

MANUFATURA ADITIVA E SUSTENTABILIDADE: ESTUDO EXPLORATÓRIO PARA AVALIAR POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS

Marco Aurélio Feriotti - CEETEPS

marco.a.feriotti@gmail.com ORCID 0000-0001-8457-3495

Mayara Neves Pohlmann - CEETEPS

mayara.pohlmann@gmail.com ORCID 0000-0001-9037-7503

Alexandre Formigoni – CEETEPS

a_formigoni@yahoo.com.br ORCID 0000-0001-7487-0541

Ronald de Freitas Oliveira - CEETEPS

ronald.oliveira@cpspos.sp.gov.br ORCID 0000-0003-2410-5037

Resumo

A Manufatura Aditiva (MA) vem desenvolvendo-se rapidamente, apresentando grande potencial na redução da necessidade de processos de fabricação convencionais que necessitam consumos intensivos de energia e recursos, o que, por sua vez, reduz a quantidade de material necessário na cadeia de suprimentos permitindo práticas mais sustentáveis. Embora aplicações desta tecnologia estejam alcançando a produção de produtos de uso final, os impactos ambientais relacionados a essa produção não foram amplamente examinados. Para futuros desenvolvimento e aplicação adequados da MA, no entanto, será importante compreender, por meio de pesquisas prévias, custos relativos aos processos e materiais, seus impactos ambientais e efeitos na saúde humana.

Neste contexto, este artigo trata-se de uma revisão da literatura, tendo como bases de dados a *Scopus* e *Web of Science*, o objetivo foi investigar a literatura científica para verificar os impactos ambientais associados ao uso da MA relacionadas a algumas questões-chave, incluindo uso de energia, saúde ocupacional, emissão de resíduos e ciclo de vida. Esta revisão de literatura, destaca as lacunas e áreas onde são necessárias pesquisas mais profundas. Analisando alguns estudos, foi possível inferir que a MA poderia ser um processo de menor impacto ambiental, quando comparada com a manufatura tradicional, no entanto, essa suposição não é válida em todos os casos, porque existem muitas variáveis que podem afetar resultados ambientais. As consequências da adoção dessa tecnologia de produção quanto à sustentabilidade não são bem compreendidas e este estudo exploratório baseia-se em dados de publicações científicas para fornecer inferências sobre os impactos da MA na sustentabilidade.

Palavras-chave: Impactos Ambientais; Manufatura Aditiva (MA); Sustentabilidade.

Abstract

Additive Manufacturing (AM) has been developing rapidly, presenting great potential in reducing the need for conventional manufacturing processes that require intensive consumption of energy and resources, which, in turn, reduces the amount of material needed in the chain. of supplies enabling more sustainable practices. Although applications of this technology are reaching the production of end-use products, the environmental impacts related to this production have not been extensively examined. For proper future development and application of AM, however, it will be important to understand, through prior research, the costs related to processes and materials, their environmental impacts, and effects on human health. In this context, this article is a literature review, having as databases Scopus and Web of Science, the objective was to investigate the scientific literature to verify the environmental impacts associated with the use of AM technologies related to some issues- including energy use, occupational health, waste emission and the life cycle. This literature review highlights gaps and areas where further research is needed. Analyzing some studies, it was possible to infer that AM could be a process with less environmental impact when compared to

traditional manufacturing, however, this assumption is not valid in all cases, because there are many variables that can affect environmental results. The consequences of adopting this new production technology on sustainability are not well understood and this exploratory study relies on data from scientific publications to provide inferences about the impacts of AM on sustainability.

Keywords: Additive Manufacturing (AM); Environmental impacts; Sustainability.

Introdução

Modificações nos processos que podem causar impactos ambientais estão sendo inseridos aos poucos nas indústrias e são empregadas na concepção do produto. Praticamente todos os envolvidos da cadeia produtiva, produtores de matéria-prima, fabricantes e usuários de produtos podem se favorecer da engenharia verde (OLIVEIRA e SERRA, 2010).

Os sistemas de produção envolvem fatores e impactos socioambientais, pois, em seu funcionamento, requerem o uso de recursos naturais, na forma de matérias-primas, insumos e energia; cria resíduos e outros riscos à saúde através de seus processos de fabricação (RIUL, SILVA e RIBEIRO, 2011).

Visando reverter décadas de negligência ambiental, o cenário encontrado atualmente mostra a grande disseminação da sustentabilidade nos mais variados processos. O conceito de sustentabilidade foi predominantemente motivado como resultado de uma série de incidentes e desastres ambientais, bem como ameaça de contaminação química e esgotamento de recursos (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

A MA tem o potencial de mudar as cadeias de processos de manufatura contemporâneas, modelos de negócios, bem como relações produto-usuário gerando produtos exclusivos e personalizados. Porém, a sustentabilidade e o desempenho ambiental da MA, em comparação com as metodologias de produção anteriores, ainda precisam ser investigados exaustivamente (KELLENS, BAUMERS, *et al.*, 2017).

Estudos sugerem que a problemática em relação à dicotomia entre as manufaturas subtrativa e aditiva quanto às vantagens ambientais parece estar apenas começando. O problema desta pesquisa emerge desse contexto, portanto, a partir desta perspectiva a principal questão desta pesquisa é:

Como identificar os impactos ambientais associados ao uso de tecnologias de MA?

A partir desta questão principal, surgem objetivos específicos, tais como:

- Pesquisar a origem dos impactos ambientais da MA;
- Identificar quais são os principais elementos que contribuem para os impactos ambientais na MA.
- Verificar se a MA é melhor que a fabricação tradicional numa perspectiva ambiental.

Este estudo foi de natureza exploratória conduzido na forma de uma pesquisa, com os dados sendo coletados nas plataformas digitais, teve como objetivo revisar publicações científicas que avaliam a sustentabilidade e o desempenho ambiental dos processos de MA.

Os estudos encontrados até metade do ano de 2021 fornecem evidências de que as tecnologias da MA podem atuar como agentes geradores de sustentabilidade quando comparados aos métodos convencionais, no entanto, apontam para a necessidade de mais estudos no campo da sua aplicação e seus impactos ambientais.

1. Referencial teórico

A conscientização da escassez eleva os preços de recursos como aço ou combustível e, portanto, a sustentabilidade toma um lugar cada vez mais importante como fator competitivo. Para lidar com esse problema, as empresas são desafiadas a desenvolver produtos sustentáveis, bem como a implantar tecnologias de fabricação sustentáveis (BURKHART e AURICH, 2015).

Nos últimos 30 anos, a forma como as pessoas consomem produtos mudou. Atualmente, as pessoas procuram produtos personalizados, ou seja, produtos especificamente adaptados às suas necessidades particulares. Nesse contexto, a partir dos anos 80 e início dos anos 90, um tipo de fabricação passa a apresentar um desenvolvimento considerável, o conceito de MA, um tipo de fabricação que produz objetos físicos a partir de informações digitais camada por camada usando diferentes materiais. Na atualidade esse novo processo de fabricação é chamado por muitos autores de "A Nova Revolução Industrial" e é um dos pilares da 'Indústria 4.0' (BARROS, 2017).

No que diz respeito à economia e sustentabilidade, a MA oferece várias vantagens sobre as técnicas de fabricação convencionais, o que confere muitas aplicações potenciais à essa tecnologia em diversos setores industriais, como

automotivo, aeroespacial, biomédico, energia e bens de consumo (ARRIZUBIETA, UKAR, *et al.*, 2020).

Grandes economias adicionais podem ser obtidas se as tecnologias MA evoluírem de forma adequada e se tornarem aplicáveis em larga escala de produção nos diversos mercados (KELLENS, BAUMERS, *et al.*, 2017).

A MA surgiu como uma possibilidade que está despertando expressivo interesse de numerosos domínios de tecnologia, fabricantes tradicionais ou não. Com esse gradativo interesse, surgiram preocupações relacionadas à performance desses novos processos comparados às técnicas convencionais econômicas, ambientais e perspectivas sociais (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

Devido a essas características promissoras, a MA vem sendo aplicada no campo industrial de forma crescente e muitas pesquisas têm sido realizadas sobre o aspecto de controle processual, simulação e modelagem. Contudo, ao reivindicar a vantagem no aspecto ambiental, há pesquisas muito limitadas sobre o aspecto da sustentabilidade dessa tecnologia (TANG, ZHAO e MAK, 2016).

Entretanto, avaliar as implicações ambientais da MA não é simples nem barato devido à crescente variedade de opções que afetam essa tecnologia, incluindo material (polímeros, metais, cerâmicas, compósitos e materiais biológicos), forma de matéria-prima (líquido, pó, filamento e folhas), processo (da exposição de materiais à fusão de leitos em pó à deposição de energia direcionada), localização (instalação industrial, espaço do fabricante e local) e opções pós-processamento. De fato, foi apontado que tanto existem oportunidades quanto desafios para que a MA contribua para a sustentabilidade ambiental (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

2.1 Manufatura Aditiva (MA)

Nas últimas décadas, a MA também conhecida como tecnologia de impressão 3D tem atraído cada vez mais a atenção do mundo industrial. Comparada à manufatura subtrativa tradicional, a MA tem três principais vantagens. Primeiramente, ela fornece a capacidade de fabricação de forma livre, mudando as restrições tradicionais de fabricação e fornecendo a liberdade de design para produtos inovadores. Em segundo lugar, a MA pode reduzir a cadeia de fornecimento de fabricação e aumentar o lucro para os fabricantes. Em terceiro lugar, suas tecnologias também fornecem um enorme potencial para reduzir o impacto ambiental que tem na fabricação convencional (TANG, ZHAO e MAK, 2016).

A MA busca ter o potencial de abordar muitas questões sustentáveis. O princípio de operação desta tecnologia é construir peças adicionando camada após camada e, portanto, geometrias complexas podem ser fabricadas sem uso de ferramentas de usinagem ou moldes (BURKHART e AURICH, 2015).

Como um processo de fabricação inovador, a MA fez muitas promessas convincentes na área de desenvolvimento social. Seu potencial para otimizar o design do produto, aumentar a sua funcionalidade e reduzir a quantidade de energia ou recursos naturais necessários para o processo, pode proporcionar vários benefícios sociais (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

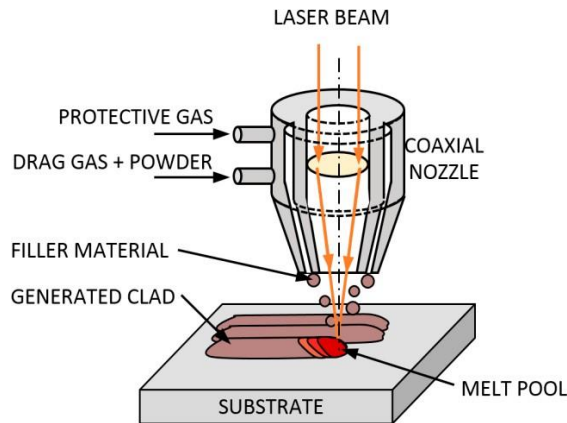
De acordo com o grupo “ASTM F42-Additive Manufacturing” da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), as tecnologias de MA são classificadas em sete categorias:

- *VAT Photopolymerisation* (Fotopolimerização)
- *Material Jetting* (Impressão por Jato de Material)
- *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante)
- *Material Extrusion* (Deposição de Material Fundido)
- *Power Bed Fusion* (Fusão em camada de pó)
- *Sheet Lamination* (Laminação de Folhas)
- *Directed Energy Deposition* (Deposição direta de energia)

2.1.1 Processo deposição direta de energia (DMD)

A deposição direta de energia *DMD* é aplicada principalmente para construir peças funcionais totalmente densas, revestir peças danificadas ou melhorar as propriedades da superfície em certas regiões. Na *DMD*, uma poça de fusão é gerada na superfície do substrato por uma fonte de energia, conforme representação da Figura 1 (ARRIZUBIETA, UKAR, *et al.*, 2020).

Figura 1 - Princípio do funcionamento DMD



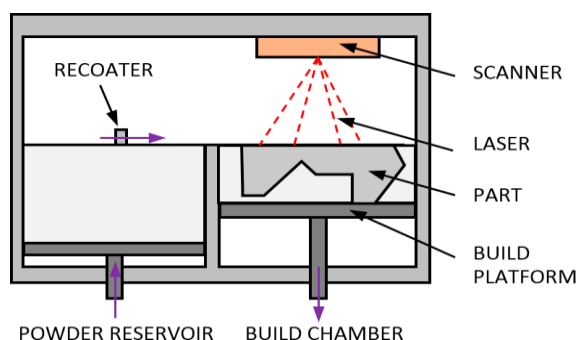
Fonte: Arrizubieta, *et al.*(2020)

Uma das principais vantagens da *DMD* é a capacidade de produzir peças com formato quase final, o que resulta na redução dos resíduos gerados e em um processo mais ecologicamente correto. Porém, a tecnologia *DMD* apresenta vários fatores limitantes que restringem suas aplicações, por exemplo, a precisão relativamente baixa das peças finais e a alta rugosidade superficial resultante. Portanto, é necessário incluir operações de pós-processamento para atender aos requisitos finais (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020).

2.1.2 Processo fusão em camada de pó (SLM)

A fusão em camada de pó (*SLM*) é um processo de duas etapas. Primeiro, uma fina camada de material é pré-depositada e, em seguida, determinadas regiões são seletivamente derretidas usando uma fonte de calor, que normalmente é um feixe de laser, conforme representado na Figura 2 (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020).

Figura 2 - Princípio do funcionamento *SLM*



Fonte: Arrizubieta, *et al.*(2020)

As peças produzidas por meio de *SLM* são limitadas pelo tamanho da câmara de construção e a taxa de deposição é menor que a de *DMD*, entretanto, esse processo permite maior complexidade e melhor acabamento superficial (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020).

2.2 Aplicação da MA e a sustentabilidade

Para muitos autores, a MA é reconhecida como mais ambientalmente respeitosa em relação a um processo de fabricação clássico. Essa tecnologia se opõe aos processos de fabricação subtrativa e suporta uma ampla gama de aplicações: (BARROS, 2017)

- Uso eficiente de matérias-primas gerando menos resíduos e uso de plástico biodegradável (PLA);
- Permite fabricar sob demanda (lotes pequenos);
- Clientes se tornam fabricantes, então as cadeias de transporte entre fabricante e cliente se tornam desnecessárias;
- Não há necessidade de ferramentas, moldes ou equipamentos caros;
- Não há emissão de sucata, moagem ou lixamento;
- Tecnologias de impressão 3D não usam fluidos e produtos químicos como processos de usinagem ou injeção;

A Comissão Europeia no *Digital Transformation Monitor* de 2017 apresentou números, onde foi estudada a natureza disruptiva da impressão 3D, estimava-se que em 2050 ela poderia economizar até 90% da matéria-prima necessária para a fabricação. Contudo, suas possibilidades não se limitam apenas à redução do uso de matéria-prima (PENG, KELLENSB, *et al.*, 2018).

A possibilidade de fabricar componentes mais leves pode levar à economia de energia, estimada entre 5% e 25% até 2050, bem como a uma redução nos custos de fabricação de cerca de 4 a 21% no mesmo período. Esta tendência é aplicável a diferentes setores industriais (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020).

Ademais, os benefícios ambientais para a cadeia de abastecimento com a fabricação mais próxima do local de distribuição e implementação de fabricação sob demanda (just-in-time), podem também reduzir deslocamentos de transportes, promovendo melhoria da cadeia de abastecimento com flexibilidade, eliminação de

retrabalho em processo e obsolescência de estoque (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

A MA tem o potencial de reduzir a energia do ciclo de vida e o impacto ambiental por meio de aplicações recém-desenvolvidas que antes eram inviáveis. Pode encurtar os ciclos de desenvolvimento do produto, reduzir a necessidade de ferramentas e manuseio, e diminuir as demandas de energia e material por meio da remanufatura e reparo (PENG, KELLENB, *et al.*, 2018).

Atualmente, pensar nas preocupações ambientais é uma necessidade. A cada dia mais pessoas estão se equipando com equipamentos digitais e de fabricação para produzir seus produtos, e não sabemos as consequências que isso terá em nosso planeta e sociedade. Sustentar esforços para empregar pesquisas neste domínio parece necessário e urgente. (BARROS, 2017).

Entretanto, apesar desses benefícios potenciais, a MA não foi suficientemente explorada de uma perspectiva sustentável. Enquanto ela poderia ser um facilitador e uma força motriz para melhorias industriais de sustentabilidade, as consequências de sua implantação no sistema industrial podem levar a um cenário alternativo em que a produção eco eficiente localizada, as demandas dos clientes por produtos customizados e uma taxa mais alta de obsolescência do produto se combinam para gerar um maior consumo de recursos (FORD e DESPEISSE, 2016).

Semelhante aos processos tradicionais de fabricação, a MA consome materiais e energia e gera emissões de resíduos e gases, assim, carrega sua própria pegada ecológica. Nota-se, inclusive, que ela pode anunciar a apoteose do consumismo, da gratificação instantânea e da sociedade descartável, tudo isso pode impor impactos negativos ao meio ambiente (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

2.2.1 O consumo de matéria prima no processo da MA.

Os processos da MA são vistos como ambientalmente interessantes porque parecem consumir apenas o material necessário para a produção da parte final. Contudo, seja qual for a tecnologia, não se pode considerar que toda a matéria-prima consumida é encontrada na parte final (KERBRAT, BOURHIS, *et al.*, 2016).

Na impressão 3D, é necessário considerar o consumo de material para criar os suportes necessários para a fabricação da peça. Esses suportes serão posteriormente removidos, dissolvendo-os ou removendo-os manualmente (KELLENS, BAUMERS, *et al.*, 2017).

2.2.2 Reuso do resíduo da matéria prima gerado no processo da MA.

As matérias-primas não consolidadas na MA em um processo à base de pó, como a fusão de leitos em pó, podem ser reutilizadas para que os resíduos do material possam ser minimizados (BURKHART e AURICH, 2015)

Da mesma forma, ao usar a tecnologia de derretimento a laser seletiva, uma quantidade do pó presente no espaço de trabalho pode não ser reutilizada (KERBRAT, BOURHIS, *et al.*, 2016).

Em tecnologias de fusão em leito de pó, uma parte do material deposto não é fundida, e é necessário considerar essa matéria-prima perdida na análise ambiental (GARCIA, MORIS, *et al.*, 2018).

No leito de pó, nem todo o pó presente no espaço de trabalho é fundido ou sinterizado e pode exigir um pós-tratamento de manufatura para ser reutilizado (KERBRAT, BOURHIS, *et al.*, 2016).

2.2.3 O consumo de energia elétrica no processo da MA.

O processo da MA tem o potencial de substituir processos onde quantidades significantes de energia são desperdiçadas, como fundição ou moldagem. Também pode economizar muitos recursos energéticos gastos na fabricação de moldes e ferramentas específicas para produção (KERBRAT, BOURHIS, *et al.*, 2016).

Um grande desafio para entender a eficiência energética da MA é o fato de que as máquinas variam amplamente em quantidade de energia que elas utilizam e o uso energético depende de muitas variáveis, que vão desde materiais até carga e uso dos espaços de mesa ou tanque (BARROS, 2017).

Os métodos industriais de fusão usando pós-metálicos e feixes de alta energia podem consumir muito mais eletricidade por unidade de produção do que os métodos convencionais de fabricação (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

Pelas características da MA e seu longo tempo de processamento, conseqüentemente a produtividade é mais lenta, portanto, a diluição da energia consumida pelo equipamento por cada item produzido torna-se uma preocupação para os pesquisadores (GARCIA, MORIS, *et al.*, 2018).

Há uma relação típica entre energia total e produtividade de processos. A maior produtividade leva menos tempo e normalmente menos energia, mas apenas melhorar

a produtividade nem sempre é viável devido às exigências de qualidade (PENG, KELLENB, *et al.*, 2018).

Para a maioria dos processos MA, as impressoras 3D usam mais energia do que os processos convencionais quando comparados em níveis de processo ou máquinas. (FORD e DESPEISSE, 2016).

Inclusive, a matéria-prima utilizada na MA pode carregar maior energia incorporada no processo de atomização. (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

É necessário também estimar o consumo de energia a partir da fase de impressão, incluindo a demanda energética das etapas de cura e sinterização, bem como as demandas de recursos e emissões de processos, visando quantificar o consumo total do ambiente completo da cadeia produtiva (KELLENS, BAUMERS, *et al.*, 2017).

Quanto ao consumo de energia, os processos de MA geralmente não são tão eficientes quanto os convencionais de fabricação. Por exemplo, as máquinas-ferramentas são equipadas com muitos dispositivos periféricos, assim, o consumo básico de energia e o tempo de processamento são as duas principais considerações nos cálculos de consumo de energia (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

2.2.4 Avaliação do ciclo de vida na MA.

Para quantificar o impacto ambiental de um processo, é necessário analisar a pegada em cada etapa do ciclo de vida do produto: desde a extração da matéria-prima até o descarte no final da vida útil do produto, que é conhecido como análise do ciclo de vida (ARRIZUBIETA, UKAR, *et al.*, 2020).

Os primeiros trabalhos na ACV da MA têm sido em grande parte focados no consumo de energia, mas estudos recentes se expandiram para incluir o consumo de materiais, estender-se sobre mais categorias de impacto ambiental e explorar diferentes operações de máquinas (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

O inventário do ciclo de vida pode ser resumido em nível de processo, ou seja, energia de processo direto e consumo de materiais, para uma série de processos MA, incluindo derretimento seletivo a laser e a sinterização seletiva de laser (KELLENS, BAUMERS, *et al.*, 2017).

Devido à falta de dados bem documentados do ciclo de vida, é difícil realizar uma avaliação precisa do ciclo de vida do produto ou uma análise de sustentabilidade para as tecnologias MA (TANG, ZHAO e MAK, 2016).

2.2.5 A MA na cadeia de abastecimento.

Como abordagem direta de fabricação digital, as máquinas MA podem ser distribuídas mais próximas aos clientes e gerenciadas por um sistema baseado na Web para coordenar as demandas e requisitos dos stakeholders do produto e maximizar a eficiência das cadeias de suprimentos. Isso pode reduzir a necessidade de transporte de longa distância, armazenagem, logística e, em muitos casos, embalagens descartáveis (KERBRAT, BOURHIS, *et al.*, 2016).

A MA tem também a capacidade de eliminar as operações da cadeia de suprimentos associadas à produção de novas ferramentas e componentes por meio da remanufatura (PENG, KELLENSB, *et al.*, 2018)

No entanto, mudanças significativas não parecem iminentes, pois a mudança depende de as organizações primeiro redesenharem os componentes e produtos para terem menos subcomponentes, com esta simplificação subsequentemente levando a cadeias de abastecimento simplificadas (FORD e DESPEISSE, 2016).

2.2.6 A MA e a saúde ocupacional

Compreender e abordar os potenciais riscos e benefícios da MA para a saúde ocupacional para os usuários de todo o quadro é fundamental para a plena realização das vantagens trazidas pelas tecnologias MA. (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

Embora a MA esteja ganhando relevância na indústria, ainda há informações relativamente escassas no que diz respeito a questões de saúde e segurança para os operadores relacionados aos processos de MA metálicos (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020).

Apesar de que muitas formas de MA apresentem uma mudança de passo frente às técnicas convencionais de fabricação, os riscos à saúde e à segurança que apresentam muitas vezes não são tão diferentes daqueles encontrados em qualquer ambiente industrial. (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

Vários autores concentraram pesquisas no biomonitoramento da exposição metálica e nas nanopartículas geradas durante o processo da MA, respectivamente. Diversos estudos foram publicados sobre a saúde e os efeitos do gás e exposição de partículas metálicas em outros ambientes ocupacionais, onde nano partículas de metal são transportadas pelo ar e são conhecidas por serem perigosas para a saúde humana, e nos processos da MA essas partículas também podem ser geradas. Tais

partículas podem facilmente atravessar barreiras imunológicas e ser absorvidas pelos folículos capilares da pele e pulmões, o que permite que as partículas entrem no corpo humano (ARRIZUBIETA, UKAR , *et al.*, 2020)

Os processos MA têm o potencial de reduzir riscos endêmicos quando comparados a muitos processos convencionais de fabricação, eles podem em princípio, ser independentes, usar menos materiais e produzir menos resíduos. No entanto, eles também apresentam a possibilidade de riscos emergentes de segurança. (REJESKI, ZHAO e HUANG, 2018).

Todavia, pouca pesquisa tem sido feita sobre a toxicidade e potência ambiental dos processos e materiais da MA. Tais impactos podem existir durante o processamento e descarte dos materiais utilizados nos processos desta tecnologia (FORD e DESPEISSE, 2016).

Benefícios pertinentes à sustentabilidade podem ser percebidos por meio da MA, e muitas vezes é suscitada como uma tecnologia sustentável. Para um desenvolvimento futuro adequado da sua aplicação, no entanto, será importante entender custos, impactos ambientais e efeitos na saúde humana no processamento dos materiais (MALSHE, NAGARAJAN, *et al.*, 2015).

2. Método da pesquisa

A metodologia adotada utilizada neste estudo baseou-se na revisão sistemática da literatura (RSL), definida por Kitchenham (2004) como um estudo que visa interpretar e avaliar a literatura relevante disponível sobre um assunto, fenômeno ou área de interesse. Para desenvolver uma RSL, segue-se quatro etapas básicas: análise, planejamento, execução da revisão teórica e demonstração de resultados (BRERETON, CARROLL e BARNSTON, 2007).

A RSL foi usada para determinar o campo da revisão. Este é um método objetivo, sistemático e replicável, que faz a revisão do estado de a arte mais clara e concisa (THORPE e HOLT, 2008). A RSL permite determinar os critérios necessários para determinar as pesquisas relevantes na área de MA, especificamente no que diz respeito à sustentabilidade do processo.

Em primeiro lugar, a principal questão foi estabelecida: “Qual é o impacto ambiental da manufatura aditiva?” Palavras-chave também foram definidas: “*Additive Manufacturing*” e “*Sustainability*”. A busca foi realizada em plataformas digitais de bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, e foram utilizadas diferentes combinações

de strings de palavras-chave. Os resultados obtidos para as diferentes combinações de palavras-chave apresentaram uma vasta gama de literatura sobre o tema, porém, a busca limitou-se a livros e periódicos, onde foram considerados artigos de revisão e pesquisa. Foram incluídos manuscritos em inglês. Na primeira abordagem, as referências anteriores ao ano de 2010 não foram consideradas. Conforme resumo demonstrado no quadro1.

Quadro 1 - Resumo dos procedimentos metodológicos

Base de dados	Portal de periódicos CAPES (<i>Web of Science e Scopus</i>)
Tipo de documentos	Artigos de Conferência e de Revisão
Campo de busca	Título do artigo, Resumo, Palavras-chave
Áreas de pesquisa	Engenharia / Gestão Ambiental
Limitar resultados	Ano: 2010 a 2021 Tipo de documento: Artigos, Artigos de revisão e pesquisas Idioma: Inglês

Fonte: Autores, 2021.

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

O *Parsifal* é dividido nos seguintes protocolos:

- Análise
- Planejamento
- Condução
- Declaração

Após o levantamento dos dados, os 166 artigos selecionados nas buscas foram importados para o *Parsifal* para serem analisados. Foi executada uma busca por artigos duplicados e foram separados 39 documentos, retornando 127 documentos.

O próximo passo foi a avaliação primária dos artigos, aplicando os critérios de seleção de inclusão e exclusão, feita por meio de uma leitura dos títulos, resumos e palavras-chave com objetivo de segregar os artigos fora do escopo da pesquisa. Nesta etapa foram aceitos 58 artigos.

Por último foi realizada a leitura da introdução, dos resultados e discussões e das considerações finais dos artigos aplicando as questões para a qualificação e separando pelos critérios de inclusão. Neste último passo foram qualificados 22 artigos.

3. Resultados e discussões

A MA é uma tecnologia promissora para sustentar a fabricação futura. Ela desempenha um papel expressivo na produção de peças complexas e altamente personalizadas de maneira flexível e econômica.

Quanto aos artigos publicados, pode-se observar uma grande preocupação de alguns autores na abordagem da questão do consumo de energia dos equipamentos. Essa preocupação se deve às vantagens da MA em termos de consumo de matéria-prima e geração de resíduos em relação às tecnologias convencionais, pois utiliza apenas a quantidade de material necessária para a fabricação de um único item. Esse fato também explica a intensa pesquisa realizada para avaliar e reduzir o consumo de energia desses equipamentos.

Muitos estudos estão sendo conduzidos para dissertar sobre questões importantes da MA, como por exemplo, qualidade confiável e consistente, seleção abrangente de materiais, produtividade e eficiência aprimoradas. No entanto, a questão da sustentabilidade ainda permanece amplamente inexplorada.

Embora a MA não substitua a fabricação subtrativa, espera-se que ela colabore e reformule efetivamente muitos segmentos de mercado. No que diz respeito a essa tecnologia, poucas conclusões foram extraídas para explicar seus impactos ambientais e de energia, e menos ainda foram baseadas na emissão de resíduos sólidos e em inventários de dados de ciclo de vida.

Características únicas dos processos MA significam que há potencialmente menos resíduos produzidos quando comparados com os processos de fabricação convencionais. No entanto, os resíduos de processos ainda existem e em alguns casos

a quantidade pode ser muito maior do que o esperado devido a erros humanos e de máquinas. Em alguns estudos, os autores descobriram que a MA impacta menos que a manufatura subtrativa e em outros os resultados são opostos.

A preparação e reciclagem de materiais é uma área de pesquisa contínua para muitos materiais usados na MA, e é principalmente consumidor de energia e ambientalmente impactante. Isso torna a MA menos econômica do que o esperado, sem mencionar sua dificuldade tecnológica.

Um estudo relatou que mais de 40% dos resíduos relacionados a materiais podem ser evitados usando MA e 95% dos materiais não utilizados podem ser reutilizados, mas esse achado ainda não foi confirmado para todos os materiais.

No geral, espera-se que a MA se torne uma tecnologia de manufatura fundamental na sociedade sustentável do futuro.

4. Considerações finais

Finalmente, esta pesquisa se dá para resumir que o uso de MA para imprimir um produto simples já facilmente fabricado pela indústria parece ser incoerente e caro em um ponto de vista ambiental.

A MA é uma tecnologia que tem o potencial de gerar uma mudança na forma como é concebida a manufatura e na economia mundial, permite a fabricação de peças complexas que de outra forma seriam impossíveis ou muito caras de se conseguir, com base em uma pesquisa realizada em 2018, mais de 30% dos componentes fabricados com a tecnologia MA são peças funcionais.

No entanto, MA está em um estágio inicial. Embora o número de peças fabricadas com essa tecnologia esteja crescendo a uma taxa de 25% ao ano, elas ainda representam uma pequena fração da produção total mundial.

Muitos autores listaram alguns desafios atuais e futuros em aspectos técnicos, sociais e ambientais para a MA. Em relação à dimensão ambiental, algumas teses e artigos são encontrados na literatura com diferentes pontos de vista, considerando diferentes tecnologias e fontes dos impactos.

Estudos adicionais são, portanto, necessários para investigar as vantagens e desafios dessa tecnologia. Pesquisas sobre suas implicações na sustentabilidade industrial, requerem estudos de caso único aprofundados e estudos de caso comparativos de diferentes setores, organizações, produtos e componentes, juntamente com modelos de sistemas de produção baseados em MA.

Esses estudos podem fornecer percepções mais ricas sobre seus efeitos na sustentabilidade, incluindo os meios pelos quais as oportunidades são exploradas e os benefícios da sustentabilidade são realizados, as barreiras que impedem que esses benefícios sejam capturados e os contextos específicos em que cada um deles ocorre.

Em resumo, estudos de impacto ambiental e energético na MA demandam dados substanciais sobre diversos materiais, processos, equipamentos, projetos de produtos e participantes da cadeia de suprimentos. Cada dado é importante para uma estimativa e avaliação confiáveis do consumo de energia e do impacto ambiental, especialmente para a análise do ciclo de vida.

Conscientização e esforços colaborativos de especialistas de áreas multidisciplinares, como materiais, mecânica, química, economia, gestão, são necessários para criar um futuro sustentável com relação ao ciclo de vida, avaliando a pegada da cadeia de suprimentos da MA e nas metodologias necessárias para comparar caminhos inteiros, desde a extração de material até o produto acabado.

São necessários melhores estudos de avaliação e gerenciamento de risco relacionados à MA, incluindo emissões toxicológicas, métodos de avaliação e controles de exposição. Especialmente quando pós-metálicos são usados no processo de fabricação para avaliar o impacto na saúde do operador.

REFERÊNCIAS

ARRIZUBIETA, J. I.; UKAR, O.; OSTOLAZA, M.; MUGICA, A. Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling. **Metals**, 10, n. 2, 2020. 261. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/met10020261>" <https://doi.org/10.3390/met10020261>

BARROS, K. D. S. Identification of the environmental impacts contributors related to the use of Additive Manufacturing technologies, 2017. Tese de Doutorado. Université Grenoble Alpes. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01689798/> Acesso em: mai. 2021

BRERETON, L.; CARROLL, C.; BARNSTON, S. Interventions for adult family carers of people who have had a stroke: a systematic review. n.10. ed. [S.l.]: Clinical rehabilitation, v. 21, 2007. p. 867-884. DOI: HYPERLINK

"<https://doi.org/10.1177/0269215507078313>"

<https://doi.org/10.1177/0269215507078313>

BURKHART, M.; AURICH, J. C. Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. **Procedia Cirp**, 29, 2015. 408 – 413. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.194>" \t "_blank" \o "Persistent link using digital object identifier" <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.194>

FORD, S.; DESPEISSE,. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of Cleaner Production**, 137, 2016. 1573-1587. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>" \t "_blank" \o "Persistent link using digital object identifier" <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>

GARCIA, F. L.; DA SILVA MORIS, V. A.; NUNES, A. O.; SILVA, D. A. Environmental performance of additive manufacturing process – an overview. **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 24 No. 7, pp. 1166-1177 2018. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2017-0108>" \o "DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2017-0108>" <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2017-0108>

KELLENS, K.; BAUMERS, M.; GUTOWSKI, T. G.; FLANAGAN, W.; LIFSET, R.; DUFLOU, J. R. Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications. **Journal of Industrial Ecology**, 21, n. S1, 2017. 49-68. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1111/jiec.12629>" <https://doi.org/10.1111/jiec.12629>

KERBRAT, O.; BOURHIS, F. L.; MOGNOL, P.; HASCOËT, J. Y. Environmental Impact Assessment Studies in Additive Manufacturing. **Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing**, Springer Singapore, 2016. 31-63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0606-7_2

KITCHENHAM, B. Procedimentos para a realização de Revisões Sistemáticas.. 33. ed. [S.I.]: Keele Univ. , v. 33, 2004. p. 1-26.

MALSHE, H.; NAGARAJAN, H.; PAN, Y.; HAAPALA, K. **Profile of Sustainability in Additive Manufacturing and Environmental Assessment of a Novel Stereolithography Process**. International Manufacturing Science and Engineering Conference. [S.I.]: American Society of Mechanical Engineers. 2015. V002T05A012.

DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9371>" \t "_blank"
<https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9371>

OLIVEIRA, O. J. D.; SERRA, J. R. Benefícios e dificuldades da gestão ambiental com base na ISO 14001 em empresas industriais de São Paulo. **Production**, v.20, n. 3, 2010. p. 429-438. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1590/S0103-65132010005000013>" \t "_blank" <https://doi.org/10.1590/S0103-65132010005000013>

PARSIFAL. Disponível online em:< <https://parsif.al/>> Acesso em:04 julho 2021.

PENG, T.; KELLENS, K.; TANG, R.; CHEN, C.; CHEN, G. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. **Additive Manufacturing**, v. 21, 2018. p. 694-704. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>" \t "_blank" \o "Persistent link using digital object identifier" <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>

REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG,. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing. **Additive Manufacturing**, v.19, 2018. p. 21-28. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>" \t "_blank" \o "Persistent link using digital object identifier" <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>

RIUL, M.; SILVA, L. F. C. D.; RIBEIRO, E. L. Aspectos e Impactos Sociais e Ambientais da Indústria Moveleira e Experiências de Gestão. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, n. 18, 2011. p.79-95. DOI: HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n18p79-95>" <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n18p79-95> .

TANG, Y.; ZHAO, ; MAK, K. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, 137, 2016. 1560-1572. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.037>" \t "_blank" \o "Persistent link using digital object identifier" <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.037>

THORPE, R.; HOLT, R. O Dicionário SAGE de Pesquisa em Gestão Qualitativa. Londres, Reino Unido: SAGE Publications Ltd., 2008.