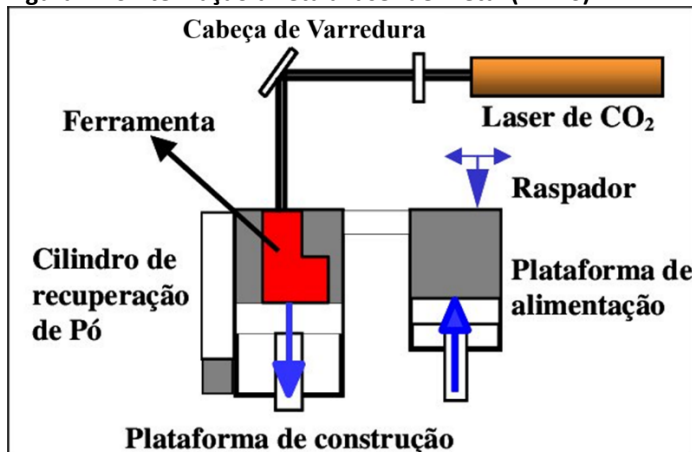
Neste processo a fabricação é feita através da compactação do material metálico em pó com uma fonte de energia, como por exemplo o laser, porém sem fundir o material, atingindo apenas uma temperatura suficiente para a união das partículas, criando assim uma estrutura sólida, baseada no modelo digital do produto (Bineli *et al.*, 2010). O princípio de funcionamento desse processo de MA a capacita a fabricar peças com complexidades tanto externas como internas. Após cada camada produzida, com o objetivo de evitar a colisão da lâmina do recobridor com as plataformas tanto dos dispensadores como da peça, quando em movimento, estas são rebaixadas, para que uma nova camada seja produzida. A plataforma dos dispensadores fornece o material metálico em pó necessário para que uma nova camada do produto seja criada através do aplicador e a distribuição do material em pó dos dispensadores para a plataforma de fabricação da peça é feita pelo recobridor, em um movimento da direita para a esquerda, ao mesmo tempo que remove o excesso de pó que cai no coletor. Esse cabeçote faz uma varredura movendo o feixe de laser através de uma secção transversal em duas dimensões (bidimensional). Os materiais metálicos em pó são depositados, curados e sinterizados pelas áreas através de uma absorção de energia (Nyrhila, 2005). Este processo se repete continuamente até que a peça esteja totalmente concluída. Nesse processo, foram obtidos com sucesso diversos produtos a partir de materiais como aço inox, ligas de titânio, ligas de cromo-cobalto e ligas de alumínio (Nyrhila, 2005). Algumas das vantagens deste tipo de processo de MA são destacadas a seguir (Bineli *et al.*, 2010; Nyrhila, 2005).

- as peças são produzidas rapidamente, num prazo de poucas horas;
- podem ter geometria com complexidades tanto externas como internas;
- resulta em peças de alta qualidade.

Apesar de todas essas vantagens, de acordo com Bineli *et. al.*, (2011), alguns dos fatores limitantes são:

- o processo ainda é bastante caro;
- consome muita energia durante a fabricação;
- a superfície, depois da peça pronta, precisa ser polida e a estrutura metálica que serve de suporte removida;
- pós-processamento térmico é lento.

Figura 2 - Sinterização direta a laser de metal (DMLS)



Fonte: Esperto e Osório (2008)

2.2.1.3 Fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting - EBM*)

Nesse processo de MA, as peças são fabricadas, como na tecnologia anterior, adicionando material camada por camada, seguindo o modelo e as etapas definidas por um software de design CAD 3D (Morgan, Ulf, Ola, 2006). Nesse processo, o pó metálico é armazenado em um reservatório dentro da própria máquina de EBM e uma lâmina distribui uma fina camada de pó metálico sobre a plataforma de construção. A espessura dessa camada é controlada com precisão, geralmente variando entre 50 e 100 micrômetros, dependendo do material e da aplicação. Um feixe de elétrons é gerado dentro de um componente do equipamento chamado canhão de feixe de elétrons. Para tal, um filamento de tungstênio é aquecido até atingir uma temperatura bastante alta fazendo com que os elétrons sejam liberados, que na sequência são acelerados através de um campo elétrico e então concentrados em um feixe através de bobinas eletromagnéticas (Ladani e Roy, 2013; Biamino *et. al.*, 2010). O feixe de elétrons, então, funde cada camada do pó de material metálico para a geometria desejada num ambiente de vácuo. O processo dentro desse ambiente de vácuo elimina impurezas e é capaz de produzir propriedades de alta resistência do material que está em processamento (Morgan, Ulf, Ola, 2006). Neste processo, os materiais mais utilizados para essa fusão através do feixe de elétrons são basicamente aço e liga de titânio. As seguintes vantagens são características desta tecnologia (Ladani e Roy, 2013):

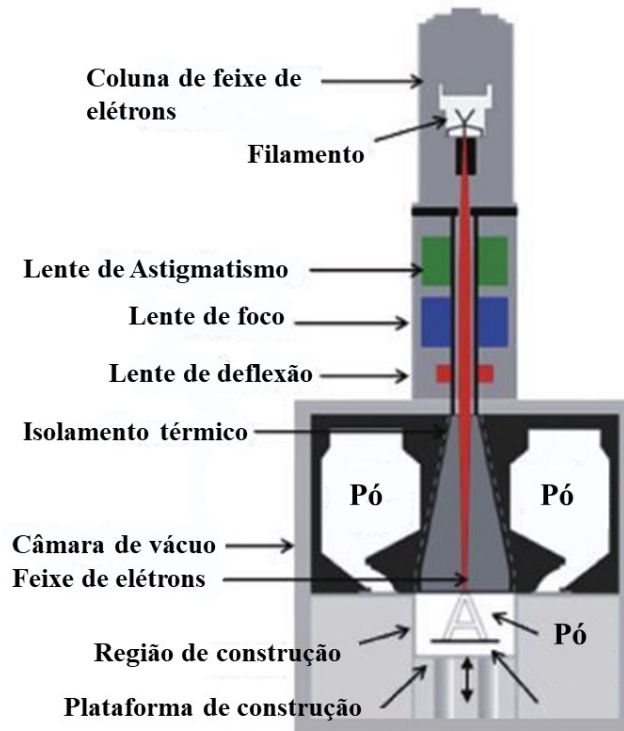
- eficiência alta quanto à utilização da matéria-prima;
- o ambiente de vácuo elimina impurezas e possibilita bom ambiente térmico;
- tem um processo relativamente rápido;
- praticamente elimina as operações de acabamento;
- possibilidade o processamento de materiais que tenham alto ponto de fusão;

- possibilita produtos complexos, dando liberdade para o design com foco na funcionalidade;
- possibilita um alto grau na customização de componentes.

Algumas das desvantagens dessa tecnologia de feixe de elétrons são (Neira, 2012):

- Devido a exigência de vácuo para o processo, pode ter um alto custo;
- Há geração de Raios-X durante a operação.

Figura 3 - Fusão por feixe de elétrons (EBM)



Fonte: Adaptado de 3DLAB

2.2.1.4 Fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting - SLM*)

A fusão seletiva a laser funciona de forma bastante semelhante com o processo de sinterização seletiva a laser, sendo que a principal diferença é a fusão total, enquanto na tecnologia anterior, a sinterização é seletiva. Como nos outros processos, inicialmente há a necessidade de um modelo em CAD 3D que na sequência é dividido em camadas. Para cada uma das camadas, o caminho de varredura do laser é calculado pelo sistema que irá definir o contorno e a forma de preenchimento, sequência que recebe o nome de padrão *raster*. Assim, as camadas são formadas com o espalhamento do pó na plataforma de fabricação da peça e em seguida o laser funde o pó durante a etapa de varredura e o mesmo logo em seguida se solidifica formando um componente sólido em 3D (Diatlov *et. al.*, 2011). Diversos materiais são usados com esta tecnologia como ligas de níquel, aço, titânio, alumínio e cobalto-cromo. As vantagens de utilizar a tecnologia de fusão a laser seletiva são:

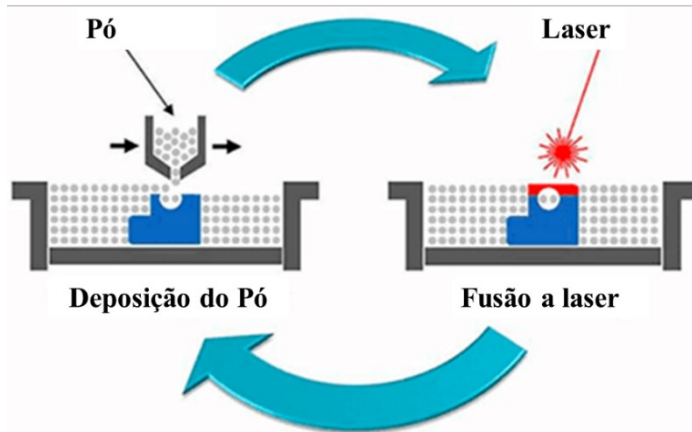
- reduz o desperdício de material, reduzindo custos;
- excelente ciclo desenvolvimento e produção;
- possibilita a fabricação de geometrias complexas;
- processo ideal para produção de peça única ou baixo volume;

- possibilita peças totalmente customizadas que se adequam a necessidades específicas.

As desvantagens da fusão a laser seletiva são:

- é um processo bastante caro e de fabricação lenta;
- tolerâncias e acabamentos superficiais são muito limitados.

Figura 4 - Fusão seletiva a laser (SLM)

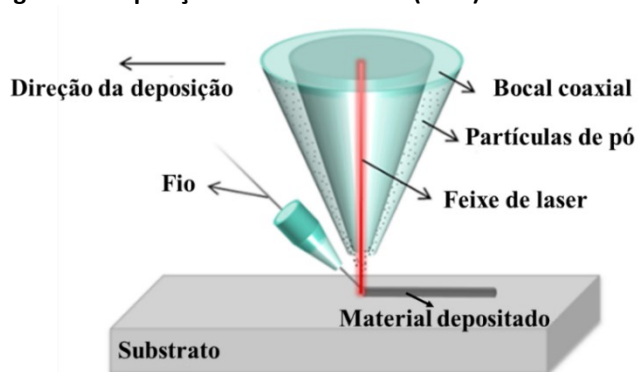


Fonte: Adaptado de 3DLAB

2.2.1.5 Deposição de Metal a Laser (*Laser Metal Deposition - LMD*)

O processo de Deposição de Metal a Laser (*LMD – Laser Metal Deposition*), ou também chamado de revestimento a laser (*laser cladding*), é um processo de MA baseado em laser e ele tem evoluído e sendo usado cada vez mais em diversos segmentos. Esta afirmação é fundamentada pelas inúmeras aplicações que têm surgido nos últimos anos, sobretudo na área da aeronáutica (Balazic, Milfelner, Kopac, 2010; Tao *et al.*, 2015), na manutenção e recuperação de ferramentas e moldes (Jhavar, Paul, Jain, 2013; Prakash *et al.*, 2015), na indústria pesada (Riedelsberger, 2013; Andolfi, Mammoliti, Pineschi, 2012) e na indústria naval (Nowotny, 2011; Torims *et al.*, 2012). O processo deposição de metal a laser é baseado na geração de uma poça de fusão na superfície do substrato que está sendo irradiado por um feixe de laser, enquanto o material de enchimento é injetado simultaneamente através de um bocal (em pó ou em forma de fio) (Thompson *et al.*, 2015).

Figura 5 - Deposição de Metal a Laser (LMD)



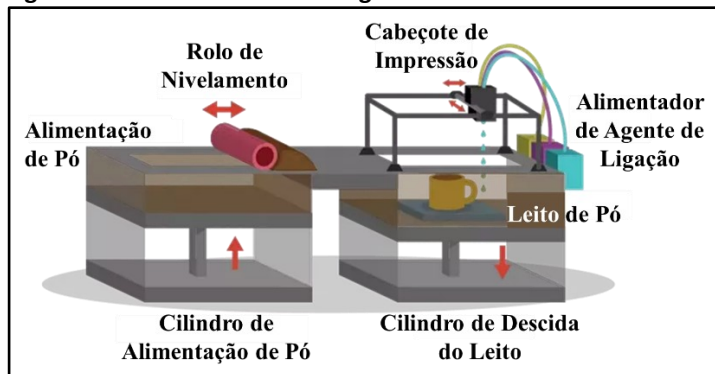
Fonte: Adaptado de Oliari, D'Oliveira e Schulz (2017)

2.2.1.6 Binder Jetting

A técnica de impressão 3D por jato de ligante envolve a aplicação de um agente líquido de liga (aglutinante) em finas camadas de material em pó. Esses materiais em pó podem ser a base de cerâmica, como vidro ou gesso, ou metálica, como aço inoxidável (Fayazfar *et al.*, 2018). Durante o processo, o cabeçote de impressão 3D se desloca sobre a plataforma de construção, depositando gotículas de aglutinante de maneira semelhante à impressão de tinta em papel nas impressoras 2D. Após a conclusão de cada camada, o leito de pó desce e uma nova camada de pó é espalhada na área de construção. Esse ciclo se repete até que todas as camadas da peça estejam completas. Após a impressão, as peças permanecem em um estado inacabado, necessitando de pós-processamento adicional para estarem prontas para uso. Frequentemente, uma substância infiltrante é adicionada para melhorar as propriedades mecânicas das peças, como adesivo de ciano acrilato para cerâmicas ou bronze para metais.

Outra abordagem é colocar a peça em um forno enquanto ainda está no estado inacabado para sinterizar os grãos do material. O processo de impressão 3D de jato de aglutinante pode funcionar com vários materiais, incluindo metais, areias e cerâmicas. Alguns materiais, como areia, não exigem processamento adicional. O jato de aglutinante é excelente para aplicações que exigem boa estética e forma, como modelos arquitetônicos, embalagens, brinquedos e estatuetas. Mas, geralmente, não é adequado para aplicações funcionais devido à natureza quebradiça das peças.

Figura 6 - Processo Binder Jetting



Fonte: Adaptado de Feng *et al.* (2020)

2.2.2 Impactos Ambientais da Manufatura Aditiva

O impacto ambiental e a sustentabilidade estão se tornando prioridades cruciais na indústria e não seria diferente quando falamos da MA de metais, um setor em rápido crescimento (Ferioti e Pohlmann, 2023). Embora a MA ofereça vantagens significativas em termos de liberdade de projeto, redução de desperdício de material e produção localizada, a questão ambiental requer consideração cuidadosa. Vários aspectos contribuem para seu perfil de sustentabilidade geral:

- **Consumo de Energia:** Os processos de MA, particularmente aqueles que envolvem fusão a laser ou por feixe de elétrons, são intensivos em questão de energia. As altas temperaturas necessárias para a fusão e a sinterização de pó metálico contribuem significativamente para o consumo total de energia, gerando emissões de gases de efeito estufa. Mais pesquisas são necessárias para otimizar a eficiência energética nos processos de MA;

- **Uso e Desperdício de Material:** Embora a MA geralmente leve a menos desperdício de material em comparação com a manufatura convencional, a eficiência de utilização do pó varia dependendo do processo e do material. O excesso de pó, muitas vezes contaminado por respingos e outros subprodutos, requer manuseio e reciclagem responsáveis. O desenvolvimento de sistemas de gestão de pó em circuito fechado é crucial para minimizar o desperdício e melhorar a sustentabilidade;
- **Emissões:** Os processos de MA podem gerar várias emissões, incluindo material particulado, compostos orgânicos voláteis (COVs) e potencialmente fumos nocivos, dependendo dos materiais utilizados e dos parâmetros do processo. Regulamentações mais rigorosas e melhorias tecnológicas no controle de filtragem e emissão são necessárias para reduzir esses impactos ambientais;
- **Aquisição de Materiais:** A sustentabilidade da MA está intimamente ligada à aquisição e à gestão do ciclo de vida do pó metálico utilizado. O uso de materiais reciclados, a priorização de materiais extraídos de forma sustentável e a consideração do carbono incorporado da matéria-prima são considerações importantes para alcançar maior responsabilidade ambiental;
- **Descarte de Peças:** A gestão do fim de vida útil das peças produzidas por MA também necessita de atenção cuidadosa. Embora as peças de MA possam ser projetadas para reciclagem, a complexidade das geometrias e o uso de vários materiais podem complicar esse processo. O desenvolvimento de métodos para reciclagem e recuperação de material eficientes é crucial para mitigar as consequências ambientais da MA ao final da vida útil do produto.

3 METODOLOGIA

Um processo de Revisão Sistemática da Literatura foi usado como um primeiro passo na construção da base para este estudo, usando a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), permitindo assim uma investigação sobre o assunto, analisando estudos já publicados, para justificar a lacuna da pesquisa (Moher *et al.*, 2009). Seguindo esta metodologia PRISMA, foram definidos os objetivos da pesquisa, em seguida a base de dados a ser utilizada para realizar a busca dos artigos publicados (*Web of Science*), em seguida foram definidos os filtros (número de citações, data, começando pela mais recente e disponível em inglês ou português) e os termos de busca (palavras-chave: Prototipagem Rápida de Metais, Indústria 4.0 e Customização de Produtos; Manufatura Aditiva de Metais). Com base nisso, foi realizada uma busca preliminar na base de dados, chegando a um total de 232 artigos identificados. Posteriormente, os artigos duplicados foram eliminados. Dos restantes, foi feita uma seleção com base em filtros pré-definidos, como artigos abertos, mais que 10 citações, ano de publicação no mínimo 2013, sabendo que se trata de um tema recente, e idiomas inglês e português, chegando a 45 artigos e na leitura dos resumos para selecionar aqueles que estivessem alinhados, elegíveis, com o tema a ser abordado resultou num total de 26 artigos selecionados (Tabela 1) que serviram de referência para a definição dos temas abordados, além de auxiliar na análise dos resultados obtidos.

Tabela 1 - Revisão Sistemática da Literatura

Definição dos Objetivos	Base de Dados	Palavras Chaves	Definição dos Filtros	Pré - Seleção	Seleção Final
- Customização de Produtos através de Prototipagem Rápida de Metais	Web of Science	- Rapid Prototyping of Metals; - Industry 4.0 and Product Customization; - Metal Additive Manufacturing.	- Números de citações > 10 - Data: >2013 - Idioma: Inglês e Português - Arquivo aberto	- Leitura Títulos - Leitura Resumos	- Leitura completa dos artigos selecionados
		↓	↓		↓
		Busca Preliminar: 232 Artigos	Seleção após Filtros: 45 Artigos		Seleção Final: 26 Artigos

Fonte: Elaborado pelos autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tecnologias de manufatura aditiva de metais apresentadas oferecem diferentes abordagens para a produção de peças metálicas, cada uma com suas próprias vantagens e limitações (Tabela 2). A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS), se diferenciam principalmente pela forma de fusão do pó metálico, com a segunda oferecendo maior precisão e densidade. A Fusão por Feixe de Elétrons (EBM), por sua vez, utiliza o feixe de elétrons em ambiente de vácuo para fundir o pó, resultando em peças de alta densidade e resistência, embora com um custo de equipamento significativamente maior e processo mais lento. Similar à DMLS, a Fusão Seletiva a Laser (SLM) utiliza laser para fundir o pó, mas frequentemente resulta em peças de maior qualidade superficial.

Finalmente, a Deposição de Metal a Laser (LMD), um processo de deposição aditiva, destaca-se por sua versatilidade na adição de material em peças existentes e na criação de geometrias complexas, porém, também se caracteriza por uma velocidade de produção mais baixa e maior dependência da habilidade do operador, já o *Binder Jetting* com um equipamento de baixo custo, possibilita construção de peças grandes. Portanto, a escolha da tecnologia ideal vai depender de vários fatores como o tipo de material, complexidade geométrica, requisitos de precisão, volume de produção e restrições orçamentárias.

Tabela 2 - Síntese das Tecnologias Aditivas

Tecnologia de Manufatura Aditiva	Aplicações	Vantagens	Limitações
SLS (Sinterização Seletiva a Laser)	Protótipos, peças de baixo volume, ferramentas, moldes de baixa complexidade, peças com geometrias complexas, alguns componentes industriais.	<ul style="list-style-type: none"> * Custo relativamente baixo * Ampla gama de materiais (polímeros, metais em pó, cerâmicas) * Geometrias complexas * Boa repetibilidade * Processo relativamente rápido para polímeros. 	<ul style="list-style-type: none"> * Peças porosas * Baixa resistência mecânica (em alguns materiais) * Limitações no tamanho de peça * Superfície áspera, requer pós-processamento em muitos casos * Seleção de materiais limitada para metais.
DMLS (Sinterização Direta a Laser de Metal)	Ferramentas, protótipos, implantes médicos, peças aeroespaciais, componentes industriais com alta precisão, ferramentas personalizadas.	<ul style="list-style-type: none"> * Alta precisão dimensional * Boa qualidade superficial * Alta densidade e forte resistência mecânica * Boa reprodutibilidade * Capacidade de produzir geometrias complexas * Boa relação custo-benefício em peças complexas 	<ul style="list-style-type: none"> * Custo de equipamento elevado * Velocidade de produção relativamente baixa * Limitações na escolha de materiais (em relação a SLM/EBM)
EBM (Fusão por Feixe de Elétrons)	Implantes médicos, componentes aeroespaciais, peças industriais de alta resistência, ferramentas especiais.	<ul style="list-style-type: none"> * Alta densidade e resistência * Capacidade de produzir peças grandes e complexas * Materiais biocompatíveis * Bom para ligas de alta temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> * Custo de equipamento muito elevado * Processo lento * Ambiente de vácuo necessário (mais complexo de operar) * Requer maiores cuidados com a segurança devido à radiação de raios X.
SLM (Fusão Seletiva a Laser)	Protótipos, peças de alta performance, componentes aeroespaciais e biomédicos, ferramentas personalizadas, moldes de alta precisão.	<ul style="list-style-type: none"> * Alta precisão e densidade * Superfície de alta qualidade * Boa resistência mecânica * Grande variedade de materiais metálicos * Geometrias complexas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Custo de equipamento elevado * Velocidade de produção relativamente baixa * Riscos de deformação * Pós-processamento pode ser necessário * Menor taxa de utilização de pó que EBM.
LMD (Deposição de Metal a Laser)	Revestimento de superfícies, reparo de peças, adição de material em peças existentes, fabricação de peças personalizadas em metal, prototipagem.	<ul style="list-style-type: none"> * Versátil, pode ser usado para adicionar material a peças existentes * Boa para reparos e modificações * Diversas opções de geometria * Boa capacidade de criar peças de grandes dimensões. 	<ul style="list-style-type: none"> * Velocidade de produção relativamente baixa * Alta complexidade do processo * Dependência da habilidade do operador * Custo de equipamento elevado.
Binder Jetting	Protótipos, modelos, moldes de areia, peças cerâmicas, algumas aplicações em metais (menos comum).	<ul style="list-style-type: none"> * Baixo custo de equipamento * Ampla gama de materiais * Geometrias complexas * Possibilidade de construção de peças grandes. 	<ul style="list-style-type: none"> * Baixa resistência mecânica (especialmente em peças metálicas) * Pós-processamento obrigatório (usualmente longo e complexo) * Peças frequentemente porosas, pouco usado com metais.

Fonte: Elaborado pelos autores

A customização dos produtos tem mostrado cada vez mais relevância para a indústria global (Fecomércio, 2021). Em um estudo realizado pela empresa americana Forrester (RichRelevance, 2021), especializada em pesquisa de mercado sobre o impacto das tecnologias nos clientes, podem ser identificadas as vantagens que a personalização dos produtos tem apresentados.

Na pesquisa, a Forrester avaliou os clientes da RichRelevance que é uma empresa líder global em customização e que oferece serviços para aproximadamente 27 empresas da América Latina. Através dessa pesquisa realizada, verificou-se que as empresas que fazem uma aposta maior na personalização de produtos, despertaram um maior desejo de compra por parte dos seus clientes em um percentual mínimo de 15%. Além disso, houve um aumento de mais de 10% na receita dessas empresas, chegando a 20% no segundo ano, com uma taxa de conversão de mais de 89% comparadas com empresas que não tem apostado na customização de produtos, sem contar o retorno de 367% sobre o investimento. Em outra pesquisa, realizada pela empresa Dassault Systèmes (2020), mostrou como resultado, que 83% dos consumidores buscam por produtos personalizados, produtos que se adaptem às suas necessidades e que além disso, estão dispostos a pagar até 25,3% a mais por essa personalização. Para a empresa que realizou a pesquisa, isso é reflexo de um consumidor cada vez mais exigente e as empresas que entenderem essa nova realidade e implementarem mudanças e fizerem investimentos em seus processos produtivos estarão à frente dos seus concorrentes que não o fizerem e se manterão ativos no mercado. A tecnologia é habilitadora da indústria 4.0. Estamos em um momento da produção em massa que não existe mais produzir por produzir, precisamos produzir o que as pessoas querem consumir (SENAI/RS, 2019). Ter um olhar para a customização que é urgente e inevitável. É muito difícil fazer lotes imensos que agradem todo mundo (Cabral, 2022). Tendo esse olhar sobre novos modelos de produção e considerando as novas possibilidades de tecnologias que habilitam empresas em fabricar peças metálicas customizadas (Cortina *et al.*, 2018). Produtos podem ser desenvolvidos utilizando um sistema híbrido de produção, onde partes comunizadas de produtos podem ser produzidos dentro do modelo já conhecido e aplicado nas indústrias e ainda agregar a esses produtos partes que sejam customizadas atendendo às novas realidades do mercado onde há uma expectativa cada vez mais latente dos consumidores por produtos personalizados. Uma combinação de MA e usinagem avançada já tem sido utilizada em máquinas que integram ambas as tecnologias permitindo fabricar não somente peças personalizadas, mas também peças que seriam simplesmente impossíveis de se fabricar de outras formas (Basinger *et al.*, 2018). Trata-se de um equipamento que integra uma fresadora de cinco eixos com um bocal articulado de deposição de pó para sinterização a laser na peça, baseado na tecnologia de sinterização seletiva a laser (SLS). Tempo de ciclo não é um ponto relevante num processo como esse, mas sim, como comentado, a possibilidade de se produzir o que era imaginável de outras maneiras, garantindo qualidade, funcionalidade e claro, personalização.

Como já comentado, inicialmente havia uma limitação na fabricação de produtos utilizando MA, por conta dos materiais que poderiam ser utilizados que estavam mais relacionados a poliméricos, assim, somente eram usados para construção de protótipos de peças, por exemplo, metálicas. Entretanto, com a evolução dessas tecnologias, a possibilidade de produzir peças metálicas passou a ser uma realidade, ainda que com custos elevados, mas que tendem a reduzir com o tempo, possibilitando uma integração cada vez maior da indústria na fabricação de peças ou parte de peças com essa característica de customização (Mahamood *et al.*, 2014). O investimento inicial é alto uma vez que as empresas para atender

a essas novas realidades da indústria 4.0 precisam contar com adequações no maquinário existente e agregar outros para auxiliar na customização dos produtos, como no caso das impressoras de MA, com o objetivo de entender os dados e aplicar as ações em tempo real. Isso permitiria que o consumidor ao comprar um produto, determine previamente detalhes desse produto que melhor adequem a sua realidade, essas informações são interpretadas e aplicadas ao processo produtivo, ou em alguns casos, essas solicitações podem ser aplicadas primeiramente a uma prototipagem personalizada para uma aprovação prévia do cliente antes da produção definitiva. Dessa forma, ainda que os custos de implementação sejam altos, conforme já mostrado em pesquisas realizadas, o retorno também é. Com uma empresa adequada à indústria 4.0 com essa característica de personalização de produtos, é possível cada vez mais integrar os processos e conectá-los ao cliente final, no conceito de integração horizontal, dando ao cliente uma experiência mais assertiva quanto às suas expectativas.

5 CONCLUSÕES

É uma realidade latente de que o consumidor está cada vez mais exigente e entender suas expectativas é fator relevante e crucial para as empresas que desejam se manter vivas no mercado cada vez mais competitivo e cada vez mais individualizado quando falamos de atender às necessidades dos clientes. Contudo, num passado recente, quando os processos de MA começaram a surgir, havia uma limitação na utilização dos mesmos em processos que peças são produzidas de materiais diferentes do poliméricos, sobretudo os metálicos, entretanto essa realidade tem se transformando, a MA está evoluindo e trazendo consigo novas possibilidades, incluindo ramos de negócio que antes não eram contemplados com essa tecnologia, mas que cada vez mais podem produzir peças que antes eram muito difíceis ou até mesmo impossíveis de serem fabricadas, além de possibilitar customizações com materiais, por exemplo, metálicos, possibilitando aos clientes, personalizarem seus produtos e quando falamos de clientes, não estamos falando apenas de clientes finais, mas também de clientes internos ou entre empresas.

Esse artigo trouxe luz a uma realidade e a uma necessidade cada vez maior do mercado, possibilitando refletir sobre um assunto cada vez mais abordado pelas empresas que enxergam as possibilidades que a MA está trazendo aos processos produtivos. Com relação ao impacto ambiental e sustentabilidade, embora a MA de metais ofereça muitas vantagens, o enfrentamento de seus impactos ambientais e a melhoria de sua sustentabilidade são primordiais. Pesquisas e desenvolvimentos contínuos, combinados com a colaboração da indústria, são essenciais para alcançar um futuro verdadeiramente sustentável para essa tecnologia de manufatura inovadora. Mais pesquisas devem se concentrar na criação de uma estrutura abrangente para quantificar o desempenho ambiental e incentivar o desenvolvimento e a adoção de processos e materiais de MA sustentáveis. Como limitação, esse estudo avaliou somente as possibilidades que a MA traz para produtos que tem como matéria prima, os metálicos e, portanto, estudos futuros podem abordar outros tipos de produtos com outros materiais base de sua fabricação.

REFERÊNCIAS

ANDOLFI, A.; MAMMOLITI, F.; PINESCHI, F. Advanced laser cladding application for oil and gas components. GE Oil and Gas company. **Technology Insights**, 2012.

BALAZIC, M.; MILFENER, M.; KOPAC, J. Repair and manufacture of high performance products for medicine and aviation with laser technology. **AIJSTPME**. v. 3, 2010, p. 15–22.

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.

BIAMINO, S.; PENNA, A.; ACKELID, U.; SABBADINI, S.; TASSA, O.; FINO, P.; PAVESE, M.; GENNARO, P.; BADINI, C. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation. **Intermetallic**, v. 19, 2010. DOI:10.1016/j.intermet.2010.11.017.

BINELI, A. R. R. *et al.* Direct metal laser sintering (DMLS): technology for design and construction of microreactors. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., de 11 a 15 de abril, Caxias do Sul, 2011. **[Anais...]**. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0502.pdf> . Acesso em: 08 abr. 2023

BINELI, A. R. R.; PERES, A. P. G.; BERNARDES, L. F.; JARDINI, A. L.; FILHO, R. Design of microreactor by integration of reverse engineering and direct metal laser sintering process. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON HYDROGEN AND FUEL CELLS, 5., Campinas, 26-29 Oct 2010. **[Proceedings...]**. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21411322> . Acesso em: 08 abr. 2023.

BOUK, D.; KAAL, H. **Selective laser sintering of metals**. Proceedings of American Society of Mechanical Engineers. New York, 2015.

CANCIGLIERI, O. J.; SELHORST, A. J.; SANT'ANNA, A. M.O. Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos. **Gestão de Produção**. São Carlos, v. 22, n. 2, p. 345-355, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/rH9gkFSkhKwzp6hWj9Gh73b/> . Acesso em: 08 abr. 2023.

CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; LIM, C.S. **Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing**. Singapura: World Scientific, 2010.

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. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/12/2583> . Acesso em: 08 abr. 2023.

DASSAULT SYSTÈMES. CES 2020 Survey by CITE Research Dassault Systèmes: **Consumers want personalized products but won't wait for them and expect a cost benefit for their data**. Velizy-Villacoublay, 6 jan. 2020. Disponível em: <https://www.3ds.com/newsroom/press-releases/ces-2020-survey-cite-research-dassault-systemes-consumers-want-personalized-products-wont-wait-them-and-expect-cost-benefit-their-data/>. Acesso em: 08 abr. 2023.

DIATLOV, A.; BUCHBINDER, D.; MEINERS, W.; WISSENBACH, K. **Towards surface topography: quantification of Selective Laser Melting (SLM) built parts**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED RESEARCH IN VIRTUAL AND RAPID PROTOTYPING, 2011. [Anais...].

DICKSON, M. Soft strain sensors fabricated through additive manufacturing. **MRS Bulletin**, v. 40, 2015. DOI:10.1557/mrs.2015.12

ESPERTO, L.; OSÓRIO, A. Rapid Tooling. Sinterização directa por laser de metais. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, v. 15, p. 117-124. 2008. Disponível em: http://www-ext.inec.pt/APAET/pdf/Rev_15_A12.pdf. Acesso em: 08 abr. 2023.

FAYAZFAR, H.; SALARIAN, M.; ROGALSKY, A.; SARKER, D.; RUSSO, P.; PASERIN, V.; TOYSERKANI, E. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. **Materials & Design**, v. 144, p. 98-128, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.018>

FECOMÉRCIO. Cresce interesse por produtos e serviços personalizados. **Portal G1**. 27 set. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/especial-publicitario/sistema-fecomercio/radar-do-comercio/noticia/2021/09/27/cresce-interesse-por-produtos-e-servicos-personalizados.ghtml>. Acesso em: 08 abr. 2023.

FENG, W.; YIN, Y.; DONG, S.; DAI, H.; HU, R. Method for calculating the shear strength of rock masses with different combined structural planes based on the 3D printing technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. v. 570, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/570/3/032028.

FERIOTTI, M.; POHLMANN, M. Manufatura aditiva e sustentabilidade: estudo exploratório para avaliar potenciais impactos ambientais. **South American Development Society Journal**. v. 8. p. 148-166, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v8i24p148-166>. Acesso em: 08 abr. 2023.

HAO, L.; DADBAKSH, S. Materials and process aspects of selective laser melting of metals and metal matrix composites: a review. **Chinese Journal of Lasers**, v. 36, 2009. DOI:10.3788/CJL2009-3612.3192.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P. Rapid prototyping for direct manufacture. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, 2001. DOI:10.1108/EUM0000-000005753.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. **CIRP Annals**, v. 47, n. 2, 1998. doi:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.

LADANI, L.; ROY, L. **Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication**. In: ASME INTERNATIONAL MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING CONFERENCE. Madison, 2013. [Proceedins...]. DOI: <https://doi.org/10.1115/MSEC2013-1105> . Acesso em: 08 abr. 2023.

LIU, F.; SLATTERY, K.; KINSELLA, M.; NEWKIRK, J.; CHOU, H. N.; LANDERS, R. Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures. **Rapid Prototyping Journal**, v. 13, 2007. DOI:10.1108/13552540710776188. Acesso em: 08 abr. 2023.

MAHAMOOD, R. M.; AKINLABI, E. T.; SCHUKLA, M.; PTYANA, S. Material efficiency of laser metal deposited Ti6Al4V: effect of laser power. **Engineering Letters**, v. 21, 2013.

MAHAMOOD, R. M.; AKINLAB, E. T.; SHUKLA, M.; PITYANA, S. Revolutionary additive manufacturing: an overview. **Lasers in Engineering**, v. 27, p. 3-4, p. 161-178, 2014.

NEIRA, A. **Thermal Modeling and simulation of electron beam melting for rapid prototyping on Ti6Al4V alloys**. (Tesis) - North Carolina State University, Raleigh. North Carolina, 2012.

NIU, H. J.; CHANG, I. T. H. Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder. **Journal of Materials Science**, v. 35, 2000. DOI:10.1023/A:1004720011671.

NOWOTNY, S. Current use of laser technology for build-up welding applications. **Surface Engineering**, v. 27, p. 231–233, 2011.

NYRHILA, O. **Characterization of process parameter for direct metal laser sintering**. 2005. (Thesis) - Nagoya Institute of Technology. Nagoya, 2005.

OLIARI, S. H.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M.; SCHULZ, M. **Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2017.

PETERSON, M.; KALZ, A. Characterization and comparison of materials of selective laser sintering. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 21, p. 21-22, 2013.

PETROVIC, V.; GONZALEZ, J. V. H.; FERRANDA, O. J.; GORDILLO, J. D.; PUCHADES, J. R. B.; GRINAN, L. P. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. **International Journal of Production Research**, v. 49, 2011. DOI:10.1080/00207-540903479786.

RICHRELEVANCE. Forrester: Total economic impact. **Portal RichRelevance**. 2021. Disponível em: <https://richrelevance.com/resources/forrester-total-economic-impact-study/> Acesso em: 08 de abril de 2023.

SENAI RIO GRANDE DO SUL. Personalização na Indústria: como conquistar a customização em massa. **Portal SENAI/RS**. 25 jun. 2019. Disponível em: <https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/personalizacao-na-industria-como-conquistar-customizacao-em-massa> Acesso em: 08 abr. 2023.

SCOTT, J.; GRUPTA, N.; WEMBER, C.; NEWSOM, S.; WOHLERS, T.; CAFFREY, T. **Additive manufacturing: status and opportunities**. Science and Technology Policy Institute, 2012.

SCHUH, G. *et al.* **Industrie 4.0 maturity index**. Managing the digital transformation of companies. Munich: Acatech Study, 2020.

SHIRAZI, S. F. S.; GHANEKHANI, S.; MEHRALI, M.; YARMAND, H.; METSELAAR, H. S. C.; KADRI, N. A.; USMAN, N. A. A. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. **Science and Technology of Advance Materials**. v. 16, 2015. DOI:10.1088/1468-6996/16/3/033502

TAO, W.; HUAPENG, D.; JIE, T.; HAO, W. Recent repair technology for aero-engine blades. **Recent Patents on Engineering**, v. 9, p. 132–141, 2015.

TELENKO, C.; SEEPERSAD, C. C. Assessing energy requirements and material flows of selective laser sintering of nylon parts. *In*: SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM, p. 289–297. Austin, 2010. **[Proceedings...]**.

THOMPSON, S.M.; BIAN, L.; SHAMSAEI, N.; YADOLLAHI, A. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing. Part I: transport phenomena, modeling and diagnostics. **Addit. Manuf.** v. 8, p. 36–62, 2015.

3DLAB. Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios. **Portal 3DLAB Soluções em Impressão 3D**. 25 set. 2018. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/> Acesso em: 08 abr. 2023.

WOHLERS, T.; CAFFREY, T. **Additive manufacturing: going mainstream**. trends, myths, and investments in additive manufacturing, 2013.

Sobre os Autores

i Anderson Tadeu de Santi Barbosa de Almeida



Graduação em Engenharia Elétrica pela FEI (2005), MBA em Gestão pela FGV (2008), MBA em Engenharia pela USP (2021), Pós-Graduação em Segurança do Trabalho pela UNIMAIS (2022), Pós-Graduação em Docência pelo SENAC (2023), Pós-Graduação em I4.0 pela USJT (2024), Mestrado pela UFABC (2023) e Doutorando pela UNESP. Atualmente é Gerente de Projetos na SmartFactory e Professor na FATEC e no SENAI.

<https://orcid.org/0000-0001-7667-0973>

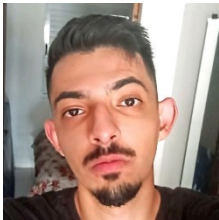
ii Gustavo Braz de Cristo Souza



Técnico em Eletroeletrônica pelo SENAI/SP (2020), Tecnólogo em Mecatrônica pelo SENAI/SP (2020) e Graduando em Engenharia de Controle e Automação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena. Atualmente é Suporte Técnico na Hausseg e Professor de Automação e Eletroeletrônica no SENAI “Manuel Garcia Filho”.

<https://orcid.org/0009-0005-7260-5775>

iii Vitor de Oliveira Botelho



Técnico em Mecatrônica pelo SENAI/SP (2017), Tecnólogo em Mecatrônica Industrial pelo IFSP (2020), Engenharia Elétrica pela USJT (2024), Pós-Graduação em Física pela FAEP (2024), Pós-Graduação em Docência pela FAEP (2024) e Mestrando em Engenharia Elétrica pela UNESP. Atualmente é Professor de Automação e Eletroeletrônica no SENAI “Manuel Garcia Filho”.

<https://orcid.org/0009-0002-4269-8702>