

A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL COM O AVANÇO DA UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA

Marco Vitor Siqueira Gusmão

marco.gusmao@fatec.sp.gov.br

Me. Flávia Morini Garcia

flavia.garcia@fatecitapetininga.edu.br

Fatec Itapetininga

RESUMO: A Manufatura Aditiva (MA) é uma das tecnologias associadas a indústria 4.0 e consiste na criação de objetos físicos através de impressão de camadas sobrepostas tendo como base um modelo tridimensional. Essa tecnologia emergiu com potencial de transformar e revolucionar a produção industrial. Este trabalho investiga o impacto do avanço da MA, com foco na modelagem por deposição fundida (FDM) sobre o aspecto da sustentabilidade ambiental nos próximos anos. Dentro desse cenário, a utilização de polímeros e polímeros reciclados podem contribuir sobremaneira para a redução do desperdício de material e da pegada de carbono ao longo do ciclo de vida do produto. Além disso, destaca-se como a integração de princípios sustentáveis na MA pode promover a eficiência energética e o uso responsável dos recursos. Este estudo tem como objetivo apresentar os problemas da Manufatura convencional (MC) que podem ser resolvidos com a MA. Além disso, o trabalho objetiva identificar quais os possíveis e futuros problemas da tecnologia FDM em relação ao processo e descarte dos resíduos sólidos com a popularização desta tecnologia. Com o intuito de atingir o objetivo proposto foi utilizada a Revisão da Literatura como metodologia, deixando evidente que com o avanço da MA surgirão oportunidades significativas para promover a sustentabilidade ambiental na produção industrial. No entanto, o sucesso depende da integração entre os aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Impressão 3D. Resíduos.

ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN THE ADVANCEMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT: Additive Manufacturing (AM) is one of the technologies associated with

Industry 4.0, involving the creation of physical objects through the layer-by-layer printing based on a three-dimensional model. This technology has emerged with the potential to transform and revolutionize industrial production. This study investigates the impact of AM, with a focus on Fused Deposition Modeling (FDM), on environmental sustainability in the coming years. In this context, the use of polymers and recycled polymers is explored for their potential to reduce material waste and carbon footprint throughout a product's lifecycle. Additionally, we highlight how integrating sustainable principles into AM can promote energy efficiency and responsible resource utilization. This research aims to identify the issues in conventional manufacturing (CM) that can be addressed through AM. In addition, this study aims to pinpoint potential present and future challenges associated with Fused Deposition Modeling (FDM) technology concerning the process and disposal of solid waste as this technology becomes more widespread. To achieve this goal, a Literature Review methodology was employed, underscoring that as Additive Manufacturing (AM) advances, significant opportunities emerge for advancing environmental sustainability in industrial production. However, success hinges on the integration of economic, social, and environmental aspects.

Keywords: Industry 4.0. 3D printing. Waste.

1 INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 possibilita que as empresas atinjam um nível industrial superior através da integração dos processos de fabricação verticais e horizontais e com a

conexão dos produtos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Ainda, por meio dessa integração, as empresas podem desenvolver novas estratégias ecologicamente corretas para a produção de produtos, aumentando significativamente a eficiência de produção e promovendo o desenvolvimento sustentável (GUIMARÃES; JÚNIOR, 2021).

Alguns exemplos tecnológicos que já estão atualmente no nosso dia a dia, desenvolvidos pela nova revolução são a robótica, a Inteligência Artificial (IA), a computação de alto desempenho, as simulações virtuais e a Manufatura Aditiva (MA) (JUNQUEIRA, 2020).

Além disso, a Manufatura Aditiva vem crescendo e sendo utilizada por diversas áreas industriais, dentre elas se destacam a biomédica, aeroespacial, automotiva, energia de bens de consumo (ARRIZUBIETA *et al.*, 2020).

Os processos da MA são fundamentais para mitigar os atuais riscos ambientais comparados a outros processos convencionais de fabricação, pois utiliza menos materiais e gera menos resíduos. Porém, podem surgir novos riscos relacionados ao processamento e descarte utilizados nos processos MA (REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

Ou seja, embora a MA apresente um grande potencial para promover uma produção mais limpa a custos acessíveis, estudos apontam que o alto consumo de energia utilizada pelo processo de calor ou laser para derreter a matéria-prima plástica ou metálica ainda impede que esse processo seja

considerado um método de produção sustentável (FRATILA; ROTARU, 2017).

O presente artigo partiu de um estudo teórico sobre os possíveis impactos e benefícios da MA com enfoque na tecnologia de *Fused Deposition Modeling* (FDM) pertinentes ao conceito de sustentabilidade e a relação com o descarte dos resíduos, tendo em vista o processo, consumo, a acessibilidade a tecnologia de impressão 3D, especificamente a tecnologia FDM, e a visão do significativo volume de resíduos descartáveis que podem aumentar a geração de resíduos e acarretar novos impactos ambientais.

Existe a necessidade de melhoria dos processos de manufatura convencional e juntamente com o avanço da indústria 4.0 surgem tecnologias como a MA que possibilita soluções de produção mais limpa a custos acessíveis e uma possível mudança nos hábitos da sociedade. Desta forma, esse estudo busca responder a seguinte pergunta: se qualquer pessoa puder adquirir uma impressora 3D, especificamente com base na tecnologia FDM que utiliza a extrusão de polímeros, para uso pessoal, isso irá aumentar consideravelmente a quantidade de resíduos poliméricos descartados? Por outro lado, no modelo atual de MA, já existem soluções tecnológicas para dar um destino adequado a estes resíduos?

Este estudo visa analisar o avanço da MA sob a ótica da sustentabilidade. Para alcançar esse propósito, serão apresentados os conceitos fundamentais da MA, incluindo sua definição e evolução ao longo do tempo.

Além disso, serão destacados os desafios enfrentados na MC que podem ser solucionados por meio da MA, enfatizando suas vantagens em termos de sustentabilidade.

A relação entre sustentabilidade e MA será explorada, demonstrando como essa tecnologia pode promover práticas mais sustentáveis na produção industrial. Por fim, serão identificados e discutidos possíveis desafios e futuras preocupações relacionadas à tecnologia FDM no contexto da MA, com foco no processo de fabricação e na gestão dos resíduos gerados por essa inovação tecnológica.

2 METODOLOGIA

O método escolhido para o desenvolvimento deste trabalho é a pesquisa bibliográfica, que permitirá alcançar os objetivos propostos, investigar e compreender o tema em questão, identificando os processos e etapas necessárias para o sucesso da pesquisa com base em trabalhos já publicados a partir de 2013, como artigos científicos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado disponíveis. Para esse propósito, foram utilizados base de dados como Google acadêmico, Scielo, Capes, encontro nacional de engenharia de produção (ENEGEP), simpósio de engenharia de produção (SIMPEP), e livros impressos.

Portanto, o presente trabalho pode ser identificado como uma revisão da literatura onde serão apresentados primeiramente o conceito da indústria 4.0 e seus princípios.

Depois um estudo com o panorama geral sobre a MA, as suas principais tecnologias, os polímeros utilizados na MA e sua relação com a geração de resíduos.

Deste modo, para atingir o objetivo proposto serão realizadas pesquisas sobre os tópicos como: manufatura aditiva, sustentabilidade, MA e seus resíduos, indústria 4.0, polímeros da MA, Economia Circular (EC), *Fused Deposition Modeling* (FDM), avanço da MA e a relação da EC com a MA a fim de apresentar os problemas causados pelo modelo atual e as possíveis vantagens e desvantagens desta nova tecnologia.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 INDÚSTRIA 4.0

O termo indústria 4.0 surgiu no século XXI, com o aprimoramento de algumas tecnologias como a internet, softwares e hardwares mais sofisticados, sensores menores e potentes, o desenvolvimento da capacidade de aprendizado das máquinas que aliados a preços mais acessíveis possibilitou criar uma enorme rede interconectada. Com isso, iniciou uma significativa transformação na indústria com consequências para a sociedade, na competitividade e na economia, transformando o mundo como o conhecemos (COELHO, 2016).

Em 2011, na feira Industrial de Hannover, na Alemanha, uma das principais feiras de tecnologia do mundo abordou-se pela primeira vez sobre a indústria 4.0. Nesse contexto, máquinas inteligentes, análise

computacional sofisticada e colaboração entre indivíduos conectados se combinam para promover transformações significativas e impulsionar a eficiência operacional em diversos setores industriais (COELHO,2016).

A implantação da indústria 4.0 surgiu com o objetivo de incentivar e facilitar as habilidades dos trabalhadores, permitindo que tarefas que possam interferir na postura ergonômica, sejam realizadas por máquinas. Com isso, há uma interligação da interface entre o homem e a máquina (SANTOS et al., 2018a).

Além disso, a indústria 4.0 consiste em uma nova configuração do sistema de produção industrial, que se baseia fortemente na tecnologia e na interligação das dimensões físicas e virtuais, conhecida como ciberespaço por meio da utilização de sistemas ciber físicos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Na configuração da indústria 4.0, estão surgindo sistemas de simulação associados a ambientes de realidade virtual e realidade aumentada, bem como a impressão aditiva (também conhecida como impressão 3D). Além disso, o uso de modelagem e simulação computacional está se tornando cada vez mais comum nas diferentes fases do ciclo de vida dos produtos, nos processos de fabricação e na cadeia de suprimentos (GRAGLIA, 2018).

Portanto, essas novas estruturas de produção, equipadas com dispositivos "inteligentes" conectados à rede, permitem que produtos e sistemas de produção se comuniquem e, assim, constituem as *Smart Factories* do futuro. Essas fábricas inteligentes são a chave para alcançar o grau de

flexibilidade necessário para atender às exigências dos mercados atuais, incluindo expectativas crescentes de produtividade, um aumento na gama de produtos e redução de custos (DALENOGARE, 2018).

3.2 MANUFATURA ADITIVA

Em função das últimas décadas de transformação e evolução ocorridas na indústria, surgiram novas técnicas aplicadas no processo produtivo, novos materiais, novas tecnologias de manufatura o que resultou em novos e inovadores produtos (WILTGEN; LOPES, 2022).

Neste contexto, surge uma nova tecnologia apresentada na década de 1980 com intuito de fabricar através da adição sucessiva de material (VOLPATO, 2017).

A Manufatura Aditiva (MA) ou impressão 3D resume-se na criação de objetos físicos através da impressão de camadas sobrepostas, a partir de uma representação geométrica digital em 3D. Este processo é justamente o oposto da manufatura subtrativa (SCHWAB, 2016).

Conforme ilustram as imagens da figura 1, essa representação em 3D geralmente é desenvolvida em sistema *Computer-Aided Design* (CAD). Por meio desse processo de adição é possível fabricar objetos físicos em diversas geometrias, modelos e tipos de materiais. O processo ocorre de maneira rápida se comparado a manufatura convencional devido a automatização do processo de construção. Inicia-se o processo com o modelo em 3D dividido digitalmente

(“fatiamento”), originando as camadas em 2D o que permite definir eletronicamente onde será adicionado ou não material. Assim o objeto começa a ser gerado através de uma sobreposição sequencial de camadas, iniciando da base até o seu topo (VOLPATO, 2017).

Figura 1 – Impressão 3D.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato. (2017, p. 17).

São cinco as principais etapas no processo de MA. A primeira é a criação do desenho: etapa onde é gerado um modelo digital tridimensional, geralmente utilizando um *software*; na sequência, ocorre a conversão do arquivo no formato STL e é nessa etapa em que o modelo digital é convertido em um formato específico para MA por exemplo *Stereolithography* (STL) ou *Additive Manufacturing Format* (AMF) (VOLPATO, 2017).

A terceira etapa trata do fatiamento da peça: consiste no planejamento do processo de fabricação através da sobreposição de camadas, momento de definir estratégias de deposição de material e avaliar a necessidade de estruturas de suporte. Após isso, ocorre a fabricação da planejada. Na última etapa ocorre o pós-processamento que pode sofrer alteração de acordo com a tecnologia

envolvida no processo, ou seja, podem ser necessárias etapas extras de processamento, limpeza, acabamentos com processos convencionais como exemplo usinagem (VOLPATO, 2017).

Já a Manufatura Subtrativa (MS) consiste na construção de um objeto através da remoção do material, ou seja, ocorre um processo de esculpir o material base, eliminando partes indesejadas para modelagem do objeto desejado. A MS é referência por ter uma boa precisão geométrica e de acabamento, vantagens que podem ser questionadas porque dependem muito da qualidade do equipamento utilizado no processo e da experiência do operador (WILTGEN; LOPES, 2022).

Existe ainda a Manufatura Formativa (MF) que utiliza um molde com as dimensões do objeto que se deseja produzir, ou seja, deve ser preenchida a cavidade do molde com material na forma líquida, pois com o processo de solidificação o objeto adquire a forma geométrica do molde (WILTGEN; LOPES, 2022).

O principal benefício da MA é o fato de utilizar apenas a quantidade necessária da matéria prima para fabricação do objeto, com isso, diminui o desperdício, sem variações geométricas comparada a MS e não necessita de moldes como na MF. (BARBOSA et al., 2019)

Existem muitas outras vantagens da MA como o aumento da velocidade para construção de objetos, a flexibilidade para customização um processo limitado na MC, não exige a troca de ferramentas durante a

fabricação de determinada peça e muitas das vezes o componente é fabricado em um único equipamento do início ao final do processo, além de ser possível a mistura de diferentes materiais ou até mesmo alterar sua densidade na própria fase de processamento antes de concluí-lo (VOLPATO, 2017).

Porém, Volpato (2017) menciona algumas limitações da MA quando comparada a MC como: as propriedades das peças obtidas na MA são diferentes da MC devido ao processo aditivo, as tecnologias possuem limitações quanto aos materiais que podem ser utilizados, distorções e empenamentos podem ser observados em alguns processos e na fabricação em lotes maiores, a MA ainda é mais cara e menos eficiente.

Portanto, aliado ao avanço da indústria 4.0 a MA é uma das tecnologias desenvolvidas mais promissoras que tem grande possibilidade de proporcionar benefícios para o processo de fabricação de peças, exclusivamente na redução de custos e diminuição do tempo de desenvolvimento, o que demonstra alto potencial para uma manufatura mais eficiente e flexível (INÁCIO et al., 2020).

3.3 TECNOLOGIAS DA MA

Ao longo dos últimos anos, as tecnologias da MA vêm ganhando destaque devido ao seu potencial de desenvolvimento de novas máquinas que permitem a fabricação de peças com diferentes tipos de materiais. Além disso, essas novas tecnologias trazem uma facilidade para o processo de produção,

pois são capazes de fabricar peças complexas o que para a MC seria uma tarefa mais difícil e possibilita uma certa economia de matéria-prima por utilizar apenas a quantidade necessária para o processo de fabricação (ALCAIDE; WILTGEN, 2018).

A MA está associada a manipulação de um protótipo em um ambiente virtual do tipo CAD em 3D, o que facilita a visualização do objeto que pretende fabricar. Essa visualização em modelo tridimensional permite realizar análises e alterações de aperfeiçoamento, interferências funcionais e até mesmo a manipulação virtual da peça para observar seu processo de montagem ou funcionamento para o intuito desenvolvido, o que melhora consideravelmente o tempo de desenvolvimento de produtos e possibilita seu lançamento mais rápido no mercado (GOMES; WILTGEN, 2020).

Basicamente o mecanismo empregado nos diversos modelos de impressora 3D, é o mesmo, o que diferencia são os materiais utilizados. Todo processo inicia com um modelo computacional tridimensional, ou seja, em 3D (ALCAIDE; WILTGEN, 2018).

As principais tecnologias da MA em fabricação de objetos tridimensionais como ferramentas, protótipos e peças estão listadas no quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Tecnologias da Manufatura Aditiva.

Classificação da Manufatura Aditiva de acordo com a ISO/ASTM 52900	Tecnologias da MA abordadas no artigo dos autores
<i>Binder Jetting</i>	<i>Binder Jetting (BJ)</i>
<i>Directed Energy Deposition</i>	<i>Laser Engineering Net Shape (LENS)</i>
<i>Material Extrusion</i>	<i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>
<i>Material Jetting</i>	<i>Material Jetting (MJ)</i>
<i>Powder Bed Fusion</i>	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>
	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>
	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>
<i>Sheet Lamination</i>	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>
<i>Vat Photopolymerisation</i>	<i>Stereolithography (SLA)</i>

Fonte: Calderaro, Lacerda e Veit (2020, p. 4).

A tecnologia de jateamento de material ou Material Jetting (MJ) consiste em um processo em que material será jateado na forma líquida sobre uma plataforma via ação física ou química ocorre a solidificação. A primeira fase dessa tecnologia foi marcada pela cera aquecida como base de construção, mas hoje os materiais mais utilizados no processo são as resinas acrílicas fotossensíveis que trazem como vantagem diversas variações das propriedades mecânicas e cores (VOLPATO, 2017).

O processo conhecido como Jato Aglutinante ou *Binder Jetting* (BJ) utiliza como base o pó que pode ser de materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos. O material em pó é distribuído em uma plataforma de construção, em seguida por meio de um cabeçote de impressão é usado para aplicar o líquido aglomerante nas áreas desejadas do material, criando um modelo de camadas, ou seja, a cada camada adicionada o pó é espalhado e aplicado o líquido na área

específica de forma repetida até que o objeto final seja construído (COELHO, 2018).

Existem outras tecnologias na classe pó, a Sinterização Seletiva a laser ou *Selective Laser Sintering* (SLS) em que uma fina camada de pó é espalhada sobre uma plataforma de construção e através de um laser é selecionada a área do pó a ser aquecida e fundida para surgir a camada. Já na Modelagem de rede com engenharia laser ou *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) o pó é pulverizado e inserido no local específico e depois por meio de um raio Laser direcionado com alta potência é derretido surgindo a camada. A Fusão Seletiva a Laser ou *Selective Laser Melting* (SLM) nesse processo o pó é totalmente fundido pelo laser de alta potência para formar o objeto metálico desejado (SOUSA, 2019).

Na Fusão por Feixe de Elétrons ou *Electron Beam Melting* (EBM) o laser é substituído por um feixe de elétrons para derreter e fundir o metal em pó para formar objetos tridimensionais camada por camada (SOUSA, 2019).

Outra tecnologia conhecida como Manufatura de Objetos Laminados ou *Laminated Object Manufacturing* (LOM) ocorre a partir de uma deposição sucessiva de materiais plásticos, papéis, tecidos ou folhas metálicas, ou seja, o modelo digital é fatiado para obter cada camada do processo e através de um laser é cortado a sobra de cada camada sobre o papel e através de um rolo aquecido as camadas se unem umas nas outras até acabar a impressão. Esse tipo é utilizado para construção de superfícies planas sendo muito

utilizado na arquitetura e construção civil (JUNIOR, 2017).

A Estereolitografia ou *Stereolithography* (SLA) é mais uma das tecnologias da MA que se conceitua na fotopolimerização em camadas através de uma resina na forma líquida que ao entrar em contato com a luz ultravioleta se solidifica. Essa técnica sucessiva de sobreposição permite criar um material exclusivo, com uma excelente precisão, bons detalhes e resistência o que possibilita, frequentemente, ser usado na área odontológica (ALMEIDA, 2020).

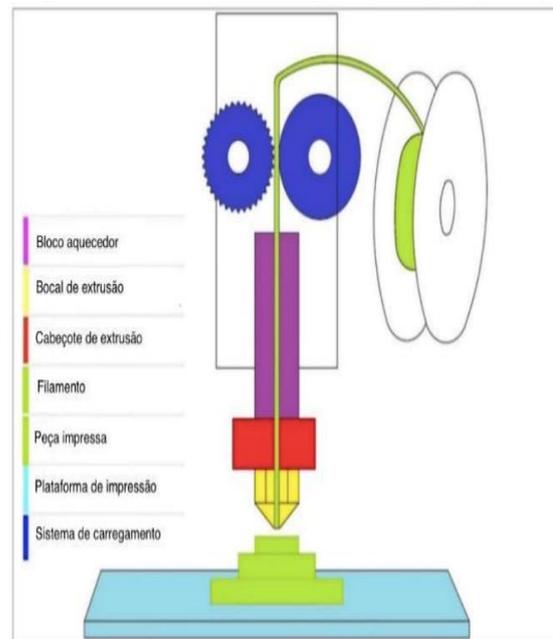
3.3.1 Modelagem por Deposição Fundida

A Modelagem por deposição fundida ou Fused Deposition Modeling (FDM) é uma das tecnologias da MA que utiliza a extrusão de termoplásticos, por meio de camadas sobre camada até a formação final do objeto desejado. O material é aquecido e depositado em uma plataforma de construção seguindo um caminho programado por um *software* de modelagem 3D. Todo processo é controlado pelo computador e os objetos produzidos por FDM apresentam uma boa qualidade de resistência mecânica e térmica (VOLPATO, 2017).

Essa técnica de FDM foi criada em 1980, onde foi vendida no mercado pela empresa American Stratasys no início dos anos 90. Atualmente o mercado conta com vários tipos de impressora 3D, inclusive nacionais, com um preço bem variado entre as marcas que utilizam o processo FDM (KUNKEL et al., 2020).

A matéria prima usada nesse tipo de tecnologia é obtida através de um cordão de filamento plástico enrolado em carretéis, como ilustra a figura 2, geralmente pesando cerca de 1 kg, com espessura de 1,75 mm de diâmetro. O bico da extrusora da impressora FDM derrete o plástico obtendo aproximadamente um diâmetro de 0.4 mm, o que possibilita que as peças tenham uma aparência lisa a percepção humana. Os materiais plásticos mais utilizados nessas impressoras são Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o Poli (ácido láctico) (PLA) (WILTGEN, 2019).

Figura 2 – Processo impressora 3D (FDM).



Fonte: Kunkel et al. (2020, p. 5).

O processo da impressora 3D inicia através de um modelo digital previamente desenvolvido em um *software* CAD. Logo em seguida, o filamento é aquecido e derretido ao passar pelo sistema de aquecimento localizado no cabeçote de extrusão. Esse material processado é inserido sucessivamente e de maneira ordenada

através do bico de extrusão. O bico de extrusão geralmente se movimenta seguindo o eixo X e Y e a plataforma de construção se movimenta ao longo do eixo Z. No processo FDM, o objeto produzido sofre variações devido as características anisotrópicas do material termoplástico, mas apesar dessa limitação esse tipo de impressão cresce em vários setores da indústria devido ao custo acessível, boa resolução e estabilidade dimensional, além de possibilidades diversas de customização e produção de geometrias complexas (KUNKEL *et al.*, 2020).

Portanto, segundo Volpato (2017) as vantagens da tecnologia FDM seriam o baixo custo de aquisição e manutenção das impressoras, variedade de materiais disponíveis, facilidade no pós-processamento das peças e a possibilidade de impressão de peças grandes. Já as desvantagens apresentadas seriam a limitação na precisão e resolução das peças, possíveis problemas de aderências entre as camadas do objeto, dificuldade de imprimir peças com estruturas internas complexas e a possível necessidade de construção de suportes que depois de finalizada impressão precisa ser retirado o que acaba estragando o objeto.

3.4 POLÍMEROS DA MA

No processo de MA para fabricação de peças, pode se utilizar como matérias primas metais, cerâmicas, polímeros, entre outros (SANTOS *et al.*, 2020).

Com a crescente expansão do uso desta nova tecnologia, torna-se imprescindível saber

quais os polímeros utilizados para criação de objetos na MA (PAOLI, 2015).

Polímeros são macromoléculas orgânicas formadas pela repetição de unidades estruturais simples chamadas de monômeros ligados através de ligações covalentes, formando cadeias longas e ramificadas podem ter propriedades variadas, dependendo das estruturas e composições das cadeias poliméricas, e são amplamente utilizados na indústria devido às suas propriedades versáteis e aplicabilidades em diferentes campos. Os polímeros podem ser naturais no caso da celulose, amido ou sintéticos como o plástico (CANEVAROLO, 2013).

Há uma ampla diversidade de materiais poliméricos que nos são familiares, e eles possuem uma vasta gama de aplicações. Isso inclui plásticos, borrachas, fibras, revestimentos, adesivos, espumas e películas. Os plásticos que são sólidos na temperatura ambiente se dividem em termoplásticos e termofixos (CANEVAROLO, 2013).

Segundo Canevarolo (2013) termoplásticos são plásticos que quando submetidos ao aumento da temperatura e pressão resultam no amolecimento do material, e quando afastado desses agentes transformadores, se solidifica de acordo com a forma definida, sendo assim, uma transformação física reversível, ou seja, o processo pode ser realizado de forma repetida. Já o plástico termofixo é justamente o contrário, ou seja, com o aquecimento o plástico amolece uma vez e através da transformação química se solidifica de forma

rígida. O processo térmico inicial resulta em ligações cruzadas covalentes que amaram as cadeias poliméricas para resistir a temperaturas elevadas e caso seja posteriormente aquecido novamente não sofrerá alteração no seu estado físico, por isso chamado de irreversível.

Os materiais mais comuns no processo de MA são: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli (ácido láctico) (PLA), Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), Polietileno Tereftalato (PET), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Poliacetato de Vinila (PVA), Poliestireno (PS) e Poliamida (PA) (BORAH, 2014; HORVATH; CAMERON, 2015).

Dois dos polímeros mais comumente utilizados na tecnologia de impressão 3D são o Poli (ácido láctico) (PLA) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). O PLA é derivado do ácido láctico, uma fonte biológica renovável, enquanto o ABS é produzido a partir do craqueamento do petróleo, não sendo uma fonte renovável. No entanto, ambos os polímeros podem ser reciclados (OSEJOS, 2016).

Quando comparados os dois tipos de polímeros, constata-se que o PLA apresenta alguns pontos positivos em relação ao ABS, ou seja, não emite gases nocivos quando utilizado em condições adequadas permitindo que exista um grupo de impressoras funcionando em um espaço fechado, não existe a necessidade de pré-aquecimento da mesa de impressão, além de uma maior variedade de cores. Já o polímero ABS, é mais resistente a altas temperaturas, seu processo de

amolecimento ocorre em torno 100 °C, enquanto no PLA em torno de 60 °C. Com ABS é possível realizar acabamentos como pintar, lixar, perfurar o objeto após o processo de fabricação (OSEJOS, 2016).

No universo da MA, outro polímero que tem ganhado destaque na tecnologia de impressão 3D é o Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), uma mistura do Polietileno Tereftalato (PET) com um alto teor de Glicol. Essa combinação tem como objetivo aumentar a resistência ao impacto, a cristalinidade e reduzir os custos associados à produção. O PETG tem se mostrado uma opção promissora devido às suas propriedades aprimoradas e à sua capacidade de ser processado por meio da impressão 3D. (SANTOS et al., 2018b).

O Polipropileno (PP) é pouco utilizado, mas é possível apresentar seus aspectos positivos como o baixo custo, menor densidade, resistente a temperaturas e impactos o que possibilita ótimas qualidade de impressão. Portanto, podemos entender que existem vários polímeros que podem ser utilizados no processo de MA, com características próprias, vantagens e desvantagens e principalmente os do tipo termoplásticos (SANTOS *et al.*, 2018b).

3.5 ECONOMIA CIRCULAR

Mudanças proporcionadas pelas revoluções industriais anteriores, influenciam a maneira como a sociedade vive, trabalha e se comunica. Uma dessas mudanças envolve o modelo de Economia Linear (EL) baseado na

ideia de extrair, produzir e descartar, que vem sendo substituído por um novo modelo chamado Economia Circular (EC) (WEETMAN, 2019).

A economia circular (EC) se origina de outras abordagens existentes, a respeito de sustentabilidade como: Simbiose industrial, *Cradle to Cradle* (do berço ao berço), conceito abordado na década de 1990 pelo Prof. Dr. Michael Braungart, químico e William McDonough, arquiteto, o que deu origem ao título para o livro publicado em 2002 chamado “Cradle to Cradle criar e reciclar ilimitadamente”. O conceito abrange a utilização sustentável e potencialmente ilimitada de materiais em ciclos, promovendo a reutilização contínua de recursos e garantindo fluxos seguros e saudáveis tanto para os seres humanos quanto para a natureza (ASSUNÇÃO, 2019).

Por vários anos o modelo de EL foi entendido pela sociedade como algo natural em relação ao ciclo de vida dos produtos, mas o modelo linear gera diversos impactos ambientais. A EC surge para ser o oposto e propõe um modelo de consumo na forma de um ciclo como, ou seja, produzir, utilizar e não descartar. A ideia principal é reutilizar o recurso anteriormente extraído como matéria prima de forma que fique em um ciclo contínuo de transformações (ASSUNÇÃO, 2019).

Em relação a gestão ambiental e ações voltadas à economia circular, as primeiras iniciativas surgiram na Alemanha. Em 1991, foi introduzido o princípio da “responsabilidade alargada do produtor”, seguido pela adoção de uma lei de gestão de resíduos em 1994, com o

conceito de ciclo fechado de substâncias. Posteriormente, a China também se envolveu nesse contexto, com projetos-piloto a partir de 1999, promulgando uma lei em 2002 e formalizando a economia circular em 2008 (LEMOS, 2018).

A sustentabilidade se tornou um assunto de prioridade mundial e aliada a economia circular permitirá uma grande mudança e reorganização a respeito de produção e consumo na economia. Atualmente, a sociedade tem consciência e preocupação em relação ao planeta que será herdado pelas próximas gerações o que possibilita repensar sobre a forma de utilização dos recursos e ver a EC como a melhor alternativa industrial (COSTA; SILVA; MENDONÇA, 2021).

Portanto, hoje é essencial considerar as questões ambientais. Um número crescente de indivíduos está adquirindo equipamentos digitais e de fabricação para produzir seus próprios produtos, e as consequências disso para o nosso planeta e sociedade ainda são desconhecidas. É crucial dedicar esforços para realizar pesquisas nessa área, pois isso se mostra necessário e urgente (BARROS, 2017).

3.6 SUSTENTABILIDADE NA MA

Um dos motivos de maior relevância em relação a MA refere-se à redução de resíduos e desperdícios que esta tecnologia pode proporcionar ao processo de fabricação, ou seja, a MA é uma tecnologia que colabora com a sustentabilidade (COSTA; SILVA; MENDONÇA, 2021).

A MA é considerada mais favorável ao meio ambiente em comparação com os processos da MC. Essa tecnologia é contrária aos métodos de fabricação subtrativos e oferece suporte a uma ampla variedade de aplicações (BARROS, 2017).

Dessa maneira, a MA tem a capacidade de transformar as atuais cadeias de processos de fabricação, modelos de negócio e as relações entre produtos e usuários, permitindo a criação de produtos exclusivos e personalizados. No entanto, é necessário realizar investigações aprofundadas para compreender plenamente a sustentabilidade e o desempenho ambiental da MA em comparação com as metodologias da MC (KELLENS et al., 2017).

Outro ponto importante em relação à sustentabilidade é a oportunidade de aproveitar essa vantagem ambiental para aumentar a competitividade, algo comum entre as empresas estrangeiras. No entanto, no Brasil, as empresas geralmente não incorporam a sustentabilidade como um diferencial competitivo, ou seja, não a consideram como um fator que pode influenciar sua escolha em adotar a MA. A principal motivação para sua adoção costuma ser a busca por vantagens em termos de eficiência de tempo e custos (VEIT, 2018).

Por outro lado, a capacidade de produzir componentes mais leves pode resultar em economia de energia projetada entre 5% e 25% até 2050, além de uma diminuição nos custos de fabricação estimada entre 4% e 21% durante o mesmo período. Essa possibilidade

é relevante para várias indústrias diferentes (ARRIZUBIETA et al., 2020).

Como mencionado anteriormente, a MA possui a competência de diminuir o consumo de energia ao longo do ciclo de vida de um produto e reduzir seu impacto ambiental, especialmente através de aplicações inovadoras que anteriormente eram impraticáveis. Além disso, a MA pode acelerar os ciclos de desenvolvimento de produtos, minimizar a necessidade de ferramentas, manuseio e reduzir as demandas por energia e materiais através de práticas como remanufatura e reparo (KELLENS et al., 2017).

No entanto, apesar dos potenciais benefícios, a tecnologia de MA ainda não foi totalmente explorada do ponto de vista da sustentabilidade. Embora possa servir como facilitadora e impulsionadora da melhoria da sustentabilidade industrial, a implementação dessa tecnologia no sistema industrial pode resultar em cenários nos quais a produção se torna menos eficiente em termos ambientais, os clientes buscam produtos personalizados e a obsolescência dos produtos aumenta, resultando em um consumo maior de recursos (FORD; DESPEISSE, 2016).

Da mesma forma que os processos da MC, a MA consome recursos como materiais e energia, resultando em emissões de resíduos e gases poluentes. Portanto, ela contribui para sua própria pegada ecológica. Além disso, é importante notar que essa tecnologia pode promover uma cultura de consumo excessivo, gratificação imediata e uma sociedade que descarta produtos rapidamente, o que pode ter

impactos negativos e significativos ao meio ambiente (REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

Por outro lado, os processos da MA são frequentemente vistos como ecologicamente favoráveis, pois parecem utilizar apenas a quantidade necessária de material para produzir a peça final. Porém, é importante observar que, independentemente da tecnologia utilizada, nem todo o material consumido é realmente incorporado na peça final (FORD; DESPEISSE, 2016).

Os materiais reciclados empregados em impressoras 3D podem ser agrupados em quatro principais categorias, que se baseiam em suas matérias-primas: plásticos, metais, cerâmicas e compósitos (COLORADO; VELÁSQUEZ; MONTEIRO, 2020).

À medida que as impressoras 3D de código aberto se tornam cada vez mais populares, a reciclagem de polímeros está ganhando importância, especialmente devido às atuais taxas de reciclagem muito baixas. Como resultado, vários projetos e extrusoras de código aberto estão se destacando na conversão de plásticos pós-consumo em matéria-prima utilizável para impressoras 3D. Isso inclui iniciativas como a Lyman Filament Extruder, a Filabot, o Recyclebot, o RepRap Recycle Add-on, além de programas como o Precious Plastic e o Plastic Bank (AGOSTINI, 2018).

Atualmente, a reciclagem de polímeros surge como uma solução eficaz para mitigar os impactos ambientais adversos. Isso envolve a redução da extração de petróleo, das emissões de dióxido de carbono e da quantidade de resíduos poliméricos

descartados. A utilização de polímeros reciclados pode substituir materiais virgens em diversas aplicações, como embalagens não alimentícias e componentes automotivos, contribuindo para a conservação de recursos naturais e a redução da demanda por petróleo (AGOSTINI, 2018).

Ainda, a reciclagem mecânica desempenha um importante papel nesse processo, envolvendo procedimentos que abrangem a separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e, por fim, a transformação desse polímero em produtos acabados (AGOSTINI, 2018).

A reciclagem de polímeros para a produção de novos filamentos segue, em sua essência, um processo semelhante, independentemente do material virgem. Esse procedimento começa com a moagem do plástico, transformando as peças a serem recicladas em fragmentos menores, seguido pela extrusão do plástico triturado, mantendo as condições de temperatura recomendadas para cada tipo de polímero. Após sair da extrusora, o filamento está pronto para ser utilizado no processo de impressão 3D. Embora, teoricamente seja possível reprocessar qualquer termoplástico para criar um filamento, esse processo acarreta alterações nas propriedades mecânicas e reológicas dos materiais (NETO, 2021).

Dessa forma, essa perda de propriedades é atribuída a fenômenos de degradação que ocorrem ao longo do tempo de vida útil e, principalmente, durante as operações de reprocessamento, nas quais o

material é submetido a ciclos de aquecimento e frequentemente a altas tensões de cisalhamento. Como resultado, tanto o envelhecimento natural quanto os processos de reciclagem podem causar mudanças substanciais na estrutura molecular quando comparadas ao material virgem (AGOSTINI, 2018).

Contudo, no processo de impressão 3D, é importante levar em conta a possibilidade de consumo de material para produzir os suportes necessários durante o processo de fabricação que serão removidos posteriormente, seja por dissolução ou remoção manual (KELLENS et al., 2017).

Dois polímeros popularmente utilizados na tecnologia FDM podem ser reciclados, porém sofrem algumas alterações. O primeiro é o ABS que após cinco ciclos de reciclagem sofrem severa degradação, afetando principalmente sua resistência ao impacto e encolhimento. Os testes demonstram que a força de impacto diminui significativamente devido à degradação do polímero, resultante da quebra dos laços de polibutadieno. Além disso, a contração do material reduz cerca de 17% no 5º ciclo devido a essa degradação (AGOSTINI, 2018).

As propriedades mecânicas do ABS após o processo de reciclagem também foram estudadas por Paiva et al. (2015) através da fabricação de peças com diferentes proporções de material virgem e reciclado. Durante o processo de reprocessamento do ABS virgem, observou-se uma redução na resistência à tração, na deformação, no módulo de elasticidade e na resistência ao

impacto em comparação com as amostras virgens não processadas. Por outro lado, nas amostras contendo ABS reciclado, à medida que a proporção desse material aumenta, nota-se um aumento no módulo de elasticidade e uma diminuição na resistência ao impacto.

Apesar das modificações identificadas em certas propriedades mecânicas, a capacidade de processamento e uso desses materiais na impressão 3D permanece intacta uma vez que os filamentos compostos por material reciclado podem resultar numa economia de até 37,5% em comparação com filamentos virgens, o estudo destaca a vantagem de empregar esse material na produção de objetos 3D para aplicações domésticas ou mesmo profissionais (PAIVA et al., 2015).

Já no PLA, os estudos indicam que quando submetido a vários ciclos de moagem e extrusão, apresenta uma considerável redução em suas propriedades mecânicas. A resistência à tração tem uma redução menor, cerca de 5,2% após dez processos de extrusão. A deformação na ruptura diminui em 8,3%, e a resistência ao impacto cai 20,2%. O índice de fluidez aumenta significativamente com os processos sucessivos de extrusão do PLA (AGOSTINI, 2018).

No estudo conduzido por Lanzotti et al., (2019), também foi realizada uma análise comparativa entre peças fabricadas com PLA virgem e PLA reciclado. No PLA reciclado foi obtido por meio da trituração das peças virgens e subsequente reprocessamento em uma extrusora caseira, notou-se que as peças

recicladas uma e duas vezes exibiram resistência à flexão máxima comparável à das peças fabricadas com material virgem, com valores de 106 ± 9 Mpa (mega pascal) e 108 ± 10 MPa, respectivamente, em comparação com 119 ± 6 MPa para as peças virgens. Entretanto, a partir do terceiro ciclo de reciclagem, as peças começaram a mostrar um desempenho significativamente inferior, com uma resistência à flexão de 75 ± 16 MPa. Além de se tornarem mais frágeis, essas peças apresentaram uma variabilidade nos resultados muito maior do que aquelas produzidas nos dois primeiros ciclos de extrusão.

Já em outro estudo abordando os comportamentos mecânicos do PLA, Anderson (2017) propôs verificar as diferenças entre as peças feitas de material virgem e reciclado, quanto as medidas de resistência a tração. Os testes de tração demonstraram que a utilização de PLA reciclado na impressão 3D pode ser uma alternativa interessante. O filamento reciclado exibiu propriedades ligeiramente inferiores em comparação ao filamento virgem, com uma resistência à tração 10,9% menor, uma tensão de cisalhamento 6,8% maior e uma dureza 2,4% menor. Um desafio durante os testes, foi a maior variabilidade nos resultados das peças recicladas como já mencionado no estudo anterior e, juntamente com problemas de impressão, como exemplo o entupimento do bico, que não eram encontrados com o filamento virgem.

É importante destacar que todos esses testes foram conduzidos em uma impressora

comum. Apesar dessas questões, vale ressaltar que o filamento utilizado passou por apenas um processo de reciclagem e mesmo assim foi possível obter peças de qualidade de impressão satisfatória, o que ressalta o potencial promissor do uso de filamentos reciclados (ANDERSON, 2017).

Resumidamente, ao planejar e produzir peças com ABS e PLA reciclado, é essencial considerar as propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e tensão de ruptura. Para compensar as limitações, pode-se usar aditivos, material virgem ou otimizar a geometria e parâmetros de impressão da peça para melhorar seu desempenho (AGOSTINI, 2018).

Entretanto, alguns materiais utilizados no processo de impressão 3D, como ABS, PLA e Poliamida (PA) submetidos a um aumento excessivo de temperatura podem acarretar riscos à saúde através de substâncias voláteis compostos orgânicos como ciclohexanona, estireno, butanol e etilbenzeno. Dessa maneira, a temperatura que se encontra a extrusora e o mau funcionamento das impressoras desempenham um papel importante nas emissões das partículas. Porém, o material particulado (PM) e a concentração de compostos orgânicos voláteis (VOC) mostram maior concentração quando a impressora acaba de ser desligada e a tampa é retirada para remover a peça impressa (COLORADO; VELÁSQUEZ; MONTEIRO, 2020).

Da mesma forma, Neto (2021) aborda a questão da caracterização das emissões de extrusoras de filamento, que permitem aos

consumidores produzirem seu próprio filamento a partir de pellets de plástico. Em um estudo conduzido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA,2020), além das emissões de VOC, foram registrados níveis de emissão de partículas ultrafinas (UFP) comparáveis aos observados em impressoras 3D. Esses dados apontam para um risco à saúde das pessoas que utilizam tanto extrusoras de filamento quanto impressoras 3D em um mesmo ambiente, visto que, em geral, esses dispositivos não possuem sistemas de filtragem para esses compostos e partículas.

Anderson (2017) também chama a atenção para uma possível preocupação relacionada ao uso de filamentos reciclados, que é o potencial aumento de UFP em comparação com filamentos virgens. Estudos indicam uma maior emissão desse tipo de partícula ao usar filamentos reciclados, supostamente devido à presença de contaminantes nesses materiais. Além disso, é importante destacar que a própria extrusora de filamentos emite UFP e VOC, o que significa que os usuários estão expostos a esses poluentes sempre que forem realizar um ciclo de reciclagem.

As taxas gerais de UFP são cerca de dez vezes maiores em impressoras 3D que utilizam ABS termoplástico em comparação com as que usam PLA bruto. Ambos os materiais são considerados "emissores significativos" de UFP, e, por essa razão, é importante cuidados ao utilizar esses filamentos em espaços internos sem ventilação adequada ou com sistemas de filtragem deficientes

(COLORADO; VELÁSQUEZ; MONTEIRO, 2020).

Quando se trata de compreender a eficiência energética na MA isso se torna um grande desafio devido à ampla variação no consumo de energia das máquinas e à dependência de diversas variáveis, que incluem desde os materiais utilizados até a carga de trabalho e a utilização dos espaços de produção (BARROS, 2017).

Devido às características da MA, que envolvem um processo mais demorado, e uma produtividade mais baixa a energia consumida pelo equipamento para cada item produzido é uma preocupação para os pesquisadores, pois pode afetar a eficiência energética (GARCIA et al., 2018).

Na maioria dos processos de MA, as impressoras 3D consomem mais energia em comparação com a MC quando consideramos níveis de processo ou máquinas. Por exemplo, as máquinas, ferramentas são equipadas com vários dispositivos periféricos. Portanto, ao calcular o consumo de energia, é importante levar em consideração tanto o consumo básico de energia e o tempo de processamento, que são os dois principais fatores a serem considerados (FORD; DESPEISSE, 2016).

De acordo com Veit (2018), o consumo de energia é considerado uma vantagem sob a perspectiva da sustentabilidade. Entretanto, essa vantagem varia dependendo do tipo de equipamento utilizado. Nos equipamentos de MA com materiais termoplásticos, o consumo de energia é baixo, o que contribui para a sustentabilidade ambiental. Por outro lado, nos equipamentos de MA com materiais metálicos,

o consumo de energia é maior em comparação com a MC, devido à necessidade de sinterização a laser.

No entanto, é importante realizar uma análise, visto que, mesmo que o consumo de energia possa aumentar, isso ocorre em um único equipamento que tem o potencial de substituir vários equipamentos usados na MC. Além disso, devemos considerar a categoria de tempos e métodos, pois a redução nos tempos de produção pode resultar em uma utilização mais eficiente de recursos, levando a uma redução no consumo total de energia (VEIT, 2018).

Para avaliar o impacto ambiental de um processo, é fundamental examinar cada estágio do ciclo de vida do produto desde a extração da matéria-prima até a fase de descarte, que ocorre no final da vida útil do produto. Essa abordagem é conhecida como avaliação do ciclo de vida (ACV) (ARRIZUBIETA et al., 2020).

No início, os esforços na ACV da MA concentraram-se principalmente na análise do consumo de energia. No entanto, novos estudos ampliaram sua abrangência para abordar também o consumo de materiais, considerando uma variedade mais extensa de impactos ambientais e investigando várias operações em máquinas (REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

A análise do ciclo de vida pode ser simplificada para focar em aspectos de processos específicos, como o uso direto de energia e materiais, ao investigar diversos processos da MA, incluindo métodos como a

fusão seletiva a laser e a sinterização seletiva a laser (KELLENS et al., 2017).

Devido à escassez de dados detalhados sobre o ciclo de vida, torna-se desafiador conduzir uma avaliação precisa do ciclo de vida de produtos ou uma análise de sustentabilidade para as tecnologias da MA (REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

Todavia, é importante notar que há uma escassez de estudos que examinam a toxicidade e o impacto ambiental dos processos e materiais utilizados na MA. É importante reconhecer que esses impactos podem ocorrer tanto durante a produção quanto no descarte dos materiais relacionados a essa tecnologia. Embora a MA seja frequentemente vista como uma tecnologia com significativos benefícios sustentáveis, é essencial entender os custos, impactos ambientais e possíveis efeitos na saúde humana ao processar esses materiais para um desenvolvimento responsável no futuro (FORD; DESPEISSE, 2016).

O crescente número de publicações nas áreas, abordadas neste estudo, indicam que os pesquisadores estão cada vez mais voltados para a sustentabilidade na MA. Isso sugere que os desafios associados como a reutilização e reciclagem de materiais, impactos na saúde e processos sustentáveis, provavelmente serão abordados de forma mais rápida. Os materiais com melhor reciclabilidade, reutilização ou circularidade serão mais viáveis para utilização futura na MA, à medida que as políticas nacionais movem cada vez mais a produção para materiais e processos sustentáveis

(COLORADO; VELÁSQUEZ; MONTEIRO, 2020).

Portanto, apesar das iniciativas que buscam aprimorar o uso e a produção de filamentos a partir de materiais renováveis de baixo custo, a grande diversidade de tecnologias de impressão 3D e os variados materiais empregados ainda não permitem alcançar um consenso definitivo sobre a sustentabilidade desse processo. Isso ocorre porque o impacto ambiental gerado varia consideravelmente entre as diferentes tecnologias e materiais utilizados (NETO,2021).

Ou seja, é essencial avaliar o ciclo de vida completo das peças fabricadas por MA em comparação com as peças produzidas por MC, considerando não apenas aspectos econômicos, mas também levando em conta os impactos ambientais e sociais. Além disso, a economia circular e as empresas que reciclam plástico para a produção de filamentos ainda necessitam de uma análise mais profunda, e sem contar que existe uma escassa literatura disponível que analise o impacto logístico do processo (NETO,2021).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi analisar a interligação entre a MA, com ênfase na tecnologia FDM, e a sustentabilidade ambiental. Investigou-se a relação entre a MA e EC, explorando os potenciais impactos e vantagens dessa tecnologia em termos de sustentabilidade e gestão de resíduos. Além disso, considerou-se o processo, o consumo

de recursos e a acessibilidade à impressão 3D como elementos chave dessa análise, buscando entender como a MA pode contribuir para práticas mais sustentáveis.

A utilização da MA vem crescendo e se mostrando cada vez mais importante em vários ramos industriais com grande potencial para reduzir riscos ambientais quando comparado a processos de MC pelo fato de utilizar somente quantidade necessária de material e gerar menos resíduos. Por outro lado, podem ser observados novos riscos relacionados ao processo e utilização desta tecnologia.

Outro aspecto significativo é que, tanto na MC quanto na MA, existe um consumo de recursos, como matéria-prima e energia, gerando significativa emissão de resíduos e gases poluentes. Independentemente da tecnologia, nem toda a matéria-prima utilizada pode ser totalmente incorporada ao produto, o que significa que a MA possui sua própria pegada ecológica.

Já a reciclagem na MA surge como uma alternativa para diminuir os impactos ambientais como exemplo a redução de resíduos poliméricos descartados. Além disso, a utilização de polímeros reciclados pode substituir a matéria-prima virgem resultando em uma conservação dos recursos naturais.

Por outro lado, segundo diferentes autores, a reciclagem dos dois polímeros mais utilizados na impressão 3D, o ABS e o PLA, é possível, algumas alterações nas suas propriedades mecânicas, como a resistência ao impacto e tensão de ruptura. Ou seja, quando for produzir objetos com polímeros reciclados essas questões devem ser levadas

em consideração; uma forma de melhorar o desempenho envolve o uso de aditivos ou uma porcentagem de matéria-prima virgem para compensar essas limitações.

No entanto, o processo que envolve a produção dos filamentos reciclados através de extrusoras e posteriormente a utilização desses filamentos em impressoras 3D podem aumentar a concentração VOC e a emissão UFP principalmente em ambientes fechados podendo acarretar riscos à saúde, sendo contrário ao conceito de economia circular que se baseia na reutilização contínua de recursos e garantia de fluxos seguros e saudáveis tanto para seres humanos quanto para a natureza.

No que diz respeito a compreensão energética na MA isso se mostra um grande desafio devido a variedade de impressoras 3D e de outros fatores envolvidos como por exemplo a carga de trabalho. O processo de MA pode ser mais demorado e tornando a produtividade mais baixa e resultando em um gasto de energia maior por peça produzida em comparação a MC. Por outro lado, este consumo varia de acordo com a tecnologia empregada, ou seja, na tecnologia que envolve termoplásticos o consumo de energia é menor e contribui para a sustentabilidade.

Em síntese, a análise dos impactos ambientais e energéticos na MA exige um volume considerável de informações abrangendo diversos materiais, processos, equipamentos, projetos de produtos e participantes da cadeia de suprimentos. Cada um desses dados desempenha um papel fundamental na obtenção de estimativas precisas e avaliações confiáveis do consumo

de energia e impacto ambiental, especialmente durante a análise do ciclo de vida.

Portanto, é essencial promover estudos aprofundados relacionados à avaliação e ao gerenciamento de novos riscos na MA, abordando aspectos como toxicidade, custos e sustentabilidade. A conscientização e colaboração entre especialistas de diversas disciplinas, incluindo materiais, mecânica, química e economia, são fundamentais para promover um futuro sustentável no contexto do ciclo de vida da MA. Esses esforços em conjunto podem contribuir, significativamente, para avaliar e reduzir o impacto ambiental e energético da MA, garantindo sua integração eficiente e sustentável na indústria.

REFERÊNCIAS

ARRIZUBIETA, J. I.; UKAR, O.; OSTOLAZA, M.; MUGICA, A.; *Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder. Additive Manufacturing and Its Handling Digital archive learning researching*, 2020. Disponível em: <<https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/41917/metals-1000261.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 04 mar. 2023.

ANDERSON, I.; *Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. 3D Printing and Additive Manufacturing – Mary Ann Liebert, inc. v. 4, n. 2, p., 2017.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054>> Acesso em: 17 set. 2023.

AGOSTINI, N. B.; *Reciclagem primária de resíduos poliméricos provindos do processo FDM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Lume Repositório Digital, 2018.* Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/190145>> Acesso em: 03 set. 2023.

ALCAIDE, E.; WILTGEN, F.; Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. UNITAU - Revista Ciências Exatas, vol.24 N 2, 2018. Disponível em: <<http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2757>> Acesso em: 29 abr. 2023.

ALMEIDA, L. F.; Efeito da Fotopolimerização Complementar em Resinas para Impressoras por Estereolitografia em suas Propriedades Mecânicas e Diferentes Designs de Impressão na Precisão de Modelos Odontológicos. Tese doutorado apresentada a Universidade estadual Paulista (UNESP), 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192340>>. Acesso em: 06 maio 2023.

ASSUNÇÃO, G. M. A.; Gestão Ambiental Rumo a Economia Circular: Como o Brasil se Apresenta Nessa Discussão. Revista eletrônica sistemas & gestão, Interface - v. 14 n. 2, 2019. Disponível em: <<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1543>>. Acesso em: 13 maio 2023.

BARBOSA, F. A.; VELÁZQUEZ, D. R. T.; HELLENO, A. L.; JUNIOR, M. V.; Vantagens e Desafios da Manufatura Híbrida – Integrando Manufatura Aditiva E Subtrativa. Encontro Nacional de Engenharia de Produção (XXXIX ENEGEP), São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://abepro.org.br/publicacoes/artigo.asp?e=enegep&a=2019&c=38258>> Acesso em: 24 abr. 2023.

BORAH, S.; 3D Printer Filament Length Monitor. International Journal of Science, technology and Society, India, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo.aspx?journalid=183&doi=10.11648/j.ijsts.20140205.16>>. Acesso em: 06 maio 2023.

BARROS, K. D. S.; *Identification of The Environmental Impacts Contributors Related to The Use of Additive Manufacturing Technologies*. Tese de doutorado da Université Grenoble Alpes, 2017. Disponível em: <<https://theses.hal.science/tel-01689798>>. Acesso em: 13 maio 2023.

COELHO, P. M. N.; Rumo à indústria 4.0. Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de ciências e Tecnologia das Universidade de Coimbra, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/36992>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

CALDERARO, D. R.; LACERDA, D. P.; VEIT, D. R.; *Selection of additive manufacturing Technologies in productive systems: a decision support model*. Gestão e produção – Scientific Electronic Library Online, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/zJRxWch3TVZjQK PJtmBjfyP/?lang=en&format=pdf>>. Acesso em: 06 maio 2023.

COELHO, A. W. F.; Manufatura Aditiva Por Jato De Aglutinante (Impressão 3D): Fabricação e Avaliação de Compósitos de Gesso Com Fibras de Sisal. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2018. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/12156>>. Acesso em: 06 maio 2023.

CANEVAROLO, S. V. J.; Ciência dos Polímeros. 3. Ed. São Paulo: Editora Artliber, 2013.

COSTA, M. R.; SILVA, R. S.; MENDONÇA, T. S.; Análise da Aplicação da Manufatura Aditiva no Recondicionamento de Moldes Sob a Perspectiva se Economia Circular. Universidade Mackenzie, Adelpa Repositório Digital, 2021. Disponível em: <<https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29041>> Acesso em: 13 maio 2023.

COLORADO, H. A.; VELÁZQUEZ, E. I. G.; MONTEIRO, S. N.; Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. Journal of materials research and technology, Volume 9, 4 August 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>> Acesso em: 09 set. 2023.

DALENOGARE, L. S. A.; indústria 4.0 no Brasil: Um Estudo dos Benefícios Esperados e Tecnologias Habilitadoras. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Lume Repositório Digital, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/185799>> Acesso em: 01 abr. 2023.

FORD, S.; DESPEISSEI, M.; *Additive Manufacturing and Sustainability: An Exploratory Study of the Advantages and Challenges*. *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, 20 November 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>> Acesso em: 09 set. 2023.

FRATILA, D.; ROTARU, H.; Additive Manufacturing – A Sustainable Manufacturing Route. *Matec Web Of Conferences* – volume 94, 2017. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/08/mateconf_cosme2017_03004/mateconf_cosme2017_03004.html> Acesso em: 09 mar. 2023.

GARCIA, F. L.; MORIS, V. A. S.; NUNES, A. O.; SILVA, D. A. L.; Environmental performance of additive manufacturing process. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Repositório Digital, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/32448/1/EnvironmentalPerformance_Nunes_2018.pdf> Acesso em: 03 set. 2023.

GUIMARÃES, E. R. L. JÚNIOR, D. S. G.; Características das Tecnologias Digitais da Indústria 4.0 que têm Apoiado a Economia Circular. *Revista Investigação, sociedade e investimento*, 2021 vol.10 N16. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22912>> Acesso em: 09 mar. 2023

GRAGLIA, M. A. V.; As Novas Tecnologias e Os Mecanismos de Impacto No Trabalho. Repositório Pontifica Universidade Católica de São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.pucsp.br/jspui/handle/handle/21157>> Acesso em: 01 abr. 2023

GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F.; Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais E Máquinas. *Revista tecnologia*, 2020 vol.41 N 1. Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/view/9917>> Acesso em: 29 abr. 2023.

HORVATH, J.; CAMERON, R. 3D Printing with Mattercontrol. Editora Apress, 2015.

INÁCIO, D.; DROZDA, F. O.; SILVA, W. de A.; MARQUES, M. A. M.; SELEME, R. A.; Importância da Manufatura Aditiva como Tecnologia Digital para a Indústria 4.0: Uma Revisão Sistemática. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*, vol. 7, N. 3, p. 653–667, 2020. Disponível em: <<https://e-revista.unioeste.br/index.php/comsus/article/view/23861>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

JUNQUEIRA, A.; A Quarta Revolução Industrial e o Potencial Impacto Da Indústria 4.0 Sobre O Emprego. Universidade do Minho, 2020. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1822/68632>>. Acesso em: 24 mar. 2023.

JUNIOR, N. A. C.; A Integração da Impressora 3D FDM no Processo Ensino-Aprendizagem da Prática Projetual de Design. Tese doutorado apresentada a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29087>>. Acesso em: 06 maio 2023.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J.; *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Indust 4.0*. *Acatech National Academy of Science and Engineering*, 2013. Disponível em: <<https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>> Acesso em: 09 mar. 2023.

KUNKEL, M. E.; CANO, A. P. D.; GANGA, T. A. F.; ARTIOLI, B. O.; JUVENAL, E. A. O.; Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica. In: Maria Elizete Kunkel. (Org.). *Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica: v.1, 1ed*. Seattle, United States: Kindle Direct Publishing, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/350801302_Manufatura_Aditiva_do_Tipo_FDM_na_Engenharia_Biomedica>. Acesso em: 06 maio 2023.

KELLENS, K.; BAUMERS, M.; GUTOWSKI, T. G.; FLANAGAN, W.; LIFSET, R.; DUFLOU, J. R.; *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Applications Domains and Their Environmental Implications*. *Journal of Industrial Ecology* v.21, 2017. Disponível em: <

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12629>>. Acesso em: 13 maio 2023

LANZOTTI, A.; MARTORELLI, M.; MAIETTA, S.; GERBINO, S.; PENTA, F.; GLORIA, A.; A comparison between mechanical properties of specimens' 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, v. 79, p. 143–146, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.030>>. Acesso em: 17 set.2023.

LEMOS, P.; Economia Circular Como Fator de Resiliência e Competitividade na Região de Lisboa e Vale Do Tejo. Comissão de coordenação e desenvolvimento regional de Lisboa, 2018. Disponível em: <https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/economia-circular-resiliencia-competitividade-RLVT_2018.pdf>. Acesso em: 18 Maio 2023.

NETO, H. P.; Iniciativas sustentáveis em relação ao uso da impressão 3D. Dissertação de mestrado a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Lume Repositório Digital, 2021. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/235682>> Acesso em: 17 set. 2023

OSEJOS, J. V. M.; *Caracteriación De Materiales Termoplásticos De ABS Y PLA Semirrígido Impress Em 3D Com Cinco Mallados Internos Diferentes*. Dissertação apresentada a Faculdade de engenharia mecânica de Quito, Equador, 2016. Disponível em: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>>. Acesso em: 30 abr. 2023

PAIVA, D. A.; SOUZA, E. W.; FERREIRA, A. C. B.; BONSE, B C.; Compostos de ABS virgem e reciclado para impressão em 3d. 13º Congresso Brasileiro de Polímeros, Natal - RN, 2015. Disponível em: <<http://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2015/>>. Acesso em: 17 set. 2023.

PAOLI, M. A. D.; Mudanças na Polímeros. Seção Editorial Polímeros – Scientific Electronic Library Online,2015. Disponível em:<<https://www.scielo.br/j/po/a/9pbGtKHG8YbzXYP3CLfqBYf/?lang=pt>>Acesso em: 29 abr. 2023.

REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG, Y.; *Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing*. *Additive Manufacturing*, 2018. pp. 21-28. Manuscrito aberto. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221486041730177X>>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B.; I.; Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, Vol.4.316, 2018a. Disponível em: <<https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedevolvimento/article/view/e316>> Acesso em 01 abr. 2023.

SANTOS, L. M. D.; ROCHA, D. S. G. M.; CARNEIRO, M. L.; LUZ, M. P.; Tipos De Polímeros Utilizados Como Matéria Prima No Método De Manufatura Aditiva Por FDM: Uma Abordagem Conceitual. Encontro nacional de engenharia de produção (XXXVIII Enegep), Alagoas, 2018b. Disponível em: <<https://abepro.org.br/publicacoes/artigo.asp?e=enegep&a=2018&c=36043>> Acesso em: 30 abr. 2023.

SANTOS, L. M. D.; JUNIOR, R. R. D. S.; LIMA, K. K. D.; COQUEIRO, S. P.; Estudo Da Ciência Na Revolução Industrial 4.0 Com Ênfase na Manufatura Aditiva. *Revista Uniaraguaia*, 2020 vol.15 N 3. Disponível em: <<https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/view/98>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

SCHWAB, K.; *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.

SOUZA, L. R. D. S.; Análise Experimental de Polímeros Recicláveis e Biodegradáveis na Manufatura Aditiva. Dissertação de Mestrado Apresentada a Universidade de Brasília (UNB), 2019. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/22066>>. Acesso em: 06 maio 2023.

VEIT, D. R.; Impactos da manufatura aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos. Tese de doutorado apresentado a Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Repositório Digital da biblioteca da Unisinos, 2018. Disponível em: <

<http://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6927>> Acesso em: 17 set. 2023

VOLPATO, N.; Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3d. São Paulo: Blücher, 2017.

WILTGEN, F.; Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva Sua Importância No Auxílio Do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (10º COBEF), 2019. Disponível em:
<<https://www.researchgate.net/profile/Filipe-Wiltgen/publication/335507334> > Acesso em: 06 maio 2023.

WILTGEN, F.; LOPES, M.; Manufatura Aditiva e Subtrativa Na Construção De Moldes Mecânicos Híbridos Para Aplicação Em Manufatura Formativa. Retec - Revista de tecnologias, 2022 vol.15 N1. Disponível em:
<<https://www.fatecourinhos.edu.br/retec/index.php/retec/article/view/425>> Acesso em: 24 abr. 2023.

WEETMAN, C.; Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. São Paulo: Autêntica, 2019.