

LIFE CYCLE DESIGN: Estudo da viabilidade de reciclagem de resíduos de Impressão 3D nas dependências universitárias como apoio ao desenvolvimento sustentável.

LIFE CYCLE DESIGN: Assessing the feasibility of recycling 3D printing waste with the support of Feevale University for sustainable development.

TAVARES, Rafael Reche; Mestrando; Universidade Federal do Rio Grande do Sul

rafaelrechetavares@gmail.com

MORISSO, Fernando Dal Pont; Doutor; Universidade Feevale

morisso@feevale.br

ACAUAN, Luiz; Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

luiz.h.acauan@gmail.com

CARÚS, Lauren Arrussul; Doutora; Universidade Feevale

lauren@feevale.br

CÂNDIDO, Luis Henrique Alvez; Doutor; Universidade Federal do Rio Grande do Sul

candido@ufrgs.br

Resumo

Este estudo analisa o crescente uso da impressão 3D e os desafios da reciclagem dos resíduos de PLA provenientes do processo. A pesquisa analisa o ciclo de vida do material, avaliando como a Universidade Feevale pode ser uma aliada no desenvolvimento sustentável. Nas dependências da universidade (Campus II), com o auxílio do Centro de Design, do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais e do Centro de Tecnologias Limpas, foram estabelecidos pontos de coleta, análises de resíduos e etapas de reprocessamento, respectivamente. O objetivo era implementar um modelo de gestão de resíduos circular, aproveitando as instalações universitárias. Os resultados mostraram que ao fortalecer a integração entre diferentes áreas da universidade as chances de viabilizar a reciclagem aumentaram. Como produto, foram obtidas chapas recicladas com distintos padrões visuais. Este estudo também contribui para a conscientização sobre o papel das instituições de ensino superior na promoção de práticas ambientalmente responsáveis.

Palavras-Chave: Resíduos de Impressão 3D, Sustentabilidade, Reciclagem.

Abstract

This study examines the growing use of 3D printing and the challenges of recycling PLA waste from the process. The research analyzes the material's life cycle, assessing how Feevale University can be an ally in sustainable development. Within the university premises (Campus II), with the assistance of the Design Center, the Laboratory of Advanced Materials Studies, and the Center for Clean Technologies, collection points, waste analysis, and reprocessing steps were established, respectively. The aim was to implement a circular waste management model, leveraging university

facilities. Results showed that by strengthening integration among different university areas, the chances of recycling viability increased. As a product, recycled sheets with different visual patterns were obtained. This study also contributes to raising awareness about the role of higher education institutions in promoting environmentally responsible practices.

Keywords: *3D Printing Waste, Sustainability, Recycling.*

1 Introdução

A tecnologia de impressão 3D ganhou popularidade logo após o término do período de vigência de sua patente, nos primeiros anos da década de 1990. A técnica, inicialmente impulsionada pelo aumento das comunidades de desenvolvimento de código aberto e pelo surgimento de iniciativas comerciais centradas em projetos faça-você-mesmo (conhecidos como Do It Yourself - DIY) (KEMPEN, 2019), mostrou-se uma importante aliada no combate à pandemia gerada pelo SARS-CoV-2 em 2020. Nesse período, inúmeras ações foram realizadas para a impressão 3D de equipamentos de proteção individual. Dessa forma, a manufatura aditiva foi apresentada como um método de fabricação com aplicação imediata no atendimento das necessidades da comunidade, o que tornou as impressoras 3D ainda mais difundidas.

Em 2020, com a crise sanitária, a tecnologia de impressão 3D se consolidou. Diversas empresas tiveram seu estoque de máquinas esgotado, e a maioria dos equipamentos foi comercializada para a rede educativa, a fim de confeccionar protetores faciais, respiradores e outros itens, que, em sua maioria, foram doados aos órgãos de saúde (SCHLINDWEIN, 2020). Devido ao baixo custo das impressoras somado ao crescimento exponencial de consumo destes dispositivos e seus insumos por instituições acadêmicas, escolas, pequenas empresas e usuários domésticos também ocorreu um aumento expressivo na geração de resíduos provenientes de impressões malsucedidas e peças defeituosas (MORENO et al., 2021).

Dentre as tecnologias de impressão 3D, a mais difundida faz uso da técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling – FDM), na qual utiliza filamentos poliméricos termoplásticos como a principal matéria-prima, que são fundidos e pressionados através de um bico de extrusão. O bico se movimenta, depositando o material fundido, seguindo um caminho pré-estabelecido pelo software da máquina. Quando o material sai do bico e é depositado na plataforma da impressora, ele resfria e se solidifica, sendo a construída a partir do depósito de camada sob camada (WANGA et al., 2017; VOLPATO, 2018)

Conforme Pereira et al. (2017), a escolha do modelo ideal de máquina depende das especificações do projeto, o mesmo ocorre para a escolha do polímero termoplástico a ser utilizado, visto que cada filamento possui suas próprias propriedades mecânicas e determinações técnicas. Dentre os materiais disponíveis para impressão 3D, encontram o filamento de poli(ácido láctico) (PLA), sendo esse o mais famoso e empregado devido à sua facilidade de processamento e ampla disponibilidade comercial (BESKO et al, 2017; VOLPATO, 2018; SALLENAVE et al., 2022).

Sob condições ideais, os resíduos plásticos gerados pelo processo de fabricação com Impressão 3D devem ser apenas os suportes, partes essenciais para a sustentação e apoio de geometrias complexas. Entretanto, na prática, é comum que ocorram erros no processo, principalmente quando a máquina é operada por usuários inexperientes. Com o aumento das vendas de impressoras alimentadas por material polimérico, identificou-se o aumento da geração de resíduos plásticos, principalmente dos filamentos termoplásticos mais populares, como o PLA (SALLENAVE et al, 2020; MORENO et al, 2021).

Conforme Sallenave et al. (2020), vale ressaltar que o modo de descarte das peças malsucedidas e partes de suporte tem impacto direto na pegada ecológica causada pelo uso da MA. Muitos espaços que usufruem da tecnologia FDM não possuem infraestrutura para o gerenciamento eficaz dos resíduos gerados, sendo misturados ao lixo comum ou estocando-os sem objetivo predefinido, sem orientação para a reciclagem (SALLENAVE et al, 2020; BUHAGIAR, 2022).

No cenário brasileiro, a reciclagem é conduzida por empresas de pequeno porte que operam

com mão de obra barata. O processamento conta com etapas de coleta e separação de resíduos. A coleta, geralmente, é feita por catadores e a separação, realizada de modo manual, ocorre por meio da identificação de símbolos nos produtos (Figura 1) ou pelo reconhecimento do som característico emitido por cada tipo de polímero (SPINACÉ, 2005).

Figura 1 - Simbologia utilizada para identificação de materiais poliméricos



Fonte: Norma NBR 13.230 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008)

É importante destacar que o Brasil apresenta um dos menores índices de reciclagem de resíduos plásticos, registrando apenas 1,28%, enquanto a média mundial gira em torno de aproximadamente 9% (WWF, 2019). Os polímeros que acabam sendo destinados ao reprocessamento, geralmente, são aqueles que possuem simbologia de identificação. No entanto, a maioria destes materiais recicláveis são frequentemente destinados a aterros sanitários ou utilizados como combustível para a geração de energia (SILVEIRA, 2021). Ao serem depositados em aterros, os plásticos provenientes de petróleo podem formar camadas impermeáveis que dificultam a decomposição de materiais orgânicos e polímeros biodegradáveis, como é o PLA. Se destinados à geração de energia através da queima, geram fumaça escura e liberam gases tóxicos para o ambiente (SILVEIRA, 2021).

Devido à rápida popularização da tecnologia, os resíduos provenientes da impressão 3D, embora recicláveis, enfrentam desafios no que diz respeito ao seu destino adequado. Buhagiar (2022) destaca que a maioria dos resíduos de impressão 3D doméstica é separada de outros plásticos para encaminhamento à reciclagem. Conforme o autor, 52,6% dos usuários de impressoras 3D entrevistados por ele indicaram separar os resíduos de impressão de outros plásticos, visando destiná-los à reciclagem. Por outro lado, 21,1% dos usuários descartam o resíduo diretamente no lixo comum, e apenas 13,2% conseguem reutilizar o material para outros fins. Apenas 7% dos participantes da pesquisa afirmam separar o resíduo, mas desconhecem a melhor forma de encaminhamento. Essa problemática é agravada pela carência de infraestrutura para coletar o PLA, juntamente com a ausência de logística e identificação. Classificado pela ABNT como número 7, esse material é categorizado como "outros polímeros" e, durante a etapa de triagem, em cooperativas de reciclagem, por não conter uma simbologia específica do material utilizado para impressão, os resíduos provenientes da manufatura aditiva dificilmente passarão por um processo efetivo de reciclagem.

Por compreender o uso das novas tecnologias, estudar as mudanças na sociedade e suas interações com produtos, além de compreender processos de fabricação e ciclo de vida de materiais o designer desempenha um papel fundamental, podendo atuar como agente social auxiliando na melhor destinação dos resíduos (MANZINI e VEZZOLI, 2011). Partindo dessa premissa, os designers devem assumir a posição de agentes locais e cidadãos comprometidos, explorando formas de inovação colaborativa que abranjam novas conexões. É essencial, ainda, que desenvolvam uma visão abrangente e cultivem o hábito de observar pessoas, lugares, organizações, projetos e ideias para identificar novas oportunidades (THACKARA, 2005). Também é necessário que esses profissionais compreendam que os materiais utilizados nos objetos produzidos permanecem, seja como lixo ou resíduos, sendo essencial contribuir para o planejamento do ciclo de vida do produto,

orientando quanto aos processos de fabricação e às possibilidades de reciclagem (CARDOSO, 2012).

Devido ao ácido polilático (PLA) ser o componente mais descartado no processo de impressão, é crucial mantê-lo na cadeia produtiva, evitando desperdício e minimizando os impactos ambientais causados por esses resíduos. Nesse sentido, o design desempenha um papel fundamental ao contribuir para o planejamento do ciclo de vida do produto, sugerindo processos de fabricação e orientando para o descarte e a reciclagem. Para repensar a durabilidade dos artefatos e sua vida útil, o primeiro passo é considerar os materiais descartados como matéria-prima para novas criações.

Esta pesquisa apresenta um estudo de caso focado na reciclagem de PLA oriundo de resíduos de impressão 3D. Também destaca os ambientes universitários como locais de apoio à reciclagem, sendo fundamentais para o desenvolvimento sustentável. O estudo considera a Universidade Feevale como um ambiente potencial devido à infraestrutura disponível na instituição, como o Centro de Design, utilizado como ponto de coleta de resíduos, o Laboratório de Estudos Avançados em Materiais, ambiente de análise da viabilidade de reciclagem, e o Centro de Tecnologias Limpas - CTL, que oferece laboratórios e equipamentos dedicados ao reprocessamento de polímeros. Para compreender o papel do designer como agente social que aborda a ideia sistêmica do Life Cycle Design (LCD), foi essencial estabelecer uma logística eficiente, promovendo a interação de diferentes áreas e espaços.

2 Impressão 3D: O papel das instituições de ensino superior da abordagem sistêmica do Life Cycle Design

De acordo com os dados obtidos através de ferramentas de análise de dados, com foco nos resultados de artigos do Google Acadêmico, observou-se um aumento expressivo de 1.810% nas pesquisas relacionadas à impressão 3D no período de 2012 a 2022. Esse crescimento exponencial sugere que ambientes científicos, como escolas, institutos e universidades, passaram a ter um acesso mais amplo a esses equipamentos. Conforme Fadel e Goulart (2019), este aumento está relacionado à diminuição dos custos de aquisição das impressoras 3D. No entanto, entende-se que a redução de custo não é um fator isolado. A crise sanitária provocada pela COVID-19 também acelerou as produções acadêmicas voltadas para a fabricação de equipamentos por meio de impressão 3D, contribuindo significativamente para esse aumento nas pesquisas.

As impressoras 3D têm despertado debates acerca da integração das tecnologias de manufatura aditiva nas instituições de ensino, abrangendo desde o ensino fundamental. Além disso, existem iniciativas em ambientes educacionais que facilitam o acesso do público em geral a essa tecnologia, por meio de laboratórios de experimentação, como a rede FABLAB, que tem como objetivo assegurar a educação voltada para a inovação em laboratórios equipados com tecnologia de manufatura aditiva (FABLAB, 2024). A rápida adesão dessas tecnologias em espaços educacionais se deve ao potencial de democratizar a fabricação de produtos, estimulando a criatividade, fomentando a geração de ideias e incentivando o empreendedorismo (COSTA E PELEGRINI, 2017).

No entanto, apesar dos inúmeros benefícios, essas mudanças têm gerado preocupações exigindo ações colaborativas, uma vez que vários atores estão envolvidos no processamento de produto, incluindo o consumo de matérias-primas, produtores, usuários, organismos públicos e empresas de descarte. Isso ocorre porque as transformações promovidas pelas tecnologias têm um impacto direto no padrão de consumo e no meio ambiente (MANZINI E VEZZOLI, 2011).

No âmbito das Instituições de Ensino Superior (IES), o desenvolvimento sustentável é

abordado a partir de duas perspectivas: a educacional e a gerencial. A visão educacional enfatiza a formação de profissionais com uma compreensão de gestão sustentável. Já a visão gerencial destaca a implementação de Sistemas de Gestão Ambiental - SGA nos campos universitários, que atuam como modelos e projetos piloto para a sociedade (TAUCHEN, 2017 apud TAVARES 2020).

Para a introdução das máquinas FDM, desde a aquisição do equipamento até a obtenção de uma impressão bem-sucedida, é essencial realizar ajustes em diversos parâmetros. Estes fatores exercem uma influência direta sobre o resultado e a aparência do objeto fabricado. Para usuários iniciantes, a definição da velocidade, quantidade de material a ser depositado, espessura da camada e preenchimento da peça podem levar a acabamentos indesejados e falhas na impressão (BUHAGIAR, 2022). Adicionalmente, a pouca familiaridade em relação ao design de produtos e a ausência de estruturas e logística para o reprocessamento contribuem para uma destinação inadequada dos resíduos de impressão 3D.

A falta de acesso a equipamentos de reprocessamento de polímeros é um desafio significativo em ambientes que possuem impressoras 3D, tanto em instituições de ensino quanto em residências. Tecnologias essenciais para a reciclagem, como moinhos de facas, extrusoras e equipamentos de prensagem, são inacessíveis devido ao seu elevado valor de mercado. Essa inacessibilidade não apenas afeta o público em geral, mas também representa uma barreira para instituições de ensino fundamental e universidades com infraestruturas mais limitadas. Adicionalmente, a falta de comunicação entre diferentes áreas, mesmo em universidades de grande porte, agrava o problema, dificultando ainda mais o reprocessamento adequado dos resíduos gerados pela impressão 3D.

Neste contexto, as Instituições de Ensino Superior (IES), como a Universidade Feevale, desempenham um papel crucial no apoio ao desenvolvimento sustentável. No âmbito educacional, onde a impressão 3D está imersa, esse apoio será efetivo quando o design se tornar uma prática sistêmica do ciclo de vida de produtos, isto é, ao projetar com foco na minimização dos impactos ambientais, conforme sugerido por Manzini e Vezzoli (2011) no conceito de LCD. Dentro das IES, essa abordagem pode ser integrada por meio da visão educacional, que destaca a formação de profissionais com uma compreensão sólida de gestão sustentável, conforme enfatizado por Tauchen (2017, apud TAVARES, 2020).

3 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram reunidos resíduos de PLA provenientes do processo de impressão 3D. Estes resíduos foram identificados como peças defeituosas, bases e suportes de impressão, pedaços de filamentos, peças antigas e pequenos fragmentos. A coleta abrangeu diversos locais, incluindo o Centro de Design e o Centro de Tecnologias Digitais (CETED) da Universidade Feevale, bem como o Laboratório Laser & Óptica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e a empresa In. Genius de impressão 3D. Ainda foram coletados resíduos provenientes de impressões 3D realizadas em ambientes domésticos.

Inicialmente, os resíduos foram separados manualmente por cores e, em seguida, submetidos a pesagem. Na etapa seguinte, esses materiais foram encaminhados para o processo de moagem no Centro de Tecnologias Limpas (CTL) da Universidade Feevale. A moagem, considerada a fase inicial do ciclo de reciclagem, teve como objetivo reduzir as peças de PLA a pequenos fragmentos conhecidos como "flakes" (FARIA e PACHECO, 2011). Essa etapa é crucial para a manufatura de novos produtos, sejam eles fabricados por extrusão, injeção ou prensagem

hidráulica, pois as oportunidades de reprocessamento derivam dessa ação. O equipamento utilizado foi um moinho de facas da marca Usifer, modelo USI-250BR (Figura 2).

Figura 2 - Quadro de imagens (a) Resíduos de PLA coletados durante o estudo (b) Moinho de facas utilizado na moagem (c) Flakes resultantes do processo (d) Resíduos de impressão 3D não reprocessáveis.



Fonte: Tavares, Morisso, Acauã e Carús (2023)

No decorrer do reprocessamento do PLA, determinados resíduos não foram passíveis de trituração utilizando o equipamento disponível na Universidade Feevale. Isso se deve à presença de preenchimento de impressão 3D de alta densidade nas peças descartadas, conforme mostra a Figura 2 (d). Esse tipo de resíduo possui elevada dureza, podendo ocasionar danos severos ao maquinário durante a operação.

Antes de iniciar a produção de produtos reciclados, o resíduo de PLA moído foi caracterizado para compreender suas propriedades térmicas, fundamentais para determinar a temperatura ideal de reprocessamento. A avaliação dessas propriedades foi conduzida por meio da calorimetria exploratória diferencial (DSC) no Laboratório de Estudos Avançados de Materiais da Universidade Feevale. Essa técnica é crucial para identificar os fenômenos físicos-químicos que acontecem no material, como a temperatura de fusão, sendo esta técnica uma das mais importantes na caracterização de polímeros.

A fabricação de produtos reciclados foi realizada por meio de moldagem por compressão. Utilizando os equipamentos disponíveis no CTL, foi possível criar chapas com cerca de 1 mm de espessura e peso médio de 30g. O processo fez uso da temperatura de conformação de 180°C, com tempos de prensagem variando entre 90s, 60s e 45s.

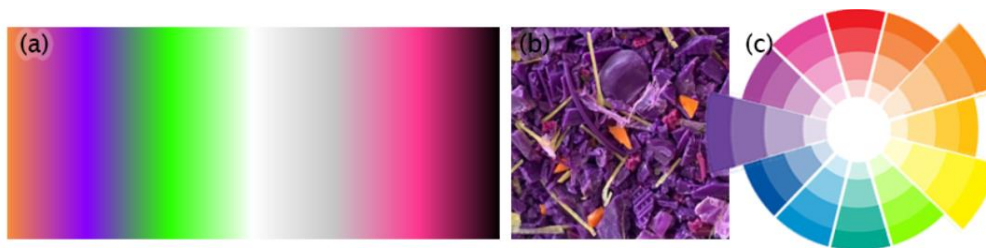
A partir do processo de reciclagem do PLA nas dependências da Universidade, foi realizado mapeamento dos setores envolvidos, visando estabelecer um ciclo de gestão de resíduos da impressão 3D. Inspirados nos ciclos de vida circulares propostos por Cardoso (2012), foi abordado fases que vão da necessidade à disposição final, considerando materiais, tecnologias, fabricação e reciclagem. O foco do estudo recai sobre a implementação de ações colaborativas que viabilizam a abordagem do LCD, promovendo a sustentabilidade e uma gestão eficiente dos resíduos da impressão 3D.

4 Resultados e discussão

O processo de moagem para a produção de flakes gera energia estática, resultando na aderência de pequenas partículas nas facas e paredes do equipamento. Para evitar contaminação de materiais e mistura de cores, a limpeza é realizada após cada moagem, implicando em consumo de tempo e energia (FARIA e PACHECO, 2011). Contudo, nesta pesquisa centrada na reciclagem para redução de impactos ambientais, aceitamos tolerâncias para contaminações de cores e materiais. Essa abordagem segue os princípios de "Minimização de recursos" e "Escolha de recursos e processos de baixo impacto ambiental" de Manzini e Vezzoli (2011), considerando também os atributos ambientais como critério simbólico no design de materiais (NEJELISKI et al, 2021).

As cores desempenham diversas funções no design e sua escolha deve considerar o contexto de aplicação. Na etapa de moagem, onde a contaminação de cores é uma preocupação, o círculo cromático foi empregado para definir a sequência de moagem, conforme ilustrado na Figura 3(a).

Figura 3 - Representação Visual: (a) Sequência das Cores dos Resíduos para Moagem, (b) Flakes Roxos com contaminação Residual, (c) Círculo Cromático Destacando a Combinação em Fenda.



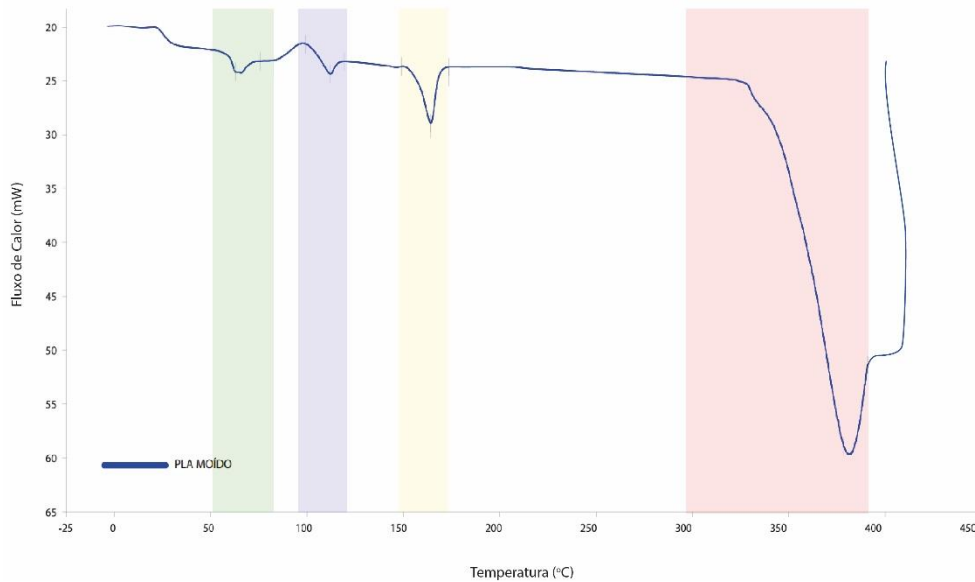
Fonte: Tavares, Morisso, Acauã e Carús (2023)

Conforme demonstrado nas Figuras 3(b) e 3(c), a moagem das peças roxas e laranjas seguiu o princípio de combinações em fenda, também conhecido como combinação complementar dividida, resultando em alto contraste. Também foram utilizadas sequências de moagem com resíduos de cores análogas e peças com pigmento branco. Os resíduos de tonalidade preta foram os últimos a serem moídos, devido ao seu maior potencial de tingimento, mesmo em pequena quantidade, como destacado por Teixeira (2017).

Os resultados da Calorimetria Exploratória Diferencial foram cruciais para determinar a temperatura de reprocessamento do PLA, assegurando a reciclagem do material sem comprometer suas propriedades. A Figura 4 exibe fenômenos endotérmicos e exotérmicos durante o aquecimento, como a temperatura de transição vítrea, fusão e degradação. Conforme a Figura 4, os flakes de PLA moído apresentam picos endotérmicos em torno de 60°C (zona verde), indicando a temperatura de transição vítrea, momento em que o material começa a amolecer. Contudo, o reprocessamento só pode iniciar com a temperatura de fusão registrada. Essa informação é representada pelo pico endotérmico próximo a 160°C (zona amarela), indicando o ponto de fusão do PLA (CHIENG et al., 2014). Essa temperatura mínima é essencial para processos de produção, como injeção, extrusão de filamentos, prensagem e impressão 3D.

A faixa em azul, entre 95°C e 120°C, destaca os picos endotérmicos relacionados à cristalização do material. Por outro lado, a faixa em vermelho, a partir de 290°C, exibe os picos associados à fase de degradação térmica do termoplástico estudado, onde o material perde propriedades mecânicas, tornando-se ainda mais frágil (CHIENG et al., 2014).

Figura 4 - Curva de Calorimetria Exploratória Diferencial do PLA Moído

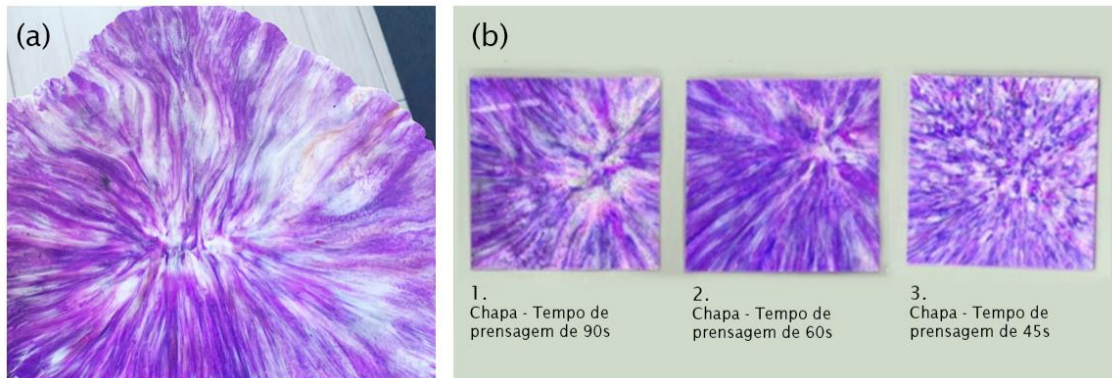


Fonte: Tavares, Morisso, Acauã e Carús (2023)

Santana et al. (2018) observaram que o PLA virgem, ou seja, sem qualquer conformação prévia, passa por dois estágios de decomposição. No entanto, a amostra de PLA moído utilizada neste estudo apresenta apenas um estágio. Tratando-se de um material residual, isso pode estar relacionado ao fato de o resíduo ter sido submetido a altas temperaturas durante o processo de impressão 3D, realizado anteriormente.

Após a determinação da temperatura de fusão por meio da análise de calorimetria, iniciou-se a fabricação das chapas, produto resultante do processo de reciclagem. A estrutura disponibilizada pelo CTL não dispõe de moldes específicos para o procedimento de prensagem, devido a isso as chapas produzidas apresentavam formato irregular e orgânico, conforme ilustrado na Figura 5(a). Com o propósito de criar chapas padronizadas de 12x12cm, as peças foram submetidas ao corte a laser (Figura 5b), com velocidade de 20mm/s.

Figura 5 - Chapas resultantes do processo de reciclagem do PLA



Fonte: Tavares, Morisso, Acauã e Carús (2023)

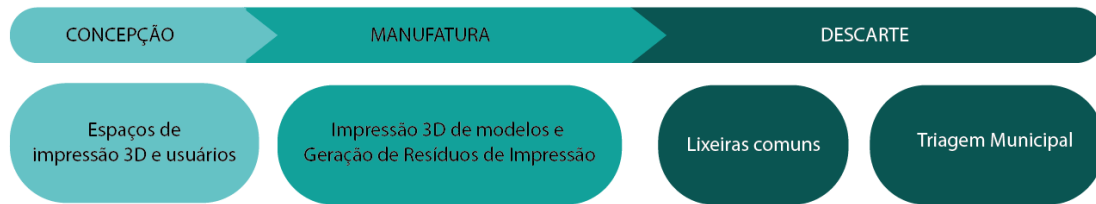
A fabricação das chapas recicladas evidência que a prolongação do tempo de prensagem resulta em maior dispersão do material. Conforme observado na Figura 5(b), a chapa com tempo de prensagem mais longo (90 segundos) exibe uma mescla de cores proveniente de um núcleo de difusão. O mesmo fenômeno é observado na chapa produzida com 60 segundos. Entretanto, a chapa com 45 segundos apresenta uma superfície na qual pequenos pontos de cor são visíveis, indicando que o padrão da superfície formada está diretamente relacionado ao tempo de processamento.

Esta questão aborda a percepção das características estéticas, simbólicas e práticas dos produtos reciclados. Nejeliski et al. (2021) explicam que as propriedades sensoriais dos materiais e os processos de fabricação conferem significados aos produtos. Quando esses aspectos são associados ao apelo ecológico, estamos lidando com atributos intangíveis em relação ao design.

Através do estudo do processo de reciclagem, que tem como base o papel do designer como agente social no LCD, foi possível avaliar a viabilidade de um modelo de gestão de resíduos de impressão 3D, com ênfase nas estruturas da Universidade Feevale. O enfoque considera as instituições de ensino como apoio ao desenvolvimento sustentável.

Com o aumento do uso de impressoras 3D, tanto em ambientes educacionais quanto domésticos, observa-se um aumento na produção de resíduos resultantes desse processo. Atualmente, conforme Buhagiar (2022) explica, muitos desses resíduos acabam sendo descartados no lixo comum. A falta de identificação do PLA por meio de símbolos do sistema RIC também dificulta a reciclagem desses materiais. Contudo, o usuário de impressão 3D possui conhecimento sobre o material utilizado no processo. A partir disso, é possível perceber que o modelo atual de gestão de resíduos de PLA apresenta semelhanças com o ciclo de vida linear de produtos, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Atual modelo de gestão de resíduos de impressão 3D empregado por ambientes que possuem impressoras 3D e por usuários domésticos



Fonte: Adaptado de Cardoso (2023)

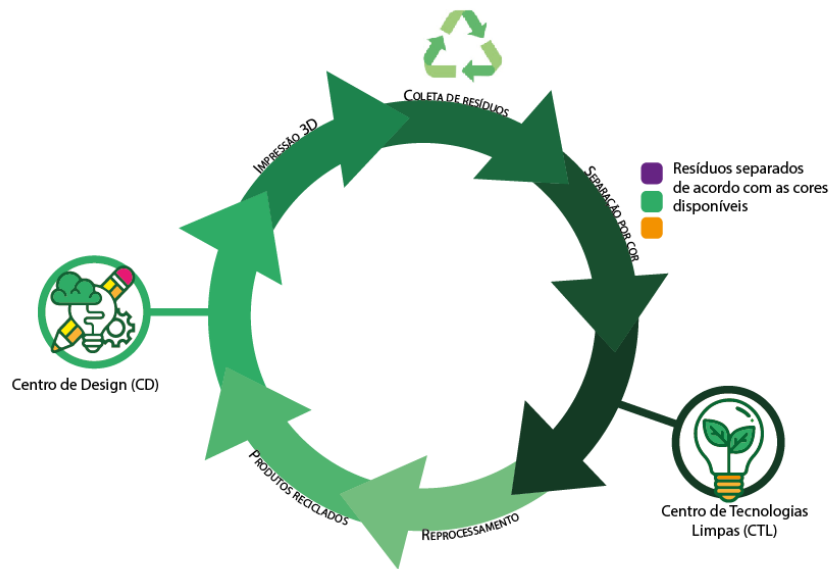
Conforme Tavares (2020), é fundamental que as instituições de ensino desempenhem um papel ativo no desenvolvimento de gestão ambiental. Isso implica promover propostas pedagógicas e implementar ações sustentáveis em toda a sua abrangência. Embora tais iniciativas possam surgir de práticas isoladas ou esforços de setores específicos, é crucial que a comunidade acadêmica busque alternativas conscientes, reavalie suas atitudes e promova mudanças de hábitos.

De acordo com Barros (2022), a transição dos modelos de gestão lineares para os modelos circulares trata-se de um processo desafiador e gradual, porém crucial e alcançável. Essa mudança deve ser iniciada já durante a formação acadêmica e estender-se aos processos industriais. Requer estudos aprofundados, pesquisas científicas, experimentações e testes práticos, além da divulgação e replicação de modelos bem-sucedidos.

Manzini e Vezzoli (2011) reconhecem que o designer não é o único responsável pelo ciclo de vida dos produtos. No entanto, devido à sua visão abrangente, pensamento projetual e conhecimento em relação às necessidades sociais e ambientais, materiais e processos, comercialização e uso de produtos, bem como reciclagem e logística reversa, o perfil do profissional de design está intrinsecamente comprometido com a preservação do meio ambiente e o bem-estar social (BARROS, 2022).

Com base nesse contexto, avaliou-se a viabilidade de uma proposta que utiliza o Centro de Design da Universidade Feevale como ponto de coleta seletiva de resíduos de impressão 3D. A abordagem está fundamentada na existência de um local específico no ambiente, onde os resíduos de PLA não são misturados com outros polímeros ou qualquer tipo de descarte, devidamente sinalizado. Conforme ilustrado na Figura 7, os resíduos podem ser concentrados no ponto de coleta já existente, separados conforme a cor e conduzidos ao Centro de Tecnologias Limpas para o reprocessamento, retornando ao Centro de Design na forma de chapas de PLA recicladas, ponto de partida para a produção de diversos artefatos.

Figura 7 - Modelo Sustentável: Gestão de Resíduos de Impressão 3D com apoio da Universidade



Fonte: Tavares, Morisso, Acauã e Carús (2023)

Na estrutura atual, o CD e os cursos de graduação em Design não mantêm projetos que promovam a proximidade com o CTL, um ambiente equipado para a reciclagem por meio da manufatura de diversos produtos, tais como extrusora para a produção de filamentos, pelletizadora para a obtenção de pellets, injetora e moldes disponíveis para utilização no maquinário e prensa pneumática para a produção de chapas. A manufatura de chapas possibilita aos estudantes de design promoverem diversos projetos de desenvolvimento de novos produtos, além de permitir o estudo de design de superfície por meio de diferentes tempos de prensagem, forma de disposição do material e combinação de cores. Essa iniciativa também pode ser encarada como uma oportunidade para oferecer serviços à comunidade, consolidando o CD como um ponto oficial de coleta e triagem de PLA dentro da instituição de ensino.

5 Conclusão

Com base nesta pesquisa, fica claro que a impressão 3D está sendo amplamente adotada em diversos setores, incluindo indústrias, ambientes universitários e residenciais. O crescente interesse por essa tecnologia, impulsionado pelo período da pandemia da Covid-19, está associado ao aumento na geração de resíduos de polímeros termoplásticos, sendo o PLA o material mais remanescente e descartado durante o processo.

Nas instalações da Universidade Feevale, em Novo Hamburgo, identificamos a viabilidade de reciclar resíduos poliméricos, especialmente o PLA proveniente da impressão 3D, utilizando a infraestrutura do Centro de Tecnologias Limpas e do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais. Nesse contexto acadêmico, é crucial orientar os usuários de impressoras 3D para a adoção de práticas sustentáveis, considerando importantes fatores como a geometria das peças. Repensar o percentual de preenchimento, para facilitar o processo de reciclagem local diante de impressões malsucedidas, também é uma ação pertinente, visto os possíveis danos causados ao maquinário e a quantidade de material descartado.

A pesquisa realizada evidencia que o PLA pode ser reprocessado por meio de etapas de

moagem e prensagem com temperaturas próximas a 180°C, permitindo a manufatura de chapas com diferentes padrões visuais, influenciados pelo estudo de cores, disposição do material e pelos tempos de prensagem.

Com o objetivo de promover uma gestão inovadora dos resíduos de impressão 3D, este estudo destaca a possibilidade de estabelecer um modelo circular, utilizando uma instituição de ensino superior como ponto de apoio. A proposta visa transformar os resíduos de PLA em matéria-prima secundária para a produção de novos artefatos, reforçando a importância de espaços e instalações apropriadas para o reprocessamento de materiais dentro do ambiente acadêmico.

6 Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

7 Referências

- BARROS, K. **Pensamento ‘Ciclo de Vida’ na formação do Designer**: urgente, necessário, obrigatório. 14º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. Rio de Janeiro, 2022.
- BUHAGIAR, M. **Tecendo Camadas**: um estudo sobre o uso doméstico da impressão 3D. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p.185. 2022.
- CARDOSO, R. **Design para um Mundo Complexo**. São Paulo. Cosac Naify, 2012
- CHIENG, B. W. et al. **Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly (lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties**. Molecules, 2014.
- COSTA, C e PELEGRINI A. **O Design dos Makerspaces e dos Fablabs no Brasil: um mapeamento preliminar**. Design & Tecnologia, 2017.
- FADEL, A e GOULART A. **Impressão 3d – o impacto da popularização e acesso no varejo brasileiro**. G&P Revista de Gestão e Práxis. 2019.
- FARIA, F E PACHECO, E. **A reciclagem de plástico a partir de conceitos de produção mais limpa**. Gepros. Gestão da Produção, Operações e Sistema, 2011.
- KEMPEN, T. **Principais tecnologias de impressão 3D**. k2go. 2019.
- MANZINI, E e VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. 1. Ed. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011
- MORENO, E. et al. **Technical Evaluation of Mechanical Recycling of PLA 3D Printing Wastes**. The First International Conference on “Green”. Polymer Materials, 2020.
- NEJELISKI, D. M. et al, **Seleção de materiais invertida: da caracterização do material as possibilidades de aplicação no design de produto**. DAPesquisa, Florianópolis. 2021.
- SALLENAVE, G. C. **Análise da degradação do PLA em ambiente marinho simulado**. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 180. 2022
- SALLENAVE, G. C. et al. **Contribuições para a discussão de resíduos gerados pelo processo de fabricação por filamento fundido**. 2020.
- SANTANA, L. et al. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de**

caracterização térmica, química e mecânica. Revista Matéria. 2018

SILVEIRA, A. **De volta ao ciclo:** tecnologias para a reciclagem de resíduos. 1. ed. Curitiba. Editora Inter Saberes. 2021.

SPINACÉ, M E PAOLI, M. **A Tecnologia de Reciclagem de Polímeros.** Química Nova. São Paulo. p.65-72. 2005.

TAVARES, E. **Gestão de resíduos sólidos em instituições de ensino superior: um estudo de caso da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/Campus Recife).** Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Administração. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

THACKARA, J. **In the bubble:** designing in a complex world. Cambridge: MIT, 2005.

TEIXEIRA, M. Concepção de paleta de cores para compósito de resíduo particulado de MDF. **Design & Tecnologia,** 2017.

WANGA, X.; JIANGB M.; ZHOUB Z.; GOUA, J.; HUIC D. **3D printing of polymer matrix composites:** A review and prospective. 2017.

WWF. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** 2019.