

## REVISÃO SOBRE A VIABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS NO MÉTODO DE PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA

Yuri Naves de Oliveira Araújo<sup>1</sup>, [yurinaves@discente.ufg.br](mailto:yurinaves@discente.ufg.br).  
Daniel Fernandes da Cunha<sup>2</sup>, [danielcunha@ufg.br](mailto:danielcunha@ufg.br).

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, CEP: 74610-240, Apto. 101, Qd. 72, S/N.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás, CEP: 74610-240, Apto. 101, Qd. 72, S/N

**Resumo.** A seguinte revisão bibliográfica visa realizar um apanhado das vantagens e as desvantagens do método da manufatura distribuída de materiais poliméricos frente à produção em larga escala (ou centralizada) na tentativa de conter o aumento de plásticos em lixões. Para tal, revisou-se pesquisas relacionadas à de reciclagem dos plásticos na tentativa de analisar a viabilidade do projeto. Em suma, a manufatura distribuída de polímeros por meio da impressão 3D é capaz de produzir peças complexas e com ampla gama de aplicações, quantidades e tipos de itens personalizados, o que é geralmente inviável para o método de produção centralizada. Algumas das desvantagens notáveis desse método são: a perda parcial das propriedades mecânicas após reciclagem (existem estudos que tentam reverter esse fato) e maior tempo para produção de itens. A alteração da finalidade do produto também é considerada a fim de garantir a reciclagem. Estudos confirmam uma maior viabilidade ambiental (menores emissões de CO<sub>2</sub> e de quantidade de energia consumida) da manufatura distribuída frente à produção centralizada para certos produtos com certas características de produção. Tal método é notavelmente benéfico para o meio ambiente e espera-se que melhorias tecnológicas de impressão 3D, tal método seja cada vez mais difundido.

**Palavras chave:** Reciclagem. Plástico. Manufatura. Aditiva. Viabilidade.

**Abstract.** The following bibliographical review aims to summarize the advantages and disadvantages of distributed manufacturing of polymeric materials compared to large-scale (or centralized) production in an attempt to curb the increase of plastics in landfills. To this end, research related to plastics recycling was reviewed in an attempt to analyze the feasibility of the project. In summary, distributed polymer manufacturing via 3D printing is capable of producing complex parts with a wide range of custom applications, quantities, and types of items, which is generally not feasible for the centralized production method. Some of the notable disadvantages of this method are: the partial loss of mechanical properties after recycling (there are studies that try to reverse this fact) and longer time to produce items. Changing the purpose of the product is also considered in order to ensure recycling. Studies confirm a greater environmental viability (lower CO<sub>2</sub> emissions and amount of energy consumed) of distributed manufacturing versus centralized production for certain products with certain production characteristics. Such a method is remarkably beneficial to the environment and it is expected that with technological improvements in 3D printing, such a method will become more and more widespread.

**Keywords:** Recycling. Plastic. Manufacturing. Additive. Viability.

### 1. INTRODUÇÃO

Polímeros tem sido cada vez mais estudados, desenvolvidos e aplicados em novas áreas, tendo se difundido completamente em produtos cotidianos. Eventos como a descoberta da vulcanização da borracha em 1844 (Hage Jr., Elias, 1998) e a produção do primeiro plástico sintético baquelite em 1907 (American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks), demonstrou na época o grande potencial desse tipo de material. Sua alta usabilidade se dá por conta de os materiais poliméricos serem mais leves e possuírem boas propriedades mecânicas, a exemplo de embalagens e garrafas plásticas, canos, borrachas, vestimentas, componentes eletrônicos, estruturais e etc. No entanto, com o uso exacerbado do mesmo e a falta de políticas públicas de reciclagem em alguns países, tem se causado a poluição do meio ambiente não só em seu produto final, mas desde a transformação da matéria prima.

Pelo fato de os plásticos terem longas vidas (alguns com centenas de anos, a exemplo de uma garrafa PET que demora no mínimo um século para ser decomposta) e seu uso ser cada vez mais significativo, a poluição pelo descarte inadequado desses itens já tem causado grandes impactos no meio ambiente como mostra Ritchie e Roser (2018). Não só o descarte inadequado tem aumentado, mas também o incremento anual da produção de plástico, uma vez que, de acordo com os autores a produção tende a aumentar, sendo que em 2015 teve-se uma produção anual de 381 milhões de toneladas de plásticos. Essa grande produção se dá por conta do método de produção em larga escala que viabiliza a produção de enormes quantidades diárias.

O método de produção em larga escala (ou centralizada) possui como princípio redução dos custos devido a fatores financeiros (como a compra de grandes quantidades de matéria prima a fim de receber um desconto no valor de compra, mão de obra barata, financiamentos favoráveis, investimentos e etc.) produzindo centenas e até milhares de produtos diários por conta da alta produtividade, a qual se dá devido a uma linha de produção com maquinários especializados que fabricam itens em poucos minutos e até mesmo segundos. Esse método causa um impacto positivo no valor final do produto devido ao seu baixo custo, entregando um valor comercial módico. No entanto, podemos elencar como pontos negativos desse método a rigidez de produção (não se compra pequenas quantidades ou itens personalizados, pois vender grandes quantidades é o que viabiliza a alta produtividade e para mudar a característica do item é necessário geralmente alterar o maquinário ou partes dele, o que significa alto custo), requer grande quantidade de matéria prima, grande quantidade de energia (se não for oriunda de fonte renovável teremos grande poluição do ambiente, por a mesma poder operar continuamente), muito espaço e etc.

Dessarte, tem-se estudados meios para não só reciclar o plástico, mas também meios de produção divergentes do método de produção em larga escala (ou centralizada), como a manufatura distribuída, a qual tem como princípio a manufatura aditiva de polímeros por meio da impressão 3D. O ramo de impressão tem crescido ultimamente devido às melhoras tecnológicas nas impressoras. Elas têm se tornado cada vez mais eficientes e vem obtendo melhores precisões que suas versões anteriores. Tal método se mostra interessante por o insumo utilizado nessas impressoras (os filamentos) poderem ser de origem reciclada, tendo inclusive empresas atuando nesse ramo, as quais serão apresentadas posteriormente.

Assim, este artigo busca pontuar as diferenças entre os atuais métodos de produção de plástico a partir de estudos bibliográficos, discutindo seus benefícios e suas desvantagens além de elencar possíveis técnicas de viabilização da manufatura distribuída, tendo um maior enfoque na manufatura aditiva de polímeros a partir da reciclagem desses. O artigo também reflete sobre a poluição associada à produção por cada método, apresentando artigos e estudos sobre essa problemática ambiental.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em buscar principalmente artigos em revistas de alto impacto, sendo os mais relevantes e citados neste trabalho, constituintes de revistas de classificação A1, isso para se ter um maior peso no que se é apresentado. Estudou-se esses artigos coletando as partes de maior relevância para a temática aqui proposta. Quanto aos sites utilizados, buscou-se aqueles mais acessados e que demonstram ser fontes insígnias, contando com diversas referências de mesma categoria. Quando a fonte não era respeitável, foi realizada uma análise crítica dos dados, verificando sua coerência com outras fontes a fim de verificar o quanto destoavam escolhendo-se a mais credível e com melhor embasamento metodológico ou bibliográfico.

## 3. RESULTADOS: BENEFÍCIOS E DESVANTAGENS DA MANUFATURA DISTRIBUÍDA

A manufatura aditiva de polímeros tem ganhado cada vez mais ênfase devido ao aprimoramento da tecnologia de impressoras 3D – não só a manufatura aditiva de polímeros como também de metais que tem sido utilizado inclusive na produção de estruturas aeroespaciais- as quais tem-se tornado cada vez mais eficientes. Uma impressora 3D possui a capacidade de produzir peças com geometrias complexas e com a possibilidade de baixa utilização de matéria prima, tendo atualmente diversas aplicações como peças estruturais, utilitários, acessórios, itens decorativos e etc.

A manufatura distribuída consiste em vários pontos de produção independentes, ou seja, várias impressoras 3D distribuídas em uma localidade (em uma cidade por exemplo), como se cada indivíduo possuísse sua própria “indústria” na sua própria casa, além de ter-se propostas de automação para esse tipo de manufatura com padrões da indústria 4.0. A necessidade de ser distribuída é tentar chegar próximo da quantidade produzida com o método centralizado, visto que uma impressão 3D demanda muito mais tempo que um maquinário especializado. Também é possível ter a produção sob demanda, o que é um diferencial contra o método centralizado que não se produz apenas uma peça quando necessário, produz-se grandes lotes para que seja viabilizado o processo, pois além da grande energia gasta pelo maquinário, o mesmo tem que se pagar devido ao seu alto custo. Produtos sob demanda podem ser atendidos pela manufatura distribuída não só em quantidade, mas também como em personalização (cor, comprimento, inscrições em alto relevo, etc.).

Um ponto interessante sobre a impressão 3D são as características e parâmetros distintos que podem ser aplicadas na impressão de uma peça. A depender da finalidade, um bloco de plástico ou uma peça meramente decorativa pode possuir uma quantidade menor de preenchimento em uma impressão, ou seja, tal peça não precisa ser totalmente preenchida com

matéria prima para atender a sua função (internamente há uma espécie de malha ou estruturas internas como a “colmeia” que é feita para dar a robustez interna necessária), economizando-a e evitando maior quantidade de plásticos no meio ambiente. Não necessariamente uma impressão com pouco preenchimento significa gerar uma peça “frágil”, parâmetros diferentes de impressão como o número de filetes da parede e sua altura, quantidade de preenchimento e como esse preenchimento é distribuído (o tipo de malha ou estrutura interna) pode gerar diferentes propriedades mecânicas no material a depender de sua aplicabilidade.

Uma desvantagem nítida entre esse método e o de larga escala que já foi dito é a quantidade produzida e o tempo de produção para cada item. Apenas para elucidar, maquinários especializados produzem uma peça em menos de 1 minuto (ou até em menos tempo como é o caso de moldes por injeção por sopra), já a impressão 3D pode demorar horas para criar uma peça, mesmo sendo uma das melhores impressoras do mercado. Isso ocorre por se ter a deposição de um filete de polímero extrudado em camadas, pois começa-se pela base e vai-se até o topo da peça. Outra desvantagem (aqui para ambos os métodos) é que se pode utilizar energia de fontes não renováveis, e isso provavelmente acarretaria para certos itens a produção distribuída um maior índice de energia incorporada no produto e até maior emissão de gases do efeito estufa.

### 3.1. VIABILIDADE

Estudos como o de Kreiger e Pearce (2013) buscam mostrar a aplicabilidade desse método a partir da produção de peças de reposição para determinados itens, como por exemplo pontas de regadores para garrafas PET, um brinquedo chamado bloco de Neuf e um espremedor de frutas cítricas. Tais itens, caso não sejam mais fabricados ou não possuam um maquinário com matrizes já prontas para a produção, requereriam um alto investimento em maquinário ou matrizes para o mesmo e uma infraestrutura para a produção de algumas poucas quantidades de peças, o que seria inviável para o método da larga escala. Kreiger e Pearce concluíram ao estudar polímeros como o ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) e o PLA (poliácido láctico) que para determinados parâmetros de impressão (sem que afetasse a funcionalidade do item), como quantidade de preenchimento, a produção dos itens supracitados seria mais viável e mais sustentável ambientalmente que na produção convencional, obtendo-se resultados mais animadores quando se utilizados painéis solares fotovoltaicos a fim de se utilizar energias renováveis (pensando em um ponto de produção como um indivíduo em sua residência, a utilização desses painéis contribuiria para a não emissão de gases do efeito estufa e economia energética), além de se poder produzir peças sob demanda. Os resultados foram melhores para o PLA (tendo além disso, ainda outra vantagem por ser um polímero biodegradável) na produção distribuída, isso por o ABS necessitar de uma temperatura mais alta de impressão, que por consequência necessita uma maior energia para ser produzida. No artigo ainda cita-se a quantidade mínima de preenchimento para obter-se tal peça com maior benefício ambiental.

### 3.2. USO DE POLÍMEROS RECICLADOS

Em 2019 no Brasil o volume de plástico pós-consumo reciclado foi de 838 mil toneladas enquanto em 2018 foram recicladas 757 mil toneladas. O índice de reciclagem pós-consumo em 2019 foi de 24%, em 2018 esse número era de 22,1% segundo Abiplast, o que mostra que a reciclagem no Brasil vem aumentando, entretanto não é alto o suficiente para evitar a poluição ambiental. Nesse intuito, estudos relacionados com a reciclagem de plásticos tem se tornado cada vez mais evidentes como o de Mikula et al. (2021), uma vez que faz um apanhado geral de artigos sobre a situação de poluição ambiental por plástico no mundo, mostrando argumentos do porque não se tem uma grande reciclagem desses itens, tais como o fato de ser economicamente mais viável ter maquinário pronto para receber grande quantidade de matéria prima virgem do que se reciclar uma grande quantidade pois tal processo pode ser mais oneroso (tanto economicamente quanto em tempo) visto a necessidade de maquinários específicos para isso assim como processos para a reciclagem como coleta, limpeza e a realização do processo de reciclagem em si.

Geralmente, grande parte dos plásticos quando reciclados e transformados em filamentos de impressão 3D tem a redução de algumas de suas propriedades mecânicas, e esse fato tende a se repetir a cada próxima extrusão (reciclagem e formação de novo filamento), fato comprovado por Gaikwad et al. (2018), o qual demonstra a diferença dessas propriedades mecânicas por meio de testes realizados entre alguns tipos de polímeros como o PLA, ABS e o PC (policarbonato) oriundo de resíduos eletrônicos. Neste artigo ainda são elencadas algumas possíveis teorias para a alteração das propriedades mecânicas após a reciclagem. Para os produtores de itens plásticos, comprar apenas matéria prima é mais interessante que investir em tratamento de reciclagem devido ao custo em tratamento e maquinário que isso implica, tendo ainda que lidar com a vantagem que os produtores tem ao se comprar grande quantidade de matéria prima para obter redução do custo. Isso acaba sendo ainda outro fator desencorajador desse processo, embora haja empresas que já trabalhem com filamentos ou matérias primas de plásticos reciclados, tendo inclusive tratamentos para a melhora de suas propriedades mecânicas (podendo tornar viável para armazenamento de alimentos) como a Eko MB (Re-pet3d, <https://re-pet3d.com/>) e a Reflow (<https://reflowfilament.com/>). Tem-se também outras empresas que fabricam filamentos de impressão 3D a partir de plásticos reciclados elencadas pelo site All3DP (<https://all3dp.com/2/recycled-3d-printer-filament-brands-compared/>). Mikula cita artigos que mostram os impactos gerados na reciclagem de alguns polímeros, que em um primeiro momento se mostram até desmotivadores. No entanto, tem-se também a citação de

estudos com aditivos em polímeros reciclados que tem se tornado bastante promissores, como por exemplo a reciclagem do PET, sendo que o estudo de Santos et al. (2018) mostra resultados de aumentos significativos em propriedades mecânicas de PET reciclado com a técnica de eletrofiiação (electrospinning) contendo fibras de sisal lignocelulósico. Essa técnica ainda pode estar engatinhando, mas se mostra promissora se aprimorada. Tem-se ainda empresas que possuem aditivos que prometem retomar as propriedades mecânicas de alguns polímeros após sua reciclagem como a Imerys com o Steangreen® (<https://www.imerys.com/product-ranges/steagreen>), uma espécie de talco de engenharia (<https://www.imerys.com/minerals/talc>). Embora a empresa foque seu produto na reciclagem de componentes de automóveis, é evidenciado o avanço nos estudos de como amenizar as perdas ou provocar o retorno das propriedades mecânicas dos materiais reciclados.

Atualmente, tem-se na internet o projeto Precious Plastic (<https://preciousplastic.com/>) o qual fornece plantas de um triturador, extrusor e outros maquinários gratuitamente para a reciclagem de plásticos para torna-los filamentos de impressão 3D, havendo também gratuitamente na internet projetos de impressoras 3D para construção, como por exemplo a iniciativa Rep Rap ([https://reprap.org/wiki/Build\\_A\\_RepRap](https://reprap.org/wiki/Build_A_RepRap)). Essa disponibilidade de itens aumenta cada vez mais a capacidade de atrair indivíduos para este tipo de manufatura, uma vez que hoje em dia pode-se construir uma série de utilitários e itens decorativos, tendo sites como All3DP (<https://all3dp.com/1/useful-cool-things-3d-print-ideas-3d-printer-projects-stuff/>) com inúmeras ideias de criação, que podem ser uma fonte de renda para indivíduos com sua impressora 3D. Se esses indivíduos se unem para produzir um certo item, temos a manufatura distribuída. Tal iniciativa fomenta ainda mais a reciclagem de plásticos por fornecer a opção de produzir seu próprio filamento, colaborando assim com o meio ambiente. No entanto, não se tem ainda a preferência desse tipo de filamento para certas aplicações por conta da redução das propriedades mecânicas como citado anteriormente. Entretanto, cabe ressaltar que para produtos meramente decorativos ou que não haja necessidade de ter se propriedades mecânicas próximas ao original, como por exemplo acessórios cotidianos de reposição, esses produtos produzidos a partir de filamentos reciclados são a melhor alternativa tanto de custo quanto para o meio ambiente.

Chong et al. (2015) ainda propõe o design Cradle to Cradle® propõe uma abordagem e estrutura para a produção de itens de impressão 3D a fim de evitar qualquer desperdício durante o processo de fabricação, tentando otimizar o processo de reciclagem. Defeitos de fabricação mesmo na produção centralizada pode representar o descarte de itens que se quiser chegaram a ser utilizados como acontece com o Rechupe (oriundas da contração térmica), logo, no método proposto por Chong et al. minimiza-se o descarte de mais plásticos para o meio ambiente.

#### 4. CONCLUSÕES

Conclui-se então que atualmente existem várias maneiras de viabilizar a manufatura distribuída, como por exemplo a disposição gratuita de plantas de trituradores, extrusores e impressoras 3D. Há também métodos de aprimoramento do processo de impressão, bem como métodos que provocam o retorno das propriedades mecânicas dos materiais reciclados como os utilizados por algumas empresas do ramo, acarretando assim benefícios para o meio ambiente. Espera-se que com a evolução da tecnologia impressoras e painéis fotovoltaicos tornem-se cada vez mais eficientes, para que assim a manufatura distribuída torne-se cada vez mais viável principalmente em relação a manufatura centralizada. A tomada de medidas públicas que viabilizem o processo de reciclagem e a difusão da manufatura distribuída a partir de incentivos, sejam eles econômicos ou a partir de um maior fornecimento de matéria prima através de uma forte política de reciclagem em sua região (como já ocorre em países da Europa) podem acarretar maior adesão da comunidade para esse método. Fomentar pesquisas que visem a retomada das propriedades mecânicas em polímeros reciclados como pesquisada por Santos et. al (2018) podem contribuir para uma maior adesão de produtos reciclados na sociedade, principalmente adesão de empresas para a utilização de matéria prima reciclada, beneficiando não só o meio ambiente como também empresas responsáveis pela reciclagem e transformação da matéria prima.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Programa de Educação Tutorial e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação e Ministério da Educação.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Hage Jr., Elias. *Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros*. 1998, v. 8, n. 2, pp. 6-9. <<https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003>>.
- American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. *Bakelite: The World's First Synthetic*. <<https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html>>.
- Hannah Ritchie and Max Roser (2018) - "Plastic Pollution". Published online at OurWorldInData.org. Set. 2018 <<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>> .

- World Economic Forum. *Impact of the Fourth Industrial Revolution on Supply Chains*. <[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Impact\\_of\\_the\\_Fourth\\_Industrial\\_Revolution\\_on\\_Supply\\_Chains\\_.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Impact_of_the_Fourth_Industrial_Revolution_on_Supply_Chains_.pdf)>. Out. 2017.
- Brecht & Stelzer. *Distributed Manufacturing. Eine Technologievorausschau anhand IT-gestützter bibliometrischer Analyse und Szenariotechnik*. Institute of Technology and Process Management. Mai. 2017. <[https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/4397/ITOP\\_10.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/4397/ITOP_10.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>
- AMFG Autonomous Manufacturing. *The Additive Manufacturing Landscape 2019; An essential guide into the additive manufacturing market today*. <<https://amfg.ai/whitepapers/whitepaper-the-additive-manufacturing-landscape-2019/#>>. 2019.
- 3DFila. “Otimizando a impressora 3D com melhores parâmetros de Infill e Shell”. <<https://3dfila.com.br/otimizando-a-impressora-3d-com-melhores-parametros-de-infill-e-shell/>>.
- Kreiger, M., Pearce, J. M. *Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2013.
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G. et al. *3D printing filament as a second life of waste plastics—a review*. Environ Sci Pollut Res 28, 12321–12333 (2021).
- Abiplast. “ÍNDICE DE PLÁSTICO RECICLADO PÓS-CONSUMO CRESCEU EM 2019, SEGUNDO ESTUDO ENCOMENDADO PELO PICPLAST”. 2 de fev. 2021 <[https://doi.org/10.3390/polym10050538](http://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-plastico-reciclado-pos-consumo-cresceu-em-2019-segundo-estudo-encomendado-pelo-picplast/#:~:text=Em%202019%20o%20volume%20reciclado.foram%20recicladadas%20757%20mil%20toneladas.&text=O%20C3%ADndice%20de%20reciclagem%20p%20C3%B3s.era%20de%2022%2C1%25.></a>>.</p><p>Santos, R. P. O.; Rossi, P. F.; Ramos, L.A.; Frollini, E. <i>Renewable Resources and a Recycled Polymer as Raw Materials: Mats from Electrospinning of Lignocellulosic Biomass and PET Solutions</i>. Polymers 2018, 10, 538. <<a href=)>
- Chong, Siewhui & Chiu, Hsien-Lung & Liao, Ying-Chih & Hung, Shuo-Ting & Pan, Guan-Ting. *Cradle to Cradle @ Design for 3D Printing*. Chemical Engineering Transactions (2015).
- Gaikwad V., Ghose A., Cholake S., Rawal A., Iwato M., Sahajwalla V. *Transformation of E-Waste Plastics into Sustainable Filaments for 3D Printing*. (2018) ACS Sustainable Chemistry and Engineering

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.