



## Produção de artefatos a partir da reciclagem de resíduos de PLA oriundos do processo de Impressão 3D

*Production of artifacts from recycling PLA waste generated from the 3D printing process*

40

**Rafael Reche Tavares, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**  
rafaelrechetavares@gmail.com

**Fernando Dal Pont Morisso, Universidade Feevale.**  
morisso@feevale.br

**Lauren Arrussul Carús, Universidade Feevale.**  
lauren@feevale.br

### Resumo

Com a popularização das impressoras 3D, a manufatura aditiva ultrapassou os ambientes industriais e pode ser encontrada em instituições de ensino e ambientes domésticos. O incremento na aquisição destas máquinas proporcionou aumento significativo na geração de resíduos oriundos da impressão 3D, sendo o poli(ácido láctico) (PLA) o material mais utilizado em função do fácil processamento. A fim de compreender como Instituições de Ensino Superior estão gerindo os resíduos de impressão 3D, esta pesquisa buscou estudar como a Universidade Feevale organiza o sistema de gestão ambiental do campus II, local onde opera o Curso de Design. A partir disso, foi possível promover a reciclagem dos resíduos de PLA por meio de diversas formas de reprocessamento, integrando espaços como o Laboratório de Materiais, o Centro de Tecnologias Limpas e o Centro de Design. Verificou-se que a reciclagem de materiais nas Instituições de Ensino é dependente de infraestruturas adequadas e ações de pesquisa.

**Palavras-chave:** Reciclagem, Impressão 3D, Poli(ácido láctico).

### Abstract

*With the popularization of 3D printers, additive manufacturing has moved beyond industrial environments and can be found in educational institutions and domestic environments. The increase in the acquisition of these machines provided a significant increase in the generation of waste from 3D printing, with poly(lactic acid) (PLA) being the most used material due to its easy processing. In order to understand how Higher Education Institutions are managing 3D printing waste, this research sought to study how Feevale University organizes the environmental management system on campus II, where the Design Course operates. From this, it was possible to promote the recycling of PLA waste through various forms of reprocessing, integrating spaces such as the Materials Laboratory, the Clean Technologies Center and the Design Center. It was found that the recycling of materials in Educational Institutions is dependent on adequate infrastructure and research actions.*

**Keywords:** Recycling, 3D printing, Poly(lactic acid).



## Introdução

A tecnologia de impressão 3D tem experimentado uma crescente popularização, ganhando destaque significativo recentemente, sobretudo devido à pandemia de COVID-19. Nesse contexto, essa tecnologia foi uma importante aliada para atender à demanda por equipamentos de proteção individual, como os protetores faciais (MORENO *et al.*, 2021). Segundo um levantamento realizado pela consultoria americana *Markets and Markets*, o mercado de impressoras 3D movimenta anualmente cerca de US \$32,78 bilhões (TECHCD, 2022). Observa-se ao longo da última década uma facilidade crescente de acesso a essas máquinas, impulsionada pelo baixo custo desses produtos e pela crescente tendência do modelo “*Do it yourself*” - DIY. O acesso facilitado a essas impressoras pelas indústrias, universidades e usuários domésticos gerou, como consequência direta, elevação na quantidade de resíduos plásticos decorrentes de impressões malsucedidas e peças defeituosas (MORENO *et al.*, 2021).

As impressoras 3D mais acessíveis no mercado utilizam o método de Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling* - FDM) e empregam filamentos termoplásticos como matéria-prima. O poli(ácido láctico) (PLA), devido à sua facilidade de processamento e ampla disponibilidade comercial, se tornou o material mais utilizado em impressões 3D. Esse material é oriundo da polimerização do ácido láctico, matéria-prima obtida a partir de fontes renováveis como amido de milho, cana-de-açúcar e outros.

O PLA é um material biodegradável cujo processo de decomposição ocorre através da hidrólise da ligação éster, não necessitando de enzimas para catalisar a reação. Devido a isso, a exposição às intempéries, como sol, chuva, variações na umidade do ar e mudanças climáticas, promove sua degradação natural (SILVESTRIM, 2018). Materiais biodegradáveis têm o potencial de serem fontes de energia para microrganismos, desde que adequadamente expostos a esses organismos por um período suficiente. Durante esse tempo, ocorre o ciclo completo de degradação, permitindo que o ambiente absorva completamente o material, sem deixar resíduos poluentes. É crucial que esse processo não comprometa os ciclos naturais do carbono, nitrogênio e outros elementos fundamentais (BRAMBILLA, 2023).

Em comparação com polímeros de origem fóssil, ou seja, os sintéticos, a biodegradabilidade se destaca como um diferencial sustentável. Polímeros sintéticos, quando descartados inadequadamente, podem formar camadas impermeáveis que dificultam a troca de gases e líquidos, prejudicando a decomposição de resíduos orgânicos e até mesmo liberando compostos tóxicos no solo (SILVEIRA, 2021).

Entretanto, os biopolímeros ainda estão sob estudo para compreender os efeitos de sua decomposição em diferentes ambientes. Uma pesquisa recente conduzida por Marcandalli (2023) revelou que os biomateriais podem afetar os aspectos hídricos do solo, muitas vezes aumentando sua capacidade de retenção de água. Esse aumento está sujeito à composição química do solo.

Quando se trata de polímeros de impressão 3D, surge uma nova questão relacionada à falta de infraestrutura para coletar esses materiais, além da ausência de logística e identificação, o que dificulta o reprocessamento (SALLENAVE, 2022). O conhecimento a respeito do material



descartado fica restrito àqueles que promovem o processo de compra de filamentos e realizam a impressão 3D.

O Brasil possui um dos menores índices de reciclagem de resíduos plásticos no mundo, com apenas 1,28% das 11,3 milhões de toneladas anuais disponíveis para o processo. É importante notar que esta quantidade de resíduo gerada situa o país como quarto maior produtor global deste tipo de material, considerando que a média mundial de reciclagem é de aproximadamente 9% (WWF, 2016 *apud* CONCEIÇÃO *et al.*, 2019). Os resíduos plásticos não reciclados são frequentemente direcionados para aterros sanitários ou utilizados na produção de energia, causando danos significativos ao meio ambiente. Por outro lado, quando queimados, os polímeros geram fumaça escura e liberam gases tóxicos (SILVEIRA, 2021).

Devido ao 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. Conforme explicado por Cardoso (2012, p. 85), os objetos manufaturados não desaparecem, eles "sobrevivem", mesmo que sejam como lixo ou 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 reutilização, assim como orientando o descarte e a reciclagem.

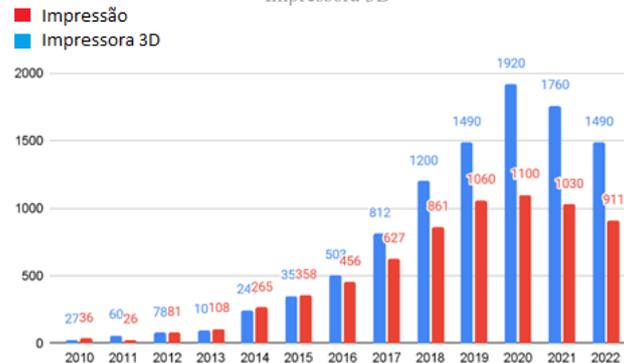
Para repensar a durabilidade dos artefatos e sua vida útil, o primeiro passo é considerar os materiais descartados como matéria-prima para novas criações. Manzini (2007) destaca o papel do designer como um agente social que lida com as mudanças sociais e as interações com os produtos fabricados, identificando oportunidades para a solução de problemas.

Como uma medida alternativa para prevenir o descarte inadequado de resíduos gerados pela impressão 3D, o presente estudo se propôs a investigar o gerenciamento interno de resíduos da Universidade Feevale, bem como a viabilidade da reciclagem do PLA dentro das suas instalações. O estudo considerou como fator potencial a infraestrutura disponível na instituição, como o Centro de Tecnologias Limpas - CTL, que oferece laboratórios e equipamentos dedicados à reciclagem de polímeros, incluindo injetoras e extrusoras, necessários para a fabricação de diversos produtos. Para alcançar esse objetivo, foi necessário estabelecer uma logística eficiente e promover a interação entre diferentes áreas, compreendendo que o design necessita considerar todo o ciclo de vida dos produtos e materiais.

## A técnica de impressão 3D e sua popularização

A impressão 3D é uma das tecnologias líderes da indústria 4.0 e vem ganhando cada vez mais espaço nas indústrias, universidades e ambientes domésticos. O crescente interesse nesse processo é mostrado na Figura 1.

Figura 1: Gráfico obtido pelo sistema de análise do Google Acadêmico: Resultados para pesquisas com os termos “Impressão 3D e “Impressora 3D”



Fonte: Autores, 2023.

Infere-se pela Figura 1, um aumento exponencial no número de pesquisas relacionadas à impressão 3D até o ano de 2020. Isso sugere que há um acesso cada vez maior de ambientes científicos, como institutos e universidades, a esses equipamentos. Este fator está relacionado, segundo Fadel e Goulart (2019), à redução do preço de aquisição de uma impressora 3D. Por essa razão, há um crescente discurso a favor da introdução das tecnologias de manufatura aditiva (MA) no contexto escolar, inclusive no ensino fundamental, com o intuito de estimular a criatividade, promover a geração de ideias e incentivar o empreendedorismo. A impressão 3D como recurso educacional, conforme apontado por Menta (2018) e Buhagiar (2022), visa criar, em breve, uma geração na qual as pessoas sejam capazes de produzir seus próprios objetos, fortalecendo o engajamento com a ciência, tecnologia, engenharia, artes e matemática. Além disso, essa técnica possibilita que os discentes se concentrem na resolução criativa de problemas e na cooperação.

A disponibilidade da tecnologia de impressão 3D para o público em geral tem sido facilitada por laboratórios de experimentação. Esses espaços físicos são dedicados ao compartilhamento de práticas, e seu gerenciamento varia de acordo com os objetivos do grupo e as demandas que surgem durante os processos, como enfatizado por Costa e Pelegrini (2017). Os laboratórios de experimentação não se limitam apenas à técnica de impressão 3D ou a um material específico, mas também são locais propícios para o desenvolvimento de novos métodos e aplicações de materiais, promovendo importantes possibilidades de inovações para o país (BARROS, DINIZ E BONTEMPO, 2021).

Os espaços de experimentação, presentes em diversas partes do Brasil e do mundo, têm como objetivo incentivar o aprendizado por meio de projetos nas áreas de design, robótica, engenharia e programação. De acordo com Fressoli e Smith (2015), os espaços de fabricação digital são laboratórios abertos à pesquisa e ao desenvolvimento, onde são disponibilizados



equipamentos para experimentação e aprendizado prático. Muitos desses espaços não possuem financiamento contínuo para suas atividades diárias e pesquisas de longo prazo, e, portanto, oferecem serviços e capacitações para terceiros como forma de obter recursos para se sustentar.

Laboratório/Espaços de fabricação digital são instalados em ambientes educacionais ou fortemente relacionados a eles. Segundo Celani *et al.*, (2012), estes locais visam a pesquisa, ensino e produção de modelos. A linha de desenvolvimento de cada laboratório está relacionada com as necessidades a serem sanadas.

Embora a impressão 3D tenha o potencial de democratizar o acesso à fabricação de produtos e trazer inúmeros benefícios para a ciência, a educação e para seus usuários, as mudanças drásticas no processo de produção sempre geraram preocupações e ajustes por parte dos produtores, consumidores e designers. Isso ocorre porque as transformações têm um impacto direto no modo de consumo e no meio ambiente. É importante considerar que essa tecnologia também pode gerar escassez de recursos naturais e resíduos que não estão sendo adequadamente reciclados (BUHAGIAR, 2022).

De acordo com Cardoso (2012, p. 156), "Nos últimos cinquenta anos, a humanidade produziu uma quantidade maior de artefatos do que em toda a sua história anterior". Essa afirmação comprova a velocidade exponencial de produção impulsionada pelas tecnologias atuais, mas também nos convida a refletir sobre o padrão de consumo, levando em consideração não apenas o produto em si, mas também sua concepção, matéria-prima e descarte. Essa falta de conscientização é uma das principais críticas ao design, visto que muitas vezes os métodos de fabricação estabelecidos não incluem uma abordagem de logística reversa ou cíclica (BUHAGIAR, 2022).

Manzini (2007) afirma que os designers são parte do problema global de produção excessiva, mas também podem e devem desempenhar um papel na solução, por meio de uma abordagem "genética" do design, com o objetivo de promover melhoria e qualidade para o mundo.

### **Espaços universitários com potencial de desenvolvimento sustentável**

Conforme a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - CMMAD (1991), o desenvolvimento sustentável atende às demandas do presente sem comprometer as futuras gerações e suas necessidades. Ou seja, conciliando o desenvolvimento econômico e a preservação do meio-ambiente (MANZINI, 2007). 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 câmpus universitários, que atuam como modelos e projetos piloto para a sociedade (TAUCHEN, 2017 *apud* TAVARES, 2020).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU), conforme definidos pela NBR 10.004 da ABNT, são gerados pelas atividades domésticas e comerciais das comunidades. A composição desses resíduos varia de acordo com fatores socioeconômicos, condições de vida e hábitos de cada



população. Os RSU podem ser categorizados da seguinte forma: (a) matéria orgânica, que inclui restos de comida e resíduos de limpeza; (b) papel e papelão, como jornais, caixas e embalagens; (c) plásticos, como garrafas, frascos e embalagens; (d) vidro, como garrafas e copos; (e) metais, como latas; e (f) outros materiais, como roupas, óleos de cozinha, resíduos informáticos, outros.

Quando se trata de reciclagem de resíduos plásticos, geralmente, estes materiais são destinados a empresas de pequeno porte. A separação dos polímeros é feita manualmente através da identificação da simbologia ou som característico emitido por cada tipo de polímero (SPINACÉ, 2005 e GIGA, 2023<sup>1</sup>). O sistema de identificação mostra que os plásticos mais utilizados pelas indústrias estão vinculados a um número de reciclagem, por exemplo, número 2 - Polietileno de Alta Densidade. Entretanto, os resíduos mais comuns gerados pelo processo de impressão 3D estão enquadrados na categoria genérica número 7, denominados como “outros” no Código de Identificação da Resina (RIC), regulada no Brasil (NBR 13230:2008). Desse modo, os artefatos produzidos através da MA por FDM não apresentam o símbolo da categoria RIC, visto que a norma não abrange produtos fabricados domesticamente ou em ambiente acadêmico.

Nas áreas criativas, iniciativas como o seminário promovido pela Faculdade de Artes e Comunicações da Fundação Educacional de Bauru buscaram reestruturar a relação entre o Design e o Brasil. Estas ações visavam estimular que os participantes buscassem técnicas e métodos que atendessem as necessidades da população brasileira. Desta forma, os designers adeptos a esses movimentos voltaram seu trabalho à concepção de produtos coerentes com a realidade local (GUIMARÃES, 2014). No entanto, é possível observar que as práticas de gestão ambiental presentes nas universidades brasileiras, na maioria das instituições, são ações isoladas que resultam apenas do esforço de alguns setores.

### *Universidade Feevale e a gestão dos resíduos de impressão 3D*

A Universidade Feevale conta com o Grupo Interno de Gerenciamento Ambiental (GIGA), encarregado de recolher, mediante solicitação, os resíduos produzidos por diversos setores. Conforme os dados fornecidos pelo GIGA durante visita guiada, a Universidade Feevale estabelece sete categorias de materiais para reciclagem: (a) papel branco, (b) papel misto, (c) papelão, (d) plásticos, (e) sucata, (f) vidro e (g) alumínio.

A categoria “plástico” inclui os resíduos resultantes dos processos de impressão 3D gerados nas dependências da universidade, sejam eles resultantes de trabalhos acadêmicos, serviços externos ou ações pontuais. Como em 2020, quando a Universidade iniciou a produção em larga escala de protetores faciais para profissionais da área da saúde por meio dos laboratórios dos Cursos de Engenharia, Computação e Design e do Feevale Techpark, em resposta à pandemia da COVID-19. Esses protótipos, feitos de PLA e acetato, foram aprovados pela Fundação de Saúde Pública de Novo Hamburgo e pelo Hospital Municipal Lauro Réus, em Campo Bom (FEEVALE, 2020).

---

<sup>1</sup>Entrevista concedida pelo Grupo Interno de Gerenciamento Ambiental (GIGA)– Universidade Feevale aos autores. Entrevistador: Rafael Tavares. Novo Hamburgo, 2023.

Após conversar com a responsável pelo setor de resíduos, verificou-se que não existem registros ou informações sobre a coleta de PLA ou quaisquer outros materiais relacionados à impressão 3D nas instalações da universidade. Isso indica que ou não houve produção de resíduos de impressão 3D nos laboratórios, ou então, se houve, os resíduos foram descartados sem serem identificados.

No ano de 2016, de acordo com o GIGA, o total de resíduos destinados à reciclagem foi de 42.389,3 kg, sendo 6.041,5 kg da categoria "plástico". Em 2017, dos 31.908,4 kg de resíduos gerados, 5.291,1 kg foram de plásticos, e em 2018, dos 32.496,6 kg de resíduos, 5.306,3 kg eram de materiais plásticos.

Apesar de a Universidade Feevale possuir laboratórios especializados na caracterização e reciclagem de polímeros, todo o material plástico coletado pelo GIGA é encaminhado a empresas terceirizadas, com exceção das tampas de garrafas plásticas, as quais são doadas a organizações não governamentais. Os resíduos que não podem ser processados pelas empresas parceiras são classificados como "rejeitos" e destinados à coleta municipal.

## Materiais e Métodos

### *Processamento do resíduo de PLA*

Os resíduos de PLA utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram coletados nas dependências da Universidade Feevale, especificamente do Centro de Design (CD). Esses materiais, provenientes de peças defeituosas, pedaços de filamentos, suportes e outros, foram separados manualmente de acordo com as cores e tipos de acabamento das peças. Após a segregação, as peças foram pesadas, conforme apresentado na Tabela 1. Na sequência, os materiais foram encaminhados para moagem no Centro de Tecnologias Limpas (CTL) da Universidade Feevale. O equipamento utilizado para a moagem foi um moinho de facas da marca Usifer, modelo USI-250BR.

Tabela 1: Parâmetros utilizados na segregação de resíduos de PLA

COR	ACABAMENTO	PESO (g)
Laranja	Normal	316
Verde	Normal	637
Roxo	Normal	611
Cinza	Normal	1.014
Branco	Normal	1.687
Preto	Normal	865
Rosa	Metalizado	698
Resquícios	Indefinido	632

Fonte: Autores, 2023.

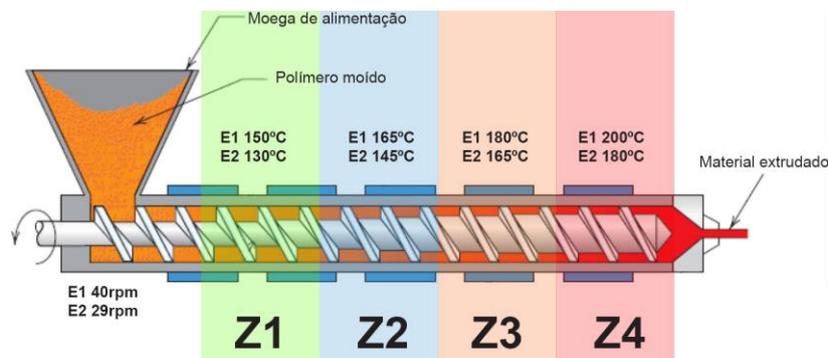
A etapa de moagem, geralmente, é tratada como o início da reciclagem. Neste processo, os resíduos são fragmentados em pedaços menores, denominados *flakes* (FARIA e PACHECO, 2011). O objetivo da moagem é facilitar a reciclagem do plástico, preparando-o para novos usos. Essa técnica é fundamental para os procedimentos subsequentes, como extrusão, peletização e injeção, uma vez que as possibilidades de reprocessamento surgem a partir dessa ação.

## Extrusão

A extrusão é um processo que envolve a aplicação de pressão e temperatura sobre um material termoplástico, resultando na fusão do material e sua subsequente extrusão. Essa técnica é amplamente empregada na fabricação de peças de geometria contínua, tais como canos, mangueiras e filamentos (CALLISTER, 2021). Nesta pesquisa, o processo de extrusão foi empregado para produzir filamentos a partir do material reciclado.

No processo de extrusão realizado, foram utilizados dois conjuntos de parâmetros, denominados E1 e E2, conforme ilustrado na Figura 2 esquemática. O equipamento empregado possui quatro zonas de aquecimento (z). Para a primeira extrusão (E1), as temperaturas nas zonas z1, z2, z3 e z4 foram configuradas para 150°C, 165°C, 180°C e 200°C, respectivamente, com uma rotação da rosca de 40 rpm. Na segunda extrusão, os parâmetros utilizados foram 130°C, 145°C, 165°C, 180°C, e a rotação da rosca foi ajustada para 29 rpm.

Figura 2: Ilustração esquemática da extrusão com os parâmetros utilizados



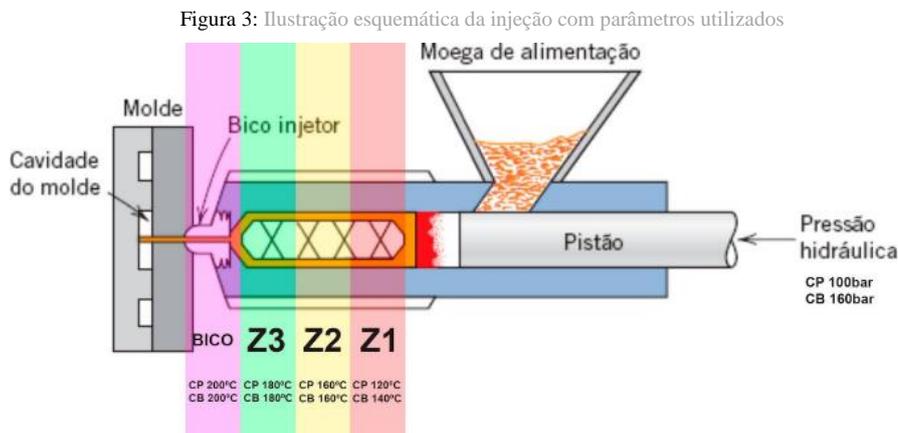
Fonte: Adaptado de Callister, 2021.

Os filamentos podem ser considerados como produto final em si mesmos, ou podem ser empregados na fabricação de pellets, outro item frequentemente comercializado. A peletização transforma os filamentos em pequenos grânulos, facilitando o manuseio e o transporte dos materiais. Esse processo é amplamente utilizado nas unidades de reciclagem. Portanto, os filamentos obtidos posteriormente foram peletizados, podendo ser utilizados como matéria-prima em diversos processos na indústria de insumos plásticos, conforme sugere a bibliografia (FALCÃO, 2015).

## Injeção

O processo de injeção envolve o preenchimento de um molde mediante a aplicação de pressão e temperatura em um material termoplástico (CALLISTER, 2021). Neste trabalho, a técnica de injeção foi utilizada tanto na fabricação de corpos de prova, quanto na produção de cabides. Os parâmetros de injeção foram ajustados durante uma fase de pré-testes, a fim de garantir as melhores condições para o preenchimento completo dos moldes.

Na injeção dos corpos de prova (CP), foram utilizadas as temperaturas de 120°C, 160°C, 180°C e 200°C, com uma pressão de 100bar. Para garantir o preenchimento completo dos moldes de cabides (CB), foi necessário aumentar a temperatura inicial do processo e ajustar a pressão; os parâmetros utilizados foram 140°C, 160°C, 180°C e 200°C, com uma pressão de 160bar, conforme ilustrado na figura esquemática (Figura 3).



Fonte: Adaptado de Callister, 2021.

### Moldagem por compressão

A moldagem por compressão envolve a prensagem de um termoplástico colocado entre as partes macho e fêmea do molde. Essas partes aplicam pressão e temperatura para fundir o material, moldando-o de acordo com o formato do molde (CALLISTER, 2021). Esse processo foi utilizado para a manufatura de chapas de PLA reciclado.

A técnica de prensagem foi empregada com variações de tempos e quantidades de materiais, com o objetivo de explorar as diferentes possibilidades do processo. Foram produzidas chapas utilizando 150, 35 e 30 gramas de PLA moído, com tempos de prensagem variando entre 120s, 90s, 60s e 45s. Para garantir a padronização e fornecer um acabamento às peças, as chapas foram submetidas ao corte a laser, resultando em quadrados com 12x12cm.

### Resultados e discussão

Ao longo desta pesquisa, aproximadamente 6,46kg de resíduos de PLA, provenientes do Centro de Design (CD) da Universidade Feevale, foram coletados e manualmente separados de acordo com sua coloração. O CD possui lixeira exclusiva para o descarte dos produtos de impressão 3D. Os materiais coletados consistiam em peças com defeito, bases e suportes de impressão, segmentos de filamento e peças antigas. Essa diversidade de produtos tornava inviável a completa segregação dos resíduos, devido a práticas adotadas no espaço e a processos descritos na literatura (BUHAGIAR, 2022).

A maioria dos resíduos provenientes da impressão 3D é segregada de outros polímeros visando a reciclagem. De acordo com a pesquisa publicada por Buhagiar (2022), 52,6% dos participantes do estudo afirmaram separar os resíduos de impressão 3D, a fim de encaminhá-los

para a reciclagem. Por outro lado, 21,1% dos usuários de impressoras 3D descartam os resíduos diretamente no lixo comum, enquanto 13,2% conseguem reutilizar o material para outros propósitos. Apenas 7% dos participantes da pesquisa afirmaram que separam os resíduos, contudo desconhecem a melhor forma de encaminhá-los.

Buhagiar (2022) explica que a educação é de extrema importância para a implementação de sistemas de coleta seletiva de resíduos, assim como a participação ativa de centros de pesquisa na busca por soluções adequadas para a destinação correta dos resíduos. Tavares (2020) ressalta que a falta de uma política institucionalizada e unificada de gestão ambiental dentro das Instituições de Ensino Superior (IES) é uma barreira para a implementação de práticas sustentáveis, sendo necessário conhecer as estruturas universitárias para conscientizar os funcionários e integrar temas sustentáveis no ambiente organizacional.

Com o objetivo de facilitar a interação entre os ambientes da instituição e viabilizar a reciclagem de PLA, os materiais foram coletados e separados nas dependências do Centro de Design (CD). Em seguida, foram transportados para o Centro de Tecnologias Limpas (CTL) para dar início à fase de reprocessamento.

Durante a fase de moagem para a produção de *flakes*, devido à energia estática, pequenas partículas do material acabam aderindo às facas e paredes do maquinário. Portanto, é comum realizar a limpeza do equipamento entre cada processamento, a fim de evitar a contaminação de cor e de materiais. Esse procedimento demanda tempo, consumo de água e energia (FARIA e PACHECO, 2011). Considerando que esta pesquisa se trata de um processo de reciclagem visando reduzir os impactos ambientais, foram toleradas as contaminações de cores e de outros materiais previamente processados, atendendo aos requisitos de "Minimização de recursos" e "Escolha de recursos e processos de baixo impacto ambiental" propostos por Manzini e Vezzoli (2007).

Conforme Lima e Pereira (2020), no design, as cores podem desempenhar diversas funções e devem ser escolhidas dentro do contexto de sua aplicação. Embora não houvesse um produto específico a ser desenvolvido, no processamento dos materiais foram considerados os fatores de contaminação por cor e, devido a este fato, na sequência de moagem foram utilizadas, preferencialmente, cores análogas ou complementares, conforme mostra Figura 4. As últimas peças utilizadas para produção de *flakes* foram as pretas, visto que esse pigmento tem maior potencial de tingimento em menor quantidade (TEIXEIRA, 2017) e poderiam ocasionar em um escurecimento indesejado da cor posterior. Por último, os resquícios de cores variadas. Como resultado, foram obtidos *flakes* de tamanhos satisfatórios para a utilização em processos futuros, mostrados na Figura 5.

Figura 4: Esquema de cores utilizadas no processo de moagem



Fonte: Autores, 2023.

Figura 5: Imagem Fotográfica - *Flakes* obtidos na moagem sequencial laranja – roxo



Fonte: Autores, 2023.

### *Reciclagem mecânica e a manufatura de produtos*

Na manufatura de filamentos, os resíduos de PLA foram introduzidos no funil de alimentação de uma extrusora e foram homogeneizados pelo cilindro extrusor. Durante esta etapa, o termoplástico foi gradualmente amolecido. Posteriormente, pressionado contra a matriz onde resfriou e foi solidificado, formando o perfil (CALLISTER, 2021). A extrusora é um equipamento de processamento contínuo que possui cilindro único e por isso, sempre que um novo material é inserido no funil de alimentação ele se mistura com a matéria que já estava no maquinário. Tendo como perspectiva a redução de resíduos por meio do design, a mescla entre as cores no filamento pode ser considerada como um dos benefícios do processo, o qual permite criar nuances. De acordo com Schüller (2021), dentre as vantagens da interface design/material/processo encontram-se a busca por variações de cor sem adição de pigmentação. No entanto, dada a diversidade de colorações dos resíduos processados, foram obtidos filamentos cinza, cinza-preto e preto.

Os parâmetros utilizados na extrusão afetaram diretamente a qualidade do produto formado. Nos parâmetros definidos como E1 foram identificadas bolhas na superfície do material, o que impossibilitou o uso do filamento gerado (Figura 6). As características superficiais sugerem que o produto sofreu degradação polimérica, fenômeno comum em termoplásticos reciclados devido a sua exposição a altas temperaturas, o que prejudica as propriedades físicas do material (FARIA e PACHECO, 2011).

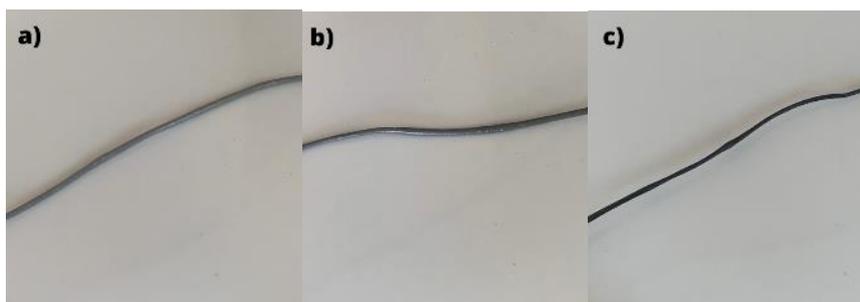
Figura 6: Imagem Fotográfica – PLA degradado durante a extrusão do filamento



Fonte: Autores, 2023.

A manufatura de produtos utilizando os parâmetros definidos em E2 resultou em um material denso e sem bolhas superficiais que gerou filamentos longos, mas de diâmetro irregular, o que indica que ainda há necessidade de ajustes de processo. Os filamentos produzidos com esse parâmetro são mostrados na Figura 7, na qual também podem ser observadas (a) a cor cinza, (b) a cor de transição cinza-preto e (c) a cor totalmente preta.

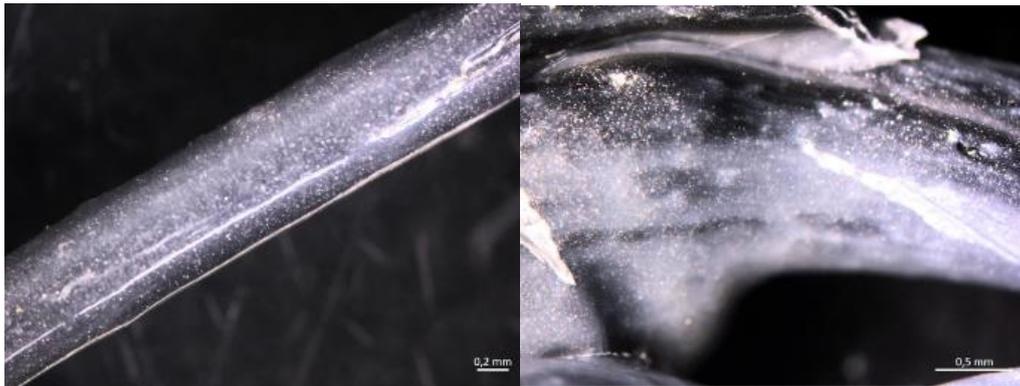
Figura 7: Imagens de Microscopia óptica dos filamentos troca de cor (a) filamento cinza (b) transição cinza-preto (c) preto



Fonte: Autores, 2023.

A transição entre cores no filamento cinza-preto foi examinada utilizando microscopia óptica, com o equipamento analítico disponível no Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Feevale. A Figura 8 indica que a cor cinza está encapsulada pelo pigmento preto, resultando em um material com características únicas. Empresas como a F3D já adotam a prática de vender filamentos "troca de cor", buscando reduzir o desperdício de recursos. Esses filamentos estão disponíveis em rolos de 250g, 500g, 750g e 1kg (Figura 9). Tais filamentos são produtos do processo de reciclagem mecânica.

Figura 8: Imagens de Microscopia Óptica - Filamento cinza-preto com aproximação real de 25,6x



Fonte: Autores, 2023.

Figura 9: Rolo de filamento troca de cor - Empresa F3D



Fonte: F3D, 2023.

A partir dos filamentos obtidos por extrusão, foram manufaturados os *pellets*. O material produzido apresentou diâmetro e comprimento irregulares, conforme mostra a Figura 10. Essa irregularidade era esperada, dado que os filamentos também apresentavam essas características. Os *pellets* são utilizados como matéria-prima em outros processos e, após caracterização, podem ser comercializados externamente.

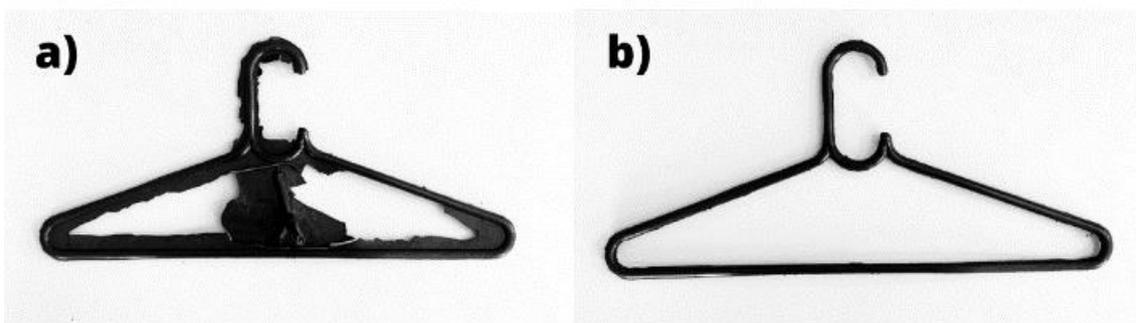
Figura 10: Imagem fotográfica - *pellets* produzidos pelo filamento cinza.



Fonte: Autores, 2023.

A fabricação de produtos por injeção ocorre em ciclos. Esse processo utiliza um molde bipartido, onde o polímero, geralmente na forma de *pellets*, é inserido na máquina injetora. Em seguida, o material é aquecido até atingir seu ponto de fusão, fluindo por compressão para a cavidade do molde. Após o resfriamento e a solidificação do material, o molde é aberto e a peça é retirada (SCHÜLER, 2021). Neste estudo, foram empregados dois moldes: um para a produção de corpos de prova destinados ao ensaio de tração e outro para a fabricação de cabides, que são produtos comercializáveis. Na fabricação dos cabides, foi necessária uma mistura dos PLAs com maior concentração de resíduos pretos, o que demandou ajustes nos parâmetros de processamento para garantir o completo preenchimento do molde. As peças produzidas não apresentaram bolhas ou orifícios em suas superfícies, porém, possivelmente devido à alta pressão da injeção, surgiram rebarbas (Figura 11a), que foram removidas manualmente com estilete (Figura 11b).

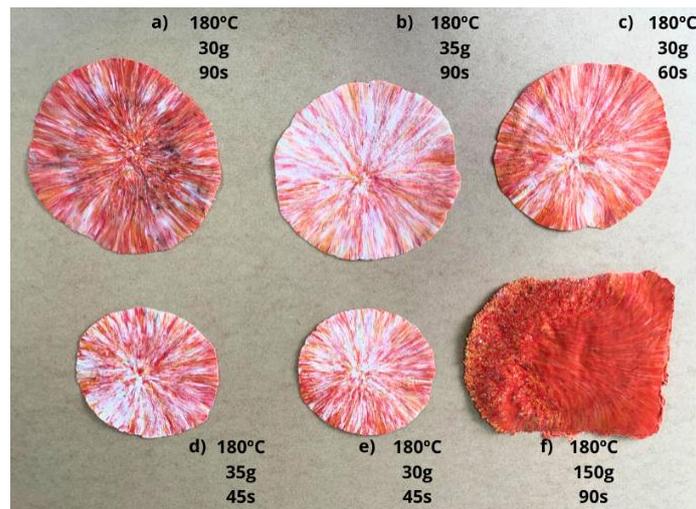
Figura 11: Imagem Fotográfica - Peças injetadas a) Cabide sem acabamento; b) Cabide com acabamento manual



Fonte: Autores, 2023

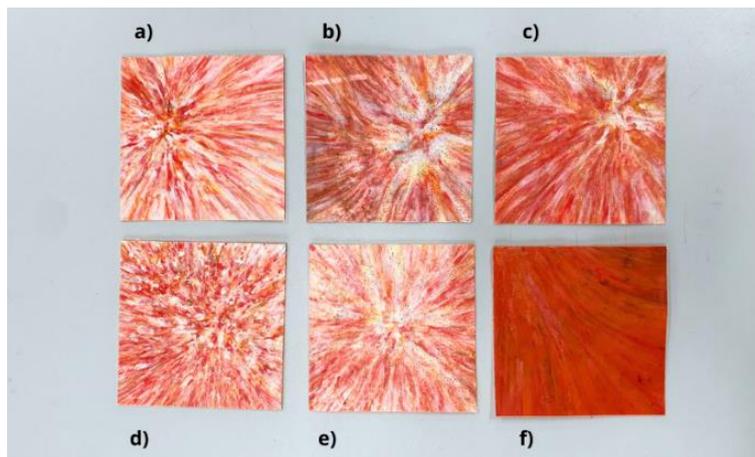
Para avaliar a viabilidade da manufatura de produtos utilizando PLA reciclado, também foram produzidas chapas por meio de moldagem por compressão. Os equipamentos disponíveis na Universidade Feevale permitiram a conformação de chapas com cerca de 1mm de espessura e peso médio de 30g, com exceção de uma única peça que alcançou aproximadamente 120g. A primeira prensagem foi realizada com 150g de *flakes*, durante 120 segundos a uma temperatura de 180°C. Durante esse processo, observou-se que uma quantidade considerável de material escorria pelas laterais da prensa, escorrendo pelo equipamento e podendo causar danos. A partir da primeira etapa de processamento, para as demais chapas, utilizou-se entre 30 e 35 gramas de PLA moído, mantendo a temperatura de 180°C e variando apenas o tempo de prensagem. Os resultados demonstram que quanto maior o tempo de prensagem, maior é a dispersão do material, resultando em uma superfície com cor mais difusa e menor quantidade de bolhas. Vale ressaltar que a estrutura disponibilizada pelo Centro de Tecnologias Limpas não possui moldes específicos para o processo de prensagem, o que resultou em chapas com formato irregular, como ilustrado na Figura 12. Com o intuito de confeccionar chapas de tamanhos padronizados de 12x12cm, as peças produzidas foram submetidas ao corte a laser, com velocidade de 20mm/s (Figura 13).

Figura 12: Imagem fotográfica - Chapas prensadas e seus parâmetros de manufatura



Fonte: Autores, 2023.

Figura 13: Imagem fotográfica – Chapas retificadas pelo corte à laser



Fonte: Autores, 2023.

## Considerações finais

A partir deste estudo, podemos observar que a impressão 3D está sendo amplamente adotada, não apenas nas indústrias, mas também em espaços universitários e residenciais, tanto por motivos recreativos, quanto como uma forma de geração de renda. Com o aumento do interesse por essa tecnologia, também houve um aumento na geração de resíduos poliméricos utilizados como filamentos, sendo o PLA o mais comumente empregado.

A Universidade Feevale, pela perspectiva gerencial do desenvolvimento sustentável no âmbito de Instituições de Ensino Superior, conta com o Grupo Interno de Gerenciamento Ambiental (GIGA), encarregado da gestão de resíduos no campus universitário. As informações fornecidas pelo GIGA indicaram a ausência de registros de resíduos de PLA provenientes dos

laboratórios. Esse cenário sugere uma possível falta de identificação adequada dos resíduos de impressão 3D, o que dificulta o reprocessamento desses materiais.

Identificar as estruturas disponíveis nas dependências da Universidade Feevale destaca a importância de integrar diferentes espaços para promover temas sustentáveis no ambiente organizacional. Essas ações dependem do comprometimento de agentes e requerem participação ativa. Este estudo envolveu a aproximação entre o Centro de Design (ponto de coleta), o Centro de Tecnologias Limpas (viabilidade de reprocessamento) e o Laboratório de Estudos Avançados em Materiais (caracterização), integrações realizadas pelos pesquisadores envolvidos.

A pesquisa demonstrou que o PLA pode ser reciclado por meio de processos mecânicos, incluindo moagem, extrusão e injeção. Esses processos permitem a produção de *pellets*, filamentos e peças injetadas, como os cabides. No contexto da universidade estudada, é crucial orientar os laboratórios que utilizam impressoras 3D a adotar práticas que facilitem a reciclagem. Por exemplo, considerar o percentual de preenchimento das peças é essencial, já que peças com alto preenchimento podem não ser recicláveis com o maquinário atual.

A Universidade Feevale poderia fortalecer sua infraestrutura ao estabelecer uma maior integração entre os espaços, como no caso dos FabLabs. A concentração de agentes educacionais e equipamentos em um único local facilita o desenvolvimento de novos projetos, promove a interdisciplinaridade, permite o compartilhamento de conhecimentos em um espaço que unifica diversas áreas e qualifica ainda mais os jovens profissionais.

## Referências

- BRAMBILLA, V. **Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e degradação de compósitos de poli (ácido láctico)/buriti**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2023.
- BUHAGIAR, M.F. **Tecendo camadas: um estudo sobre o uso doméstico da impressão 3D**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. *E-book*. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- CARDOSO, R. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012.
- COSTA, C. O.; PELEGRINI, A. V. O design dos Makerspaces e dos Fablabs no Brasil: um mapeamento preliminar. **Design e Tecnologia**, v. 7, n. 13, p. 57-66, 30 jun. 2017.
- FALCÃO, P. M. **Panorama da poluição costeira por pellets de plástico em praias de SP (Brasil): uma contribuição aos estudos de geografia do litoral**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/T.8.2016.tde-12012016-150123. Acesso em: 2023-05-15.
- FARIA, F. P.; PACHECO, E. B. A. V. A reciclagem de plástico a partir de conceitos de Produção Mais Limpa. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [S. l.], n. 3, p. 93,

2012. DOI: 10.15675/gepros.v0i3.534. Disponível em:  
<https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/534>. Acesso em: 15 set. 2023

FEEVALE, **Feevale começa a produzir protetores faciais em escala**. Disponível em:  
<https://www.feevale.br/acontece/noticias/feevale-comeca-a-produzir-protetores-faciais-em-escala>, 2020. Acesso em 08 de abril de 2023.

GUIMARÃES, M.J.S. **Contributions of the design of to the sustainable development of craft production**. 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Design de Produtos) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.

56

LIMA, Y.; PEREIRA, C. A influência da cor na produção de sentidos: um estudo no contexto de capas de livros. **Design e Tecnologia**, v. 10, n. 21, p. 89-100, 24 dez. 2020. Disponível em:  
<<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/826/305>>. Acesso em 03 de junho 2023.

MARCANDALLI, L. **Biopolímero: efeitos em aspectos físico-hídricos do solo e na dinâmica de nitrogênio e potássio**. Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura. Piracicaba, 2023.

MANZINI E; VEZZOLI C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais**. 1. ed. São Paulo. Edusp. 2007.

MENTA E. **IMPRESSÃO: imaginar, planejar e materializar**. 1. ed. Paraná, Secretaria de Estado da Educação do Paraná. Disponível em:  
<[http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed\\_lab/caderno\\_impresao\\_3d.pdf](http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impresao_3d.pdf)>. Acesso em 01 de junho de 2023.

SALLENAVE G. **Análise da degradação do PLA em ambiente marinho simulado**. 2022. Dissertação (Mestrado) - PgDesign, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em:  
<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/255164/001163294.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 08 de abril de 2023.

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

SILVESTRIM, R. G. **Desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de poliácido láctico reforçado com fibra vegetal de alta resistência da árvore embira**. 2018.

TECHCD, **Conheça as principais tendências do setor de impressão 3D para 2023**. Disponível em:<<https://techcd.com.br/noticias/tendencias-do-setor-impresao-3d/#:~:text=Segundo%20levantamento%20da%20consultoria%20americana,impressoras%20D%20seguem%20em%20alta>>. Acesso em: 06 de abril de 2023.

TEIXEIRA, M. G. **Concepção de paleta de cores para compósito de resíduo particulado de MDF com poliéster termofixo e aplicação em um produto conceitual**. *Design e Tecnologia*, v. 7, n. 13, p. 100-109, 30 jun. 2017. Disponível em:  
<<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/350/222>>. Acesso em 03 de junho de 2023.

TAVARES, Edayane Evelyn Alves Silva. **Gestão de resíduos sólidos em instituições de ensino superior: um estudo de caso na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/Campus Recife)**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em:  
[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-12012016-150123/publico/2015\\_PlinioMartinsFalcao\\_VOrig.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-12012016-150123/publico/2015_PlinioMartinsFalcao_VOrig.pdf)>. Acesso em 10 de maio 2023.



WWF, **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 29 de maio de 2023.

### **Sobre o autor**

#### **Rafael Reche Tavares**

Graduado em Design pela Universidade Feevale. Mestrando no programa de Pós-graduação em Design (PgDesign) na UFRGS.

ORCID. <https://orcid.org/0009-0006-1019-7451>

57

#### **Fernando Dal Pont Morisso**

Professor Doutor, na Universidade Feevale. Graduado em Química e Licenciatura em Química pela PUCRS. Mestre em Química pela UFRGS. Doutor pelo Programa de pós-graduação em Química da UFRGS. Coordenador do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale. Líder do grupo de pesquisa em Desenvolvimento de Materiais Biocompatíveis e Tecnologias em Saúde.

ORCID. <https://orcid.org/0000-0002-9653-9857>

#### **Lauren Arrussul Carús**

Professora Doutora, na Universidade Feevale. Graduada em Design de Produto pela UFN. Mestra em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela UFRGS. Doutora pelo Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e materiais / UFRGS

ORCID. <https://orcid.org/0000-0001-5891-1665>