

VANTAGENS E DESAFIOS DA MANUFATURA HÍBRIDA - INTEGRANDO MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA

FÁBIO ANTONIO BARBOSA (Programa de Pós-Graduação
Engenharia de Produção)

fabio.barbosa@unimep.br

Daniel René Tasé Velázquez (Programa de Pós-Graduação
Engenharia de Produção)

dtasev88@gmail.com

André Luís Helleno (Universidade Metodista de Piracicaba)

alhelleno@unimep.br

Milton Vieira Junior (Universidade Metodista de Piracicaba)

buda.milton@gmail.com



O surgimento de novos processos de manufatura, trazem sempre uma grande expectativa em relação às oportunidades que tal tecnologia criará; no ambiente industrial. Dentro desses novos processos, surge a Manufatura Híbrida, integrada dos processos de

Palavras-chave: Manufatura Híbrida, Manufatura aditiva; Processos de Usinagem, Laser Metal Deposition, Direct Energy Deposition.

1. Introdução

Os processos de fabricação estão em constante mudança. Novos materiais, novas tecnologias e novas abordagens de trabalho surgem a todo o momento para atender à demanda de usuários cada vez mais exigente e consciente em relação ao que desejam, como o desejam e, principalmente, o quanto querem pagar pelo produto. Neste sentido, as formas tradicionais de fabricação começam a ser questionadas, para que as necessidades dos clientes sejam atendidas, sem o comprometimento da lucratividade das empresas (BERMAN et al.; 2012).

As questões de sustentabilidade e, em especial, a questão ambiental, jamais estiveram tão em alta como nos últimos anos, forçando as empresas a repensarem seus produtos, utilizando materiais de origem certificada em relação à matéria prima e componentes, sem a presença de agentes que agridam de alguma forma sociedade (exemplo: metais pesados) e, principalmente, seus processos de fabricação, tornando-os mais eficientes energeticamente, menos poluidores, mais rápidos, gerando menor quantidade de matérias na forma de sucata (CORTINA *et al.*, 2018).

Diante das necessidades desse cenário cada mais exigente, houve avanços significativos na indústria de transformação. Um dos principais avanços relacionados à melhoria dos processos de fabricação de bens refere-se ao processo de Manufatura Aditiva (MA). Este tipo de processo permite transformar uma geometria 3D, oriunda de um sistema CAD, em um componente físico e funcional por meio de uma adição de camadas, sem a necessidade da utilização de processo de remoção de material (usinagem) a partir de uma geometria com sobremetal (*blank*) (MATIAS; RAO; 2015).

Desenvolvida para a fabricação de protótipos físicos, a MA tem evoluído constantemente tanto em exatidão como em tipos de materiais, podendo hoje utilizar uma gama de materiais que vão de resina a metais (PINHEIRO; 2015).

O conceito utilizado permite que a MA seja utilizada nas mais diversas áreas profissionais que vão desde a fabricação de próteses, órteses e peças diversas; porém, existe a necessidade de se ter um tratamento posterior para que o acabamento desejado em alguns casos seja alcançado. Assim, embora existam ganhos relacionados à quantidade de material e energia utilizados no processo entre outros existentes, estes ainda poderiam ser melhorados.

Mais recentemente, surge o conceito da Manufatura Híbrida (MH). A MH tem por objetivo a junção de processos distintos em um único equipamento com o objetivo de maximizar os

ganhos e minimizar as deficiências de cada processo individualmente. Nesta junção, pode-se trabalhar com a MA e a Manufatura Subtrativa (MS), ou seja, processos de usinagem, além de integrar outros, tais como a medição e o escaneamento.

Considerando estas oportunidades, este trabalho tem por objetivo apresentar as vantagens e limitações desta nova tecnologia relacionada à indústria metalmeccânica.

2. Metodologia

O presente trabalho utilizou como procedimento metodológico a pesquisa bibliográfica, buscando a temática em revistas, artigos e periódicos. A pesquisa foi feita na base de dados do Portal de Periódicos da CAPES, buscando como palavras chaves: *Hybrid Manufacturing*, *Laser Metal Deposition*, *HybridMachine e Opportunities*. A pesquisa, classificada como descritiva (PRODANOV; FREITAS, 2013), objetivou analisar e descrever os fatos, tal como descrito pelos autores. A pesquisa buscou identificar a maior quantidade de artigos possíveis, privilegiando os mais recentes, em função da novidade da temática, mas também trouxe base histórica para o artigo.

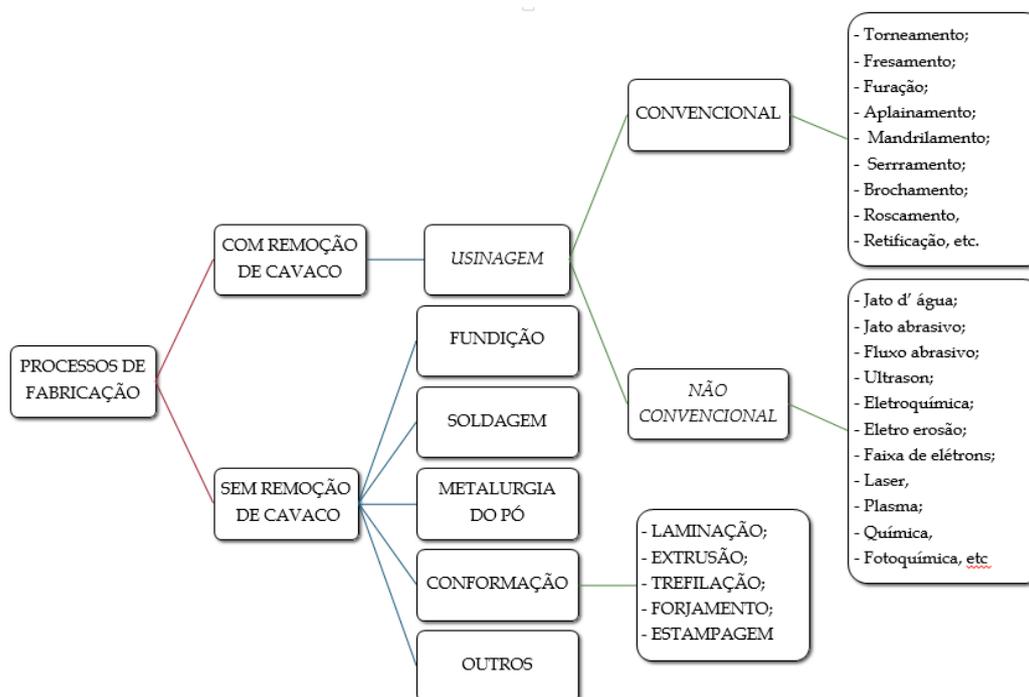
3. Referencial Teórico

Neste item são apresentados aspectos teóricos dos processos de fabricação, partindo-se dos processos tradicionais, passando pela MA, apresentado a opção da Manufatura Híbrida (MA + Processo tradicional) e em seguida as vantagens e desafios a serem superados por essa nova tecnologia.

3.1 Processos tradicionais

Os processos de fabricação tradicionalmente são tratados de forma separada em relação às atividades que são executadas. Neste sentido, Machado, Coelho e Abrão (2009), propuseram que os processos de fabricação fossem separados conforme descrito na figura 1. Nota-se que a integração entre os processos é inexistente, embora em muitos casos haja a necessidade de um produto passar por vários processos.

Figura 1 – Classificação dos processos de Fabricação



Fonte: Adaptado de Machado; Coelho e Abrão, 2009

3.2 Manufatura Aditiva

Na década de 1980 surge o conceito da primeira máquina de impressão 3D, permitindo que um desenho gerado na plataforma CAD/CAM se torne em bem um tangível por meio da deposição de material, ou seja, sem a necessidade da remoção de material a partir de um “Blank” (MATIAS; RAO, 2015) .

A ISO / ASTM 52900 (2015) define a manufatura aditiva como “processo de junção de materiais para fabricar peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, ao contrário de manufatura subtrativa e metodologias de manufatura formativa”.

O desenvolvimento da área da MA cresceu significativamente e no ano de 2013, vários tipos de tecnologias ligadas a MA foram criados, fazendo com que a *American Society for Testing and Materials*(ASTM), propusesse uma terminologia para os tipos de manufatura aditivas conhecidos. Surge então a ASTM F 2792-12^a (2012), definindo os processos para este tipo de processo, conforme descrito no quadro 1.

Quadro 1: Terminologias da Manufatura aditiva segundo a ASTM F 2792 – 12a

Tecnologia	Processo
<i>Binder Jetting</i> (BJ)	Processo aditivo em que um agente ligante líquido é depositado seletivamente em materiais em pó.
<i>Direct Energy Deposition</i> (DED)	Processo em que a energia térmica é usada na fusão de materiais, quando estão sendo depositados. Na geração da energia térmica é usado, por exemplo: o laser, feixe de elétrons ou arco de plasma.
<i>Material Extrusion</i> (ME)	Processo pelo qual o material a ser depositado é extrusado por um orifício.
<i>Material Jetting</i> (MJ)	Processo de manufatura aditiva em que o material adicionado é feito na forma de gotículas seletivamente.
<i>Powder Bed Fusion</i> (PBF)	Processo de fabricação aditiva em que a energia térmica funde regiões de pó, depositadas em um leito.
<i>Sheet Lamination</i> (SL)	Processo de fabricação aditiva em que folhas de um determinado material são sobrepostas para a formação de um objeto
<i>Vat Photopolymerization</i> (VP)	Processo aditivo em que um fotopolímero líquido em um tanque é curado seletivamente por polimerização acionada por luz.

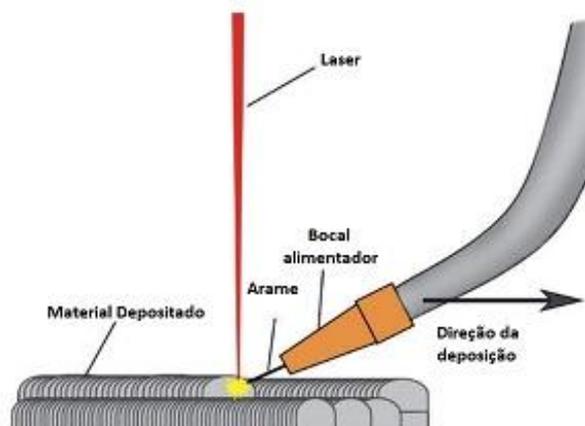
Fonte: (Gibson et al., 2013)

Como verificado no quadro 1, a variedade de materiais possíveis de se trabalhar na manufatura aditiva é muito ampla, permitindo o uso de materiais como: Gesso, elastômero, termoplásticos, metais, borracha, porcelanas, ligas metálicas diversas (titânio, cobalto, aços inoxidáveis, entre outros), papel, fotopolímero, resinas acrílicas, laminas metálicas, enfim, uma série de materiais (PINHEIRO, 2015).

Um dos processos de maior desenvolvimento na MA refere-se aos do tipo DED. Este tipo de processo permite que o material seja adicionado de diversas maneiras, criando dentro dessa área diversas subdivisões, da qual uma foi especialmente importante para o desenvolvimento da chamada tecnologia de Manufatura Híbrida (MH), chamada de *Laser Metal Deposition* (LMD) (GRAF et al.;2018).

O LMD está dividido em duas partes: LMD-w e o LMD-p. O sistema de deposição por laser, no caso do LMD, divide-se em função da forma que o material será depositado: pó ou arame. No LMD-w, um feixe de laser funde o arame que é introduzido no foco do laser por meio de um alimentador como demonstrado na figura 2.

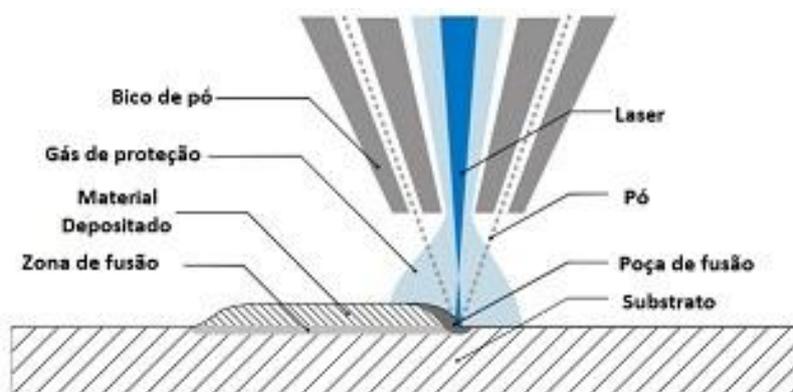
Figura 2: Representação esquemática do LMD-w



Fonte: Adaptado de Segerstark (2015)

Já no LMD-p, o material é adicionado na forma de pó, por meio de bocais. A depender do tipo de bocal (coaxial ou multi-jet), o sistema LMD-P permite que a construção da peça ocorra em qualquer sentido, visto que alimentação ocorre de forma multidirecional e não de forma unilateral como no caso do arame. O sistema LMD-p pode ser visto esquematicamente na figura 3.

Figura 3: Representação esquemática do LMD-p



Fonte: Adaptado de Graf et al. (2018)

Caiazza (2018), explica que o sistema LMD possui a vantagem de trabalhar com baixa transferência de energia se comparado aos sistemas tradicionais (como a soldagem a arco ou plasma). Esse fator minimiza a distorção da peça, criando uma microestrutura fina, com níveis de diluição baixos entre as camadas que permite que as peças fabricadas tenham boas propriedades mecânicas com mínimas imperfeições.

Além dessa vantagem, Lima *et al.*, 2017, explicam que a adição de material na forma LMD, permite a utilização de uma gama de materiais, destacando: os aços ferramenta; os aços inoxidáveis; as ligas de níquel, de titânio, de cobre, enfim, materiais ferrosos e não ferrosos. Ainda é possível, colocar materiais com características diferentes em determinadas regiões de

uma peça para que se obtenha características especiais, conforme as solicitações do projeto e das forças, tornando as peças mais baratas que as obtidas em processos tradicionais.

Já Kong et al. (2010), explicam que a forma construtiva do laser utilizado no processo LMD permite facilmente sua adaptação em equipamentos CNC (múltiplos eixos), permitindo o desenvolvimento de equipamentos de Manufatura Híbrida (MH) (aditiva / subtrativa) de grande versatilidade produtiva.

3.3 A Manufatura Híbrida

O objetivo da manufatura híbrida é a junção de dois ou mais processos distintos em um único equipamento, buscando maximizar suas vantagens, ao mesmo tempo em que minimiza as limitações do processo.

Cortina et al., 2018, explicam que o conceito dos equipamentos híbridos não são novidade, e que em 2011 já havia proposituras para classificação de tecnologias híbridas de diferentes processos que poderiam compor um único equipamento.

Verdadeiramente, os conceitos de manufatura aditiva / subtrativa são tratados separadamente até a década de 1990 quando começaram os primeiros estudos (LORENZ *et al.*, 2000). O artigo “*3D Welding and Milling - A Direct Approach for Fabrication of Injection Molds*” (SONG *et al.*, [S.d.]), que demonstra a fabricação de uma peça por meio da soldagem e do fresamento, em um único equipamento.

Neste mesmo aspecto, a MH, que faz a junção das manufaturas aditivas e subtrativas, está ganhando especial atenção no segmento industrial, pois o processo aditivo sozinho não garante a precisão necessária para a construção de alguns componentes, ao passo que a manufatura subtrativa (usinagem) permite precisão e acabamento, mas precisa de um blank, ou seja, um peça em bruto cortada, para tal (CORTINA et al., 2018).

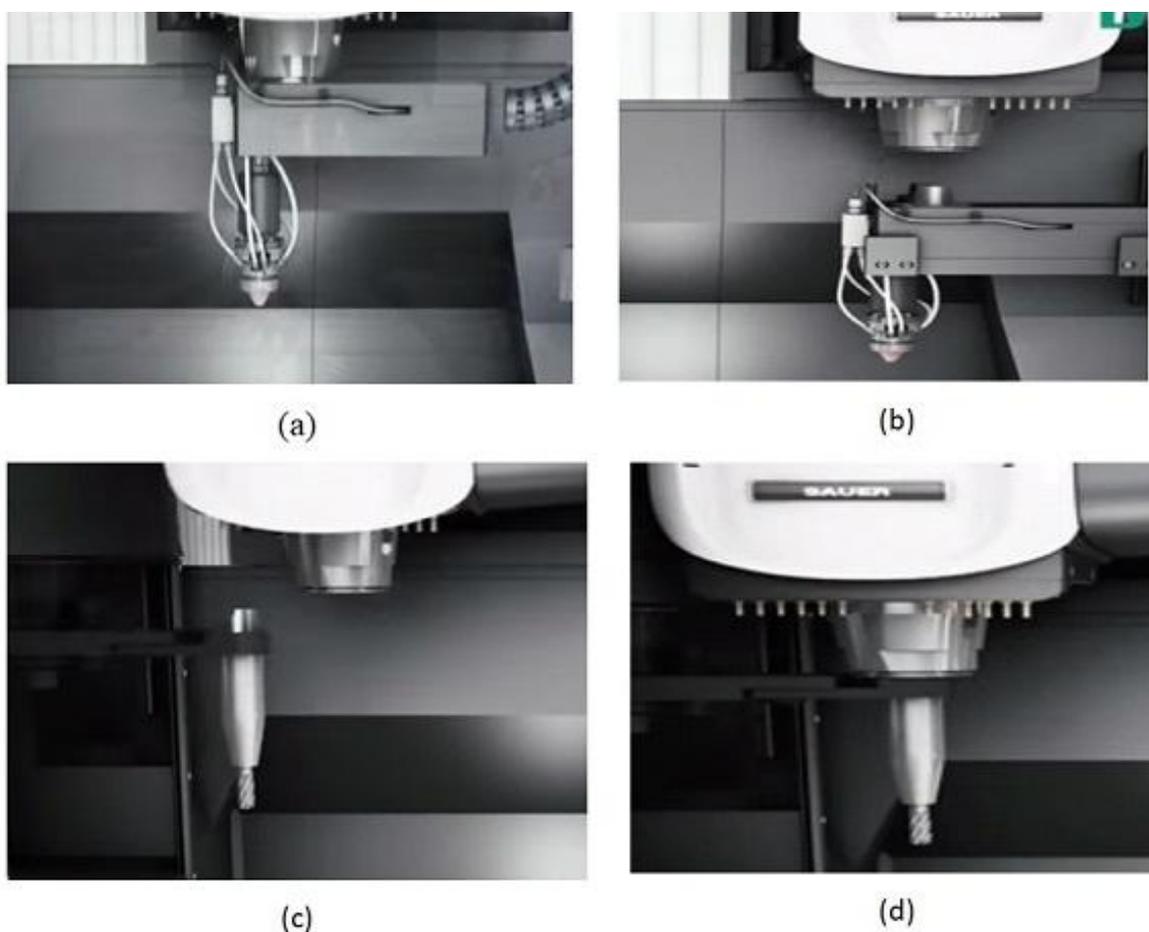
Na fabricação do equipamento híbrido, o sistema LMD tem se mostrado muito promissor. Devido à sua forma construtiva, verifica-se a possibilidade de utilizá-lo com máquinas de 2, 3 ou 5 eixos, além de sistemas de medição e escaneamento que permitem melhorar o processo de tomada de decisões, comparando as imagens e medidas da peça às de um banco de dados, permitindo escolher a melhor forma de aproveitamento do componente a ser recuperado (NEWMAN et al., 2015).

A versatilidade da MH já permitiu a remanufatura de produtos de alto valor agregado como pás de turbinas, rotores, queimadores a gás, além de matrizes e moldes (WILSON et al.,

2014), com alto grau de qualidade, demonstrando todo o potencial desta tecnologia.

As formas construtivas dos equipamentos podem variar em função do fabricante, como pode ser visto nas figuras 4 e 5. Na figura 4, o cabeçote laser é acoplado ao *spindle* (eixo árvore) da máquina diretamente, como se fosse uma ferramenta. Este tipo de construção é usado pela empresa DMG MORI, na construção de máquinas aditivas. Nota-se na figura 4 (DMG-MORI, 2015): (a) o *spindle* montado com o cabeçote aditivo para trabalho; (b) o cabeçote aditivo no berço de descanso (suporte diferente do magazine de ferramentas da máquina), liberando o *spindle* para uma nova operação; (c) o *spindle* buscando uma nova ferramenta para trabalho e (d) a ferramenta montada (fresa), pronta para o processo subtrativo.

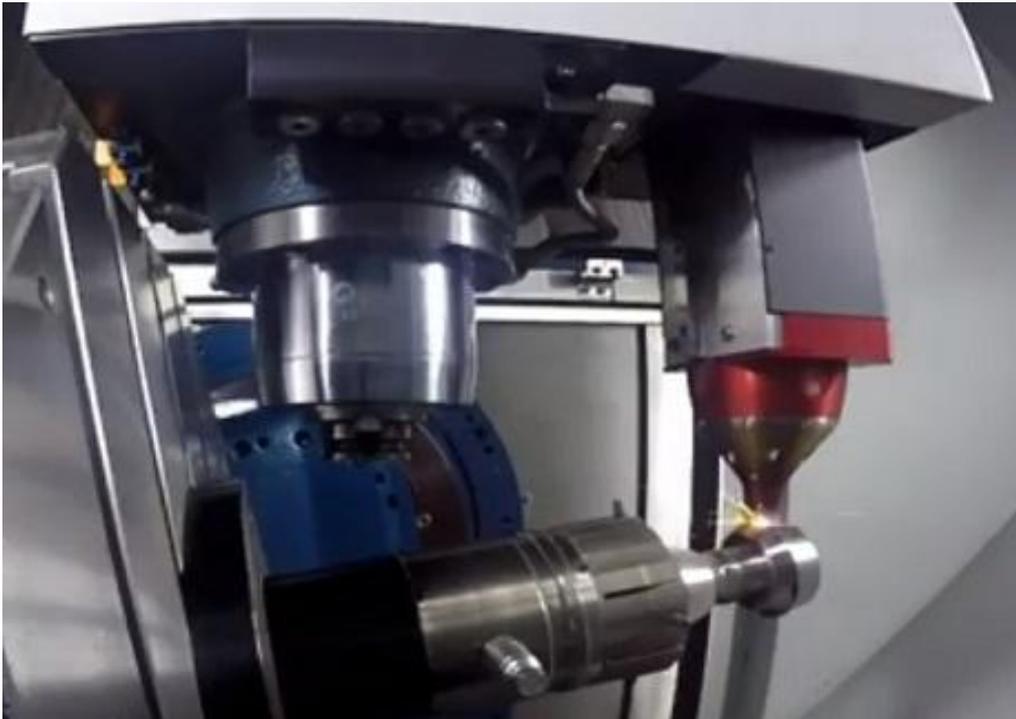
Figura 4: Máquina Híbrida com cabeçote aditivo acoplado ao *Spindle* da máquina



Fonte: DMG-Mori (<https://www.youtube.com/watch?v=oaIOrQi2HLM>, (acesso em 07/05/2019)

A figura 5 apresenta uma nova montagem: o cabeçote aditivo é colocado ao lado do *spindle* de usinagem, ou seja, estão colocados paralelamente um ao outro. Este modelo construtivo de máquina é similar ao usado pela empresa ROMI S/A (ROMI; 2017).

Figura 5: Máquina Híbrida com o cabeçote aditivo ao lado do *spindle*



Fonte: Indústrias Romi S.A. (<https://www.youtube.com/watch?v=yLMftRD5DhU>, (acesso em 07/05/2019))

3.4 Oportunidades e desafios da Manufatura Híbrida

Manogharan *et al.* (2015), descrevem que existem vários fatores que devem ser considerados para a MH. Entre os principais, o autor cita:

- a) A vantagem do sistema de coordenadas permanecer fixo quando há a alternância entre as atividades aditivas e subtrativas, além da possibilidade de utilizar uma gama de ferramentas na mesma máquina;
- b) Múltiplas operações de usinagem tais como o fresamento, a furação, o torneamento, podem ser seguidos por operações de adição de material;
- c) A necessidade de se identificar a correta sequência de operações entre as atividades aditivas e subtrativas, verificando as possíveis interferências entre os processos, afim de evitar colisões entre o material adicionado e os outros elementos do equipamento;
- d) Os tempos mortos, que ocorrem entre as trocas de ferramentas e sistemas produtivos aditivos/subtrativos;
- e) Resultados com a microestrutura do material depositado, oriundos dos ciclos irregulares de calor do processo aditivo, em função da alteração da quantidade de camadas depositadas antes do processo de usinagem;
- f) A questão da necessidade de tratamento térmico pós processamento aditivo;

- g) O uso de fluidos de corte, não é desejável durante o processo subtrativo, devido ao laser e à possibilidade de danos aos sistemas ópticos da máquina e porosidade na nova adição;
- h) O problema da sobreposição de camadas de materiais considerados superligas, pois sua soldabilidade é menor que os materiais tradicionais;
- i) O problema da construção de peças complexas com seções transversais não uniformes, devido a inviabilidade de incorporar estruturas de suporte para as bordas;
- j) A questão dos processos de deposição, que até o presente momento, são aplicáveis apenas aos processos de deposição direta de energia (DED) e
- k) A dificuldade de integrar literalmente os processos por falta de um protocolo de planejamento de processos híbridos para pós processamento da manufatura aditiva.

Já Segerstark (2015), descreve que existe um conjunto de atributos que são interligados interferindo no processo. Entre eles, estão:

- a) Os parâmetros de processamento, incluindo: a energia específica, a linha de massa, a taxa de deposição, a forma de sobreposição, o tempo decorrido entre as deposições, a distância do foco do pó ao substrato e o fluxo de gás;
- b) As características do póenvolvendo: o tamanho do grão, porosidade, inclusões de gás, impurezas e morfologia;
- c) As características do substrato, considerando a dimensão, o tamanho do grão, a composição química, a rugosidade superficial e a reflectividade;
- d) As características do processo de deposição, abrangendo o perfil do fluxo do pó, o perfil da poça de fusão e a interação do pó e do laser;
- e) Características materiais, que englobam a dimensão geométrica, o tamanho do grão, a diluição, as transformações de fase, o *stress* residual, a questão de porosidades e trincas e o acabamento superficial.

Outros fatores que interferem no processo segundo Paul *et al.* (2011), colocam a questão do laser e óptica, envolvendo ajustes dos parâmetros de comprimento de ondas, tipo de operação do laser (onda contínua e duração focal); a alimentação do material, referindo-se à questão da alimentação lateral ou coaxial e os parâmetros de alimentação que foram estabelecidos e finalmente, a forma de manipulação do trabalho, ou seja, como a peça vai ser construída, incluindo o número de eixos da máquina.

Cortina *et al.* (2018), colocam como vantagens da manufatura híbrida:

- a) A não necessidade de alteração de zeros da peça durante o processo de fabricação. Uma única configuração é utilizada do início ao fim em todas as atividades, sejam elas aditivas ou subtrativas. Isso diminui o erro de posicionamento e aumenta a sua precisão, além de reduzir os tempos de fabricação;
- b) O fato de utilizar uma única máquina na produção, reduz a movimentação de material dentro da fábrica, diminui os estoques em processo, melhora a utilização do espaço disponível, impactando tanto na parte financeira como na questão da segurança;
- c) A fabricação de geometrias de maior complexidade, pela facilidade de alternar as manufaturas aditivas e subtrativas, o que possibilita a usinagem de áreas que não estão acessíveis quando as peças estiverem prontas. Isso aumenta a liberdade e flexibilidade no projeto da peça ideal.
- d) Redução dos desperdícios de manufatura, por meio da manufatura aditiva, diminuindo os custos de material e de usinagem. Como o material é “impresso”, por meio da fusão do pó, os desperdícios de material e usinagem são minimizados. Ainda neste sentido, a MH tem um perfil mais ecológico, minimizando tanto material, quanto a energia gasta na elaboração da peça;
- e) A necessidade de espaços fabris menores, visto que todas as operações são feitas em um único equipamento, portanto, o espaço fabril pode ser reduzido sem prejuízos;
- f) Considerando que todas as atividades são realizadas em um único equipamento, sob o mesmo sistema operacional em uma interface única, afirma-se que o treinamento do operador e a operação do equipamento, também é simplificada;
- g) Embora as máquinas híbridas possuam um custo de aquisição maior que as convencionais (aditivas e subtrativas separadamente), o investimento total é menor. Isso ocorre porque na máquina híbrida existe o compartilhamento de elementos comuns (sistemas de orientação, CNC, estrutura da máquina, etc.), assim, a compra de um equipamento híbrido, representa um gasto menor que a compra de dois equipamentos em separado;
- h) A redução dos custos das peças finais, pois este processo permite a aplicação de materiais de alto desempenho sobre materiais mais baratos, conseguindo desta forma uma peça com custo acessível com propriedades aprimoradas.

Já entre os desafios a serem vencidos, Cortina *et al.* (2018) elencam:

- a) A influência dos fluídos de corte, que geram basicamente dois problemas: a

- contaminação do processo aditivo, gerando porosidade e o problema das partículas de pó se misturarem ao fluído e interferirem na absorção do feixe de laser;
- b) O problema da abrasão no interior do equipamento sobre as guias;
 - c) Incertezas do processo aditivo, gerado pela falta de maturidade do processo. Considerando esse problema, afirma-se que este é o elo mais fraco da tecnologia híbrida;
 - d) O problema das tensões residuais, oriundo do processo aditivo que podem ser liberadas nas etapas de usinagem subsequentes. Isso resulta na distorção da geometria da peça, fazendo com que a manufatura subtrativa perca sua precisão. A presença de porosidade na peça também demonstram ser um problema, já que impactam na resistência do componente. Assim, haveria necessidade de tratamento térmico para eliminar essas tensões. Como os equipamentos não estão adaptados a essa necessidade, necessitando de tratamento externo, isso eliminaria as vantagens da máquina híbrida;
 - e) A necessidade de mudanças de paradigmas, pois esta tecnologia exige que se pense de forma integrada em relação aos equipamentos e não de forma separadas como tradicionalmente é feito;
 - f) O treinamento pode se tornar mais complicado, já que será exigido dos operadores conhecimentos múltiplos para dominar os processos. O uso de ferramentas computacionais para otimizar o processo híbrido, exige dedicação e investimento em capacitação;
 - g) O problema dos resíduos, que embora sejam reduzidos em até 90% se comparados aos processos tradicionais, são considerados em alguns casos mais tóxicos (no caso de altos teores de níquel, cobalto). Assim, cuidados especiais devem ser tomados, enquanto estudos relacionados à toxicidade e efeitos relacionados ao pó não forem concluídos;
 - h) A recuperação e reciclagem do pó devem ser estudados. Neste processo, apenas uma fração é utilizada (de 5% a 70%), entretanto, o material interagiu com o feixe de laser, o que pode ter alterado a forma e composição das partículas, prejudicando a sua reutilização;
 - i) A proteção da máquina também deve ser considerada. Não só em relação à colisões, mas também em relação ao calor gerado no processo e principalmente a capacidade

que a máquina deve ter de reter a luz do laser, evitando que componentes da máquina sofram com a reflexão do mesmo.

3.5 Síntese

No quadro 2 foi elaborado uma síntese dos autores abordados neste artigo, juntamente com o processo abordado e as características descritas por cada um deles. Já nos quadros 3 e 4 respectivamente, há uma síntese dos desafios e das vantagens da MH, para que haja a consolidação desta tecnologia.

Quadro 2: Síntese dos autores em relação ao processo abordado

Autor	Processo Abordado	Características
MACHADO, COELHO E ABRÃO (2009)	Tradicional	Abordagem em separado das tecnologias de fabricação.
MATIAS; RAO (2015)	MA	Formação de peças por meio da MA, sem necessidade de Blank.
ASTM F 2792 – 12º GIBSON et al. (2013)	MA	Divisões e subdivisões dos processos de manufatura aditiva. Binder Jetting (BJ): ligante líquido sobre pó. Direct Energy Deposition (DED): fusão de material na deposição por meio de laser, feixe de elétrons ou arco de plasma; Material Extrusion (ME): material extrudado por orifício; Material Jetting (MJ): adição seletiva de material feito por meio de gotículas; Powder Bed Fusion (PBF): fusão de pó em leito, feito por meio de energia térmica. Sheet Lamination (SL): manufatura obtida por meio de folhas de material sobrepostas; Vat Photopolymerization (VP): Polimerização feita por luz em fotopolímero líquido.
PINHEIRO, (2015)	MA	Descrição dos vários tipos de material utilizados na MA (gesso, elastômero, termoplástico, metais, borracha e ligas metálicas diversas)
LIMA et. al. (2017)	MA	Além de descrever a gama de materiais possíveis de se trabalhar na MA, explica que se pode colocar materiais com características diferentes em áreas específicas da peça.
GRAF et. al. (2018)	MA	Abordagem da MA tipo DED, abordando o sistema LMD.
SEGERSTARK (2015)	MA	Aborda a MA, demonstrando as características do LMD-w e LMD-p, seus usos e indicações.
CAIAZZO, (2018)	MA	Descrevem as vantagens do sistema LMD por trabalhar com baixa transferência de energia, minimizando distorções na peça e melhorando suas características finais.
KONG et. al. (2010)	MA	Descrevem que a forma construtiva do laser de adição pode ser facilmente adaptado em equipamentos CNC (de múltiplos eixos), facilitando a construção de equipamentos de MH.
CORTINA et. al. (2018)	MH	Explicam que o conceito de MH não é recente e em 2011 já havia propostas de classificação destes equipamentos. Também expõem que a junção da manufatura aditiva e subtrativa estão ganhando atenção, pois permitem a fabricação de componentes com precisão e acabamento.
NEWMAN et. al.; (2015)	MH	Descreve que o LMD tem se mostrado promissor na MH, podendo ser utilizado em máquinas de múltiplos eixos em conjunto com outros sistemas.
WILSON et. al. (2014)	MH	Descrevem que os processos oriundos da MH já permitiram a remanufatura de produtos de alto valor agregado, incluindo pás de turbinas, rotores e outros componentes de alto valor agregado
JONES et. al. (2012)	MH	
DMG-MORI (2015)	MH	Demonstra a forma construtiva de um equipamento, onde o sistema de adição a laser, utiliza o mesmo <i>spindle</i> de usinagem.
ROMI (2017)	MH	Demonstra a forma construtiva de um equipamento, onde o sistema de adição a laser, e colocado paralelamente ao <i>spindle</i> de usinagem.
MANOGHARAN et al. (2015); Paul et al. (2011)	MH	Demonstra as vantagens e desafios

Fonte: Autor

Quadro 3: Síntese dos desafios da MH apontado pelos autores

Autor	Desafios
MANOGHARAN et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar a sequência correta das operações para evitar colisões; - Minimizar tempos mortos entre trocas de ferramentas; - Ciclos irregulares de calor, alterando a microestrutura do material depositado; - Necessidade de tratamento térmico pós processo aditivo; - Eliminar o totalmente o fluido de corte pós processo subtrativo para evitar danos à máquina e a nova adição; - O problema da soldabilidade de superligas que é menor que em materiais tradicionais; - Construção de peças com seções transversais não uniformes, sem a necessidade de estrutura de suporte; - O problema dos processos de deposição na MH estarem limitados ao DED; - Falta de protocolo de planejamento para se trabalhar com a MH.
SEGERSTARK (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros de processamento (energia específica, taxa de deposição, tempo entre deposições, etc); - Características dos pós utilizados (tamanho do grão, porosidade, composição química, impurezas, etc); - Característica do substrato (dimensão, tamanho do grão, rugosidade, reflectividade e composição química); - Processo de deposição (perfil da poça de fusão, interação pó-laser, fluxo de pó); - Característica dos materiais (transformação de fase, stress residual, porosidade, trincas)
PAUL et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustes do comprimento de ondas do laser; - Alimentação do material; - Processo construtivo da peça (fases de construção), incluindo a quantidade de eixos da máquina.
CORTINA et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - A influência do fluido de corte que contamina o processo aditivo e interfere no laser; - Abrasão gerado no interior do equipamento pelo material utilizado; - Incertezas geradas pelo processo aditivo por falta de maturidade; - O problema das tensões residuais que podem influenciar os processos subsequentes; - Necessidade de tratamento externo para eliminar tensões, o que inviabiliza a MH; - Necessidade de pensar de forma integrada, gerando uma mudança de paradigma; - Treinamento pode ficar complicado, por exigir conhecimentos múltiplos para domínio do processo; - A questão de resíduos tóxicos (altos teores de níquel, cromo, cobalto, etc) liberados na forma de gás na MA; - Recuperação e reciclagem do pó, já que só são adicionados de 5% a 70% do material liberado; - Proteção da máquina na retenção do laser e contra colisões.

Fonte: Autor

Quadro 4: Síntese das vantagens da MH apontado pelos autores

Autor	Vantagens
MANOGHARAN et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de coordenadas fixo; - possibilidade de uso de múltiplas ferramentas e operações; - possibilidade de alternância de usinagem e adição de material;
CORTINA et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Não alterar o zero da máquina a cada operação; - Redução de movimentação de material, de estoques em processo, melhorando a segurança; - Fabricação de geometrias mais complexas com possibilidade de alternar adição e usinagem; - Minimização de desperdícios de material por meio da MA; - Menor necessidade de espaços fabris; - Equipamento único com interface também única, facilita e simplifica a atividade e treinamento; - Investimento em equipamentos é menor, pois há compartilhamento de sistemas de orientação, CNC e estrutura de máquina; - Redução do custo da peça, já que é possível aplicar material mais nobre sobre material mais barato.

Fonte: Autor

4. Considerações Finais

Na visão dos autores citados neste trabalho, não existem dúvidas de que a Manufatura Híbrida possui um grande potencial de desenvolvimento e de uso industrial. Sua combinação de processos aditivos e subtrativos garante a fabricação de componentes com geometrias complexas, antes impossíveis de serem concebidos. A junção do processo subtrativo ao aditivo em um único equipamento, conforme observado na revisão da literatura, possibilita o acabamento e as tolerâncias necessárias para que haja interesse comercial pelas peças. Entretanto, como se trata de uma tecnologia recente, verifica-se a existência de desafios a serem vencidos até que este processo atinja sua maturidade.

Por um lado, o processo híbrido demonstra ser muito eficiente. O uso de materiais na forma de pó gerando uma peça com menor quantidade de sobrematerial para usinagem e o menor uso de energia na elaboração da peça, garante vantagens financeira e ambiental em relação aos processos tradicionais, além da possibilidade de novos projetos mais flexíveis. Além disso, a possibilidade de sobrepor os materiais diferentes, tornam essa tecnologia imprescindível na redução de custos industriais, considerando que podem ser aplicados

materiais mais nobres sobre materiais mais simples, conferindo características diferenciadas à peça.

Por outro lado, os desafios para consolidar a tecnologia também são grandes, pois a tecnologia aditiva ainda é recente e demanda esforços para seu aprimoramento. O processo aditivo ainda não está totalmente dominado nas características utilizadas pela manufatura híbrida, podendo inclusive inviabilizar seu uso, se isso não ocorrer.

Uma barreira a ser vencida, considerando-se que a tecnologia MH ainda é nova, é a falta de profissionais capacitados a desenvolverem projetos utilizando esse recurso, dificultando o seu desenvolvimento. Por isso, seu potencial de utilização tende a permanecer estagnado durante o período de capacitação de profissionais da área de projetos e de resolução dos problemas inerentes da tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ASTM, Standard terminology for additive manufacturing technologies, Standard F2792-12a, ASTM International, 2012 www.astm.org, ASTM COMMITTEE F42 ON ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES; ASTM COMMITTEE F42 ON ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. SUBCOMMITTEE F42. 91 ON TERMINOLOGY. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International, 2012.
- BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.
- CAIAZZO, Fabrizio. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. **Optics & Laser Technology**, v. 103, p. 193-198, 2018.
- CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUIZ, J. E.; UKAR, E. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. **Materials**, v. 11, n. 12, p. 2583, 2018.
- DMG-Mori (<https://www.youtube.com/watch?v=oaIOrQi2HLM>, acesso em 07/05/2019)
- GIBSON, I., Rosen, D. W., & Stucker, B.. **Additive manufacturing technologies**. New York: Springer, 2014.
- GRAF, B.; MARKO, A.; PETRAT, T.; GUMENYUK, A.; RETHMEIER, M. 3D laser metal deposition: process steps for additive manufacturing. **Welding in the World**, v. 62, n. 4, p. 877–883, 2018.
- INDÚSTRIAS ROMI S.A. (<https://www.youtube.com/watch?v=yIMftRD5DhU>, acesso em 07/05/2019)
- STANDARD, A. S. T. M. ISO/ASTM 52900: 2015 Additive manufacturing-General principles-terminology. **ASTM F2792-10e1**, 2012.
- KONG, C. Y.; SCUDAMORE, R. J.; ALLEN, J. High-rate laser metal deposition of Inconel 718 component using low heat-input approach. **Physics Procedia**, v. 5, p. 379–386, 2010.
- LIMA, D. D.; MANTRI, S. A.; MIKLER, C. V.; CONTIERI, R. YANNETTA, K. N. CAMPO, K. N., LOPES E. S., STYLES, M. J., BORKAR, T., CARAM, R. BANERJEE, R. Laser Additive Processing of a Functionally Graded Internal Fracture Fixation Plate. **Materials & Design**, 2017.
- LORENZ, K. A.; JONES, J. B.; WIMPENNY, D. I.; JACKSON, M. R. A review of hybrid manufacturing. , p.

96–108, 2000.

MACHADO Alison Rocha, COELHO ReginaldoTeixeira, ABRÃO Alexandre Mendes et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, editora: Blucher 1ª edição, 2009

MANOGHARAN, G.; WYSK, R.; HARRYSSON, O.; AMAN, R. AIMS- a Metal Additive-Hybrid Manufacturing System : System Architecture and Attributes. **Procedia Manufacturing**, v. 1, p. 273–286, 2015.

MATIAS, Elizabeth; RAO, Bharat. 3D printing: On its historical evolution and the implications for business.

In: **2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)**. IEEE, 2015. p. 551-558.

NEWMAN, S. T.; ZHU, Z.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals**, v. 64, n. 1, p. 467–470, 2015.

PAUL, Christ P., BHARGAVA, Pankaj, KUMAR, Atul, PATHAK, Ayukt K. and KUKREJA, Lalit M. Laser Rapid Manufacturing: Technology, Applications, Modeling and Future Prospects. **Lasers in Manufacturing**. P. 1-67, 2013.

PINHEIRO, Rogélio Carpes, Design Virtual na Reconstrução Auricular com Material Autógeno. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

SEGERSTARK, Andreas. **Additive Manufacturing using Alloy 718 Powder: Influence of Laser Metal Deposition Process Parameters on Microstructural Characteristics**. 2015. Tese de Doutorado. University West.

SONG, Yong-Ak et al. 3D welding and milling - a direct approach for fabrication of injection molds.

In: **Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium**. University of Texas at Austin. 1999. p. 793-800.

WILSON, J Michael, CECIL Piya, YUNG C Shin, FU Zhao, e KARTHIK Ramani. 2014.

“Remanufacturing of Turbine Blades by Laser Direct Deposition with Its Energy and Environmental Impact Analysis.” **Journal of Cleaner Production** 80: p.170–78.