

**PROMOVENDO A SUSTENTABILIDADE POR MEIO DE UMA OFICINA DE
RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE IMPRESSÃO 3D**

***PROMOCIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD A TRAVÉS DE UN TALLER DE RECICLAJE
DE RESIDUOS DE IMPRESIÓN 3D***

***PROMOTING SUSTAINABILITY THROUGH A 3D PRINTING WASTE RECYCLING
WORKSHOP***



Jackeline Lira BREMGARTNER¹
e-mail: jackeline.bremgartner@ifam.edu.br



Vitor BREMGARTNER²
e-mail: vitorbref@ifam.edu.br



Lizandro MANZATO³
e-mail: lizandro@ifam.edu.br



Joaquim dos SANTOS⁴
e-mail: joaquimdossantos701@gmail.com

Como referenciar este artigo:

BREMGARTNER, J. L.; BREMGARTNER, V.; MANZATO, L.; SANTOS, J. Promovendo a sustentabilidade por meio de uma oficina de reciclagem de resíduos de impressão 3D. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, Araraquara, v. 19, n. esp. 1, e024064, 2024. e-ISSN: 1982-5587. DOI: <https://doi.org/10.21723/riaee.v19iesp.1.18341>



- | Submetido em: 21/07/2023
- | Revisões requeridas em: 26/01/2024
- | Aprovado em: 05/03/2024
- | Publicado em: 27/04/2024

Editor: Prof. Dr. José Luís Bizelli
Editor Adjunto Executivo: Prof. Dr. José Anderson Santos Cruz

¹ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus – AM – Brasil. Doutoranda em Ciências de Florestas Tropicais (PPGCFT) do INPA.

² Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Manaus – AM – Brasil. Doutor em Informática. Professor e Pesquisador do Polo de Inovação do IFAM (INOVA). Professor no Programa de Pós-Graduação em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT).

³ Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Manaus – AM – Brasil. Doutor em Ciência em Engenharia de Materiais. Professor e Coordenador do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do INOVA.

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus – AM – Brasil. Doutor em Ciências Florestais. Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPGCFT) do INPA.

RESUMO: No processo de impressão 3D por modelagem de deposição fundida (FDM), filamentos são utilizados, entre eles o ácido polilático (PLA), advindo da cana de açúcar ou do milho, que é derretido durante a impressão para formar peças em camadas tridimensionais. Contudo, com a crescente demanda de impressões 3D em diversos setores da sociedade, a tendência é o descarte irregular e o acúmulo desse material na forma de resíduos. Por isso, temos como objetivo reaproveitar resíduos de impressões 3D feitos do PLA por meio da conversão mecânica de reciclagem. Para isso, realizamos uma oficina de reciclagem de resíduos de impressão 3D com alunos de Nível Médio e Superior do Instituto Federal do Amazonas Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM CMDI). Durante a oficina, perguntamos aos alunos sobre a impressão 3D e a sustentabilidade e ministramos uma aula sobre princípios básicos de impressão 3D e reciclagem de seus resíduos. Posteriormente, os alunos utilizaram a extrusora de parafuso monorroscas para formar o filamento de PLA que pode ser usado novamente em uma nova impressão. Os alunos aprenderam a desenvolver filamentos para impressora 3D, aliando a Educação Ambiental e a Educação Profissional e Tecnológica, estimulando a aprendizagem e tornando-os makers, fabricando o próprio material, podendo, a longo prazo, empreender e trabalhar nessa área. Logo, com esta oficina de reciclagem de PLA, promovemos a economia circular, a fim de que os produtos e materiais sejam reaproveitados, aumentando a vida útil e reduzindo o desperdício de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D. Economia Circular. Sustentabilidade. Educação Ambiental. Reciclagem de Resíduos.

RESUMEN: *En el proceso de impresión 3D por modelado de deposición fundida (FDM), se utilizan filamentos, entre ellos el ácido polilático (PLA), procedente de la caña de azúcar o del maíz, que se funde durante la impresión para formar piezas en capas tridimensionales. Sin embargo, con la creciente demanda de impresión 3D en diferentes sectores de la sociedad, la tendencia es hacia la eliminación irregular y la acumulación de este material en forma de residuos. Por lo tanto, nuestro objetivo es reutilizar los residuos de impresión 3D fabricados a partir de PLA mediante conversión de reciclaje mecánico. Para ello, realizamos un taller de reciclaje de residuos de impresión 3D con estudiantes de Secundaria y Universitarios del Instituto Federal do Amazonas Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM CMDI). Durante el taller, preguntamos a los estudiantes sobre la impresión 3D y la sostenibilidad y les impartimos una clase sobre los conceptos básicos de la impresión 3D y el reciclaje de residuos. Posteriormente, los estudiantes utilizaron el extrusor de un solo tornillo para formar el filamento PLA que podrá usarse nuevamente en una nueva impresión. Los alumnos aprendieron a desarrollar filamentos para impresoras 3D, combinando Educación Ambiental y Educación Profesional y Tecnológica, estimulando el aprendizaje y convirtiéndolos en makers, fabricando su propio material, pudiendo, a largo plazo, emprender y trabajar en este ámbito. Por eso, con este taller de reciclaje de PLA fomentamos la economía circular, para que productos y materiales se reutilicen, aumentando su vida útil y reduciendo los residuos.*

PALABRAS CLAVE: *Impresión 3D. Economía Circular. Sostenibilidad. Educación Ambiental. Reciclaje de Resíduos.*

ABSTRACT: In 3D printing process using fused deposition modeling (FDM), filaments are used, including polylactic acid (PLA), coming from sugar cane or corn, which is melted during printing to form parts in three-dimensional layers. However, with the growing demand for 3D printing in different sectors of society, the trend is towards irregular disposal and the accumulation of this material in the form of waste. Therefore, we aim to reuse 3D printing waste made from PLA through mechanical recycling conversion. To this end, we held a 3D printing waste recycling workshop with High School and Higher students from the Instituto Federal do Amazonas Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM CMDI). During the workshop, we asked students about 3D printing and sustainability and taught a class on the basics of 3D printing and recycling their waste. Later, the students used the single-screw extruder to form the PLA filament that can be used again in a new print. The students learned how to develop filaments for 3D printers, combining Environmental Education and Professional and Technological Education, stimulating learning and making them makers, manufacturing their own material, being able, in the long term, to undertake and work in this area. Therefore, with this PLA recycling workshop, we promote the circular economy, so that products and materials are reused, increasing their useful life and reducing waste.

KEYWORDS: 3D printing. Circular Economy. Sustainability. Environmental Education. Waste Recycling.

Introdução

A impressão 3D, também chamada de manufatura aditiva, cria o objeto em três dimensões, depositando camada por camada (Pinheiro *et al.* 2018). Existem diversas técnicas de impressão 3D como processo de manufatura aditiva (Han *et al.*, 2023; Wong, Hernandez, 2012; Kumar; Prasad, 2021) como: Estereolitografia (*Stereo Lithography Apparatus* – SLA, Sinterização direta de metal a laser (*Direct Metal Laser Sintering* – DMLS), Deposição direta de metal (direct metal deposition – DMD), Sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* – SLS), Manufatura laminar de objetos (Laminated Object Manufacturing - LOM) e a Modelagem de Deposição Fundida (FDM).

A técnica de FDM é atualmente a técnica mais usada de manufatura aditiva de prototipagem rápida de materiais, em que os materiais mais comuns são filamentos termoplástico à base de polímero acoplados na impressora 3D, que são derretidos para formar o objeto, sendo eles o biopolímero PLA (ácido poliláctico) proveniente da cana de açúcar e do milho e os polímeros ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e PETG (tereftalato de polietileno glicol) derivados do petróleo (Tao *et al.*, 2017).

As impressoras 3D estão ganhando cada vez mais espaço no ambiente doméstico ao redor de todo o mundo, a partir da modelagem do objeto a ser fabricado em software e a escolha da impressora 3D que se adequa ao tipo de material a ser impresso, disseminadas também na cultura maker (faça-você-mesmo), no qual a pessoa pode produzir seu próprio objeto (Pinheiro *et al.* 2018; Littlemaker, 2019). A impressão 3D é, também, aplicada na construção de edifícios de concretos, área aeroespacial, biomédica, automotivo, objetos de decoração, culinária, vestuários.

Com a tecnologia de impressão 3D, surgiram novos questionamentos visando a redução de custos e o aprimoramento de técnicas, o que é vital para as linhas de produção e para a sustentabilidade. Por exemplo, durante algumas impressões, é necessário utilizar suportes para a peça principal, que devem ser programados de acordo com o tipo de filamento utilizado, que serão resíduos quando a impressão estiver finalizada. Também, peças com falhas de impressão, incompletas ou quebradas, resultando em desperdício de material e mais resíduos.

Em consonância ao debate de aproveitamento de plásticos, as empresas, as sociedades e os governos têm buscado, ao longo dos anos, alternativas de reduzir, reutilizar e reciclar o resíduo. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), os sete bilhões de habitantes do mundo produzem 1,4 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma média de 1,2 kg de lixo por dia per capita (ONU, 2023). Logo, o problema é global, sendo fundamental que iniciativas sejam estimuladas para diminuir a geração do resíduo e aumentar o tempo de vida útil de cada material.

Para otimizar o uso de materiais e evitar os desperdícios pós-consumo, é necessário efetivar a economia circular, no qual tem como fundamento um *sistema regenerativo dos ciclos de materiais e energia* em um processo contínuo, como ocorre nos ecossistemas naturais e “*isso pode ser alcançado por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem duradouros*”. Assim, o material que outrora poderia ser descartado, volta ao ciclo produtivo (Geissdoerfer *et al.* 2017).

A produção e descarte inadequado de materiais plásticos no cotidiano tornou-se algo natural, como mostra o estudo realizado pelo Fundo Mundial para a Natureza (WWF) e divulgado em 2019, em que o Brasil produz 11 milhões de toneladas de lixo plástico por ano e está em 4º lugar como maior produtor de lixo plástico do mundo, e também é um dos que menos recicla: apenas 1,2% desse material é reciclado (WWF, 2023; De Paoli; Spinacé; Romão, 2009).

Por sua vez, ao utilizarmos da Educação Ambiental para ensinar processos sustentáveis, buscamos criar nas gerações que estão na escola uma nova mentalidade de preservação ambiental, pois

Ao implementarmos um projeto de educação que envolva o meio ambiente e sustentabilidade, estaremos facilitando aos alunos uma compreensão fundamental dos problemas existentes da presença humana no meio ambiente, da sua responsabilidade e do seu papel crítico como cidadãos, desenvolvendo as competências e valores que conduzirão a repensar e avaliar de outra maneira as suas atitudes diárias e as suas consequências no meio ambiente em que vivem (Ross; Becker, 2012).

Em relação ao aproveitamento de resíduos de impressões 3D e estudos sobre o impacto ambiental dos descartes de impressões 3D, temos um cenário ainda limitado e escasso e quase nenhum dado disponível sobre 3D reciclado (Zhao *et al.*, 2018; Anderson, 2017). Ong *et al.* (2020) afirmam que a reciclagem é viável para formar novos filamentos, apesar das propriedades mecânicas reduzidas. Anderson (2017), em seu estudo, relata que os resíduos de PLA tem propriedades semelhantes ao PLA in natura.

Liu, Li e Jiang (2016) explanam que é necessária a fabricação sustentável, imprimindo melhor e mais rápido, tendo configurações de parâmetros ideais para comandos na impressora 3D, bem como a avaliação do ciclo de vida (ACV) que pode ser usada ao modelar os impactos ambientais da impressão 3D. Analisaram que a aplicação de Custo do Ciclo de Vida (LCC) para estudar o benefício econômico da impressão 3D deu alguns resultados promissores. Contudo, os autores relatam que as pesquisas não consideraram o meio ambiente e os aspectos sociais. Os autores concluem que na modelagem de avaliação de sustentabilidade em 3D a impressão precisa integrar os três pilares (ambiental, econômico e social) de forma abrangente, incluindo melhorias em parâmetros de configurações, filamentos e tipos de filamentos mais ecológicos.

Nesse sentido, este trabalho busca, por meio da Educação Ambiental e Sustentabilidade, e da Educação Profissional e Tecnológica, atuar dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2023), que são um grupo de 17 objetivos globais, estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Isto posto, aplicamos uma oficina para o aproveitamento de resíduos provenientes de impressões 3D, especificamente de filamentos PLA, para a fabricação de novos filamentos e o ensino desta técnica a alunos de Ensino Médio e Superior do Instituto Federal do Amazonas, Campus Manaus, Distrito Industrial (IFAM CMDI).

Manufatura Aditiva

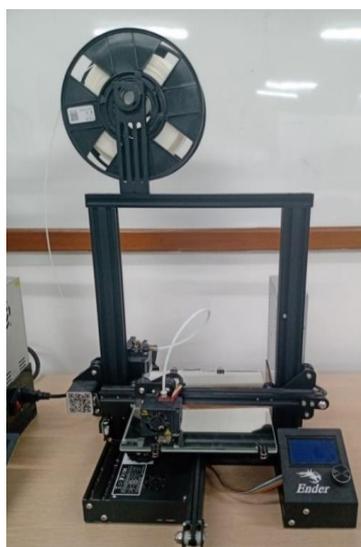
A impressão 3D, conhecida como manufatura aditiva, é uma técnica para produzir objetos em três dimensões a partir de um modelo tridimensional em meio digital. Uma das formas de impressão 3D mais conhecidas é a partir do derretimento de filamentos (Figura 1a) para produzir o objeto, pelo processo de modelagem de deposição fundida (FDM). O funcionamento da impressora 3D (Figura 1b) consiste na deposição nos eixos x, y e z de cada nova camada impressa que se move em um plano (por exemplo, horizontalmente) enquanto a plataforma se move em outra (por exemplo, verticalmente). No processo de FDM, ocorre deposição em um fluxo contínuo por um bocal sob pressão constante e o material é fundido na câmara de liquefação a 200°C antes de entrar no bocal; a camada é, então, depositada sequencialmente até a conclusão do objeto.

Nesse processo, um dos filamentos mais utilizados é o feito de ácido poliláctico (PLA), que é um biopolímero termoplástico constituído por moléculas de ácido láctico de origem biológica obtido do amido de milho ou da cana-de-açúcar, que tem potencial de substituir plásticos derivados do petróleo, sendo biodegradável (Singh *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2017; Pinheiro *et al.*, 2018). O PLA é considerado um substituto valioso para polímeros sintéticos e possui usos diversificados como na impressão 3D, em embalagens, na área da saúde e têxteis, devido às suas fortes qualidades mecânicas, alta rigidez e biodegradabilidade (Singh *et al.*, 2022). A Figura 1c apresenta o PLA em sua forma granulada.

Figura 1 – Materiais para impressão 3D. (a) Carretéis de filamento PLA (b) Impressora 3D da marca Creality, modelo Ender 3. (c) Forma granulada de PLA



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração dos autores.

Os filamentos que vão para o comércio são desenvolvidos em indústrias especializadas em fabricação de matéria-prima para impressão 3D. A formação do filamento dá-se com o uso de uma extrusora de dupla rosca ou monorrosca. Na Figura 2, temos um exemplo de produção de filamento na cor transparente para ser utilizada na impressora 3D. Os *pellets* (grânulos) *in natura* de um polímero são alimentados na extrusora, que por sua vez irá fundir o plástico devido ao aquecimento e o material sairá por um bocal com diâmetro de aproximadamente 1,75 mm, no qual passará por um choque térmico na calha de resfriamento e será puxado por uma rebobinadora, que enrolará o filamento em um carretel.

Figura 2 – Processo de extrusão industrial de filamento PLA



Fonte: Adaptado de <https://www.lgmt.com.br/linha-filamento-impressora-3d>.

As técnicas de obtenção do ácido polilático por fermentação bacteriana do amido e de polimerização do PLA “tornou-o um polímero de fonte renovável biodegradável de maior competitividade no mercado, com preços acessíveis e produção em larga escala, atingido a capacidade de produção mundial de 350 kt/ano em 2014” (Dartora, 2018).

O PLA é um material que tem alta dureza superficial, possuindo uma estrutura mais dura que o ABS. O PLA é bem resistente à abrasão, possui alta qualidade na impressão e ótima adesão entre camadas, sendo considerado um polímero ecologicamente correto em comparação com materiais plásticos de petróleo, como ABS, polietileno e polipropileno. No mercado atual, no Brasil, o quilo de um carretel contendo PLA custa em média R\$ 130,00.

O principal mecanismo de degradação do PLA é a hidrólise, seguido pela biodegradação bacteriana. A taxa de degradação por hidrólise pode ser catalisada por ácidos ou bases fazendo com que o PLA se degrade em semanas ou meses, em períodos inferiores a dois anos. Por outro lado, o alto teor de umidade, pH e temperatura, tanto em condições aeróbias como anaeróbias

são fatores que contribuem para a biodegradação. No entanto, em condições favoráveis ao uso, o PLA mantém suas características e propriedades por anos (Dartora, 2018; Vacciola, 2015).

Paralelamente à questão da biodegradação do PLA, com o avanço da tecnologia e da Indústria 4.0 surgiu um novo conceito: a Sustentabilidade 4.0, que vem da premissa de um novo pensar sobre a utilização dos recursos naturais e o uso das tecnologias em prol do meio ambiente. A evolução do pensamento e da tecnologia são movidos pelos desafios ambientais em relação ao uso dos recursos naturais e a integração do homem na reconexão para mudar pensamentos, atitudes e valores para um comportamento que valorize a floresta e mude hábitos degradadores sobre o meio ambiente. As empresas precisarão rever a conduta de suas práticas ambientais e os consumidores estão mais atentos, exigentes e dispostos a consumir (leia-se pagar por) sustentabilidade (Maya, 2019).

Em função disso, com a preocupação ambiental e a pressão por mudanças de produção mais sustentáveis das indústrias surgiu, então, o modelo de economia circular como uma alternativa ao modelo econômico atual e como uma das soluções para o desenvolvimento sustentável, em um ciclo fechado de fluxos de materiais na economia (Santos; Shiba; Silva, 2019).

O modo de produção e consumo tradicional é realizado de maneira linear por meio da manufatura dos produtos, comercialização, consumo e posterior descarte do produto em aterros sanitários. Porém, esse modelo não considera que os recursos naturais são finitos, o que leva ao desperdício e à pressão pela exploração, que dificulta a capacidade de regeneração de um ecossistema (Gonçalves; Barroso, 2019). Já o modelo econômico circular baseia-se em três princípios: 1. Preservar e aprimorar o capital, através do controle do estoque dos recursos naturais finitos e equilíbrio do fluxo de utilização dos recursos renováveis; 2. Otimizar o rendimento dos recursos, promovendo o aproveitamento e resíduos e estimulando a reciclagem por meio dos 5 Rs (reduzir, reciclar, reutilizar, repensar e recusar) e 3. Estimular a efetividade do sistema (Pontes; Ângelo, 2019).

Durante o ciclo da economia circular, a logística reversa é aplicada no fluxo econômico por ser uma ferramenta importante para a gestão de resíduos não só empresarial como, também, o doméstico. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.3051 de 02/08/2010, no Art. 3º, inciso XII, define a logística reversa como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento,

em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010, on-line).

Materiais e Métodos

No nosso trabalho, o filamento de PLA reciclado foi feito a partir de grânulos (pedaços cortados) de resíduos de PLA de impressões 3D, evidenciando o aproveitamento dos descartes de impressões por meio de uma extrusora, que apresenta propriedades tecnológicas que lhe confere aptidão de uso. Dessa forma, para a oficina ser executada, seguimos os passos listados abaixo na presente pesquisa-ação:

Preparação da oficina

Antes de realizarmos a oficina, efetivamos uma adaptação técnica de conversão mecânica dos resíduos de PLA (Hidalgo-Carvajal *et al.*, 2023; Spinacé; De Paolli, 2005). Coletamos os resíduos de impressões 3D (Figura 3a) feitas com filamentos de PLA da fabricante 3D LAB (3D Lab, 2023), oriundas do Espaço Maker Rivelino Lima do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas do Distrito Industrial (IFAM/CMDI). Em seguida, no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN/IFAM), pertencente ao Polo de Inovação do IFAM (INOVA), os resíduos foram cortados com o auxílio de um alicate de corte em tamanhos de 2 a 4 cm de comprimento e largura (Figura 3b) e foram triturados em um moinho de facas (Figuras 3c e 3d). Em seguida, os pedaços cortados foram pesados (Figura 3e) e, no final, passaram pelo processo de secagem em uma estufa a 90°C por 2 horas (Agaliotis *et al.* 2022), a fim de retirar a umidade (Figura 3f).

Figura 3 – Processo de fabricação do filamento reciclado
(a) Resíduos. (b) Corte dos resíduos. (c) Trituração no moinho. (d) Resíduos triturados. (e) Pesagem do resíduo. (f) Secagem na estufa



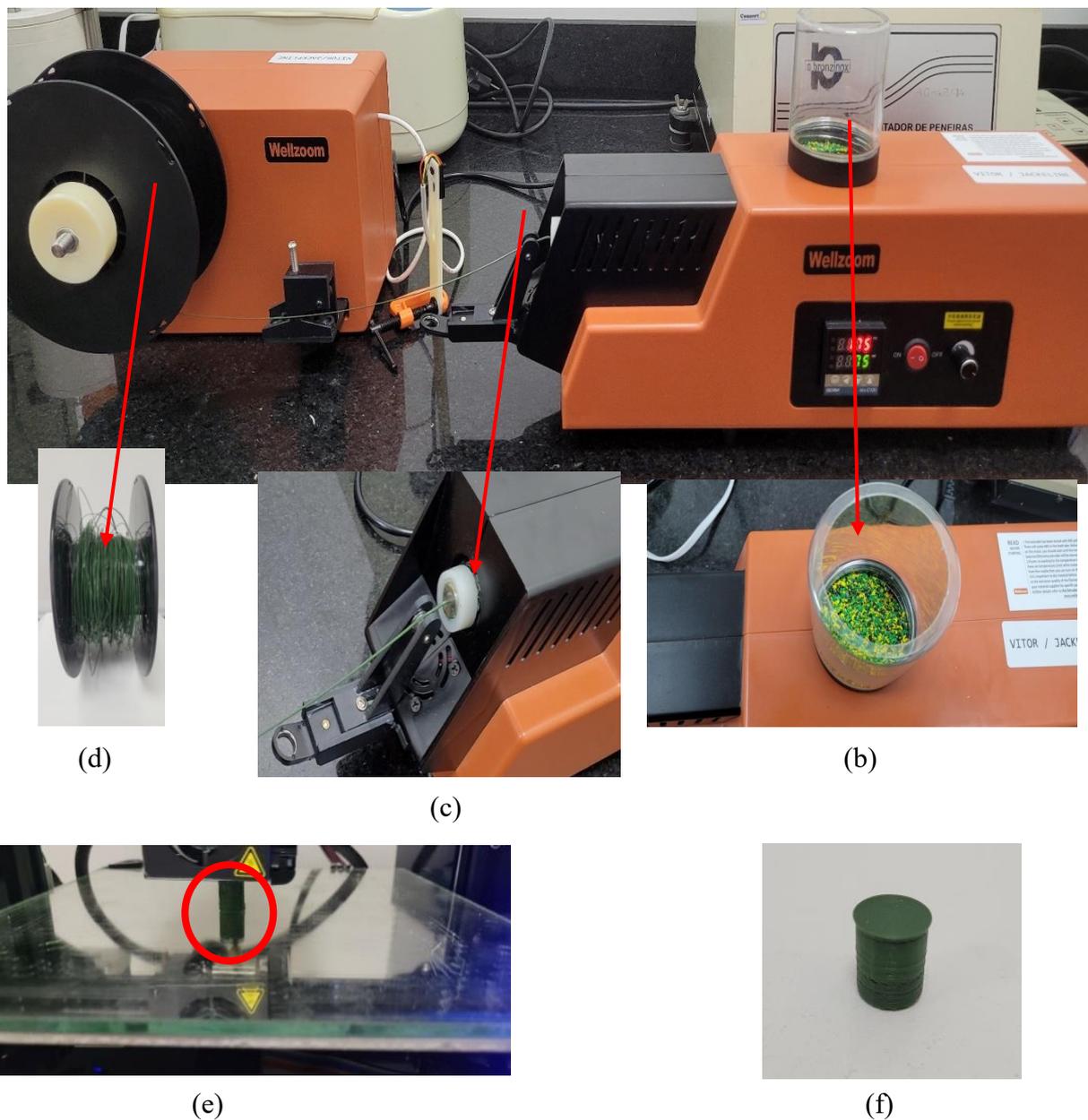
Fonte: Elaboração dos autores.

Obtenção do filamento reciclado

Após a secagem na estufa, obtivemos um filamento feito de resíduos de PLA, inicialmente, a fim de verificar se a extrusora atendia às expectativas de fabricação e de detectar possíveis melhorias no nosso processo de extrusão antes de começar a oficina. A Figura 4a mostra a extrusora de parafuso único e a rebobinadora utilizadas nesta oficina, ambas da marca chinesa *Wellzoom* (Wellzoom, 2023), juntamente com o filamento gerado pelo processo de extrusão. A Figura 4b mostra os resíduos dentro do alimentador e a Figura 4c apresenta uma extrusão sendo realizada com sucesso. O processo de extrusão consistiu primeiramente na alimentação do resíduo PLA na extrusora (Figura 4b), com a temperatura de 175°C por meio de um parafuso monorroscas giratório para a fundição do material, o que resultou na saída do filamento com diâmetro de aproximadamente 1,75 mm (Figura 4c), que seguiu para o enrolamento automático na rebobinadora (Figura 4d). Após a conclusão do processo de extrusão, imprimimos na impressora 3D *Creality* (CrealityStore, 2023) o modelo *Ender 3* (já

mostrada na Figura 1b) uma peça cilíndrica (Figura 4e) para visualizar o objeto impresso 3D a partir do PLA reciclado, que pode ser visto na Figura 4f.

Figura 4 – Obtenção do filamento reciclado na extrusora e impressão de uma peça
Extrusora e rebobinadora. (b) Resíduos no alimentador. (c) Filamento reciclado. (d) Carretel com filamento reciclado. (e) Imprimindo peça 3D. (f) Peça pronta



Fonte: Elaboração dos autores.

Realização da oficina com os alunos

Após o processo da preparação, a oficina de reciclagem de filamentos PLA ocorreu na sala de treinamentos do Polo de Inovação do IFAM. Participaram da oficina 19 alunos do IFAM, dentre eles 2 do curso Superior de Engenharia de Software, 2 do curso Superior de Engenharia de Controle e Automação, 1 do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 5 do Ensino Médio Técnico Integrado em Eletrônica e 9 do Ensino Médio Técnico Integrado em Mecatrônica. Todos os alunos já conheciam a impressão 3D. A oficina durou cerca de 2 horas e passou pelo seguinte roteiro: primeiro, foi feita uma apresentação sobre a Tecnologia dos Materiais e o LSCN, que é o laboratório onde este projeto está sendo desenvolvido.

Em seguida, apresentamos os conceitos sobre a impressão 3D, os tipos de filamentos utilizados, enfatizamos o conceito de polímeros e a importância de aproveitar os resíduos provenientes de impressões 3D, bem como os carretéis vazios após o término do filamento. Foi ministrado, também, como é realizada a fabricação de filamento industrial e em laboratório, e por fim, explicamos sobre os processos executados nas etapas (1) e (2), a fim de que os alunos compreendessem de forma mais clara os passos a serem seguidos para reciclarmos os resíduos de filamentos PLA. Na Figura 5 é apresentada a realização da oficina, no momento em que estavam sendo explicados os passos para reciclagem do PLA mostrados na Figura 3.

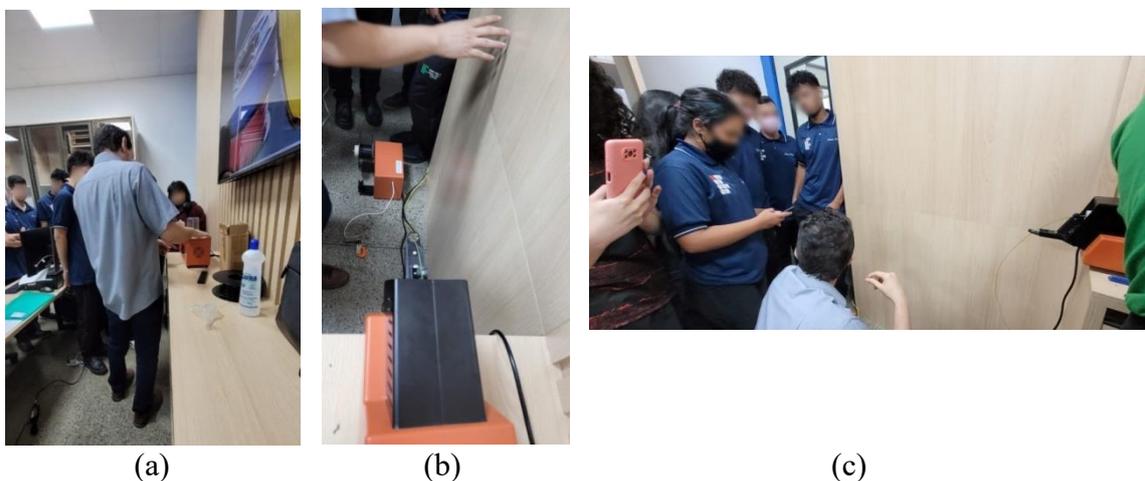
Figura 5 – Oficina de reciclagem de filamentos PLA executada no Polo de Inovação do IFAM



Fonte: Elaboração dos autores.

Em seguida, realizamos a parte prática da oficina, no qual todos os alunos aprenderam a fabricar o filamento reciclado, conforme mostrado na Figura 6. Nessa etapa, utilizamos os resíduos já triturados e secados advindos do processo de preparação em laboratório antes da oficina e explicado aos alunos na aula teórica. Na Figura 6a, explicamos sobre a extrusora; na Figura 6b, apresentamos o funcionamento da mesma para os alunos e na Figura 6c os alunos registraram os momentos de produção de PLA reciclado. No decorrer da oficina, indagamos alguns alunos se eles entendiam sobre sustentabilidade, impressão 3D, o processo de fabricação de filamentos para impressão 3D e o que acharam interessante desta oficina.

Figura 6 – Prática na oficina de reciclagem de filamentos PLA
(a) Apresentação da máquina extrusora. (b) Extrusora em funcionamento diante dos alunos (c) Alunos registrando o funcionamento da extrusora



Fonte: Elaboração dos autores.

Resultados e Discussão

Como resultados das perguntas feitas aos alunos, todos os alunos conheciam a impressão 3D e 68,8% já imprimiram algum objeto 3D. Em relação ao processo de fabricação de filamentos para impressoras 3D, 56,3% já conhecia, porém, não compreendiam de forma mais profunda todas as etapas de fabricação industrial. A respeito da sustentabilidade, entre as respostas mais frequentes, alguns alunos concordaram que a sustentabilidade representa o equilíbrio encontrado na exploração dos recursos naturais e a preservação do meio ambiente, podendo reaproveitar materiais, sendo um meio de tornar a vida do planeta mais duradoura e com qualidade.

Os alunos também acharam interessante poder fabricar o filamento PLA a partir de resíduos de impressões 3D e poder usar o que antes era considerado resíduo em novos objetos 3D. Entre algumas opiniões, foi relatado que a reutilização de materiais que hodiernamente são jogados é essencial para diminuir o volume de descarte no meio ambiente. Além disso, o aproveitamento de resíduos de impressões 3D para fazer novos filamentos torna-se algo relevante e sustentável, que futuramente pode gerar renda para as pessoas que têm interesse pela impressão 3D. Isso se dá uma vez que as organizações procuram conciliar a reciclagem de plástico e a tecnologia de impressão 3D para a criação de soluções inovadoras, de baixo custo e sustentáveis, podendo ser adaptadas para a produção em microempresas, microempreendedores individuais (MEIs) e *startups* (Pires, 2022).

Os alunos também mencionaram que com o reaproveitamento dos resíduos, tem-se a possibilidade de usar quase que todo o filamento para impressão, reduzindo o desperdício e os custos com a fabricação de filamentos. Os alunos se mostraram interessados na área, evidenciando a vontade de fabricar o próprio filamento e até, futuramente, montar uma extrusora própria, utilizando não somente o PLA, como outros materiais para extrusão. Estudos evidenciam que outros materiais podem ser aproveitados no processo de extrusão para impressão 3D como polímeros PET (polietilenotereftalato), polietileno e polipropileno (Ferreira, 2020; Pires, 2022).

Os feedbacks positivos dos alunos mostram que conseguimos despertar a percepção ambiental neles, estimulando o interesse pelo reuso dos materiais que antes poderiam ser descartados de forma indevida no meio ambiente, pois segundo Ross e Becker (2012) a educação ambiental busca soluções e resultados em prol do meio ambiente e, inclusive, preparando cidadãos como agentes transformadores.

Apesar de a carga horária da oficina com os alunos ter sido de 2 horas, foi suficiente para obtermos resultados positivos. Tal carga horária, inclusive, deve-se ao fato de a disponibilidade dos alunos ter sido limitada, uma vez que muitos do Ensino Superior trabalham e os alunos do Ensino Médio são de turno Integral, reduzindo seu tempo livre. Para um trabalho que foi executado pela primeira vez no âmbito do IFAM, integrando a Educação Ambiental e a Profissional e Tecnológica, estes resultados apresentaram-se satisfatórios, confirmando a utilidade da oficina realizada.

Notamos que nesta oficina houve uma percepção ambiental dos estudantes, no qual foi despertada na conscientização de cada aluno a importância da sustentabilidade e da valorização do meio ambiente, mesmo com o progresso industrial. Na nossa abordagem, integramos a área

tecnológica com as ciências ambientais, ao mesmo tempo em que preparamos os alunos para o mundo do trabalho nas áreas Tecnológicas e de Engenharias, assim como também buscamos conscientizá-los a respeito da sustentabilidade. Assim, agregamos a tecnologia da manufatura aditiva para a economia sustentável, além de contribuir na diminuição do volume rejeitado a partir do reaproveitamento da impressão 3D.

Considerações finais

Neste trabalho, apresentamos um relato de experiência de uma oficina de reciclagem de resíduos de impressão 3D, em especial do filamento PLA, desde a obtenção de resíduos, passando pela preparação da oficina até a sua execução prática. Tal processo contribui para a sustentabilidade uma vez que o PLA, apesar de ser biodegradável, é um polímero que pode se acumular na natureza, se não for devidamente reaproveitado.

Foi possível, por meio da oficina, aplicar na prática conceitos de sustentabilidade e tecnologia no aproveitamento de resíduos de impressões 3D para formar filamentos reciclados que voltam ao ciclo de consumo em novas impressões, além de despertar o ensino desta técnica aliando as áreas dos alunos envolvidos, que são Tecnologias e Engenharias. Notamos que nesta oficina houve uma percepção ambiental dos estudantes, no qual foi despertada na conscientização de cada aluno a importância da sustentabilidade e da valorização do meio ambiente, aliada ao progresso industrial.

Como trabalhos futuros, consideramos oficinas de impressão 3D juntamente com o processo de reciclagem com um público-alvo maior, abrangendo outros turnos e mais cursos, com uma carga horária ampla, possivelmente dentro de alguma disciplina que envolva meio ambiente ou como um curso de extensão para alunos que desconhecem a impressão 3D e a reciclagem dos materiais de impressão. Vislumbramos, também, empregar esta técnica em comunidades, dentro do escopo de economia solidária e do empreendedorismo, utilizando resíduos 3D de diversos setores da sociedade como domésticos, industriais, educacionais e espaços makers.

AGRADECIMENTOS: Pesquisa oriunda do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPG-CFT) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Este trabalho teve o apoio do Laboratório de Caracterização e Síntese de Nanomateriais (LSCN), integrante do Polo de Inovação do Instituto Federal do Amazonas (INOVA/IFAM). Este trabalho e sua pesquisa foram realizados com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e também contou com o apoio do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (POSGRAD-FAPEAM), Edição 2022-2023, Resolução nº 005/2022.

REFERÊNCIAS

3D LAB. **Impressão 3D é Aqui**. Disponível em: <https://3dlab.com.br/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

AGALLOTIS, E. M.; AKE-CONCHA, B. D.; MAY-PAT, A.; MORALES-ARIAS, J. P.; BERNAL, C.; VALADEZ-GONZALEZ, A.; HERRERAFRANCO, P. J.; PROUST, G.; KOHDZUL, J. F.; CARRILLO, J. G.; FLORES-JOHNSON, E. A. Tensile Behavior of 3D Printed Polylactic Acid (PLA) Based Composites Reinforced with Natural Fiber. *Polymers*, [S. l.], v. 14, 2022. DOI: 10.3390/polym14193976. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/19/3976>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ANDERSON, I. Mechanical Properties of specimens 3D printed with virgin and recycled polylactic acid. *3D Print. Addit. Manuf*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 110–115, 2017. DOI: 10.1089/3dp.2016.0054. Disponível em: <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/3dp.2016.0054>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. **Lei n. 12.3051, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 15 jul. 2023.

CREALITYSTORE. **Loja Oficial da Creality no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.crealitystore.com.br/impressora-3d-ender-fdm>. Acesso em: 15 jul. 2023.

DARTORA, P. C. **Cristalização e morfologia do poli(ácido láctico) com agente nucleante heteropolissacarídeo de fonte natural**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

DE PAOLI, M. A.; SPINACÉ, M. A. S.; ROMÃO, W. Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.19, n. 2, p. 121-132, 2009. DOI: 10.1590/S0104-14282009000200009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/M977rShFktsw4DpHbqk6KYN/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

FERREIRA, F. F. **Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, [S. l], v. 143, p.757-768, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616321023>. Acesso em: 15 jul. 2023.

GONÇALVES, T. M.; BARROSO, A. F. F. A economia circular como alternativa à economia linear. **Anais do XI Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**, 2019.

HAN, B.; LI, R.; PI, Q.; SHI, Y.; QI, H.; BI, K.; SUN, G. Prediction of deposit characteristics based on the discrete coaxial nozzle during laser direct metal deposition. **Optics & Laser Technology**, [S. l], v. 163, 2023. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109385. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399223002785>. Acesso em: 15 jul. 2023.

HIDALGO-CARVAJAL, D.; MUÑOZ, Á.H.; GARRIDO-GONZÁLEZ, J.J.; CARRASCO-GALLEGO, R.; ALCÁZAR MONTERO, V. Recycled PLA for 3D Printing: A Comparison of Recycled PLA Filaments from Waste of Different Origins after Repeated Cycles of Extrusion. **Polymers**, [S. l], v. 15, n. 17, 2023. DOI: 10.3390/polym15173651. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/17/3651>. Acesso em: 15 jul. 2023.

KUMAR, S. A.; PRASAD, R. V. S. Chapter 2 - Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies. **Additive Manufacturing**, [S. l], p. 17-35, 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-822056-6.00012-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128220566000126>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LITTLEMAKER. **Guia movimento Maker na Educação**. Guia para projetar atividade maker focada na Educação Integral pela BNCC. 2019. Disponível em: <https://materiais.littlemaker.com.br/guia-movimento-maker>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LIU, Z.C.; LI, T.; JIANG, Q. Sustainability of 3D Printing: A Critical Review and Recommendations. In: INTERNATIONAL MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING CONFERENCE, 11., 2016. **Proceedings** [...]. Blacksburg, Virginia: [s. n.], 2016. DOI: 10.1115/MSEC2016-8618. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/308970924_Sustainability_of_3D_Printing_A_Critical_Review_and_Recommendations. Acesso em: 15 jul. 2023.

MAYA, M. H. **Sustentabilidade 4.0**. O novo mindset do desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Editora Vermelho Marinho, 2019. 182 p.

ONG, T.K.; CHOO, H.L.; CHOO, W.J.; KOAY, S.C.; PANG, M.M. Recycling of polylactic acid (PLA) wastes from 3D printing laboratory. In: EMAMIAN, S. S.; AWANG, M.;

YUSOF, F. (ed.). **Advances in Manufacturing Engineering**. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Nature, 2020. p. 725–732.

ONU. **Organização das Nações Unidas**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 15 jul. 2023.

PINHEIRO, C. M. P.; MOTA, G. E; STEINHAUS, C.; SOUZA, M. Impressoras 3D: uma mudança na dinâmica do consumo. **Signos do Consumo**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 15-22, 2018. DOI: 10.11606/issn.1984-5057.v10i1p15-22. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/signosdoconsumo/article/view/128758>. Acesso em: 15 jul. 2023.

PIRES, L, T. **Avaliação técnica da produção de filamentos plásticos para impressão 3D**: comparação de plásticos virgens e reciclados. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Paraná, Jandaia do Sul, PR, 2022.

PONTES, A. T.; ANGELO, A. C. M. Utilização da avaliação do ciclo de vida no contexto da economia circular: uma revisão de literatura. **Sistemas & Gestão**, [S. l], p. 424-434, 14, 2019. DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n4.1576. Disponível em: <https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1576>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ROOS, A.; BECKER, E. L. S. Educação Ambiental e Sustentabilidade. **Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l], v. 5, n. 5, 857–866, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/223611704259>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/4259/3035>. Acesso em: 15 jul. 2023.

SANTOS, M. R.; SHIBAO, F. Y.; SILVA, F. C. Economia circular: conceitos e aplicação. **Revista Eletrônica Gestão e Serviços**, [S. l], v. 10, n. 2, p. 2808 – 2826, 2019. DOI: 10.15603/2177-7284/regs.v10n2p2808-2826. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339205052_Economia_circular_conceitos_e_aplicacao. Acesso em: 15 jul. 2023.

SINGH, T.; PATNAIK, A.; RANAKOTI, L.; DOGOSSY, G.; LENDVAI, L. Thermal and sliding wear Properties of Wood Waste-Filled Poly(Lactic Acid) Biocomposites. **Polymers**, [S. l], v. 14, 2022. DOI: 10.3390/polym14112230. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/11/2230>. Acesso em: 15 jul. 2023.

SINGH, T.; PATTNAIK, P.; AHERWAR, A.; RANAKOTI, L.; DOGOSSY, G.; LENDVAI, L. Optimal Design of Wood/Rice Husk-Waste-Filled PLA Biocomposites Using Integrated CRITIC–MABAC-Based Decision-Making Algorithm. **Polymers**, [S. l], v. 14, 2022. DOI: 10.3390/polym14132603. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/13/2603>. Acesso em: 15 jul. 2023.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A Tecnologia Da Reciclagem De Polímeros. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. DOI: 10.1590/S0100-40422005000100014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

TAO, Y.; WANG, H.; LI, Z.; LI, P.; SHI, S. Q. Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. **Materials**, [S. l], v. 10, 2017.

DOI: 10.3390/ma10040339. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28772694/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

VACCIOLI, K. **Estudo da blenda PBAT/PLA com cargas**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

WELLZOOM. **WELLZOOM Desktop Filament Extruder**. Disponível em: <http://wellzoomextruder.com/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

WONG, K.; HERNANDEZ.; A. A Review of Additive Manufacturing. **International Scholarly Research Network**, [S. l], 2012. DOI:10.5402/2012/208760. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

WWF. **Fundo Mundial para a Natureza**. 2023. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ZHAO, P.; RAO, C.; GU, F.; SHARMIN, N.; FU, L. Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: Na experimental investigation and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, [S. l], p. 1046-1055, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.275. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618319346>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CRedit Author Statement

Reconhecimentos: Pesquisa oriunda do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPG-CFT) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Este trabalho teve o apoio do Laboratório de Caracterização e Síntese de Nanomateriais (LSCN), integrante do Polo de Inovação do Instituto Federal do Amazonas (INOVA/IFAM).

Financiamento: Este trabalho e sua pesquisa foram realizados com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e também contou com o apoio do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (POSGRAD-FAPEAM), Edição 2022-2023, Resolução nº 005/2022.

Conflitos de interesse: Não há conflitos de interesse.

Aprovação ética: Não se aplica.

Disponibilidade de dados e material: Não, pois foi um relato de experiência feita em um minicurso expositivo.

Contribuições dos autores: Todos os autores contribuíram para a escrita e execução das demais atividades que foram objeto deste estudo.

Processamento e editoração: Editora Ibero-Americana de Educação.
Revisão, formatação, normalização e tradução.

