

MANUFATURA ADITIVA COMO FERRAMENTA PARA O DESIGN CIRCULAR: o caso Retex

ADDITIVE MANUFACTURING AS A TOOL FOR CIRCULAR DESIGN: The Retex Case

CONCEIÇÃO, Maria Eloisa de Jesus; Doutora; PUC-Rio

mariaeloisa.jcq@dad.puc-rio.br

SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos; Doutor; PUC-Rio

jorge.lopes@puc-rio.br

MAGALHÃES, Cláudio Freitas; Doutor; PUC-Rio

claudio-design@puc-rio.br

Resumo

À medida que as preocupações ambientais aumentam, ocorre uma contínua atualização das tecnologias, abrangendo desde a criação de novos materiais até o desenvolvimento de técnicas inovadoras, com o objetivo de evitar desperdícios de qualquer natureza. A manufatura aditiva destaca-se como uma tecnologia que permite o surgimento de novos processos produtivos e é considerada essencial para a implementação da economia circular. Esta tecnologia desempenha um papel central na redução da distância entre produção e consumo de materiais, além de viabilizar a fabricação de produtos personalizados e sob demanda, e de forma distribuída. Este artigo explora a manufatura aditiva sob a perspectiva da economia circular, fornecendo uma compreensão abrangente das suas implicações na melhoria da sustentabilidade dos sistemas industriais e na criação de novas configurações para a cadeia de suprimentos. Além disso, apresenta o caso do Retex, um material desenvolvido a partir de resíduos têxteis para uso em impressoras 3D.

Palavras Chave: design circular; manufatura aditiva; resíduo têxtil.

Abstract

As environmental concerns increase, there is a continuous update of technologies, ranging from the creation of new materials to the development of innovative techniques, aiming to avoid any kind of waste. Additive manufacturing (AM) stands out as a technology that enables the emergence of new production processes and is considered essential for implementing the circular economy (CE). This technology plays a central role in reducing the distance between material production and consumption, as well as enabling the manufacturing of customized and on-demand products, and of a distributed form. This article explores AM from the perspective of the CE, providing a comprehensive understanding of its implications for improving the sustainability of industrial systems and creating new configurations for the supply chain. Additionally, it presents the case of Retex, a material developed from textile waste for use in 3D printers.

Keywords: circular design; additive manufacturing; textile waste.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o mundo tem testemunhado um aumento significativo nas preocupações ambientais, impulsionando uma necessidade urgente de desenvolver tecnologias sustentáveis que possam mitigar os impactos negativos ao meio ambiente. A crescente conscientização sobre as limitações dos recursos naturais e a necessidade de reduzir a pegada ecológica têm catalisado inovações em diversas áreas, desde a criação de novos materiais até a aplicação de técnicas avançadas para minimizar desperdícios. Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como uma das tecnologias mais promissoras, capaz de transformar profundamente os processos produtivos e promover a economia circular.

A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação que cria objetos tridimensionais a partir de um modelo digital, adicionando material camada por camada. Essa tecnologia contrasta com os métodos tradicionais de manufatura, que geralmente envolvem a remoção de material através de cortes ou subtrações. A principal vantagem da MA reside na sua capacidade de produzir componentes complexos com alta precisão, reduzindo significativamente o desperdício de materiais. Além disso, ela permite a customização em massa e a produção sob demanda, características que se alinham perfeitamente com os princípios da economia circular.

A economia circular (EC) é um conceito econômico que busca redefinir a ideia de crescimento, focando em benefícios sociais amplos e sustentáveis. Ela implica na dissociação da atividade econômica do consumo de recursos finitos e na eliminação de resíduos do sistema. Em vez de seguir o modelo linear tradicional de "extrair, fabricar, descartar", a EC promove um ciclo de produção regenerativo, onde os materiais são constantemente reutilizados e reciclados. A MA é vista como um facilitador chave para este modelo, pois permite a criação de produtos duráveis e recicláveis, diminuindo a necessidade de matéria-prima virgem e a geração de resíduos.

No âmbito industrial, a aplicação desta tecnologia pode resultar em cadeias de suprimentos mais eficientes e sustentáveis. Ela possibilita a produção local e distribuída, o que reduz a necessidade de transporte e, conseqüentemente, a emissão de gases de efeito estufa. Produtos podem ser fabricados próximos ao local de consumo, diminuindo a dependência de complexas redes logísticas globais. Além disso, a capacidade de produzir peças sob demanda elimina a necessidade de grandes estoques, reduzindo o desperdício e os custos associados ao armazenamento.

Para ilustrar essas aplicações, apresentamos o caso Retex, um material desenvolvido na pesquisa de tese intitulada *Design Circular para gestão de resíduos têxteis: a manufatura aditiva como tecnologia capacitadora* (Conceição, 2022) que incorpora os princípios da manufatura aditiva e do design circular. Retex é um material na forma de grânulos, criado a partir de resíduos têxteis provenientes da indústria de moda praia, destinado ao uso em impressoras 3D. Este material inovador não apenas reutiliza resíduos têxteis que de outra forma seriam descartados, como também oferece uma solução sustentável para a produção de aviamentos e acessórios customizados e produzidos sob demanda. Além de reabastecer a própria cadeia de origem, Retex pode ser aplicado em outras cadeias produtivas, demonstrando sua versatilidade e potencial para promover a economia circular em diversos setores industriais.

Este artigo tem como objetivo explorar a interseção entre a manufatura aditiva e a economia circular, fornecendo uma compreensão de como essa tecnologia pode contribuir para a sustentabilidade industrial. Serão discutidos os princípios fundamentais da manufatura aditiva, soluções em materiais reciclados para impressoras 3D, bem como as suas implicações para a cadeia

de suprimentos. Também será apresentado um estudo de caso sobre o uso da manufatura aditiva no design circular, destacando as oportunidades e os desafios na criação de produtos que incorporem esses princípios.

Ao investigar a manufatura aditiva sob a perspectiva da economia circular, espera-se oferecer novas perspectivas para pesquisadores, designers e gestores industriais que buscam implementar práticas mais sustentáveis em suas operações. Compreender como essas tecnologias emergentes podem ser integradas de maneira eficiente e eficaz é crucial para enfrentar os desafios ambientais atuais e futuros, promovendo um desenvolvimento econômico que seja verdadeiramente sustentável e benéfico para toda a sociedade.

2 Design circular: economia circular e pensamento sistêmico

O design circular combina os princípios da economia circular e o pensamento sistêmico para unir materiais, design e modelos de negócios, numa perspectiva inteiramente diferente sobre os produtos. Esse pensamento impulsiona a criatividade e habilita designers a criar de forma mais resiliente e próspera, levando em consideração a eliminação de resíduos e poluição, a circulação de produtos e materiais, e a regeneração da natureza (Conceição, 2022).

Na economia circular (EC), os modelos de negócio, produtos e materiais são projetados para ampliar o uso e reuso, criando uma economia na qual nada é resíduo e tudo tem valor (EMF, 2021). Assim como nos sistemas naturais, o resíduo de um ciclo é reinserido no processo ou torna-se matéria-prima para abastecer outras cadeias produtivas através do planejamento de todas as fases do ciclo de vida do produto. Este planejamento reúne princípios de escolas de pensamento que vieram antes e que serviram de base para a evolução do conceito de EC, como por exemplo, a ecologia industrial, *cradle to cradle* (do berço ao berço), capitalismo natural, economia azul, economia de serviços/desempenho, entre outras, cujas propostas tangenciam os objetivos de uma produção e consumo dentro dos limites planetários (conforme Quadro 1).

Quadro 1 - Escolas de pensamento referência para a economia circular.

Escola	Objetivo	Estratégia	Princípios
Economia do desempenho (Walter Stahel)	Focar na venda de serviços, em vez de bens, internalizando todos os custos.	Combinar design sistêmico, inovação técnica e comercial, no âmbito de economias regionais, como na recomercialização de bens e ampliação do ciclo de vida dos produtos/componentes.	Conservação da natureza; limite da toxicidade; produtividade de recursos; ecologia social; ecologia natural.
Capitalismo natural (Paul Hawken, Amory Lovins e Hunter Lovins)	Sobrepôr os interesses ambientais e empresariais, aumentando o lucro ao mesmo tempo que resolve os problemas ambientais.	Dotar tecnologias inovadoras e reconsiderar práticas nocivas com ênfase no “design sistêmico”.	Aumentar a produtividade de recursos; inspiração na natureza; fluxo contínuo de serviços; reinvestir em capital natural.
Ecologia industrial (Tomas Graedel)	Ajudar as empresas a compreender como usam os recursos-chave, como monitora os fluxos de materiais, energia e água, e como se responsabilizar pelo	Otimizar o consumo de energia e materiais, e minimizar a geração de resíduos através do intercâmbio de recursos.	–

produto durante todo o ciclo de vida.

Economia Azul (Ganter Pauli)	Questionar todos os materiais usados na produção, eliminar resíduos e qualquer subproduto.	Basear soluções na física, usando sistemas naturais de nutrientes, matérias e energia como modelo ideal.	Substituição de uma coisa, por nenhuma outra; cascadeamento de nutrientes e energia
Cradle to Cradle (McDonough e Braungart)	Alcançar a “ecoeficácia” induzindo a inovação e liderança para objetivos positivos.	Encorajar uma abordagem de pensamento sistêmico, reenquadrando o design para torna-lo regenerativo.	Saúde dos materiais; reutilização de materiais; energia renovável; manejo de água; justiça social.

Fonte: Conceição (2022).

A estrutura da EC recomenda o uso de recursos existentes, a redução das ineficiências do processo produtivo e a análise dos resíduos ou subprodutos a partir de uma perspectiva regenerativa, do início ao fim. Entretanto, alguns autores alertam sobre a importância de não confundir circularidade com o pensamento linear em ciclos (Braungart, 2020). Não se trata apenas de um conjunto de procedimentos e meios para recolher e dar encaminhamento pós-venda ou pós-consumo aos bens industriais. A transição para a EC representa uma mudança sistêmica que constrói resiliência em longo prazo, considerando possíveis inovações e estratégias de redesenho das cadeias de suprimento, sob um viés de valor compartilhado.

A essência do pensamento sistêmico está na ideia de que cada parte do sistema influencia o todo. Assim, em cada estágio do processo de design deve-se mover para frente e para trás, entre as necessidades do usuário e a consideração do conjunto de elementos interligados, oscilando continuamente entre estas duas perspectivas, de forma igualmente críticas (EMF, 2021). Ao considerar as interconexões entre as diferentes partes do sistema e compreender como cada elemento se relaciona com o outro, é possível projetar soluções que tenham efeito positivo no sistema em geral, satisfazendo o usuário, mas também, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos.

O melhor aproveitamento dos recursos utilizados na produção de bens começa no projeto. O produto deve ser pensado para que possa ser remanufaturado, reformado ou reciclado, mantendo os componentes e materiais circulando, no mais alto nível de valorização possível.

Na EC a cadeia de suprimentos se transforma em uma cadeia de recursos, melhorando a capacidade de usar materiais secundários (pós-industrial) ao mesmo tempo que estimula o setor de reciclagem (pós-uso). “Além dos fluxos principais, como entrega de produtos duráveis e embalados para atender aos pedidos, pode haver fluxos a granel de volumes previsíveis de subprodutos” (Weetman 2019, p.346). Na abordagem de design circular, a etapa de projeto não é mais uma etapa da cadeia de valor, mas uma atividade que se coloca ao longo de todo o processo (EMF, 2021). O design circular é fundamentalmente sobre enxergar as conexões e projetar sob novos padrões, e como pôr em prática o potencial de cadeias de suprimento circulares, distribuídas, descentralizadas e resilientes.

Nesse sentido, é também importante que designers conheçam melhor os materiais, os avanços nas técnicas de construção, processos, e toda a cadeia de suprimentos, para que possam ampliar as possibilidades de solução em cada etapa do ciclo de vida do produto. Além disso, é preciso aprender a projetar conjuntamente e promover relações entre as diferentes partes interessadas, articulando-as para convergir interesses econômicos e ambientais.

Um dos pontos focais do modelo de EC é promover ativamente a restauração dos sistemas naturais ao mesmo tempo em que busca alternativas para produzir sem causar impactos negativos ao meio ambiente. Suas práticas são norteadas por alguns princípios fundamentais, conforme é apresentado no Quadro 2:

Quadro 2 – Princípios fundamentais da economia circular.

Princípios	Descrição
Projetar resíduos	Não existe resíduo quando um produto é projetado, por intenção, para desmontagem, reforma e remanufatura.
Resiliência através da diversidade	Modularidade, versatilidade e adaptabilidade são recursos que precisam ser priorizados, e os sistemas naturais devem servir de modelo na busca de soluções sustentáveis.
Energia renovável	Todo processo circular deve analisar a energia envolvida no processo de produção, e todos os elementos devem priorizar fontes de energia renováveis.
Pensar em sistemas	Entender como as partes se influenciam dentro de um todo é essencial. O pensamento sistêmico enfatiza o fluxo e a conexão ao longo do tempo, e tem o potencial para abranger condições regenerativas.
Resíduo como nutriente	A capacidade de reintroduzir produtos e materiais em ciclos técnicos, ou biológicos através de loops restauradores não tóxicos.

Fonte: Conceição (2022).

O primeiro passo para a transição da lógica linear para a circular consiste em analisar as oportunidades de inovação nos modelos de negócios das empresas possibilitando a criação de melhores processos, produtos e serviços, para expandir a proposição de valor e capturar valores perdidos e não percebidos por todas as partes interessadas (CNI, 2018). No Brasil, já são identificadas oportunidades de novos modelos de negócios com geração de investimento e emprego como, por exemplo, a empresa Retalhar que se dedica à transformação de uniformes profissionais em novos produtos, promovendo a sustentabilidade e a economia circular.

Um dos grandes desafios para a desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos circular é a integração entre os vários atores envolvidos. Como afirma Weetman (2019), os profissionais de design, abastecimento, fabricação, logística, atendimento a consumidores e manejo de resíduos, precisam trabalhar em estreita colaboração para o desenvolvimento de soluções e melhorias. À medida que o modelo de produção circular se desenvolve e amadurece, essas abordagens atingem outros níveis, incentivando a captação de melhores materiais a partir de fontes resilientes, seguras e confiáveis. As cadeias de suprimento circulares desenvolvem abordagens de ecossistemas industriais, com subprodutos e outros fluxos simbióticos. O foco da cadeia de suprimentos se deslocará dos fluxos diretos, que consistem na entrega de produtos ou serviços de forma convencional, e se concentrará na construção de uma rede de nutrientes que recebe e distribui grande variedade de materiais e produtos. As roupas serão projetadas para serem refeitas, desmontadas e recicladas, estimulando ciclos de inovação e, por consequência, ampliando a infraestrutura de pontos de coleta e de reciclagem.

As abordagens circulares implicam reconsiderar e redesenhar sistemas complexos, envolvendo colaboração e compartilhamento de conhecimento entre todas as partes interessadas. Nesse sentido, o escopo e a escala das cadeias de suprimento mudam profundamente com o

envolvimento crescente tanto no *midstream* quanto no *downstream*.

3 Manufatura aditiva: tecnologia capacitadora para a economia circular

Os capacitadores são os mecanismos de mercado, novos ou renovados, que podem encorajar a reutilização de materiais e aumentar a produtividade dos recursos, e estão divididos em: *abordagens para mudança de mentalidade* – biomimética (Benyus, 2016), química verde (Lancaster, 2016), pensamento sistêmico (Meadows, 2008; Osterwalder & Pigneur, 2010), e inovação frugal (Radjul & Prabhu, 2015) –; e *tecnologias* – manufatura aditiva (Hopkinson, Hague & Dickens, 2005; Volpato, 2017), internet das coisas (Buyya & Dastjerdi, 2016; Veneri & Capasso, 2018), tecnologia autônoma, rastreamento de ativos, big data, computação em nuvem, e novos materiais através de processos bioquímicos e de biorrefino (Tavares, 2018).

A manufatura aditiva exerce múltiplos impactos sobre *midstream* da cadeia (processo de fabricação) e repercute em parte do *downstream* (distribuição). Em uma cadeia de suprimentos circular, a MA reduz consideravelmente a necessidade de transporte de matérias-primas e de produtos acabados, e a necessidade de embalagens primárias, secundárias e terciárias. Além disso, pode ser considerada uma tecnologia ecologicamente correta porque, praticamente, não gera resíduo no processo de impressão.

Volpato & Carvalho (2017) definem a MA como um processo de fabricação por meio da adição de sucessivas camadas de material a partir de formas projetadas virtualmente com o auxílio de sistemas de desenho auxiliado por computador (CAD). Os objetos são fabricados em quatro operações: a primeira compreende a obtenção do modelo 3D, que pode se dá, basicamente, através da modelagem geométrica digital ou do escaneamento digital do objeto; a segunda envolve a exportação de arquivos do modelo no formato STL (*Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language*) e consolidação da peça de acordo com as propriedades fundamentais do material pretendido; a seguinte, inclui o planejamento do processo para a fabricação da camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição do material); e por último, a materialização da peça em uma impressora 3D (ISO/ASTM, 2021). Muitas vezes, o objeto precisa passar por um pós-processamento, como remoção de estrutura de suporte ou limpeza, no entanto, esta é considerada uma etapa separada do processo, uma vez que é realizada após a conclusão do ciclo de fabricação.

As tecnologias de MA se diferenciam umas das outras na forma como constroem suas camadas e/ou pela natureza da matéria-prima utilizada. Os processos estão divididos em três categorias: sistemas baseados em líquidos, *Stereolithography Jetting System*, *Direct Light Processing*, *High-Viscosity Jetting*, *Maple Process*; sistemas baseados em pó, *Selective Laser Sintering* e *Direct Metal Laser Sintering*; e sistemas baseados em sólidos, *Sheet lamination* e *Fused Depositon Modeling (FDM)* (Conceição, 2018; Mwema & Akinlab, 2021).

A MA por fusão e deposição de material (FDM) quando comparada aos outros sistemas, é considerada de baixo custo, de simples manuseio e pode ser utilizada em um ambiente doméstico ou de escritório (Gibson, Rosen & Stucker, 2015a; Trindade, 2019). É uma tecnologia bastante flexível que opera com uma diversidade de materiais como polímeros puros, compósitos de polímero com metais, polímeros cerâmicos, ou qualquer outro material que esteja ou possa ser transformado em uma pasta possibilitando a sua extrusão, e posterior cura ou secagem (Sun et al., 2008). Uma variação dessa tecnologia é Fusão de Granulado Fundido (FGF), cuja diferença é que o material usado na impressora 3D é na forma de grânulos.

Com relação às dimensões de sustentabilidade, o uso da manufatura aditiva torna a cadeia

de suprimentos mais simples e eficiente, reduz necessidade de transporte, apresenta menos perda de material, gera menos resíduo e não depende de moldes (Mojtaba, Torabi & Nonino, 2019). No lugar de grandes volumes de produtos acabados, fabricados em série, é possível produzir somente o necessário para atender cada pedido, possibilitando a customização em massa que é caracterizada pela capacidade de produzir uma peça única de acordo com as especificidades de cada usuário (Conceição, 2018; Weetman, 2019).

A eficiência de recursos, com melhorias nas fases de uso e produção; o prolongamento da vida útil, por meio de reparos, remanufatura e substituições de partes componentes; padrões socioeconômicos mais sustentáveis, como a conexão entre pessoa e produto e relações mais próximas entre produtores e consumidores, estão entre os benefícios potenciais no uso da tecnologia de MA (Despeisse e Ford, 2015; Durão et. al., 2017). Com esta tecnologia é possível projetar cadeias de valor mais curtas, mais localizadas e mais colaborativas, e fabricar de forma descentralizada, autônoma e orientada ao usuário.

3.1 Soluções em materiais reciclados para impressoras 3D

Os polímeros termoplásticos são a principal matéria-prima para os filamentos e grânulos utilizados, respectivamente, nas impressoras 3D FDM e FGF, e os processos de reciclagem para este tipo de material têm evoluído progressivamente.

A reciclagem distribuída, que pode ser entendida como uma “rede inteligente” composta por pequenas unidades de reciclagem coordenadas, é uma forma de lidar com a questão dos resíduos plásticos e apoiar o desenvolvimento da EC (Zhong & Pearce, 2018). Em levantamento realizado na base Scopus, apurou-se que o termo reciclagem distribuída apareceu pela primeira vez em 2013, com estudos dirigidos pela pesquisadora Megan Kreige como, por exemplo, o que analisou o ciclo de vida da reciclagem distribuída pós-consumo de polietileno de alta densidade para filamentos de impressoras 3D (Kreiger et al., 2013). Neste mesmo ano, o pesquisador holandês Dave Hakkens propôs um novo modelo para a reciclagem de plásticos com o lançamento da versão I do *Precious Plastic*, um projeto de código aberto com a proposta de criar e interconectar pequenos espaços de reciclagem para operar em escala reduzida (Hakkens, 2021).

Nos últimos anos, pesquisas e iniciativas com abordagens baseadas na reciclagem distribuída de plástico para tecnologias de MA de código aberto, têm emergido rapidamente (Santander et al. 2020). Sanchez et al. (2020) argumentam que a rápida evolução técnica da MA permite uma nova via para impulsionar a EC através do conceito de *Distributed Recycling Additive Manufacturing* - DRAM (Reciclagem Distribuída via Manufatura Aditiva), que está relacionado ao uso de materiais reciclados como matéria-prima para a produção de filamentos de impressoras 3D.

O trabalho de Sanchez et al. (2020) examinou os atuais avanços nos processos de reciclagem de termoplásticos por meio de tecnologias de manufatura aditiva com base em seis tópicos (recuperação, preparação, composição, matéria-prima, impressão, qualidade), e concluíram que poucos trabalhos exploraram as etapas de recuperação e preparação, enquanto um grande avanço já foi feito nos outros estágios. Além deste resultado, os autores também identificaram potenciais caminhos de investigação no pré-tratamento de material reciclado, a nível local e nas fases de impressão, de forma a conectar o desenvolvimento da DRAM com a ambição da EC a nível micro, através da interação; meso, com a constituição de grupos para intercâmbio de materiais; e macro, com o alcance da interdependência sistêmica.

Os efeitos da reciclagem de um filamento PLA através da análise das propriedades mecânicas do material impresso em 3D, foram determinados por Pillin et al. (2008), que concluíram que o peso molecular e a viscosidade do polímero diminuíram 46% e 80%, respectivamente, após cinco ciclos de reciclagem, comportamento esperado para polímeros de condensação como o PLA. Na investigação, apenas o módulo de tração do PLA permaneceu inalterável.

Mohammed et. al (2017) examinaram o potencial do uso de ABS 100% reciclado para formar filamentos de impressoras 3D FDM, e constataram que o material pode ser reciclado e reformado em filamento sem a adição de material virgem. No entanto, os autores destacam que foram observadas notáveis mudanças nas características do polímero, refletidas pela degradação das propriedades mecânicas durante os testes de tração e, pela diminuição no fluxo de fusão do polímero, o que exigiu a redução da velocidade do raster para obter impressões replicáveis.

A adequação de um tipo de polietileno de alta densidade (HDPE), proveniente de resíduos sólidos urbanos, foi investigada por Angatkina (2018), que relatou desafios relacionados ao empenamento e dificuldade de adesão da primeira camada do material durante a extrusão. Problemas semelhantes foram relatados por Schirmeister et al. (2019), que testaram diferentes materiais como plataforma de construção, obtendo bons resultados com o uso de folhas de SEBS (copolímero de estireno, etileno, butadieno e estireno), que permaneceram intactas após a remoção do objeto impresso podendo ser reutilizada várias vezes.

O uso de filamentos para impressoras 3D produzidos a partir da reciclagem de fibras de poliamida 12 foi estudado por Vidakis et. al. (2021), que submetem o material a seis ciclos de reciclagem, e em cada ciclo realizaram o controle de qualidade do filamento através de um sistema de monitoramento em tempo real com o uso de sensores ópticos (sistema embutido na extrusora). Dentre outras conclusões, os autores identificaram que a partir do quinto ciclo o fluxo do material ficou comprometido, dificultando a extrusão do filamento devido à interrupção do fluxo. Os autores sugerem que uma possível reticulação (ligação cruzada na cadeia polimérica) de baixo grau pode ser o motivo dessa reação.

No experimento realizado por Baumi et. al. (2017) para reciclar fragmentos têxteis de malha, foi utilizada glicerina resultante do processo de produção de biodiesel, para produzir poliamida 66 reciclada em pó. As notas conclusivas da pesquisa evidenciam resultados bem sucedidos, e indicam que o material não sofreu alteração na estrutura química. Como desdobramento, os autores tentam processar o material na forma de filamento para avaliar o seu desempenho em uma impressora 3D FDM.

Do ponto de vista técnico, Sanchez et al. (2020) destacam que a qualidade final é a principal questão para produtos reciclados mecanicamente. Os autores apresentam uma síntese de caracterização técnica com base em três elementos principais para uma avaliação holística da qualidade do material processado, conforme pode ser observado abaixo, no Quadro 3:

Quadro 3 - Síntese de caracterização técnica.

Elementos principais	Descrição
Estrutural e morfológico	Determina a natureza química dos constituintes do polímero reciclado.
Viabilidade de produção e estabilidade	Refere-se às propriedades macroscópicas (térmicas, mecânicas e reológicas) dos reciclados.

Compostos de baixo peso molecular

Refere-se à análise de produtos de degradação (aditivos, impurezas, contaminantes) na estrutura do polímero

Fonte: Conceição (2022).

A abordagem de reciclagem distribuída de plástico como fornecedora de filamentos de impressoras 3D FDM amplia o caráter sustentável desta tecnologia que está entre as mais utilizadas atualmente, tanto para aplicações industriais quanto para uso pessoal. Os atributos da manufatura aditiva, a natureza do processo em si e a variedade de materiais, têm grande potencial para promover cadeias de suprimentos circulares.

3.2 Fabricação local e distribuída: o impacto da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos

Novas estratégias estão sendo exploradas para aproximar produção e demanda, motivadas pela ascensão e implementação de tecnologias digitais na produção, como é o caso da tecnologia de manufatura aditiva que oferece a possibilidade de mudar o paradigma da cadeia de suprimentos.

De acordo com Weetman (2019), a fabricação distribuída tende a ser um elemento-chave na transição para um modo de produção circular. De forma antagônica a produção centralizada tradicional, que fabrica grandes volumes de produtos em série, a fabricação distribuída reestrutura as matérias-primas e os métodos de fabricação para que os processos ocorram muito mais próximos do lugar onde o produto será consumido (Srai et al., 2016).

Também definida como manufatura redistribuída por alguns autores (Ford & Minshall, 2015; Tuner et al., 2019), a fabricação distribuída foi estabelecida pelo *Engineering and Physical Sciences Research Council* (Conselho de Pesquisa em Engenharia e Ciências Físicas), como tecnologias, sistemas e estratégias que mudam a economia e a organização da manufatura, particularmente no que diz respeito à localização da feitura.

A fabricação distribuída apresenta desafios em termos de troca de informação, comunicação e controle entre os locais de produção, mas, como afirma Durão et al. (2017), o ambiente industrial conectado, que se convencionou chamar de Indústria 4.0 ou 4ª Revolução Industrial, pode ser a resposta para superar esses aspectos. A partir de um estudo de caso envolvendo os departamentos de design e de engenharia de uma empresa, Durão et al. (2017) analisaram o desenvolvimento de uma rede de fabricação distribuída bem sucedida, em que o modelo do produto foi desenvolvido na Alemanha, por meio de softwares de modelagem 3D, e a estrutura de fabricação aconteceu no Brasil, sendo a MA o principal processo produtivo.

Considerando as especificidades dos processos de MA, surge um amplo campo de oportunidades para desenvolver meios de produção mais sustentáveis em diferentes níveis (Despeisse & Ford, 2015), e esta é uma tecnologia que tem enorme potencial para melhorar a eficiência dos recursos e viabilizar os modelos de economia circular, com mudanças na escala de fabricação e na distribuição.

Ao avaliar a sustentabilidade do processo de MA ou de qualquer processo de fabricação, deve-se considerar todo o ciclo de vida do produto para que os impactos de cada etapa sejam identificados. Entretanto, majoritariamente, o processo de fabricação através da tecnologia de MA apresenta diversas vantagens para a cadeia de suprimento (conforme Quadro 4).

Quadro 4 - Principais vantagens no uso da MA para a fabricação sustentável

Redução de desperdício	Menos desperdício, devido à natureza do processo aditivo, ao contrário das peças que são produzidas por manufatura subtrativa.
Processo produtivo simplificado	Não há necessidade de uso de ferramentas ou acessórios especializados para utilizar a tecnologia de manufatura aditiva.
Otimização do uso da matéria-prima	Tem a capacidade de construir peças funcionalmente leves, e com resistência mecânica.
Produção mais próxima ao local de uso	Reduz a necessidade de grandes quantidades de matéria-prima na cadeia de suprimentos e transporte.
Eficiência	Eficiente em termos de material quando comparada a processos como usinagem e fundição tradicionais.
Redução de impacto	Menos impacto da peça ao longo de seu ciclo de vida, resultando em menor pegada de carbono, menos energia incorporada e melhor modelo econômico
Eliminação de estoque	Capacidade de criar peças de reposição sob demanda, reduzindo ou eliminando estoque.

Fonte: Conceição (2022).

Para Durão et al. (2017), a fabricação de peças sobressalentes e o seu fornecimento em tempo hábil são atividades complexas para diversos setores, e destacam que a fabricação distribuída de peças de reposição em locais mais próximos do usuário final pode apresentar diversas vantagens como redução do tempo de entrega e redução dos custos com logística.

Uma das notáveis características do uso da MA é a possibilidade de construir formas complexas, com montagem mais simples ou sem montagem, utilizando apenas um tipo de material. Igualmente, pode-se imprimir partes componentes de produtos obsoletos por meio do escaneamento das peças existentes e criar o design com base na imagem escaneada.

A fabricação distribuída também é uma alternativa para enfrentar situações de crise. Nos primeiros meses da pandemia da Covid-19, em 2020, houve uma escassez de equipamentos de proteção individual (EPIs) para os profissionais de saúde, resultado tanto da alta demanda, como da falta de matéria-prima disponível para a produção, devido aos bloqueios em todo o mundo. Diferentes laboratórios de MA em instituições de ensino de diversos países, mobilizaram suas equipes para produzir localmente esses equipamentos utilizando impressoras 3D e arquivos digitais dos modelos compartilhados pela internet. O professor Jorge Lopes, do Núcleo de Experimentação Tridimensional, laboratório que faz parte do Departamento de Artes & Design da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), coordenou um projeto que fez parte de uma rede interinstitucional para desenvolver, avaliar, produzir e distribuir EPIs para hospitais e instituições de referência do estado, utilizando diferentes tecnologias de MA (Santos et al., 2020).

Sob outra perspectiva, há duas questões sensíveis relacionadas ao uso da MA: o direito de propriedade intelectual, quando produtos existentes são escaneados e impressos por terceiros; e a escolha de recursos finitos, como metais, plásticos derivados de petróleo e resina. Todavia, em relação aos materiais, como foi apresentado no subitem anterior, há avanços encorajadores no uso

de termoplásticos reciclados, que aumentam as possibilidades de fluxos circulares, além do desenvolvimento de biomateriais.

A mudança de um sistema de fabricação centralizado para um modelo distribuído torna a cadeia de suprimentos mais ágil, resiliente e responsiva. Além de permitir o redesenho de produtos e processos, o uso da tecnologia de MA também viabiliza a produção customizada e sob demanda.

3.3 Produção sob demanda e customização em massa

Customização em massa é um termo genérico usado para descrever a fabricação de produtos customizados para um mercado de massa. Segundo Pine (1993), através da aplicação de novas tecnologias e novos métodos de gerenciamento, seria possível encontrar alternativas para um novo paradigma de produção, criando opções de customização através da flexibilidade e capacidade de resposta rápida.

Na verdade, a customização em massa é uma proposição incrivelmente atraente tanto para consumidores como para produtores. Os consumidores obtêm um produto a um preço razoável e sob medida que reflete sua seleção pessoal de cores, recursos, funções e estilos. Os produtores, por sua vez, conseguem reduzir seus estoques e despesas gerais de fabricação, eliminar o desperdício em suas cadeias de suprimentos e obter mais precisão de informações sobre demanda. Em outras palavras, a customização em massa é uma proposta de ganha-ganha” (Codoni & Martineli, 2006, p.3) (Tradução livre).

A MA possibilita a produção sob demanda em substituição a produção em série, que resulta no armazenamento de grande quantidade de mercadoria, com prazos muito mais rápidos, redução de custo substanciais e de desperdício, tanto na fase de fabricação, quanto no estágio de recuperação, por meio do uso de materiais mais simples e recicláveis. As principais diferenças entre os processos de produção em massa e customização em massa estão descritas no Quadro 5.

Quadro 5 - Principais diferenças entre os processos de produção em massa e customização em massa.

	Produção em massa	Customização em massa
Foco	Eficiência através da estabilidade e controle.	Variedade e possibilidade de customização através da flexibilidade e resposta rápida.
Objetivo	Desenvolvimento, produção, marketing e entrega de bens e serviços a preços baixos.	Desenvolvimento, produção, marketing e entrega acessível de bens e serviços com possibilidades de customização.
Características	Demanda instável; mercados homogêneos; baixo custo, qualidade consistente; padronização de bens e serviços; produtos com o ciclo de desenvolvimento longo e tempo de vida útil curto.	Demanda fragmentada; nichos heterogêneos; baixo custo e alta qualidade; bens e serviços customizados; produtos com o ciclo de desenvolvimento curto e tempo de vida útil prolongado.

Fonte: adaptado de Conceição (2018).

O uso da MA gera algumas implicações para a cadeia de suprimentos, como designs customizáveis ou exclusivos que podem ser feitos sob encomenda, reduzindo os estoques e o risco de obsolescência, e a produção de peças de reposição, também sob encomenda, e em instalações locais, mantendo os produtos em uso por muito mais tempo e possibilitando o serviço de reparo qualificado para produtos de consumo e para tecnologias.

Como explica Santos (2017), arquivos tridimensionais digitalmente customizados são desenvolvidos para a obtenção da geometria/volumetria desejada, por meio de tecnologias não invasivas de obtenção de imagens, como base para a personalização (como é o caso da digitalização do corpo humano para a confecção de órteses, próteses e equipamentos esportivos). Mas também, é possível fazer objetos customizáveis sem nenhuma digitalização recorrendo ao design paramétrico. Empresas de todos os tamanhos estão usando a MA para criar design de produtos individualizados numa forma de customização em massa. Na indústria da moda, além de acessórios e aviamentos, peças inteiras já foram produzidas utilizando sistemas de manufatura aditiva à base de pó (*Selective Laser Sintering – SLS*), e à base de sólidos (*Fused Deposition Modeling – FDM*) (Conceição, 2018). Muitas pesquisas têm investigado o potencial da fabricação distribuída através da tecnologia de MA, por exemplo, analisando o ciclo de vida ambiental da produção (Kreiger, et al., 2014), desenvolvendo códigos de reciclagem de polímeros para fabricação distribuída (Hunt et al., 2015), e analisando formas de gerenciar e programar serviços distribuídos de manufatura aditiva (Mai et al. 2016).

Associada às ferramentas de virtualização do design e de produção, e de plataformas em nuvem para integração da informação em toda a rede de valor, a MA pode produzir cada peça ou cada objeto, com alto grau de individualização, sem que isto represente perdas econômicas ou restrição de acesso por aumento de custos. A customização em massa levanta uma série de questões, que são vitais para explorar e, obviamente, a grande diversidade de requisitos que podem ser capturados vai requerer técnicas e ferramentas diferentes.

Ao se estabelecer um novo tipo de relação entre pequena e larga escala, e entre global e local, os sistemas distribuídos desafiam os modelos de produção dominantes e sua infraestrutura tecnológica, dando origem a redes capazes de transformar o modelo de produção tradicional.

4 Retex: transformando resíduos têxteis em produtos de valor

O estado do Rio de Janeiro é um dos líderes mundiais na produção de moda praia. No processo de corte destes modelos, há um desperdício médio de 30% de matéria-prima, maioria de origem sintética, e grande parte desse montante acaba descartado em aterros e lixões, onde pode levar séculos para se decompor. Apesar da grande expressão na indústria têxtil e de vestuário, o Brasil não apresenta atividade significativa de reciclagem neste setor, mercado pouco explorado, mas com grande potencial de desenvolvimento, acima de tudo, diante da premência de tornar os processos de produção mais responsáveis e sustentáveis.

Retex é uma startup brasileira, com sede no Rio de Janeiro, que se destaca por sua abordagem inovadora e sustentável no setor de moda e design. Fundada com a missão de reduzir o impacto ambiental da indústria de moda praia, Retex utiliza a reciclagem têxtil e a manufatura aditiva para transformar resíduos têxteis em produtos de alta qualidade e valor agregado, através de seu modelo de negócios baseado na economia circular.

Resultado do desdobramento da pesquisa de Conceição (2022), Retex se apresenta como um material produzido na forma grânulos para impressoras 3D, a partir de resíduos têxteis que seriam descartados de forma irregular, para reabastecer a própria cadeia produtiva de origem, com aviamentos e acessórios, e também cadeias de outros segmentos através de outras aplicações.

Retex (conforme Figura 1) foi inicialmente pensado para ser produzido na forma de filamento, mas com o avanço das pesquisas percebeu-se que produzir o material na forma de grânulos (conforme Figura 2) reduziria custo e etapas dos processos, além de eliminar a necessidade

de uso de componentes de suporte, como carretéis. A partir de estudos complementares, foi evidenciado que o uso de grânulos aumenta em dez vezes a velocidade de impressão e reduz em dez vezes os custos de material em comparação com a impressão 3D baseada em filamentos (Materiais da EXT Titan Pellet, 2023).

Figura 1 – Etapas de transformação do resíduo têxtil em filamento para impressoras 3D.



Fonte: Conceição (2022).

Retex coleta resíduos têxteis de fábricas que fazem parte do Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio, no Rio de Janeiro, classifica-os e realiza o processo de reciclagem têxtil. Ao invés de simplesmente reciclar os tecidos, designers do Retex trabalham para agregar valor aos resíduos, geralmente processados em *dowcycling*, transformando o material resultante em novos itens de moda e outros produtos fabricados com impressoras 3D, que são sustentáveis, desejáveis e comercialmente viáveis.

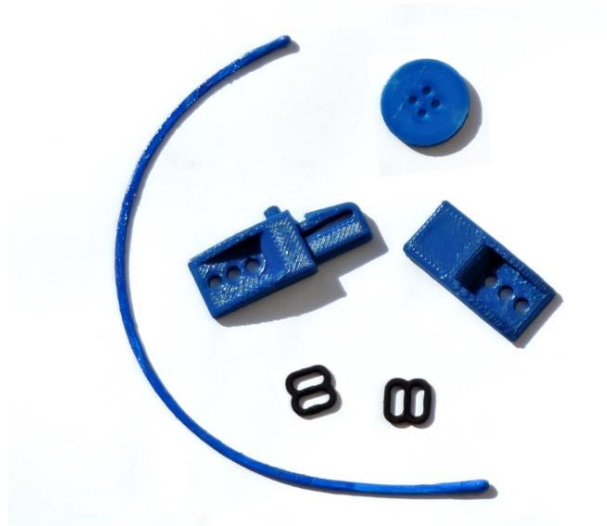
Figura 2 – Retex produzido na forma de grânulos.



Fonte: Conceição (2022).

Na indústria da moda, é possível utilizar aviamentos e acessórios fabricados com Retex (conforme Figura 3) para produzir peças de roupa com base no design monomaterial, uma estratégia de design circular que facilita o processo de reciclagem em fim de vida ao eliminar ou reduzir a necessidade de desmontagem do produto, visto que esta é uma das maiores dificuldades enfrentadas pelo setor de reciclagem têxtil.

Figura 3 – Aviamentos e acessórios produzidos com Retex.



Fonte: Conceição (2022).

O caso Retex exemplifica como a economia circular pode ser aplicada no setor têxtil para criar um modelo de negócios sustentável. Ao transformar resíduos em recursos, a startup reduz o impacto ambiental, e também gera valor econômico e social. Retex mostra que é possível combinar inovação, sustentabilidade e design para criar produtos por meio processos responsáveis, viabilizando o design circular.

5 Considerações finais

A economia circular é um instrumental necessário para conceber modos de produção mais responsáveis e sustentáveis, e funciona como integradora de ações a partir de práticas apoiadas em seus princípios, captando as oportunidades que surgem desse contexto. O modelo de produção circular, em oposição ao sistema linear vigente, tem benefícios que podem ser notados em três dimensões: econômica, com o aumento da eficiência no uso de recursos; social, com a geração de novos empregos em setores como o de reciclagem; e ambiental, com a redução do uso de matéria-prima inexplorada, e, por consequência, a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A circularidade amplia a cadeia de valor e a sustentabilidade dos processos produtivos, mantendo os materiais e recursos na economia pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos. A economia circular aponta para caminhos alternativos que podem remediar o impacto do descarte.

Como ferramenta capacitadora, a tecnologia de manufatura aditiva pode trazer melhorias na eficiência de recursos, com sistemas de fabricação mais eficientes, produção sob demanda,

integração de novos materiais e implementação de novos processos. A manufatura aditiva estabelece um novo paradigma para a produção através da flexibilidade, e da capacidade de resposta rápida, que é o foco de controle para romper com a cadeia produtiva linear.

O estudo de caso do material Retex exemplifica como a esta tecnologia pode ser utilizada para criar soluções sustentáveis no design circular. Desenvolvido a partir de resíduos têxteis, Retex reutiliza materiais que de outra forma seriam descartados, e também oferece uma solução inovadora para a produção de aviamentos e acessórios customizados e produzidos sob demanda. A versatilidade do Retex, com aplicações potenciais em diversas cadeias produtivas, demonstra seu atributo para promover a economia circular em múltiplos setores industriais. Ainda assim, é importante destacar que o material ainda está em processo de aprimoramento, e os protótipos fabricados precisarão passar por uma avaliação qualitativa, tanto por operadores de MA quanto por profissionais do setor de confecção e usuários finais. Através da análise deste caso Retex, este artigo ilustra como a manufatura aditiva pode ser uma importante ferramenta para a sustentabilidade industrial.

Em uma cadeia de suprimentos circular, a manufatura aditiva, pode reduzir consideravelmente a necessidade de transporte de matérias-primas e de produtos acabados, e necessidade de embalagens primárias, secundárias e terciárias. Além disso, pode ser considerada uma tecnologia ecologicamente correta porque, praticamente, não gera desperdício ou resíduo no processo de impressão.

Em conclusão, a manufatura aditiva, alinhada aos princípios da economia circular, representa um passo significativo em direção a um modelo de desenvolvimento econômico mais sustentável e resiliente. A adoção da impressão 3D na indústria da moda apresenta oportunidades econômicas relevantes, e abre novas frentes de negócios como a produção de acessórios, itens de design e componentes industriais customizados e sob demanda, fabricados próximos ao local de consumo, eliminando a dependência de complexas redes logísticas globais. Como resultado, temos menor impacto ambiental e custos de transporte e armazenamento reduzidos.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), Processo SEI 260003/000171/2024. Os autores deste artigo agradecem à Coordenação do PPGD PUC-Rio e ao CTCH PUC-Rio.

6 Referências

- ANGAKTRINA, K. **Recycling of HDPE from MSW waste to 3D printing filaments**. Monografia (Doutorado) – Materials Processing Technology da Arcada University of Applied Sciences, Helsinque, 2018.
- BAUMI, et al. Utilização de glicerina da produção de biodiesel na reciclagem de retraço têxtil. *Rev. Virtual Quim*, 2017, 9:4. Disponível em: <<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/BaumiNoPrelo.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- BENYUS, J. **Biomimética: inovação inspirada pela natureza**. 10ed. São Paulo: Cultrix, 2016. 303p.
- BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W. **Cradle to Cradle: remaking the way we make things**. Random House: Vintage, 2009.

- BUYA, R.; DASTJERDI, A. (ed.). **Internet of things: principles and paradigms**. Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers, 2016. 378p.
- CODONI, F.; MARTINELLI, C. **Mass customization**. Seminar in Customer Relationship Management. 2006.
- CONCEIÇÃO, M.E. Fabricação digital no design de vestuário: digitalização 3D, modelagem paramétrica e manufatura aditiva. Monografia (Dissertação). Departamento de Artes & Design da Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2018.
- CONCEIÇÃO, M.E. Design circular para a gestão de resíduos têxteis: a manufatura aditiva como tecnologia capacitadora. Monografia (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Departamento de Artes & Design, 2022.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. Economia circular: caminho estratégico. Brasília: CNI, 2019, 76p. Relatório Técnico.
- DESPEISSE, M.; FORD, S. The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. **International Conference on Advances in Production Management Systems**, p. 129-136, 2015. Springer. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22759-7_15>. Acesso em: 9 abr. 2021.
- DURÃO, L. et al. Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts. **International Journal Adv Manuf Technol**, v.93, p. 869–880, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0555-z>>. 11 jul. 2021.
- Ellen MacArthur Foundation. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. 2013. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Circular design for fashion**. United Kingdom: Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2021. 207p. Relatório Técnico.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Generalized Additive Manufacturing Process Chain. In: **Additive Manufacturing Technologies**. New York: Springer, p. 46-61, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_3>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- HAKKENS, D. **Precious Plastic**. 2021. Disponível em: <https://preciousplastic.com>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- HOPKINSON, N.; HAGUE, R.; DICKENS, P. (Ed.). **Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age**. London: John Wiley, 2005.
- HUNT, E. Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, p. 24-30, 2015.
- KREIGER, M. et al. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**, v.70, p. 90 – 96, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- LANCASTER, M. **Green Chemistry: an introductory text**. 3ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2016. 392p.
- Materiais da EXT Titan Pellet. 3D Systems, 2023. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/materials/pellet-materials>. Acesso em: 9 jul. 2023.
- MEADOWS, D. **Thinking in systems: a primer**. Vermont: Chelsea Green Publishing, 2008.

- MUTHU, S. (Ed.) **Circular Economy in Textiles and Apparel: processing, manufacturing and design**. Kidlington: Elsevier, 2018.
- MWEMA, F.; AKINLAB, E. Print resolution and orientation strategy. In: __ **Fused Deposition Modeling**. 30 may 2020, p. 17-32. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48259-6_2>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y. **Business model canvas**. Self published, 2010.
- PILLIN, I. et al. Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly (lactic acid). **Polymer Degradation and Stability**, v. 93:2, p. 321-328, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.005>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- PINE, B. **Mass Customisation: The New Frontier in Business Competition**. Massachusetts: Harvard Business School Press, 1993.
- SANCHEZ, F. et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SANTOS, J. A manufatura aditiva no design de produtos. In: __ **Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, p. 143-179.
- SANTANDER, P. et al. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v 154, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104531>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SCHIRMEISTER, C. et al. 3D printing of high-density polyethylene by fused filament fabrication. **Journal Additive Manufacturing**, v. 28, p. 152-159, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- TAVARES, A. **A cadeia produtiva da indústria química no contexto da economia circular**. Monografia (Dissertação). Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- TRINDADE, B. **Renascendo das cinzas: experimentação com resíduos do incêndio no Museu Nacional na recriação de peças do acervo através de manufatura aditiva**. 2020. 121p. Monografia (Mestrado) – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- TURNER et al. Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing. **Sustainability**, v.11(16), 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su11164291>>. Acesso em: 11 jul. 2020.
- VIDAKIS, N. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyamide 12 over Multiple Recycling Processes. **Materials**, v. 14(2):466, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma14020466>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva. In: __ **Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, p. 15-30.
- WEETMAN, C. **Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente sustentável e lucrativa**. São Paulo: Autêntica Business, 2019. 501p.
- ZHONG, S; PEARCE, J. Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. **Recycling**. V128, p 48-58, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.023>>. Acesso em: 9 jul. 2021.