

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO RECONDICIONAMENTO DE MOLDES SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR

Mariana Ribeiro Costa – ribeirocostamariana@gmail.com

Rafaela Sousa da Silva – rafasilvaqui@gmail.com

Thainá da Silva Mendonça – thainasmendonca@gmail.com

André Luís Helleno (Orientador) – andre.helleno@mackenzie.br

RESUMO

A Manufatura Aditiva é uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, que vem ganhando espaço no cenário industrial, assim como em paralelo, a economia circular segue sendo foco de organizações empresariais com compromissos sustentáveis estabelecidos em seus planos de negócio. Neste contexto esse artigo tem o objetivo de mapear as principais características da utilização da Manufatura aditiva aplicada ao processo produtivo de moldes e matrizes, que, após desgastados, podem ser retrabalhados, a fim de aumentar o tempo útil do ciclo de vida, contribuindo para a economia circular neste segmento. Para isso, dividiu-se esta análise em duas macros etapas, sendo a primeira a aplicação de questionário para captação da percepção empresarial sobre a utilização da manufatura aditiva e a segunda, a análise bibliométrica sobre a utilização desta tecnologia em outros países, a fim de entender o contexto global. A partir destas etapas, foi notório que na amostra respondente do questionário, apesar da percepção de benefícios relevantes para utilização deste método, este ainda não é amplamente utilizado principalmente devido ao custo de investimento. Em contrapartida, nos demais países explorados, há maior aderência a esta tecnologia, tanto para a remanufatura de moldes, como para outros setores da indústria.

Palavras-chave: Ciclo de vida. Economia circular. Sustentabilidade. Manufatura aditiva. Moldes.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is a technology of Industry 4.0, which has been standing out in the industrial scenario, just as in parallel, the circular economy continues to be the focus of business organizations with sustainable commitments established in their business plans. In this context, this article aims to map the main characteristics of the use of additive Manufacturing applied to the production process of molds and dies, which, after being worn out, can be reworked in order to increase the useful life cycle, contributing to the circular economy in this segment. Therefore, the analysis was divided into two stages, the first one was the application of a questionnaire to capture the business perception about the use of manufacturing and the second, the bibliometric analysis on the use of this technology

in other countries, in order to understand the global context. From these stages, it was clear that in the sample which attended to the survey, despite the perception of relevant benefits for using this method, it is still not widely used, mainly due to the limited budget. On the other hand, in the other countries explored, there is greater adherence to this technology, both for the remanufacturing of molds and for other sectors of the industry.

Key Words: Life Cycle. Circular Economy. Sustainability. Additive Manufacturing. Molds.

1 INTRODUÇÃO

Geralmente, os processos utilizados para a fabricação de moldes e matrizes se baseiam na remoção de material por meio da usinagem, eletroerosão e/ou retificação. Esses processos de modo geral, consistem no movimento rotativo da ferramenta ou da peça, combinados com o avanço linear ou circular, para que, com a retirada de material, seja possível definir a geometria necessária para moldagem do produto a ser produzido (ALMEIDA; SOUZA, 2015).

Especificamente o setor de moldes e matrizes, em 2019, atendeu apenas aproximadamente 50% da demanda nacional e vem em constante queda em número de ferramentarias abertas no Brasil (ABINFER - Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais, 2018).

Em paralelo, observa-se que, com o passar do tempo, surgem novos recursos tecnológicos, como a manufatura aditiva, que consiste em uma inovação da manufatura tradicional, realizada por meio da transformação dos modelos CAD (Computer Aided Design) em camadas para serem materializados por impressoras 3D (DESPEISSE; FORD, 2016).

Naturalmente, no quadro de demanda diversificada, as tecnologias industriais vêm evoluindo para permitir também maior alcance na produção de diferentes formatos e materiais (VAYRE et al., 2012; KAPNER et al., 2018; STEWART, 2019 *apud* BRANDÃO et al., 2020). A manufatura aditiva pode ser comumente associada a impressão de peças plásticas, porém o avanço tecnológico, já permite a impressão de objetos de inúmeros materiais, inclusive os metais, existindo diversos processos que possibilitam sua manipulação, como a deposição por energia direta (*Direct energy deposition*, DED), fundição de pó metálico a laser (*Powder bed fusion*, PBF), o jateamento de pó metálico (Binder jetting, BJ) e a laminação em folha (*sheet lamination*, SL), (GOMES; WILTGEN, 2020).

Em adicional, a sustentabilidade, que nos últimos anos vem se tornando um tema cada vez mais destacado (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018), é um dos pilares que busca apoio na era tecnológica, visto que a relação entre a indústria e o meio ambiente torna-se cada vez mais estreita e relevante para o desempenho dos negócios. Dentro deste tema, um tópico que vem sendo abordado em apoio ao desenvolvimento sustentável é a Economia Circular, conceito que consiste no circuito fechado de fluxos de materiais na economia, pois aplica-se a reutilização dos materiais da forma mais

eficiente possível, para que haja harmonia entre o meio ambiente e os negócios. Essa abordagem começou a ser desenvolvida na tentativa de lidar com o fato de que os ecossistemas não podem sustentar a taxa de extração de matéria-prima e consumo de energia, dado que a demanda aumenta rapidamente, trazendo um crescente consumo de recursos naturais (SANTOS; SHIBAO e SILVA, 2019).

Desta forma, no contexto geral, percebe-se a possibilidade de adaptação do setor industrial de moldes e matrizes, com base no desenvolvimento tecnológico para atendimento das demandas de mercado de forma sustentável.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Em uma perspectiva global, pode-se afirmar que os direcionamentos governamentais e empresariais, em alinhamento aos objetivos sustentáveis da Organização das Nações Unidas (ONU), vêm se desenhando para inclusão de metas ambientais cada vez mais ambiciosas a longo prazo, onde o foco em redução, reutilização e reciclagem de materiais, logística reversa e economia circular são primordiais para o alcance destes objetivos.

Um dos grandes desafios de toda cadeia produtiva, atrelado à sustentabilidade, é o aumento do ciclo de vida dos produtos por ela gerado, de modo geral, o mercado demanda agilidade no desenvolvimento e requer soluções efetivas e duradouras.

Um dos possíveis suportes tecnológicos nesses desafios, pode ser a aplicação da manufatura aditiva de material metálico, ramo que vem apresentando grande visibilidade positiva em relação a suas aplicações, dentre elas a fabricação e remanufatura de moldes. Acredita-se que esta tecnologia pode ser uma excelente opção para as empresas que têm como um de seus pilares, a sustentabilidade dentro da cadeia de produção.

Espera-se que este artigo contribua para o entendimento da atual aplicação, limitações e benefícios da utilização da manufatura aditiva para otimização do ciclo de vida dos moldes e matrizes, de forma a contribuir com a economia circular.

1.2 OBJETIVOS

Esse artigo tem como objetivo analisar a utilização da manufatura aditiva na cadeia de moldes e matrizes no processo de remanufatura, sob a ótica da economia circular e analisar a tendência de utilização da manufatura aditiva ao redor do mundo, em comparação à utilização no Brasil.

1.3 JUSTIFICATIVA

Visto o crescente reconhecimento da importância da sustentabilidade, diversos setores do mercado vêm buscando cada vez mais adaptações para que possam contribuir com o tema. Dado que o meio industrial se trata de um setor do mercado com processos que causam diversos impactos

negativos para o meio ambiente, é necessário buscar por alternativas que tornem os seus processos de produção mais sustentáveis, isto é, procurar e implantar soluções que possam ser menos agressivas ao meio ambiente, assim se adequando ao novo cenário mundial.

A manufatura aditiva trata-se de uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0 com benefícios sustentáveis significativos, com isso entende-se que esta pode ser uma alternativa dentro da indústria, para que seus processos estejam de acordo com os princípios sustentáveis. Portanto, pode ser considerada como uma boa ferramenta para a realização da remanufatura de moldes, e consequentemente aumentando o seu ciclo de vida.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Dividiu-se a revisão da literatura em dois macros segmentos, sendo eles o ponto de vista tecnológico relacionado à manufatura aditiva e híbrida para contextualização, o mapeamento de benefícios e limitações, e o outro, o panorama de sustentabilidade da economia circular para clara definição e conceitualização.

2.1 MANUFATURA ADITIVA E HÍBRIDA

Nos últimos anos, a sociedade mundial tem enfrentado muitos problemas em relação ao meio ambiente, com isso todos os setores empresariais vêm encarando uma nova realidade, onde colocar a sustentabilidade como uma de suas prioridades se tornou uma tarefa de demasiada necessidade. Desse modo as indústrias têm buscado cada vez mais agir de forma sustentável, isto é, vêm adaptando os seus processos industriais, fazendo com que sejam menos poluentes, além de procurarem gerar a menor quantidade de resíduos possíveis, e agindo conscientemente em relação às suas matérias primas, para garantir que sejam cada vez menos prejudiciais ao meio ambiente (ARRIZUBIETA et al., 2018 *apud* BARBOSA, 2019). Para se adequar a este cenário, as indústrias buscam tecnologias alternativas às usuais, como as manufaturas aditiva e híbrida.

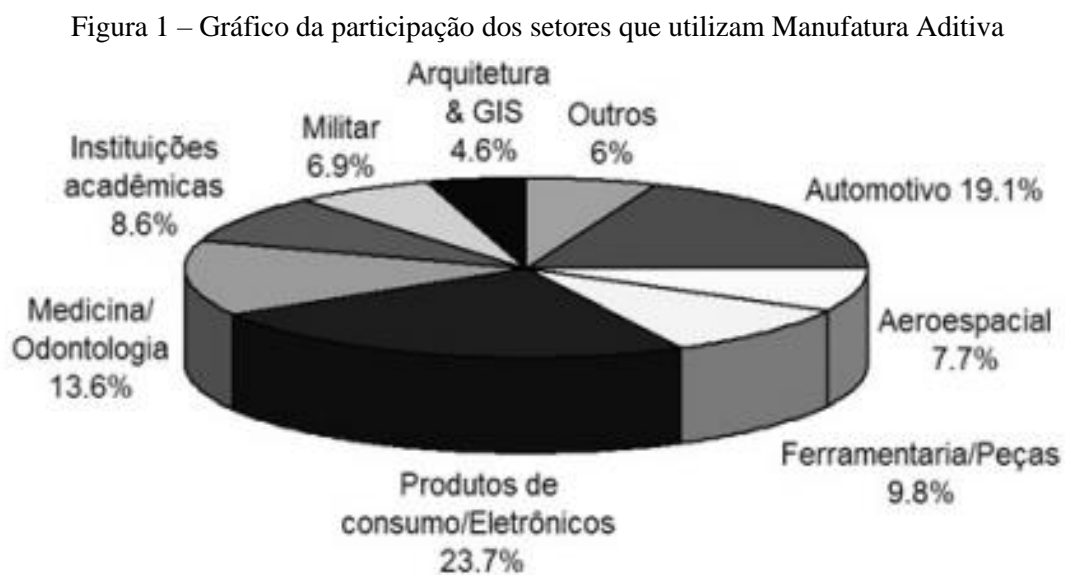
A Manufatura Aditiva (Additive Manufacturing – AM) trata-se de uma tecnologia avançada de fabricação de produtos, que permite a impressão de objetos na terceira dimensão, pode-se descrevê-la como “um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente” (VOLPATO; CARVALHO, 2017). Ou ainda de forma simplificada, como “processos de fabricação com o objetivo de se criar um objeto tridimensional por camadas a partir de um modelo virtual” (BRANDÃO et al., 2020).

De acordo com Guo e Leu (2013 *apud* DESPEISSE; FORD, 2016, p. 1574), os materiais mais comuns a serem utilizados nos processos de manufatura aditiva, são polímeros, metais e cerâmica. E o material utilizado está diretamente relacionado com o tipo de processo que será realizado. Apesar de existir uma grande variedade de processos relacionadas a manufatura aditiva, os mais comuns a

serem utilizados são: modelagem de deposição fundida, estereolitografia, fusão a laser seletivo, sinterização a laser seletivo e processamento digital de luz. Dado este contexto, é importante entender os benefícios que a tecnologia pode prover diante de várias perspectivas, são eles:

- a) maior eficiência de recursos: As melhorias podem ser realizadas nas fases de produção e de uso, dado que os processos de manufatura e os produtos podem ser reprojatados para AM;
- b) vida útil prolongada do produto: alcançada por meio de abordagens técnicas, como reparo, remanufatura e renovação, e padrões socioeconômicos mais sustentáveis;
- c) cadeias de valor reconfiguradas: cadeia de suprimentos mais curta e simples, produção mais localizada, modelos de distribuição inovadores e novas colaborações.

Desde seu surgimento, essa tecnologia tem ganhado cada vez mais espaço, em diferentes setores. O primeiro ramo a fazer uso dessa tecnologia foi o setor de fabricação de protótipos com funcionalidade limitada. Entretanto, ao longo do tempo o uso da tecnologia foi se expandindo e, de acordo com Wohlers (2008 *apud* RAULINO, 2011), no cenário mundial em 2007, o uso da tecnologia se distribuía, mundialmente, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 1.



Fonte: WOHLERS, 2008

Ainda a respeito dos benefícios, de acordo com Volpato e Carvalho (2017), a Manufatura Aditiva, quando comparada aos processos tradicionais de fabricação, apresenta vantagens tais como:

- a) a grande liberdade geométrica na fabricação, independentemente da complexidade da peça;
- b) o baixo desperdício de material e a utilização eficiente de energia;
- c) a possibilidade de misturar diferentes materiais ou mudar a densidade do mesmo material durante o processamento, permitindo a variação de propriedades ao longo da peça, como resistência, dureza, flexibilidade etc.;

- d) a dispensabilidade da troca de ferramentas durante a fabricação, como ocorre, por exemplo, nas máquinas de CNC;
- e) o fato de a fabricação ocorrer em uma única etapa, em um único equipamento.

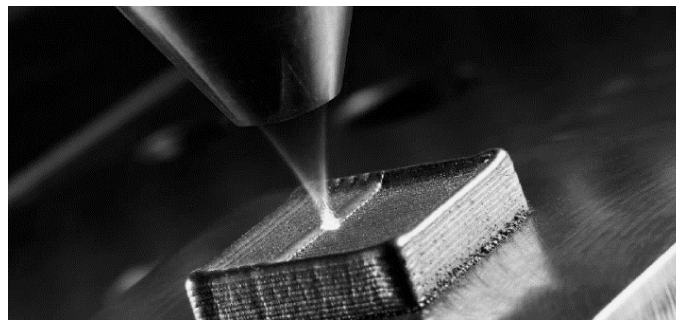
Abaixo, as Figuras 2 e 3 ilustram as etapas dos processos da manufatura subtrativa e aditiva, ressaltando a diferença entre a quantidade de etapas e tipos de ferramentas utilizadas em ambos os processos.

Figura 2 - Etapas de fabricação de moldes e matrizes em máquinas CNC (Manufatura Subtrativa)



Fonte: ALMEIDA; SOUZA, 2015

Figura 3 - Etapa de fabricação de moldes e matrizes em impressoras 3D (Manufatura aditiva)



Fonte: PIZZINI, 2013.

Apesar de estar em constante evolução e conquistando espaços cada vez mais significantes nos processos de produção, a Manufatura Aditiva pode não ser, sozinha, a melhor técnica a ser empregada, tendo em vista que as peças metálicas que são fabricadas ou remanufaturadas, através desse processo podem necessitar de um processamento posterior, para refinamento de sua exatidão geométrica e melhoria na qualidade de sua superfície (GUESSASMA et al., 2015; NEWMAN et al., 2016; LIU et al., 2017 *apud* HELLENO et al., 2020). Por esse motivo, algumas empresas estão optando pela utilização da Manufatura Híbrida.

A Manufatura Híbrida trata-se de uma tecnologia que une diferentes processos em apenas um equipamento, com a finalidade de aumentar os benefícios e diminuir as imperfeições dos processos nos quais for aplicada. Sendo assim, torna-se possível trabalhar, em conjunto, com a Manufatura Aditiva e a Manufatura Subtrativa (BARBOSA et al., 2019). Dado que este processo é uma junção de duas tecnologias, ele apresenta uma grande versatilidade, e isso permite que a remanufatura de

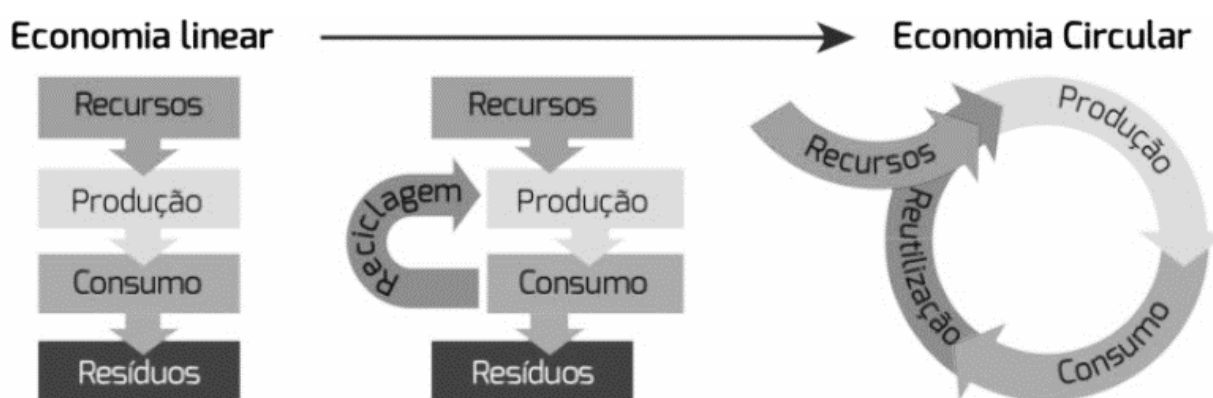
moldes e matrizes seja performada com alta qualidade, e assim torna-se notável o seu potencial para o ramo industrial (PIYA et al., 2014).

Este avanço tecnológico vem se destacando gradativamente e sendo um novo foco de atenção no ramo industrial. Essa tecnologia une as vantagens da manufatura aditiva e subtrativa, pois a manufatura aditiva apesar de apresentar uma grande eficiência tecnológica, apresenta, entretanto, uma baixa qualidade no quesito de precisão dimensional e no processo de sobreposição de camadas de material, em contrapartida a manufatura subtrativa promove uma alta qualidade nesses quesitos. Desta forma, pode-se perceber que manufatura híbrida se trata de um complemento das duas manufaturas, para que possa ser aproveitado os benefícios de cada uma (HASCOËT; LAGUIONIE; RAUCH, 2014), pois nos quesitos que uma manufatura tem carência, a outra complementa. Embora esta junção possibilite que os produtos sejam fabricados com maior qualidade e de uma maneira mais eficiente, atendendo as constantes mudanças que os processos industriais passam, o planejamento desses processos ainda é considerado como uma tarefa complicada de ser realizada (BEHANDISH; NELATURI; KLEER, 2018).

2.2 ECONOMIA CIRCULAR

Por um longo período, a economia linear, baseada em extrair, produzir, consumir e descartar, era vista com naturalidade em relação ao ciclo de vida dos produtos, quando na verdade essa linha de ação, causa ao planeta grandes impactos ambientais. Na contrapartida deste padrão, surge a economia circular, que propõe um modelo de consumo cíclico, baseado em produzir, utilizar e não descartar, mas sim reutilizar, mantendo os recursos já extraídos dentro de um ciclo contínuo de adaptação (ASSUNÇÃO, 2019). A Figura 4 representa a esquematização da transição da economia linear para economia circular.

Figura 4 – Economia Linear e transição para Economia Circular



Fonte: ASSUNÇÃO, 2019

Nessa linha de desenvolvimento, pode-se destacar o trabalho do economista britânico Kenneth Boulding, como um dos marcos iniciais na construção do conceito, atualmente conhecido e

claramente definido como Economia Circular, pois já na década de sessenta Boulding ressaltava a necessidade de o homem encontrar um lugar cíclico no sistema ecológico, onde a forma material possa ser continuamente reproduzida, mesmo que para isso seja necessária a aplicação de energia. Entretanto, seu nome apenas começou a se destacar no meio profissional e acadêmico no decorrer dos anos 2000, juntamente com o crescimento da preocupação com a sustentabilidade (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018). Segundo Moncaster e Pomponi (2017), a Economia Circular nasce com a promessa de eliminar a rivalidade entre a economia e o meio ambiente, dado que o tema preza pelo fim da alta geração de resíduos vindo dos recursos, defendendo a ideia de reutilização.

Mcdounough e Braungart (2002 *apud* DESPEISSE; FORD, 2016) trazem a analogia do circuito linear descrito com a expressão “do berço ao túmulo”, e a economia circular “do berço ao berço”, ou seja, o circuito linear possui um fim, gerando desperdícios, já a economia circular, ao fim da vida útil de um material ou produto, destina-o a um novo começo, através da reciclagem, reutilização, remanufatura ou manutenção, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, quesito para o qual as diretrizes de produção empresariais buscam se alinhar, considerando o relevante crescimento da população global, que duplicou nos últimos 60 anos, e continuará crescendo nos próximos (ONU, 2019). O crescimento populacional é um dos principais fatores de contribuição para o aumento das demandas de mercado, segundo Weetman (2019) a economia circular, tem justamente o objetivo de desacoplar o crescimento das indústrias, em relação ao consumo de recursos naturais, para que não cheguemos ao colapso dos recursos do planeta.

Há chances de a Economia Circular ser uma grande revolução e reorganização no que tange produção e consumo na economia global nos próximos séculos, dado que este conceito apresenta uma reestruturação na relação do mercado e dos recursos. Nos dias atuais as pessoas têm uma alta consciência e preocupação de como deixarão o mundo para as próximas gerações, com isso o tratamento dos recursos naturais vem sendo repensado, e assim há possibilidades de que a economia circular seja a melhor alternativa de modelo industrial, substituindo o atual “take-make-waste” de acordo com Lacy e Rutqvist (2015). A aplicação deste novo modelo vem se tornando cada vez mais necessária e importante, dado que a sustentabilidade vem se tornando prioritária no mundo.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente artigo, realizou-se a revisão da literatura dos temas abordados, a aplicação de questionário, análise de tendências da utilização da manufatura aditiva e híbrida ao redor do mundo e, por fim, a análise dos resultados. Utilizou-se a revisão da literatura já apresentada neste artigo para desenvolvimento das questões sobre este tema com embasamento teórico, a fim de obter-se respostas e percepções dos profissionais que já trabalharam ou trabalham

atualmente em empresas de moldes e matrizes, ou que tenham tido contato com processos de Manufatura Aditiva.

Como primeira etapa captaram-se as principais características da manufatura aditiva e manufatura híbrida na cadeia de moldes e matrizes no processo de remanufatura sob a ótica da economia circular, através da profunda análise da Revisão da Literatura, onde as características e detalhes de cada tema foram explorados, visando garantir o melhor embasamento sobre o assunto em questão.

Em paralelo desenvolveu-se o questionário de cunho qualitativo, onde utilizou-se a escala *Likert* nas questões afirmativas, ou seja, respostas que seriam dissertativas foram caracterizadas de forma numérica, sendo 1) discordo totalmente, 2) discordo, 3) indiferente (ou neutro), 4) concordo e 5) concordo totalmente. Aplicou-se esta escala afim de verificar o nível de concordância dos entrevistados, sobre benefícios e limitações já conhecidos da manufatura aditiva e híbrida, além da obtenção de respostas dissertativas com texto livre, sobre conhecimento, interesse e utilização destas tecnologias, além dos demais benefícios e limitações possivelmente percebidos pelos entrevistados.

A etapa seguinte, tratou-se de uma fase com caráter analítico e exploratório. Nesta foi realizada uma análise afim de aprofundar o conhecimento e mapear as aplicações e as tendências dessa tecnologia a nível global. Para realizar essa análise foi feita uma bibliometria, onde buscou-se artigos de diversos países com o propósito de explorar a utilização da manufatura aditiva em cada localidade para obter informações que contribuam com o conhecimento sobre o tema, ou seja, objetiva-se compreender como a tecnologia está sendo utilizada ao redor do mundo.

A última etapa tratou-se da análise de resultados, isto é, está é a fase em que todas as respostas obtidas através do questionário e todas as informações atingidas através da bibliometria foram consideradas e a partir delas, juntamente com as informações descritas na Revisão da Literatura, realizou-se uma análise profunda desses dados, para que houvesse o embasamento necessário para realizar a conclusão do presente artigo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DO QUESTIONÁRIO

Esta seção refere-se às análises dos resultados obtidos através da aplicação do questionário, onde este será comparado, posteriormente, com pesquisas realizadas sobre a utilização da Manufatura Aditiva na indústria pelo mundo.

Para introduzir as repostas do questionário, é importante examinar o público que respondeu a este. Explorando essa população, observa-se que em sua maioria há diretores e gerentes, porém pesquisadores, especialistas e técnicos também contribuíram para a pesquisa. Essa população provém de diversos ramos do mercado, o que traz a reflexão sobre a versatilidade da Manufatura Aditiva.

Importante que seja ressaltado também que as respostas foram provenientes de colaboradores de todos os portes de empresas, ou seja, microempresas, empresas de pequeno, médio e grande porte.

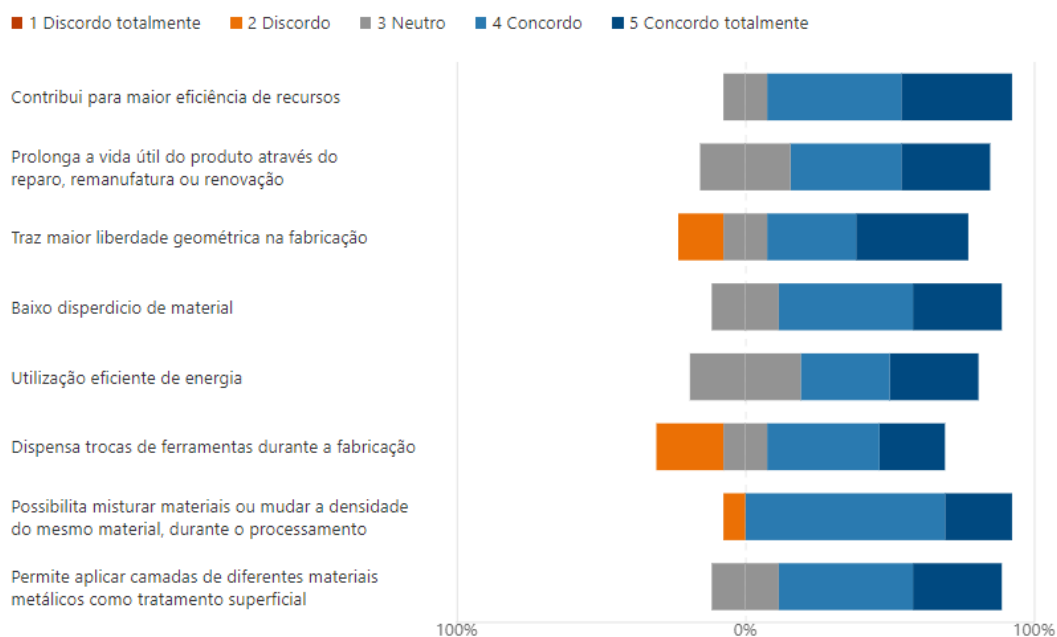
De acordo com as respostas obtidas no questionário, verificou-se que apenas 36% dos respondentes trabalham em empresas que utilizam a Manufatura Aditiva, sendo estas em sua maioria, empresas de grande porte, em contrapartida 64% dos indivíduos não trabalham em empresas que utilizam a Manufatura Aditiva, porém, destes, nota-se de forma quase unanime o conhecimento sobre a existência deste processo e o interesse em sua utilização, uma vez que 90% responderam que conhecem essa tecnologia e gostariam de utilizá-la.

Percebe-se que os motivos pelos quais a manufatura aditiva é de interesse comum são similares, os dois mais apontados foram o tempo e a excelência na performance. Em relação ao tempo de trabalho foi levantado que esta tecnologia contribui positivamente para o *lead time* (ou tempo de ciclo) dos processos em que é aplicada, dado que otimizar tempo é muito importante no ponto de vista industrial e sempre é buscado. No tocante da eficiência em sua performance, destaca-se sua agilidade, ela possibilita que a produção de peças sob medida e peças complexas sejam realizadas de uma maneira mais fácil e com excelência em seu acabamento, visto a dificuldade que é encontrada para esses pontos nos processos no qual ela não está inserida. Além dessas razões, também foi apontado que a tecnologia carrega consigo a capacidade de redução de custos, isto é, segundo os respondentes, mesmo que seja alto o seu custo de aquisição, ela traz benefícios financeiros para o processo fabril.

Um motivo que foi pouco levantado pelos respondentes, entretanto, é de extrema importância, é a redução de resíduos e desperdícios que esta tecnologia pode trazer para os seus processos, posto que a Manufatura Aditiva é uma tecnologia que está de acordo com a Economia Circular, assim sendo uma aliada da sustentabilidade. O que é de grande relevância, dado que a sustentabilidade vem sendo cada vez mais requisitada nas empresas.

Conforme demonstrado no gráfico abaixo, é possível notar que mesmo a manufatura aditiva quase não sendo utilizada em seus processos, os respondentes, em sua maioria, concordam ou concordam totalmente com os benefícios citados por Volpato e de Carvalho (2017, p. 24).

Figura 5 – Percepção dos benefícios da Manufatura Aditiva



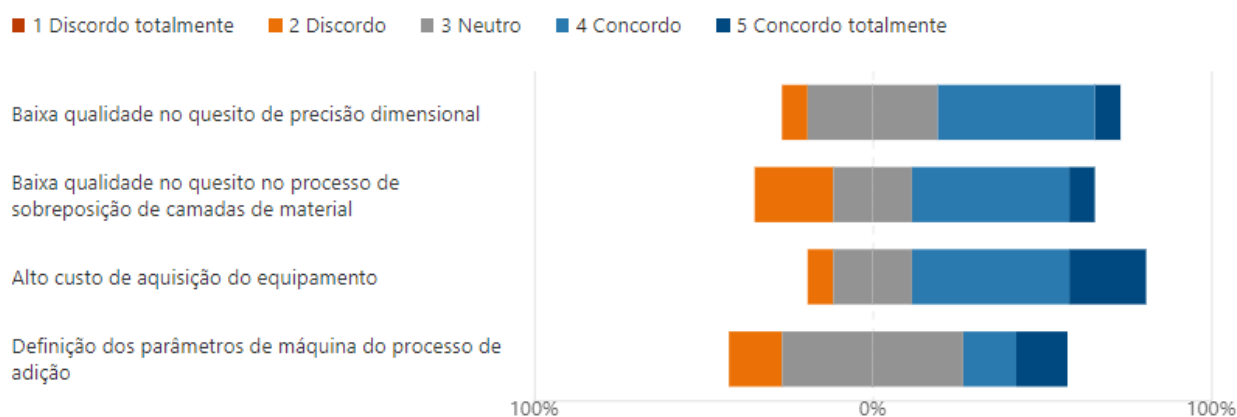
Fonte: elaborada a partir das respostas recebidas no questionário (2021)

Como benefícios adicionais aos apresentados no questionário, os respondentes citaram:

- baixa intervenção humana no processamento e pós processamento de peças;
- possível redução do inventário de peças de reposição, aplicando os princípios do modelo de “produção-sob-encomenda”;
- reconfiguração da cadeia de valor (rcv) por meio da adoção das tecnologias avançadas de manufatura e seu vínculo à indústria 4.0, web 2.0, contribuindo para futuras cadeias de valor mais curtas, colaborativas e mais sustentáveis;
- alternativa viável as peças de equipamentos descontinuados (sem peças de reposição);
- especialmente interessante para peças complexas em termos de geometria e montagem;
- menor descarte, redução no uso de matéria prima, ecologicamente correto;
- possibilidade de obtenção/construção de superfícies complexas (*Free Form Surfaces*) impossíveis de se obter pelos processos tradicionais.

Em relação as limitações citadas por Hascoët, Laguionie e Rauch (2014), percebe-se maior concordância dos respondentes, principalmente relacionada ao alto custo de aquisição do equipamento, seguido da baixa precisão e baixa qualidade no processo de sobreposição. Observa-se também maior neutralidade em relação a dificuldade na definição dos parâmetros de máquina, aparentemente não sendo um ponto relevante na perspectiva dos respondentes. +

Figura 6 – Percepção das limitações da Manufatura Aditiva



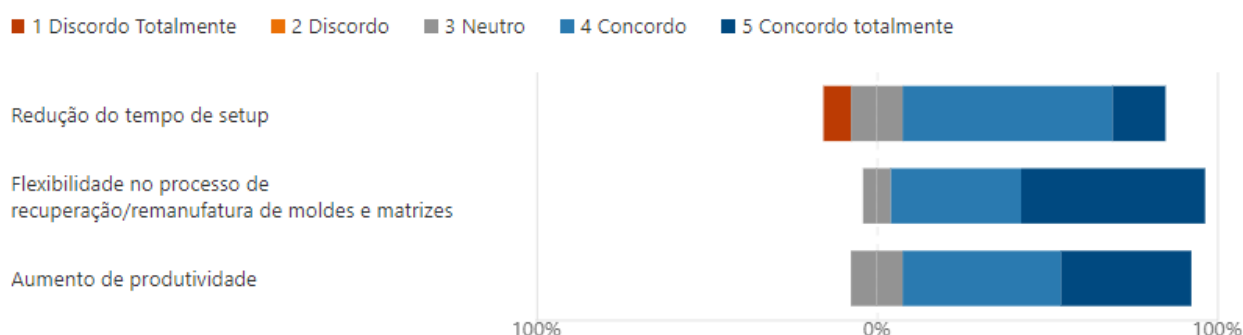
Fonte: elaborada a partir das respostas recebidas no questionário (2021)

Como limitações adicionais às apresentadas no questionário, os respondentes citaram:

- baixa disponibilidade de força de trabalho corretamente capacitada e treinada;
- capabilidade de produção limitada (*one-part/piece batch*) e pouca maturidade do processo;
- alta variabilidade na integração dos parâmetros do processo e seu efeito nas variáveis de saída;
- baixa disponibilidade/aquisição de matéria prima e equipamentos;
- alto custo na aquisição de componentes manufaturados através desta tecnologia, para demonstrar sua eficácia;
- ainda não é amplamente difundida (difícil acesso).

Em relação à Manufatura Híbrida, todos os respondentes acreditam que a tecnologia traz benefícios em um centro de usinagem. Além disso, a grande maioria concorda, ou concorda totalmente com os benefícios apresentados no questionário.

Figura 7 – Percepção dos benefícios da Manufatura Híbrida



Fonte: elaborada a partir das respostas recebidas no questionário (2021)

Em adicional, foi bastante citado pelos respondentes, o benefício de proporcionar liberdade na construção de superfícies complexas, ou difíceis de construir utilizando isoladamente a manufatura

aditiva ou a tradicional, ressaltando também a flexibilidade da combinação dos processos aditivos e subtrativos, bem como a diminuição no desperdício e desgaste de ferramentas.

Também foram citadas possíveis limitações no uso dessa tecnologia, sendo a principal delas, o custo do equipamento, que, por ser relativamente alto, ainda é um impeditivo para microempresas e empresas de pequeno e médio porte, além deste, foram citados os pontos abaixo:

- a) tecnologia, em cenário nacional, pouco desenvolvida, trazendo poucas utilizações concretas no cenário industrial nacional;
- b) inexistência de modelos de planejamento do processo com abordagem preditiva que atenda não só ao efeito da interação dos parâmetros do processo híbrido, como também à variação das características geométricas da deposição;
- c) estabilidade do processo (repetitividade sob as mesmas condições operacionais);
- d) baixa resistência dos materiais;
- e) métodos de controle metrológico *at-line* ainda em desenvolvimento;
- f) tecnologia pouco difundida, com alto custo frente as demais tecnologias, trazendo assim poucos *cases* concretos no cenário nacional;
- g) dificuldades de adaptação e treinamento;
- h) pouco domínio tecnológico do processo.

4.2 ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS

Conforme exposto anteriormente, a Manufatura Aditiva, apesar de benéfica, ainda não é muito utilizada no Brasil. Entretanto, no restante do mundo, sua utilização se diferencia, uma vez que existem diversas aplicações, bem como na remanufatura de moldes e matrizes, a serem exploradas mundo afora. Na tabela abaixo, há exemplos da aplicação da Manufatura Aditiva ao redor do mundo. De acordo com as pesquisas demonstradas na tabela, nota-se a veracidade dos benefícios citados pelos especialistas.

Quadro 1 – Tendências e aplicações da manufatura aditiva ao redor do mundo

País	Tendências e aplicações
Alemanha	Combina-se a manufatura aditiva com a formação de folha incremental, a partir disso obtêm-se flexibilidade no processo de fabricar peças com funções integradas e peças leves em larga proporção com peça aditivas menores em uma máquina e dispositivo de fixação. Essa fusão pode resultar na economia de energia. (HAHN; TEBAAY; TEKKAYA, 2020)
Áustria	Utiliza-se a manufatura aditiva em consultórios e laboratórios técnicos odontológicos, com o objetivo de melhoria nas próteses dentárias, pela ascensão da tecnologia de fabricação assistida por computador (CAM). (HARTMANN; STAMPFL, 2019)

Canadá	Comparação e avaliação, sob a perspectiva sustentável, do ciclo de vida dos 3 métodos de manufatura conhecidos: aditiva, subtrativa e formativa. Após a realização das avaliações em larga escala, foi comprovado que opção mais adequada, foi a fundição, e a usinagem teve o pior desempenho, sob a perspectiva sustentável. Explora-se o impacto ambiental das manufaturas. (DEBOER et al., 2021)
China	A manufatura aditiva está sendo utilizada para processos considerados mais sustentáveis, visando reduzir o custo e o consumo de energia durante a produção. A manufatura aditiva circular de metal busca a reciclagem da matéria-prima e das peças remanufaturadas, eliminando a produção de resíduos e economizando energia. (DONG et al., 2020)
Estado Unidos	A Manufatura Aditiva tem sido vastamente utilizada para o reparo de componentes assim como no revestimento de reparo de peças cilíndricas, ou seja, esta está sendo utilizada na remanufatura destes itens. (CUI et al., 2018)
França	A deposição camada por camada leva a desempenhos mecânicos mais baixos em comparação com os processos subtrativos tradicionais, porém pretende-se estender a utilização da manufatura aditiva e otimizar o desempenho das peças mecânicas, melhorando a resistência através da aplicação da manufatura híbrida, que associa diferentes técnicas de produção. (CADIOU; DEMOLY; GOMES, 2021)
Itália	Explora-se o uma nova invenção, e esta é baseada no <i>Laser Metal Deposition</i> (LMD). Trata-se de um método alternativo de fabricação de eixo de comando objetivando a melhoria da eficiência do processo e prover flexibilidade ao produto. Isto é, a tecnologia é examinada para aumento de eficiência e flexibilidade. (CECCHIEL et al., 2019)
Portugal	Através de ensaios mecânicos, testa-se como as peças produzidas a partir da Deposição de Metal a Laser (LMD) podem se adequar à indústria automotiva, por meio de diversas medições e análises. O objetivo desses ensaios é, principalmente, entender o comportamento dessas peças em relação ao desgaste e à abrasão, assim como na determinação das propriedades elásticas, tendo em vista que essas características são as mais importantes para aplicações automotivas. (ALVES, 2019)
Reino Unido	Através de estudos, comprovou-se que o processo de <i>Laser Metal Deposition with powder (LMD-p)</i> é um método adequado para o forjamento de ferramentas a quente. Ademais, demonstrou-se que a liga de <i>Stellite 21</i> ® aparenta possuir ótima resistência ao desgaste, tenacidade, usinabilidade e forjabilidade no estudo realizado, sendo assim uma liga efetiva para uso em remanufaturas de matrizes complexas. (CULLEN et al., 2018)
Suécia	Confirma-se a efetividade da utilização da manufatura aditiva no tratamento de superfícies e na remanufatura de ferramentas, matrizes e moldes, porém enfatiza-se a necessidade de estudos de custo adicionais, sendo este um obstáculo para disseminação industrial mais ampla dos processos aditivos a laser em fabricação e remanufatura de ferramentas, além de indicar a importância de novas pesquisas neste campo. (ASNAFI, 2021)
Turquia	Apesar do rápido crescimento na última década, a aplicação industrial da manufatura aditiva ainda não foi alcançada devido a certas limitações. Uma

tendência recente para contornar suas desvantagens inerentes, é integrar a manufatura aditiva com técnicas de produção secundária, ou seja, soluções híbridas. (DILBEROGLU et al., 2021)
--

Fonte: elaborado pelas autoras a partir da leitura de artigos citados no quadro (2021)

A partir desta tabela pode-se observar a presença da Manufatura Aditiva em diversos campos de atuação ao redor do mundo, o que difere de sua utilização no Brasil, que ainda é escassa, dado que estes são países mais desenvolvidos financeira e tecnologicamente. Embora exista uma divergência da aplicação no Brasil em comparação aos demais países observados, percebe-se que há semelhanças nos campos de estudo e nas aplicações entre essas nações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo conclui-se que apesar do interesse e conhecimento acerca dos benefícios, limitações e relevância da manufatura aditiva para diversos setores, assim como seu potencial apoio no pilar sustentável, considerando possíveis reduções de etapas nos processos de produção, menor uso de matéria prima e energia, o alto custo de aquisição ainda é uma barreira representativa, como apresentado no questionário, a maior parte da população que utiliza a manufatura aditiva, provém de empresas de grande porte, acentuando a correlação entre o poder aquisitivo e a alocação de recursos neste tipo de investimento.

Além disso, através da bibliometria realizada, pode-se afirmar que, a nível global, além da utilização na remanufatura (em países como EUA e Suécia), a Manufatura Aditiva também está sendo aplicada e estudada em outros ramos, como por exemplo no campo odontológico (na Áustria) e na indústria automotiva (em Portugal). Em comparação, na Turquia, devido às limitações na utilização da MA, a tendência é recorrer a soluções híbridas, integrando à tecnologia, técnicas secundárias de produção. Países como o Canadá, a China e a Alemanha estudam, além dos possíveis âmbitos de aplicação, as vantagens sustentáveis dessa tecnologia, destacando pontos como a redução de resíduos, o aumento do ciclo de vida e a economia de energia. Sendo assim, pode-se concluir que, em relação à amostra de respondentes do questionário aplicado, a utilização, ao redor do mundo, está mais avançada do que no Brasil, principalmente devido ao alto investimento inicial.

Através desta presente pesquisa foi possível identificar os benefícios que a manufatura aditiva e híbrida podem agregar aos processos nos quais estão inseridas, assim como o porquê estas ainda não são tão comuns nos processos brasileiros, tratando-se principalmente de uma questão financeira, além de destacar também algumas de suas aplicações ao redor do mundo. Assim abrindo horizontes para novos estudos acerca do tema apresentado, com o objetivo de ampliação dos campos de utilização da manufatura aditiva.

Devido ao atual cenário de pandemia da COVID-19, existiram limitações no desenvolvimento deste artigo e entende-se como oportunidade, o aprofundamento no tema através do desenvolvimento

de um estudo de caso, que represente o mapeamento de custo, tempo de retorno sobre o investimento, ganhos de eficiência, contribuições para a sustentabilidade no processo de remanufatura de moldes e matrizes, de forma a tangibilizar em um caso aplicado, os benefícios teóricos já apresentados, e assim contribuir como exemplo para empresas interessadas neste ramo.

REFERÊNCIAS

- ABINFER – Associação Brasileira da Indústria de Ferramentas. **Setor de moldes prevê crescimento em 2019**. 2018. Disponível em: <https://abinfer.org.br/setor-de-moldes-preve-crescimento-em-2019/>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio de; SOUZA, Wander Burielo de. **Moldes e matrizes: Características, desenvolvimento e funcionalidades para transformação de plásticos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. 136 p. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520490/>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- ALVES, M. L.; CORREIA, M. S.; VILHENA, L. M.; RAMALHO, A. RAMALHO, F. Q.. Study of Laser Metal Deposition (LMD) as a Manufacturing Technique in Automotive Industry. **Lecture Notes In Mechanical Engineering**, [S.L.], p. 225-239, 29 set. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-29041-2_29. Acesso em: 23 maio 2021.
- ARRIZUBIETA, Jon; CORTINA, Magdalena; LAMIKIZ, Aitzol; RUIZ, Jose; UKAR, Eneko. **Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations**. **Materials**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2583, 18 dez. 2018. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma11122583>. Acesso em: 19 nov. 2020.
- ASNAFI, Nader. Tool and Die Making, Surface Treatment, and Repair by Laser-based Additive Processes. **Bhm Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte**, [S.L.], v. 166, n. 5, p. 225-236, maio 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00501-021-01113-2>. Acesso em: 22 maio 2021.
- ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes de. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 223-231, 30 jun. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20985/1980-5160.2019.v14n2.1543>. Acesso em: 22 maio 2021.
- BARBOSA, Fábio Antonio; HELLENO, André Luís; VELÁZQUEZ, Daniel René Tasé; VIEIRA JUNIOR, Milton. VANTAGENS E DESAFIOS DA MANUFATURA HÍBRIDA - INTEGRANDO MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA. In: ENEGEP 2019 - ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019. [S.L.]: Enegep 2019 - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2019. p. 1-18. Disponível em: https://www.readcube.com/articles/10.14488%2Fenegep2019_tn_wpg_290_1638_38258. Acesso em: 27 fev. 2021.
- BEHANDISH, Morad; KLEER, Johan de; NELATURI, Saigopal. Automated process planning for hybrid manufacturing. **Computer-Aided Design**, [S.L.], v. 102, p. 115-127, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.04.022>. Acesso em: 04 abr. 2021.

BOULDING, Kenneth E. **The Economics of the Coming Spaceship Earth**. [S.L.], p. 4, 1966. Disponível em: <http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsprometheus/BOULDING.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2020.

BRANDÃO, Lincoln Cardoso; SANTANDREA, Rafael Souza; SILVA, Pedro Coelho; VOLPINI, Victor Lattaro; XAVIER, Marcos Vinício Antônio. MANUFATURA ADITIVA: revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 84502-84515, 03 nov. 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/19274/15465>. Acesso em: 21 nov. 2020.

CADIOU, Thibaut; DEMOLY, Frédéric; GOMES, Samuel. A hybrid additive manufacturing platform based on fused filament fabrication and direct ink writing techniques for multi-material 3D printing. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 114, n. 11-12, p. 3551-3562, 28 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06891-0>. Acesso em: 22 maio 2021.

CECCHIEL, Silvia; FERRARIO, Davide; MONDINI, Claudio; MONTANI, Marco; PREVITALI, Barbara. Application of Laser Metal Deposition for a New Model of Assembled Camshaft. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [S.L.], v. 28, n. 12, p. 7756-7767, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04504-2>. Acesso em: 23 maio 2021.

CUI, Wenyuan; LI, Wei; LIOU, Frank; ZHANG, Xinchang. Effects of tool path in remanufacturing cylindrical components by laser metal deposition. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 100, n. 5-8, p. 1607-1617, 5 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2786-z>. Acesso em: 22 maio 2021.

CULLEN, Crawford; FOSTER, Jim; FITZPATRICK, Stephen; HALL, Liza; MARASHI, James; PAYNE, Grant. Remanufacture of hot forging tools and dies using laser metal deposition with powder and a hard-facing alloy Stellite 21®. **Journal Of Remanufacturing**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 189-203, 16 nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13243-018-0063-9>. Acesso em: 22 maio 2021.

DEBOER, Benjamin; DIBA, Fereydoon; HOSSEINI, Ali; NGUYEN, Nam. Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07173-5>. Acesso em: 23 maio 2021.

DESPEISSE, Mélanie; FORD, Simon. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 137, p. 1573-1587, nov. 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304395?via%3Dihub>. Acesso em: 22 nov. 2020.

DILBEROGLU, Ugur M.; DOLEN, Melik; GHAREHPAPAGH, Bahar; YAMAN, Ulas. Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 113, n. 3-4, p. 623-648, 27 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06688-1>. Acesso em: 22 maio 2021.

DONG, Zhao-Wang; GUO, Xue-Yi; LIU, Yong; TIAN, Qing-Hua; XIA, Yang. Towards a circular metal additive manufacturing through recycling of materials: a mini review. **Journal Of Central South University**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 1134-1145, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4354-6>. Acesso em: 23 maio 2021.

GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 1-16, 9 abr. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/9917/6240>. Acesso em: 2 jun. 2021.

HAHN, Marlon; TEBAAY, Lennart M.; TEKKAYA, A. Erman. Distortion and Dilution Behavior for Laser Metal Deposition onto Thin Sheet Metals. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 625-634, 12 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00203-9>. Acesso em: 23 maio 2021.

HARTMANN, Malte; STAMPFL, Jürgen. Additive Fertigung in der digitalen Zahnheilkunde. **Bhm Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte**, [S.L.], v. 164, n. 3, p. 141-146, 19 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00501-019-0834-0>. Acesso em: 23 maio 2021.

HASCOËT, Jean Yves; LAGUIONIE, Raphael; RAUCH, Matthieu. A STEP-NC approach for multi-process manufacturing, simulation and optimisation. **International Journal Of Product Development**, [S.L.], v. 19, n. 1/2/3, p. 21-38, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264834894_A_STEP-NC_approach_for_multi-process_manufacturing_simulation_and_optimisation. Acesso em: 04 abr. 2021.

HELLENO, André Luís; LIMA, Carlos Roberto Camello; MASTRAPA, Lorena Hernández; VELÁZQUEZ, Daniel René Tasé. Implicações das tecnologias híbridas de fabricação nos processos de reparo e remanufatura de peças no contexto da manutenção: uma revisão sistemática. **Exacta**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 778-798, 9 nov. 2020. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/13270>. Acesso em: 28 fev. 2021.

LACY, Peter; RUTQVIST, Jakob. **Waste to Wealth: the circular economy advantage**. [S.L.]: Palgrave Macmillan, 2015. 264 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/9781137530707>. Acesso em: 10 nov. 2020.

LEITÃO, Alexandra. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **PORTUGUESE JOURNAL OF FINANCE, MANAGEMENT AND ACCOUNTING**, [S. l.], p. 2183-3826, 22 set. 2015. Disponível em: <http://u3isjournal.isvouga.pt/index.php/PJFMA/article/view/114/52>. Acesso em: 23 nov. 2020.

MONCASTER, Alice; POMPONI, Francesco. Circular economy for the built environment: a research framework. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 143, n. 1, p. 710-718, fev. 2017. Disponível em: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/261963>. Acesso em: 15 nov. 2020.

ONU – Organização das Nações Unidas, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. Disponível em: <https://un.org/>. Acesso em: 15 nov. 2020.

PIYA, Cecil; RAMANI, Karthik; SHIN, Yung C.; WILSON, J. Michael; ZHAO, Fu. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 80, p. 170-178, out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.084>. Acesso em: 15 nov. 2020.

PIZZINI, Karina. **Demanda abre mercado para a manufatura aditiva em metais**. 2013. Disponível em: <https://www.manufaturaemfoco.com.br/demanda-abre-mercado-para-a-manufatura-aditiva-em-metais/>. Acesso em: 22 maio 2021.

REIKE, Denise; VERMEULEN, Walter J.V.; WITJES, Sjors. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? – Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], p. 246-264, ago. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302756?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2020.

SANTOS, Mario Roberto dos; SHIBAO, Fabio Ytoshi; SILVA, Flavia Cristina da. Economia circular: conceitos e aplicação. **Revista Eletrônica Gestão e Serviços**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 2808-2826, 11 fev. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339205052_Economia_circular_conceitos_e_aplicacao. Acesso em: 08 nov. 2020.

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias E Aplicações Da Impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 1. p. 15-30. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ni9dDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=manufatura+aditiva+aplica%C3%A7%C3%B5es&ots=Jq1NgxDxXP&sig=M7EsafLzkUPYJPvKn6-YrkxqcWI#v=onepage&q=manufatura%20aditiva%20aplica%C3%A7%C3%B5es&f=false>. Acesso em: 21 nov. 2020.

WEETMAN, Catherine. **Economia Circular**: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. 1. ed. São Paulo: Autêntica, 2019. 518 p. v. 1.