

REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS SOBRE A SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

SYSTEMATIC REVIEW OF STUDIES ON THE SUSTAINABILITY OF THE 3D PRINTING PROCESS

Tainá Stempkowski Terra, Mestranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

tainaterra94@gmail.com

Beatriz Martins Frasnelli, Mestranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

beatrizfreewill@gmail.com

Jocelise Jacques de Jacques, Doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

jocelise.jacques@ufrgs.br

Fábio Gonçalves Teixeira, Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

fgtdsg@gmail.com

Resumo

A manufatura aditiva se destaca no cenário acadêmico e profissional devido à redução de material e economia de tempo. Apesar disso, enfrenta desafios comuns a avanços tecnológicos. Esta revisão sistemática de literatura analisa o estado atual da manufatura aditiva, propondo soluções para seus desafios. Abordando manufatura aditiva, economia circular e ciclo de vida dos produtos, a revisão contempla todos os estágios do produto gerado por essa tecnologia. Resultados indicam soluções promissoras e preocupações, como emissões de gases na impressão 3D e impacto ambiental de diferentes materiais. Destaca-se a relevância da pesquisa e divulgação para a decisão sobre o uso da manufatura aditiva em vários contextos

Palavras-chave: Impressão 3D; Desenvolvimento sustentável de produto; Design e Tecnologia

Abstract

Additive manufacturing stands out in the academic and professional scene due to material reduction and time savings. Despite this, it faces challenges common to technological advances. This review analyzes the current state of additive manufacturing, proposing solutions to its challenges. Addressing additive manufacturing, circular economy and product life cycle, the review covers all stages of the product generated by this technology. Results indicate promising solutions and concerns, such as gas emissions in 3D printing and the environmental impact of different materials. The relevance of research and dissemination for deciding on the use of additive manufacturing in various contexts is highlighted.

Keywords: 3D printing; Sustainable Product Development; Design and Technology

1. Introdução

Charles Hull [1] definiu a manufatura aditiva, ou impressão 3D como o método de formar objetos em três dimensões através da união de materiais, normalmente através de impressão de camadas bidimensionais. Na manufatura aditiva o projeto começa em um software CAD (Computer Aided Design), tecnologia esta que traz ganhos por estar em formato digital, como diminuição de estoque, menor desperdício de matéria prima. Tendo em vista que o arquivo pode ser impresso a qualquer hora, isso inclui artigos decorativos, peças mecânicas, joalheria, vestuário, entre outros ramos beneficiados pela tecnologia 3D [2]. Gomes [3] afirma que tal tecnologia é a mais adequada para a prototipagem rápida ou aditivo de manufaturamento.

Entre os métodos mais comuns de impressão 3D utiliza-se a modelagem por deposição fundida (FDM), neste método se usa um filamento, termossensível. O filamento se desenrola do carretel e passa pelo bocal da máquina onde será aquecido e ganha a forma de um cordão fino [03]. Assim vão sendo construídas as camadas do objeto [04]. Na figura 01 é possível visualizar o sistema de Deposição Fundida da Manufatura Aditiva:

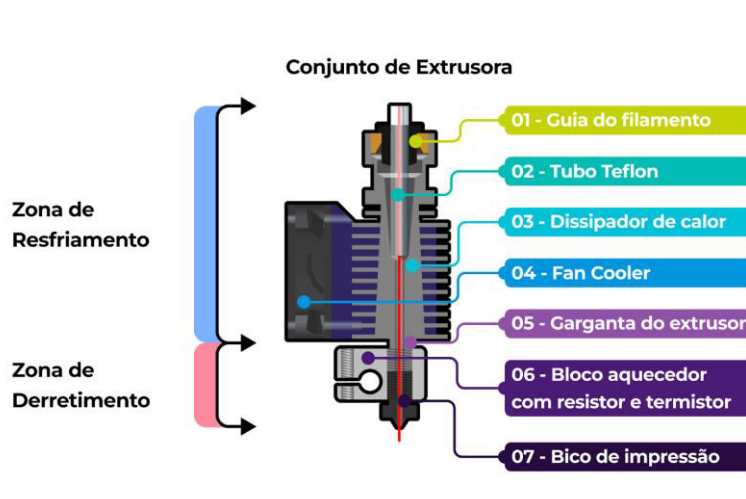


Figura 01: Sistema de Deposição Fundida (FDM) **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Como qualquer outra tecnologia, a manufatura aditiva também possui pontos que precisam ser melhorados e limitações, um dos principais problemas que essa tecnologia traz é emissão de compostos orgânicos voláteis que trazem um agravamento na qualidade do ar onde a impressora se localiza, elevando assim riscos à saúde de quem trabalha no local [05]. Junto com a emissão dos compostos também existe a emissão de uma partícula ultrafina comparável aos objetos impressos 3D, sendo bastante associada a inflamações no sistema pulmonar aumento em morbidade e mortalidade. E a inalação de componentes orgânicos voláteis está relacionada a efeitos adversos, incluindo irritação no sistema respiratório, efeitos sensoriais e formação de câncer [06].

Contudo, além destes desafios relacionados à segurança do processo produtivo, conceitos ligados à sustentabilidade de maneira ampla como “fim de ciclo de vida”, “berço ao berço” e

“economia circular” podem ser discutidos dentro do contexto da impressão 3D. Assim, a partir da realização de uma pesquisa sistemática da literatura, o presente artigo tem como objetivo principal a construção de uma revisão sistemática da literatura relacionando a impressão 3D com conceitos de sustentabilidade, especialmente a circularidade, conseguindo assim destacar os principais avanços dessa relação. Na pesquisa foi escolhido o portal Science Direct para fazer a buscas de artigos dos últimos 5 anos sobre a relação entre os temas, levando em consideração a relevância do portal no meio acadêmico.

2. Contextualização da Manufatura Aditiva e seu impacto ambiental

O panorama atual reflete uma ampla integração da sustentabilidade em diversos processos da MA. A teoria do triplo resultado da sustentabilidade demonstra que o êxito empresarial é influenciado pela interação positiva entre economia, sustentabilidade ambiental e social [07], isso aprimora a lucratividade, atende às necessidades das partes envolvidas e preserva os recursos naturais [08].

No que diz respeito aos materiais mais utilizados na impressão 3D, encontra-se borracha, papel, resinas, metais e plástico, dependendo das particularidades do projeto definido [09]. Vale destacar que apesar de não ser tão popular, existem impressoras que usam a extrusão para imprimir artefatos de cerâmica e até mesmo alimentos [09]. A partir da Segunda Guerra Mundial houve um aumento na utilização de polímeros sintéticos, isso deve-se ao fato dos investimentos em pesquisa básica, principalmente para a indústria automobilística [03]. Neste contexto, os polímeros mais utilizados na impressão 3D, ainda são os sintéticos, que tiveram sua evolução na segunda metade do século XX, e que em sua maioria são derivados do petróleo, e que são de difícil degradação [10]. Geralmente, depois do descarte de peças de polímeros sintéticos ainda são necessários mais de 100 anos para a sua decomposição [03]. Para estes polímeros busca-se a implementação do reuso e da reciclagem, dentro de um ciclo tecnológico [11].

Por outro lado, as questões de fim de ciclo de vida colaboraram para a preocupação global com o uso de polímeros sintéticos, fomentando assim a pesquisa e o início da utilização de matérias biodegradáveis, dando destaque à decomposição [12], no sentido de implementar também o ciclo biológico. A Partir dos anos 2000 foi possível notar a tendência de demandas com materiais menos agressivos ao meio ambiente como por exemplo o plástico vegetal [13]. Sendo assim, se tornou possível o desenvolvimento de alguns tipos de polímeros ambientalmente amigáveis, entre eles os polímeros verdes, biopolímeros e polímeros biodegradáveis, que estão associados ao conceito de sustentabilidade [14].

Os polímeros biodegradáveis caracterizam-se pela sua degradação feita através de microrganismos, como fungos e bactérias [12]. No mercado encontram-se os polímeros biodegradáveis fabricados por materiais naturais como celulose, quitina, amido, entre outros; ou sintéticos como por exemplo o poli (álcool vinílico) (PVA) [15]. O polímero PVA ainda é considerado como um polímero completamente biodegradável [16]. Ainda no que diz respeito a polímeros, com baixo impacto ambiental, utilizados na impressão 3D, alguns ainda podem ser picados e reciclados e até mesmo biodegradados na natureza, e podem ser encontrados tanto em pó, em resina e em acrílico [17].

Neste cenário, há diferentes opções de polímeros para utilização na MA, e cabe aos projetistas e consumidores decisões importantes ao longo do ciclo de vida, especialmente no que diz

respeito ao consumo de recursos e à geração de resíduos. Para muitos especialistas, a Manufatura Avançada (MA) é amplamente reconhecida como uma abordagem ambientalmente amigável em comparação com os processos de fabricação clássicos. Essa tecnologia contrasta com os métodos de fabricação subtrativa e oferece suporte a uma diversificada gama de aplicações [18]. A Comissão Europeia, por meio do Digital Transformation Monitor de 2017, apresentou estatísticas reveladoras, ao investigar a natureza disruptiva da impressão 3D, previu-se que até 2050, essa tecnologia poderia potencialmente economizar até 90% da matéria-prima necessária para processos de fabricação convencionais.

3. Procedimentos Metodológicos

A revisão sistemática da literatura foi desenvolvida a partir de publicações já existentes, como livros, teses, artigos, entre outros [19]. Segundo Conforto [20], primeiro se estabeleceu o problema de pesquisa: “Pesquisar como artigos acadêmicos investigam o fim do ciclo de vida e a reutilização dos filamentos com sugestões menos agressivas para o meio ambiente?”

Em seguida definiu-se o portal Science Direct, para a seleção dos artigos, devido a sua relevância na comunidade científica. Foi então definida a string de busca, a qual envolve três áreas de estudo: i) Fim do ciclo de vida; ii) Manufatura Aditiva e iii) Filamentos. Após testes a string definida foi ((“3d print” OR “additive manufacturing” AND “filament”) AND (“end of life” OR “Circular economy”)), os operadores booleanos escolhidos foram, OR e AND, conseguindo assim uma melhor busca com as strings definidas, assim conseguindo melhores resultados para o estudo da manufatura aditiva juntamente com os filamentos e para estudar questões de fim do ciclo de vida dentro dos filamentos. A busca resultou em 588 artigos com os seguintes critérios de inclusão de artigos foram selecionados filtros: i) trabalhos de 2023 a 2019, últimos 5 anos; ii) Artigos revisados por pares e a artigos de pesquisa; iii) Artigos abertos, livre acesso. os quais após passarem pelos filtros de pesquisa restaram 159 artigos, estes passaram por um filtro de leitura dos títulos em que foram selecionados 13 artigos para leitura na íntegra.

Esses artigos foram avaliados para fazer a relação de resultados relacionados a: i) Manufatura Aditiva; ii) Economia Circular; iii) Final do ciclo de vida [20]. Inicialmente, os dados coletados durante a pesquisa realizada no Science Direct foram utilizados para a construção de quadros informativos. Este processo envolveu uma análise cuidadosa dos dados, com foco particular em artigos de revisão e pesquisa. O objetivo era compreender as tendências e padrões emergentes na literatura disponível a fim de fornecer uma visão abrangente do estado atual do campo. A seguir na tabela 01 é apresentado os dados dos arquivos selecionados.

Nome do Artigo	Autores e Ano	Periódicos
A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed: Product with PLA, ABS & PETG Materials	(Kumar, et al., 2022)	Procedia CIRP, v. 107, p. 15-20
Additive Manufacturing for Sustainability and Circular Economy: Needs, Challenges, and Opportunities for 3D Printing of Recycled Polymeric Waste	(Rashid; Koç, 2023)	Materials Today Sustainability, p. 100529
Additive manufacturing in cities: Closing circular resource loops	(Valera, et al., 2023)	Circular Economy, p. 100049
Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review	(Kokare; Oliveira; Godina, 2023)	Journal of Manufacturing Systems, v. 68, p. 536-559

Life cycle assessment of filament production in distributed plastic recycling via additive manufacturing	(Caceres-Mendoza, et al., 2023)	Cleaner Waste Systems, v. 5, p. 100100
Net zero on 3D printing filament recycling: A sustainable analysis	(Oladapo, et al., 2023)	Science of the Total Environment, p. 165046
Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy	(Sanchez, et al., 2020)	Journal of Cleaner Production, v. 264, p. 121602
Summary and derived Risk Assessment of 3D printing emission studies	(Romanowski, et al., 2023)	Atmospheric Environment, v. 294, p. 119501
Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives	(Colorado; Velásquez; Monteiro, 2020)	Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 4, p. 8221-8234
Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing	(Jayawardane, et al., 2023)	Sustainable Manufacturing and Service Economics, p. 100015
Technology adoption, global value chains and sustainability: The case of additive manufacturing	(Sanguineti; Magnani; Zucchella, 2023)	Journal of Cleaner Production, v. 408, p. 137095
The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa	(Oyinlola, et al., 2023)	Resources, Conservation & Recycling Advances, v. 17, p. 200129
Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing	(Olawumi, et al., 2023)	Science of the Total Environment, v. 905, p. 167109

Tabela 01: Artigos Selecionados **Fonte:** Elaborado pelos Autores (2023)

4 Resultados e Discussões

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, é crucial destacar que a questão da sustentabilidade ainda permanece pouco explorada.

Desde 2015, quando o conceito de Economia Circular foi apresentado pela Fundação Ellen MacArthur houve um aumento notável no volume de estudos nestes campos, indicando um crescente interesse e reconhecimento da importância de tópicos relacionados à circularidade na comunidade científica. Esta pesquisa focou nos últimos 5 anos, quando o conceito já estava consolidado e o aumento mais nítido. Kumar [21] afirma que os resultados da comparação entre PETG, PLA e ABS mostraram que o PETG é o mais sustentável, seguido pelo PLA e, por fim, o ABS. Embora o PLA seja biodegradável, ele teve os maiores impactos negativos na depleção de água e ecotoxicidade de água doce [21]. Destaca-se a importância da reciclagem, especialmente para PLA e ABS, com a extração de matéria-prima para o PLA tendo o maior impacto negativo relacionado à água. Essas conclusões são essenciais para orientar a escolha de materiais na fabricação de produtos 3D, considerando não apenas suas propriedades técnicas, mas também seus efeitos ambientais durante todo o ciclo de vida.

Para Jayawardane [22], a avaliação do ciclo de vida (ACV) e o custo do ciclo de vida (CCV) são aspectos cruciais na determinação da sustentabilidade dos métodos de fabricação, como a fabricação aditiva e subtrativa. A ACV é uma metodologia que examina o impacto ambiental de um produto desde a extração de matérias-primas até o descarte final, permitindo identificar os impactos ambientais associados à produção de peças. Ao aplicar a ACV na fabricação, é

possível comparar o desempenho ambiental desses métodos, identificar pontos críticos de impacto e orientar decisões para melhorar a sustentabilidade.

Por outro lado, o CCV avalia os custos ao longo do ciclo de vida de um produto, incluindo produção, manutenção, uso e descarte. Isso proporciona uma compreensão abrangente dos custos envolvidos na produção de peças, desde os custos diretos de fabricação até os custos indiretos ao longo do ciclo de vida do produto. Integrando o CCV à avaliação da sustentabilidade da fabricação aditiva e subtrativa, é possível analisar não apenas os impactos ambientais, mas também os aspectos econômicos, oferecendo uma visão completa do desempenho sustentável. Assim, a combinação da ACV e do CCV possibilita uma abordagem holística para avaliar e melhorar a sustentabilidade dos métodos de fabricação, garantindo uma análise completa dos impactos ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida dos produtos fabricados pela manufatura aditiva.

Rashid [23] destaca a importância da reciclagem de polímeros na indústria, abordando a classificação de materiais e os desafios enfrentados nesse processo. São revisadas técnicas avançadas de reciclagem, explorando o uso de polímeros reciclados na manufatura aditiva. O estudo oferece insights sobre práticas sustentáveis e propõe direções para pesquisas futuras, visando melhorar a eficiência e sustentabilidade da reciclagem de polímeros. Também é apresentado um modelo de economia circular para a manufatura aditiva com polímeros reciclados, destacando seu potencial para promover a sustentabilidade na indústria.

O estudo de Oladapo [24], indica que o processo de reciclagem de filamentos de impressão 3D geralmente consome menos energia do que a produção de filamentos virgens. A reciclagem resulta em emissões de gases de efeito estufa mais baixas do que a produção de filamentos virgens. No entanto, para alcançar emissões líquidas zero, é necessário adotar fontes de energia renovável durante a reciclagem e reduzir as emissões relacionadas ao transporte. As principais recomendações do autor são: incluir a adoção de fontes de energia renovável, otimização da logística, incentivos políticos, conscientização do consumidor e investimento em pesquisa e desenvolvimento para melhorar o processo de reciclagem e a qualidade dos filamentos reciclados.

Oyinlola [25], enfatiza a necessidade de cooperação internacional para impulsionar a capacidade de produção e inovação na impressão, além disso seu estudo identificou que a qualidade do filamento usado tem um impacto direto na consistência e previsibilidade da resistência do filamento, especialmente em amostras de plásticos reciclados. Isso destaca a importância de assegurar a qualidade dos materiais empregados no processo de impressão 3D para alcançar resultados uniformes e de alta qualidade.

4 Considerações Finais:

O estudo realizado chegou a conclusão que questões relacionadas ao pós-processamento e final do ciclo de vida estão sempre sendo excluídas dos estudos. Outro ponto interessante foi que de modo geral a MA se mostrou uma solução mais amigável ao meio ambiente devido a menor quantidade de material utilizado e uma melhor utilização do material. Apenas em casos

específicos em que alguns materiais exigiam maiores temperaturas de processamento mostravam maior gasto energético e mais resíduos tóxicos sendo liberados, nesses casos a manufatura aditiva se mostrou mais danosa que a manufatura convencional.

Ao adotar essa abordagem sistêmica, criou-se um corpo de conhecimento substancial que orientará a integração da MA de forma sustentável nas operações industriais. Esse esforço de pesquisa ajudará as empresas a tomar decisões mais informadas, reduzir os riscos e maximizar os benefícios da MA, contribuindo para um futuro industrial mais eficiente e ecologicamente consciente.

É fundamental direcionar esforços para compreender e abordar a interseção entre a manufatura avançada e a sustentabilidade. Isso implica a busca por métodos inovadores que reduzam o impacto ambiental, a otimização do ciclo de vida dos produtos e a adoção de práticas sustentáveis em toda a cadeia de produção.

Referências

- [01]HULL, Charles W. inventor; UVP, Inc., assignee. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. United States patent US, v. 4, n. 575, p. 330, 1986.
- [02]SCHUBERT, C.; VAN LANGEVELD, M. C.; DONOSO, L. A.; Innovations in 3D printing:a 3D overview from optics to organs 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304446>.> Acesso em: 24/04/2024
- [03]GOMES, NEVES, J. et al. Impressão 3D para vestuário: novos paradigmas de design e consumo. *ModaPalavra e-periódico*, v. 13, n. 29, p. 136-156, 2020.
- [04]MIRANDA MORANDINI, M.; DEL VECHIO, G. H. Impressão 3D, Tipos E Possibilidades. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020.
- [05]DAVIS, A. Y.; ZHANG, Q.; WONG, J. P. S.; et al. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers. *Building and Environment*, v. 160, n. March, p. 106209, 2019.
- [06]BYRLEY, P.; GEER WALLACE, M. A.; BOYES, W. K.; et al. Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. *Science of the Total Environment*, v. 736, p. 139604, 2020.
- [07]HARSTVEDT, J. D., Dunaway, D., Bian, L., & Jaradat, R. (2018). An exploratory investigation of Additively Manufactured Product life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 192, 55-70.
- [08]JANJUA, Shahana Y.; SARKER, Prabir K.; BISWAS, Wahidul K. Impact of service life on the environmental performance of buildings. *Buildings*, v. 9, n. 1, p. 9, 2019.
- [09]SILVA, D. N. DA. A tridimensionalidade da superfície vestível e a impressão 3d: processos, estratégias e experimentações. *Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação*, p. 173, 2020.

- [10]MALHERBI, N. M. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a base de polímeros de fontes renováveis e polpa de guabiroba (*Campomanesia xanthocarpa*). 2015.[s.l: s.n.].
- [11]MCDONOUGH, W. e M. Braungart. *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. New York: North Point Press. 2002. 193 pg.
- [12]OZAKI, S. K. Compósitos Biodegradáveis de Resíduos de madeira-PVA modificado por anidrido fáltico. p. 210, 2004.
- [13]ABDULLAH, Z. W. et al. PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, v. 56, n. 12, p. 1307–1344, 201.
- [14]GOMES, NEVES, J. *Moda e Impressão 3D: Estado da arte, tecnologia, materiais e inovação*. 2015 [s.l: s.n.].
- [15]OLIVEIRA, C. B. DE. Influência do peso molecular do polímero na morfologia, interação e liberação de flavonoides em filmes de poli (álcool vinílico). 2018. [s.l: s.n.].
- [16]ARANHA, I. B.; LUCAS, E. F. Poli(Álcool Vinílico) Modificado com Cadeias Hidrocarbônicas: Avaliação do Balanço Hidrófilo/Lipófilo. *Polímeros*, v. 11, n. 4, p. 174–181, 2001.
- [17]DE LIMA, Patrícia Cristina; DUPONT, Mariana Gomes. A impressão 3D no mercado de moda: sustentabilidade e desenvolvimento. *Diálogo com a Economia Criativa*, v. 3,n. 8, p. 102-116, 2018.
- [18]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: Jan 2024
- [19]GIL, A. *Como elaborar projetos de pesquisa*. Atlas: São Paulo, 2007.
- [20]CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, SL da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *Trabalho apresentado*, v. 8, p. 1-12, 2011.
- [21] KUMAR, Rishi et al. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*, v. 107, p. 15-20, 2022.
- [22]JAYAWARDANE, Heshan et al. Sustainability perspectives—a review of additive and subtractive manufacturing. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, p. 100015, 2023.
- [23] RASHID, Ans; KOÇ, Muammer. Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste. *Materials Today Sustainability*, p. 100529, 2023.
- [24]OLADAPO, Bankole I. et al. Net zero on 3D printing filament recycling: A sustainable analysis. *Science of the Total Environment*, p. 165046, 2023.
- [25] OYINLOLA, Muyiwa et al. The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 17, p. 200129, 2023.

[26] CACERES-MENDOZA, Cristian et al. Life cycle assessment of filament production in distributed plastic recycling via additive manufacturing. *Cleaner Waste Systems*, v. 5, p. 100100, 2023.

[27] COLORADO, Henry A.; VELÁSQUEZ, Elkin I. Gutiérrez; MONTEIRO, Sergio Neves. Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 8221-8234, 2020.F

[28] 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>"

[29] KOKARE, S.; OLIVEIRA, J. P.; GODINA, R. Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 68, n. May, p. 536–559, 2023a.

[30] OLAWUMI, Matthew A. et al. Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing. *Science of the Total Environment*, v. 905, p. 167109, 2023.

[31] ROMANOWSKI, Heike et al. Summary and derived risk assessment of 3D printing emission studies. *Atmospheric Environment*, v. 294, p. 119501, 2023.

[32] SANCHEZ, Fabio A. Cruz et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, p. 121602, 2020.

[33] SANGUINETI, Francesca; MAGNANI, Giovanna; ZUCHELLA, Antonella. Technology adoption, global value chains and sustainability: The case of additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 408, p. 137095, 2023.

[34] VALERA, Elias Hernandez et al. Additive manufacturing in cities: Closing circular resource loops. *Circular Economy*, p. 100049, 2023.