Reciclagem de cápsulas de café pós-consumo: produção de filamento de polipropileno para uso em impressora 3D

Palavras-Chave: Embalagens pós-consumo, Cápsulas de Café, Economia Circular

Diego Leonardo Campos (Faculdade de Tecnologia da Unicamp – FT – PIBIC)
Profª Drª Carmenlucia S. G. Penteado (Orientadora, Faculdade de Tecnologia)
Dr. Rodrigo Luiz Ximenes (Co-orientador, Faculdade de Tecnologia)

INTRODUÇÃO

O mercado global de café em cápsulas monodose experimentou um crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado pela conveniência e praticidade que oferece aos consumidores. Dados de 2020 indicam que 40% dos lares nos Estados Unidos já utilizavam essa tecnologia. No entanto, essa popularidade gerou um significativo passivo ambiental. Estudos de impacto, como o realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), revelam que o consumo de café por meio de cápsulas no Brasil pode gerar até 14 vezes mais resíduos sólidos em comparação com métodos tradicionais, como o coador de papel. Em um ano, um único consumidor pode descartar 2,6 kg de resíduos de cápsulas, um volume drasticamente maior que os 183g de filtros de papel para produzir uma quantidade similar de bebida (State, 2024).

O principal componente plástico das cápsulas é o polipropileno (PP), um dos polímeros mais consumidos no mundo, superado apenas pelo polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC). Sua ampla aplicação em diversos setores industriais e produtos do cotidiano o torna um dos maiores contribuintes para a geração de resíduos plásticos. Contudo, o PP também possui propriedades que o tornam um excelente material para a tecnologia de impressão 3D, como leveza, alta resistência química e durabilidade, representando uma oportunidade para sua reinserção na cadeia produtiva (GONÇALVES, 2024).

Diante deste cenário, o presente projeto de iniciação científica teve como proposta central investigar e testar a viabilidade técnica de reciclar cápsulas de café monodose pós-consumo para a produção de filamentos de polipropileno para impressoras 3D. Os objetivos específicos da pesquisa foram: (i) projetar e construir um protótipo de extrusora em escala laboratorial; (ii) desenvolver e otimizar os parâmetros de operação do equipamento para o processamento do PP; e (iii) realizar uma análise comparativa preliminar entre o desempenho do filamento produzido e filamentos comerciais de PLA, comumente utilizados na impressão 3D. Este estudo busca, portanto, apresentar uma rota tecnológica sustentável para a valorização de um resíduo sólido relevante, alinhando inovação com os princípios da economia circular.

METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, o projeto foi estruturado em quatro etapas metodológicas principais: Revisão da Literatura, Coleta e Preparo das Cápsulas, Construção da Extrusora e Testes Operacionais.

Inicialmente, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) entre setembro e novembro, utilizando as bases de dados Science Direct e Scopus. A busca focou em artigos sobre as propriedades de polímeros, técnicas de reciclagem e, especificamente, a reciclagem de cápsulas de café. A metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Mohler et al. 2019) foi empregada para garantir uma seleção e análise sistemática e confiável das informações que embasaram o desenvolvimento do projeto.

A matéria-prima foi obtida através da instalação de pontos de coleta de cápsulas de café pós-consumo na Faculdade de Tecnologia (FT) da Unicamp e na Escola Técnica Estadual Trajano Camargo, com divulgação realizada em murais e redes sociais. As cápsulas arrecadadas (do tipo compatível com o sistema Dolce Gusto) passaram por um processo de triagem e desmontagem manual para a separação de seus componentes: o corpo da cápsula (PP), a película de vedação (PP), o filtro interno (PP), a película de PLA e a fina camada de alumínio. O resíduo de café e a fração de alumínio foram devidamente descartados (Figura 1).

Figura 1. Componentes da cápsula após remoção do resíduo de café: (a) recipiente PP; (b) película de vedação PP; (c) película PLA; (d) filtro PP; (e) película de alumínio.

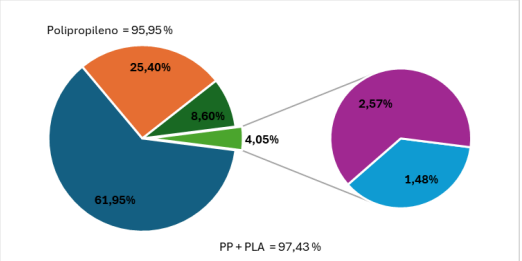
Fonte: Autor, 2024.

Um balanço de massa (Tabela 1) realizado com uma amostra de cápsulas pós-consumo revelou que o resíduo de café representava 61,42% da massa total. Após a remoção do café, a análise dos componentes restantes indicou que a fração plástica (PP + PLA) correspondia a 97,43% da massa, confirmando o elevado potencial de reciclagem do material (Figura 2).

Tabela 1. Balanço de massa dos componentes de uma cápsula de café pós-consumo.

Amostra	Massa (g)						
	Capsula PP	Filtro PP	Pelicula PP	Pelicula PLA	Alumínio	Pó café	Total
1	1,7751	0,7369	0,2618	0,0617	0,0786	4,8222	7,7363
2	1,7902	0,7385	0,2606	0,0569	0,0754	4,2941	7,2157
3	1,7852	0,7295	0,2401	0,0276	0,0697	4,9840	7,8361
4	1,7968	0,7298	0,2214	0,0298	0,0733	4,5660	7,4171
5	1,8144	0,7402	0,2602	0,03775	0,0748	4,3675	7,29485
Média	1,79234	0,73498	0,24882	0,04275	0,07436	4,60676	7,50001
%	23,8978348	9,80%	3,32%	0,57%	0,99%	61,42%	100,00%

Figura 2. Composição (em massa) dos materiais componentes da cápsula após remoção do resíduo de café.



Fonte: Autor, 2024.

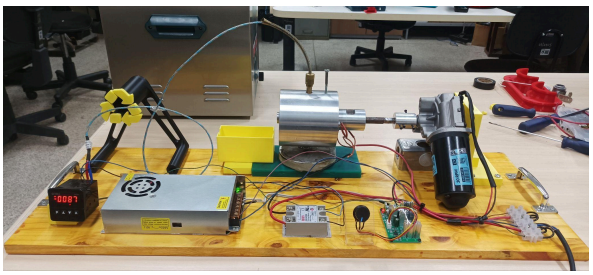
Para adequar o material à alimentação na extrusora, os componentes plásticos foram submetidos à moagem. Posteriormente, como etapa crucial de purificação, os fragmentos foram tratados em um banho ultrassônico para garantir a completa remoção de partículas de alumínio residuais, que poderiam causar obstruções no bico da extrusora ou da impressora 3D.

A extrusora foi projetada como um modelo compacto de bancada, a partir de pesquisas na literatura (PIRES, s.d; GUIMARÃES, 2018; GHENO, 2024; FERNANDES, 2025) e consultas com profissionais da área. Seus componentes foram adquiridos e as peças metálicas centrais, como o bloco de aquecimento e o mancal, foram usinadas em alumínio com base em desenhos técnicos detalhados, elaborados no software AutoCAD.

A montagem final integrou todos os componentes mecânicos e elétricos sobre uma plataforma de madeira tratada. Aspectos críticos do projeto foram cuidadosamente considerados, como o acoplamento seguro entre o motor e a broca extrusora por meio de um flange de alumínio e o isolamento térmico do bloco de aquecimento, que foi solucionado com o uso de uma manta de silicone de 10 mm de espessura para proteger a base de madeira. Peças customizadas, como suportes para o motor, foram fabricadas em uma impressora 3D com filamento PLA. O funil de alimentação foi confeccionado artesanalmente em estanho, material escolhido por sua maleabilidade e, principalmente, por sua resistência às altas temperaturas.

O sistema eletrônico foi montado e interligado, sendo o controle de velocidade do motor realizado por um microcontrolador Arduino com um módulo PWM, e o controle de temperatura gerenciado por um controlador digital que aciona as resistências de aquecimento através de um relé de estado sólido. Com a programação do *setpoint* de temperatura, o equipamento foi finalizado (Figura 3).

Figura 3. Extrusora construída



Fonte: Autor, 2025.

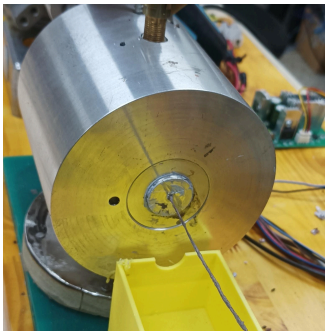
Com o protótipo funcional, iniciou-se a fase de testes para determinar os parâmetros ideais de processo. O principal parâmetro avaliado foi a temperatura de extrusão. Foi conduzida uma série de ensaios sistemáticos, variando a temperatura de 170°C até 215°C, com incrementos de 5°C. Durante toda a avaliação, a velocidade de

extrusão foi mantida constante e deliberadamente baixa (aproximadamente 2 mm/s) para isolar o efeito da temperatura sobre a qualidade do filamento gerado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes operacionais realizados com a extrusora demonstraram o sucesso do projeto em sua prova de conceito, validando a viabilidade técnica de produzir um filamento contínuo a partir do polipropileno reciclado das cápsulas de café (Figura 4).

Figura 4. Filamento de polipropileno reciclado produzido na extrusora experimental



Fonte: Autor, 2025

A análise sistemática da temperatura de extrusão revelou que esta é uma variável crítica para a qualidade do produto final. Observou-se que a faixa de temperatura ótima de processo se encontra entre 200°C e 215°C, diferente das faixas de temperatura de fusão do polipropileno, de aproximadamente 165ºC (MARTINS et. al, 2009), e do PLA, entre 170 e 180 ºC (SANTANA, 2018), pesquisadas na literatura. Dentro deste intervalo, o PP atingiu a viscosidade ideal para um fluxo estável e contínuo através do bico extrusor, sem apresentar sinais de degradação térmica, como fumaça ou alteração de cor. Temperaturas abaixo desta faixa resultaram em um material quebradiço e extrusão descontínua, enquanto temperaturas superiores poderiam comprometer a integridade do polímero.

O filamento produzido exibe características mecânicas promissoras. Em uma análise tátil preliminar, demonstrou boa resistência à tração e excelente flexibilidade, propriedades intrínsecas ao PP que são desejáveis para muitas aplicações em impressão 3D. Além disso, notou-se um rápido resfriamento do material ao sair do bico, uma característica positiva que pode ajudar a evitar deformações durante a impressão.

Contudo, a principal limitação identificada foi a variação no diâmetro do filamento ao longo de seu comprimento, que não atingiu a uniformidade circular de um filamento comercial.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa demonstrou a viabilidade técnica de reciclar cápsulas de café pós-consumo e transformá-las em filamentos de polipropileno para impressão 3D. A construção e operação de um protótipo de extrusora em escala laboratorial permitiram não apenas a produção do filamento, mas também a identificação de parâmetros de

processo cruciais, como a faixa de temperatura ótima de 200°C a 215°C e a velocidade de extrusão de aproximadamente 2 mm/s.

O filamento produzido, embora necessite de otimização em sua uniformidade dimensional, já apresenta características promissoras de resistência e flexibilidade. O principal desafio da variação de diâmetro foi atribuído à heterogeneidade da matéria-prima reciclada e às exigências térmicas do PP. A superação deste obstáculo, principalmente através do ajuste da velocidade de extrusão, é o próximo passo natural para o desenvolvimento do projeto.

Conclui-se que o projeto não apenas oferece uma solução sustentável alinhada aos princípios da economia circular, mas também impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem locais e de baixo custo, incentivando a inovação e a responsabilidade ambiental no campo da manufatura de peças.

BIBLIOGRAFIA

FERNANDES, Sarah Even Oliveira Barbosa. Desenvolvimento de uma extrusora de filamento PET para impressão 3D. Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente, v. 5, n. 2, 2024. Disponível em: https://ime.events/conasust2024/pdf/32991. Acesso em: 29 jan. 2025

GHENO, Simoni Maria et al. ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE EXTRUSÃO DE FILAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D A PARTIR DE PET RECICLÁVEIS. SITEFA, v. 7, n. 1, p. e7118-e7118, 2024.

GONÇALVES, Péterson Alexandre de Souza. Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em Polipropileno com aplicação em filamentos para impressora 3D. 2024.

GUIMARÃES, Ana Lúcia. Projeto e construção de uma extrusora como alternativa na melhoria da produção de fertilizantes foliares. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Vai um cafezinho aí?. São Paulo, 31 maio 2019. Disponível em: https://ipt.br/2019/05/31/vai-um-cafezinho-ai/. Acesso em: 4 ago. 2025.

MARTINS, MAP; ARAÚJO, H. N.; PELLIZZARO, Marli. Estudo de compósitos com produtos de reciclagem. XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2009.

MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, ALTMAN DG. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Medicine 6 (7) e1000097. doi:10.1371/journal.pmed.1000097.

PIRES, Breno Pimenta; COELHO, Caique Moreira Pires; DA SILVA VIEIRA, Dalila Oliveira. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA EXTRUSORA AUTOMATIZADA.

SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, p. e12267, 2018.

STATE. Sustentabilidade e cápsula de café: uma combinação possível? State, 22 mar. 2024. Disponível em: https://www.state.is/posts/sustentabilidade-capsula-cafe. Acesso em: 4 ago. 2025.