

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS EM FAB LABS POR FUSÃO QUÍMICA DE RESÍDUOS DE FILAMENTOS

OPTIMIZATION OF PRODUCT DEVELOPMENT PROCESSES IN FAB LABS THROUGH CHEMICAL FUSION OF FILAMENT WASTE

NAKAMURA, Danyele Arissa; Autora; Universidade Estadual de Maringá

danyeleqrisa@gmail.com

SANTOS, Kamilly Gimenes dos; Co-autora; Universidade Estadual de Maringá

ra126920@uem.br

FORCATO, Marcelo dos Santos; Doutor; Universidade Estadual de Maringá

msforcato2@uem.br

EL KATTEL, Cristina do Carmo Lucio Berrehil; Doutora; Universidade Estadual de Maringá

cclucio@uem.br

MIYAMOTO, Rodolfo Tsutomu; Mestre; Universidade Estadual de Maringá

rtmiyamoto2@uem.br

Resumo

O crescimento do uso da tecnologia de Manufatura Aditiva (AM) em impressoras 3D é evidente na indústria 4.0, particularmente em campos como o design, o que tem gerado um acúmulo significativo de resíduos. Estes, são constantemente descartados de forma inadequada, intensificando os impactos ambientais, especialmente em ecossistemas aquáticos. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um processo para o desenvolvimento de um material feito a partir de resíduos plásticos gerados em impressões tridimensionais através da fusão química, tendo em vista que a reciclagem de filamentos pode mitigar problemas ambientais e reduzir custos de produção. Foram realizados experimentos com resíduos de PLA e ABS e solventes como D'Limoneno, acetona e acetato de etila. A interação entre o ABS e o acetato de etila destacou-se, apresentando resultados satisfatórios para fins de revestimento, soldagem e, também, como compósito para a geração de novos produtos. Os dados obtidos ressaltam o potencial significativo dessa abordagem em aplicações práticas e sustentáveis.

Palavras Chave: manufatura aditiva; impressão 3D; sustentabilidade e fusão química.

Abstract

The growth of Additive Manufacturing (AM) technology in 3D printing is evident in Industry 4.0, particularly in fields such as design, which has led to a significant accumulation of waste. These wastes are often inadequately discarded, intensifying environmental impacts, especially in aquatic ecosystems. In this context, this research aimed to develop a process for creating a material from plastic waste generated by 3D printing through chemical fusion, considering that filament recycling can mitigate environmental problems and reduce production costs. Experiments were conducted with PLA and ABS waste and solvents such as D-Limonene, acetone, and ethyl acetate. The interaction between ABS and ethyl acetate stood out, showing satisfactory results for coating, welding, and also as a composite for the generation of new products. The obtained data highlight the significant potential of this approach in practical and sustainable applications.

Keywords: additive manufacturing; 3D Printing; sustainability and chemical fusion.

1 Introdução

O uso da tecnologia de Manufatura Aditiva (AM) utilizada nas impressoras 3D é uma crescente dentro da indústria 4.0, principalmente para fabricação de produtos em áreas diversas (Lavecchia et al., 2021), como o Design. Essa crescente demanda acarreta no acúmulo de resíduos que muitas vezes não recebem destinação adequada, agravando os impactos ambientais, principalmente no ambiente aquático, que já apresenta quantidades significativas de microplásticos, encontrados em rios, lagos, mares e oceanos (Gola et al., 2021).

A busca por novas alternativas de reaproveitamento com viés sustentável se faz cada vez mais necessária a fim de garantir um desenvolvimento tecnológico consciente. Dessa forma, a reciclagem de filamentos utilizados em sistemas de impressão tridimensional (3D) pode ser observada como um ponto de extrema relevância para otimização dessa produção, pois ela não só amenizaria os problemas ambientais, mas também reduziria os custos durante a fabricação de um produto (Lee et al., 2022).

Os tratamentos químicos já são uma alternativa amplamente adotada devido às vantagens existentes quanto à versatilidade, rapidez do processo e ausência das limitações geométricas, além da possibilidade de os solventes serem utilizados tanto em seu estado líquido como em vapor (Lavecchia et al., 2021).

Assim, a realização da fusão química dos resíduos provenientes da impressão 3D se torna uma possibilidade viável que colabora para geração de outras aplicabilidades, seja para acabamento de peças impressas, soldagem ou confecção de uma nova matéria-prima reutilizada, trazendo inovação para o mercado e contribuindo para um ciclo de produção mais eficiente e sustentável agregando valor ao que antes seria descartado e degradaria o meio ambiente.

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um processo para reutilização do material plástico residual proveniente de impressões tridimensionais (3D) por meio da fusão química.

2 Referencial teórico

2.1 Manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva (AM), popularmente conhecida como Impressão 3D, é um processo inovador que consiste na deposição de material em camadas, baseando-se em modelos 3D. Desde sua origem na década de 1980, essa tecnologia tem passado por significativos aprimoramentos em termos de maquinário, materiais e aplicações. Atualmente, ela desempenha um papel crucial em diversas áreas, como arquitetura, medicina, automotiva e design, integrando-se de maneira marcante à manufatura avançada, característica da indústria 4.0 (Lavecchia et al., 2021).

Essa tecnologia destaca-se pela sua versatilidade, oferecendo aos usuários a liberdade de escolher entre uma ampla gama de materiais e de enfrentar desafios projetuais complexos. Além disso, caracteriza-se por ser um processo mais eficiente em termos de tempo e custo de produção em comparação com métodos tradicionais (Di e Yang, 2022).

2.2 Tecnologia FDM: PLA e ABS

A Manufatura Aditiva engloba a tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), também conhecida como FFF (Fused Filament Fabrication), que envolve processos como a preparação de um modelo digital tridimensional, a configuração da máquina e arquivo de impressão, a própria impressão do material, solidificação e resfriamento, finalizando com a etapa de pós-tratamento.

Os materiais termoplásticos são os mais utilizados neste processo, sendo o PLA (Ácido Polilático, $(C_3H_4O_2)_n$) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno, $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$) os mais comuns (Alzahrani, 2021). De acordo com dados da Coherent Market Insights (2021), estima-se que o mercado global de polímeros para manufatura aditiva ultrapasse US\$599 milhões, aproximadamente R\$3 bilhões, até o final de 2027. Pesquisas como de Bateni (et.al., 2011) utilizam esses materiais para além da impressão 3D, sendo aplicados também para geração de compósitos de madeira e plástico, proporcionando propriedades físico-mecânicas aprimoradas com potencial de aplicação na indústria automotiva e de embalagens.

O PLA é um polímero constituído de ácido orgânico que provém de fontes renováveis e, por isso, caracteriza-se por ser biodegradável, atóxico, fácil de ser impresso com ponto de fusão relativamente baixo, facilitando também sua solubilidade em certos solventes, além de ser encontrado em cores diversas (Zigon et al., 2020).

O ABS, por sua vez, origina-se do petróleo - uma fonte não renovável - e por isso não biodegradável, no entanto, é mais resistente que o PLA, tendo uma ótima tenacidade e resistência ao impacto, além de possuir um preço de mercado acessível (Barcelos et.al., 2019). De acordo com Lima (2006), quanto maior a presença de acrilonitrila maior será sua resistência química, a altas temperaturas e ao intemperismo, já o butadieno aumentará a resistência ao impacto, flexibilidade, retenção de propriedades a baixa temperatura e, o estireno, afeta características como brilho e maleabilidade.

Quadro 1 – Quadro comparativo propriedades de impressão do PLA e ABS

PROPRIEDADES	PLA	ABS
Força Máxima	65 MPa	40 MPa
Temperatura Máxima de Serviço	52°C	98°C
Coeficiente de expansão térmica	68 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$	90 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
Densidade	1.24 g/cm^3	1,04 g / cm^3
Temperatura da Extrusora	190 - 220°C	220 - 250°C
Temperatura do leito	45 - 60°C	95 - 110°C

Fonte: Simplify3D (2023)

2.3 Resíduos de filamentos e formas de reciclagem

A popularidade da impressão 3D alavancou o número de demandas de projetos, e conseqüentemente, o número de resíduos. Eles podem surgir de diversas formas, seja devido ao mau funcionamento da máquina, falhas de impressão, remoção dos suportes estruturais da peça, etc (Di e Yang., 2022).

Tais resíduos se não descartados corretamente podem agravar os impactos ambientais que têm sido persistentes ao longo das décadas principalmente nos corpos d'água como mar, lagoas e rios afetando os seres que os habitam onde os materiais plásticos são identificados como componentes tóxicos em seus corpos (GOLA et al., 2021).

Tendo em vista tal problemática, estratégias de reciclagem de filamentos utilizados na impressão 3D têm crescido, propondo em conjunto com a diminuição do impacto ambiental e emissão de gases de efeito estufa, a redução de custos de matéria-prima, do processo de fabricação da peça e a geração de resíduos (Lee et al., 2022).

Os processos de reciclagem desses materiais podem variar entre reciclagem mecânica, térmica ou química (Rashid, 2023). Na reciclagem mecânica, os polímeros são separados e triturados em pequenos pedaços para então serem derretidos e extrudados em *pellets*, material utilizado para geração de novos produtos plásticos. Um processo simples de custo-benefício, com baixo impacto ambiental.

No processo de reciclagem térmica, os polímeros são quebrados em monômeros constituintes ou outros químicos através do aquecimento. O material resultante pode ser utilizado para gerar novos produtos ou outros químicos como combustíveis ou ceras.

Para reciclagem química, é necessário primeiramente decompor o polímero, seja através da pirólise (aquecimento em alta temperatura sem oxigênio), gaseificação (converter o polímero em gás através de reações químicas) ou hidrólise (uso de água e solventes para quebrar o polímero), passando depois pela purificação para remover impurezas, podendo, por fim, gerar novos produtos através da polimerização.

Os processos de reciclagem química são eficazes na recuperação de uma vasta gama de polímeros, reduzindo significativamente o volume de resíduos destinados a aterros sanitários. Caracterizam-se por um processo rápido e eficiente, embora exijam cuidados para a gestão segura dos reagentes químicos utilizados, a fim de minimizar qualquer risco potencial à saúde humana e ao meio ambiente.

Após a análise das três alternativas de reciclagem – mecânica, térmica e química – este projeto optou pela fusão química. Essa escolha visa explorar e propor uma técnica prática com impacto ambiental reduzido, promovendo a quebra molecular dos polímeros presentes nos filamentos para garantir alta qualidade dos materiais reciclados. Esse método não apenas diminui a dependência de recursos virgens, mas também complementa a reciclagem mecânica ao reciclar peças mais complexas, minimizando os impactos ambientais associados à produção convencional de plásticos.

Além disso, a fusão química destaca-se como uma alternativa sustentável com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a produção convencional de plásticos é notoriamente intensiva em carbono. Assim, este método contribui para a economia circular e diminui o impacto ambiental relacionado à impressão 3D e aos resíduos plásticos resultantes.

2.4 Métodos de acabamento em peças tridimensionais e solventes químicos

Os tratamentos químicos para fins de acabamento em peças impressas já são uma alternativa amplamente adotada devido às vantagens existentes quanto à versatilidade, rapidez do processo e ausência das limitações geométricas, além da possibilidade de os solventes serem utilizados tanto em seu estado líquido como em vapor (Lavecchia et al., 2021).

O método mais utilizado, atualmente, é o tratamento a base da vaporização química onde as peças, após uma limpeza prévia, são impostas em um recipiente e colocadas em água fervente com o solvente, o qual irá evaporar e então reagir com o produto. Os resultados variam de acordo com o tempo de tratamento e solvente utilizado.

Algumas reações são mais positivas que outras, pois varia de acordo com a composição química do reagente e sua relação com o material. O mesmo estudo de Lavecchia (2021), apontou que o uso da dimetilcetona é mais benéfico para reações com peças de ABS, e o acetato de etila para o PLA.

Além disso, outros métodos de pós-tratamento foram implementados, como o tratamento químico utilizando uma solução de NaOH e vapores de diclorometano, resultando em uma redução na rugosidade superficial das peças. Outra abordagem envolveu a imersão e pulverização das amostras em solventes inorgânicos, como o clorofórmio, resultando em uma melhoria de 97%, e acetato de etila, com uma melhoria de 35% (Lavecchia et al., 2021).

O acetato de etila, caracterizado por baixa toxicidade, ampla disponibilidade e custos reduzidos, emerge como um solvente promissor no contexto deste projeto em desenvolvimento. Por outro lado, a solução de NaOH com diclorometano, apesar de sua eficácia na dissolução de resíduos poliméricos, apresenta desafios relacionados à sua volatilidade e toxicidade, exigindo, assim, precauções rigorosas e conhecimento técnico aprofundado para manuseio seguro. Similarmente, o clorofórmio, embora já tenha sido amplamente empregado como solvente na produção química, teve seu uso significativamente reduzido devido a considerações sobre sua toxicidade e impactos adversos na saúde e bem-estar humano.

A produção de peças de grande porte via impressão 3D geralmente é realizada por meio da segmentação em partes menores, que são posteriormente conectadas para formar o produto final. Essa abordagem é frequentemente necessária devido às limitações espaciais da máquina ou, em alguns casos, para otimizar o processo de impressão, reduzindo o tempo de processamento e garantindo um maior detalhamento das partes. No entanto, essa prática introduz desafios significativos na etapa de junção, onde, muitas vezes, a colagem manual é empregada, resultando em uma redução da resistência mecânica e na apresentação final da peça.

Para superar essa problemática de acabamento, uma estratégia eficaz envolve a utilização de um material de ligação criado a partir do mesmo material utilizado na impressão. Esse método não apenas confere um acabamento final de qualidade, mas também proporciona reforço físico à peça (Bortoluzzi, 2021). Em um estudo de tração conduzido por Bortoluzzi (2021), uma relação particular mostrou-se eficaz: 50% de material ABS combinado com 50% de uma solução contendo

acetona e dimetilcetona para dissolver o material. Essa composição resultou em uma "Cola ABS", utilizada para conectar as peças segmentadas de forma robusta e eficaz.

O estudo de Zigon et al. (2020) investigou o acabamento de peças impressas em polímeros com três revestimentos: um revestimento alquídico à base de solvente (Tessarol Profissional), um revestimento acrílico à base de água (Belinka Exterior email), ambos comercialmente disponíveis e usados para proteção contra intempéries, e um revestimento de ABS diluído em acetona (50% ABS: 50% acetona). Os resultados mostraram diferenças significativas na composição química entre os substratos e os revestimentos aplicados, resultando em desempenhos distintos.

A acetona destacou-se por promover uma aderência significativa aos polímeros ABS. Este estudo reforça a eficácia da acetona em combinação com ABS na proporção de 50%:50%. Em contraste, os outros dois revestimentos não promoveram a fusão química dos resíduos de filamentos, tornando-os inadequados para os propósitos deste projeto.

Figura 1 – Reação de uma peça em ABS com a acetona



Fonte: A autora (2023)

Cunico (et al., 2019) emprega uma pasta plástica derivada de resíduos gerados na manufatura aditiva, a qual apresenta versatilidade para soldagem, acabamento superficial e reforço estrutural de peças impressas. Essa pasta passa por um processo de fusão química, reagindo com solventes específicos para formação de sua composição final. No estudo, o clorofórmio foi selecionado como solvente compatível com o PLA, enquanto o Metil-etil-cetona (MEC), de fórmula $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_3$, foi empregado para o ABS. Apesar dos resultados satisfatórios obtidos, a utilização de solventes de alto risco ambiental e para a saúde humana representa uma lacuna a ser abordada nesta pesquisa.

Quando se abordam compostos e reações químicas, a identificação de substâncias ecológicas e isentas de impactos ambientais se torna um desafio. Com o objetivo de promover a química sustentável, foi conduzida uma investigação sobre solventes naturais viáveis para a dissolução de resíduos poliméricos, visando à sua aplicação neste projeto.

O D-Limoneno foi um dos solventes encontrados; este tem sua origem a partir de um resíduo orgânico, a casca de laranja, e, segundo os experimentos executados por Silva (et. al., 2021) é capaz de dissolver o poliestireno expandido, um tipo de polímero não biodegradável. Este material possui baixa densidade, composto por 98% de ar e 2% de poliestireno, diferindo do PLA

ou ABS, além de apresentar características compatíveis com a dissolução pelo solvente. Cabe ressaltar que, embora tenha se mostrado eficaz para um determinado polímero, não é possível generalizar suas reações a todos os polímeros e, por isso, requer experimentos específicos para relações com outros materiais.

O limoneno, com fórmula molecular C₁₀H₁₆, é um líquido lipofílico, apresentando afinidade com lipídios (gorduras) e odor cítrico. Encontra-se em diversos óleos, como óleos cítricos e terebintina (resina destilada de árvores coníferas). O D-limoneno é prevalente em plantas, sendo o principal componente do óleo da casca de laranja (90 a 95%), e pode ser encontrado em outros óleos essenciais cítricos, como limão, mandarina e lima. Suas aplicações são variadas, sendo encontrado em solvente, produto de limpeza, componente de fragrâncias de perfumes, etc (Silva et al., 2021). Trata-se de um solvente biodegradável, atóxico, e que em níveis baixos não produz vapores prejudiciais à saúde.

Quadro 2 – Propriedades do D-Limoneno

Ponto de Ebulição de 176°C
Ponto de Fusão de - 75°C
Densidade Relativa de 0,84 g/mL
Insolúvel em Água
Solúvel em Álcool

Fonte: Barrozo e Santos (2008)

A revisão das pesquisas pertinentes sobre solventes e técnicas para o acabamento de peças impressas permite concluir que, para reações associadas a resíduos de PLA e ABS, a acetona (dimetilcetona/propanona), metil etil cetona (butanona), o acetato de etila e o D-limoneno emergem como solventes mais promissores. Essa seleção fundamenta-se na intenção de dissolver o substrato e gerar um material que possa ser aplicável diretamente à peça impressa.

A avaliação da adequação destes solventes é baseada na análise de toxicidade e riscos à saúde humana e ambiental fornecidas pela Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), NFPA (Associação Nacional de Proteção Contra Incêndios) e FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos). Nesse contexto, é necessário adotar solventes de menor risco, empregando equipamentos de proteção individual e conduzindo os experimentos em instalações apropriadas. Além de considerar os danos ambientais que os processos do projeto podem trazer prezando, portanto, por uma alternativa segura e sustentável.

Quadro 3 - Classificação de Solventes

Solvente	Preço	Solubilidade PLA	Solubilidade ABS	Riscos à saúde	Riscos ao meio ambiente
Acetona (C ₃ H ₆ O)	Baixo	Não solúvel	Solúvel	Baixo/Médio	Médio/Alto
Metil etil cetona (CH ₃ C(O)CH ₂ CH ₃)	Médio	Não solúvel	Solúvel	Médio/Alto	Baixo
Acetato de etila	Baixo	Solúvel	Solúvel	Baixo/Médio	Baixo
Clorofórmio	Baixo	Solúvel	Não solúvel	Alto	Alto
Diclorometano	Médio	Solúvel	Solúvel	Alto	Alto
Hidróxido de Sódio (NaOH)	Médio	Não recomendado	Não recomendado	Alto	Alto
Limoneno/ D-Limoneno	Baixo	Não Solúvel	Limitada	Baixo	Baixo

Fonte: A autora (2023)

O nível de risco à saúde humana pode variar de acordo com o tempo de exposição e a quantidade de solvente em manuseio. Por exemplo, a exposição prolongada ou em grandes quantidades em relação a acetona, pode causar irritação nos olhos, nariz e garganta, além de ressecamento da pele. Em doses muito altas, pode causar efeitos mais graves, como tontura, dor de cabeça, náusea e até mesmo danos ao sistema nervoso central. Por isso, é importante utilizar todos os solventes com cautela, em ambientes bem ventilados e seguir as instruções de segurança fornecidas pelos fabricantes.

O mesmo se dá em relação ao meio ambiente, em quantidades altas e descarte incorreto, a acetona devido a sua alta volatilidade pode contribuir para a poluição atmosférica e danos a corpos d'água. Por isso, independente da classificação de risco do solvente, é importante que seu manuseio seja correto do início ao fim, garantindo a integridade humana e ambiental.

3 Materiais e Métodos

Os resíduos de filamentos poliméricos foram obtidos por meio de doações do Fab Lab da Universidade Estadual de Maringá, campus de Cianorte, Paraná. Testes preliminares com acetona foram realizados utilizando esses resíduos, estabelecendo a base para a hipótese do estudo sobre seu reaproveitamento. Os solventes escolhidos para o projeto foram acetato de etila, acetona e D-Limoneno. Esses testes ocorreram no primeiro semestre de 2024.

Essa pesquisa seguiu uma sequência de passos planejados para atingir seus objetivos. Inicialmente, procedeu-se à coleta dos resíduos no Fab Lab da Universidade Estadual de Maringá, com ênfase nos resíduos de PLA e ABS, dois materiais comumente utilizados na impressão 3D. Posteriormente, os resíduos foram submetidos a uma fase de separação, onde foram devidamente classificados de acordo com o tipo de material, garantindo a precisão e consistência dos experimentos.

Na etapa seguinte, os resíduos foram triturados e fragmentados em pedaços menores (cerca de 2mm de dimensões gerais) utilizando um liquidificador convencional, visando facilitar o manuseio e preparação subsequente. Em seguida, através do uso de uma balança digital de cozinha (precisão eletrônica de 1 grama a 10 kg), diferentes medidas de solvente foram testadas em relação à quantidade de resíduos, seguindo uma tabela experimental previamente estabelecida. Esses testes foram realizados em potes de vidro de 200ml e 500ml com tampas de metal e anel de vedação para controle e observação adequada.

Após a aplicação dos solventes nos resíduos, foi realizada uma análise das reações resultantes em um intervalo inicial de minutos observando possíveis mudanças nas propriedades dos materiais como solubilidade, coloração, viscosidade e volatilidade. Posteriormente, a massa resultante da dissolução dos resíduos foi aplicada em peças impressas de PLA e ABS, permitindo a observação de sua viabilidade e comportamento durante aplicação como acabamento.

As peças foram então submetidas a um processo de secagem de aproximadamente 24h para remover o excesso de solvente e solidificar o material. Por fim, foram analisadas detalhadamente através da comparação por foto após a secagem, avaliando possíveis alterações nas propriedades físicas e estéticas do material. Essa metodologia sistemática permitiu a realização de experimentos controlados e a obtenção de resultados concretos para a pesquisa.

O plano experimental, apresentado na tabela 1, foi determinado com base em testes preliminares realizados com os materiais e de acordo com as pesquisas apresentadas no referencial teórico. Esta tem como objetivo criar uma base de orientação para as experimentações iniciais, mas podendo ser modificada conforme a compreensão das interações em questão.

Tabela 1. Design experimental da produção do material com Acetato de Etila e Acetona

Amostra	Resíduos de filamentos plásticos: PLA	Resíduos de filamentos plásticos: ABS	Acetato de etila	Acetona
A1	80%	0	20%	0
A2	65%	0	35%	0
A3	50%	0	50%	0
A4	35%	0	65%	0
A5	20%	0	80%	0
A6	0	80%	0	80%
A7	0	65%	0	65%
A8	0	50%	0	50%
A9	0	35%	0	35%
A10	0	20%	0	20%

Fonte: a autora (2024)

A Tabela 2, por sua vez, explora a mesma base experimental da tabela anterior, mas com foco no uso do PLA, que se mostra mais adequado para reações químicas com o D-limoneno.

Tabela 2. Design experimental da produção do material com D-Limoneno¹

Mistura	Resíduos de filamentos plásticos: PLA	Resíduos de filamentos plásticos: ABS	D-Limoneno
M1	80%	0	20%
M2	65%	0	35%
M3	25%	25%	50%
M4	35%	0	65%

Fonte: a autora (2024)

¹ Para realização dos experimentos que envolvem compostos químicos é importante ressaltar o uso de EPI's (Equipamentos de Proteção Individual) para exercício pleno das atividades sem causar qualquer dano à saúde. Neste sentido, para trabalhos envolvendo acetona, acetato de etila e D-limoneno, o uso de óculos de proteção, luvas de neoprene, Lab Coat, máscara de proteção com carvão ativado e válvula Prosafety são necessários, além de trabalhar em área bem ventilada ou em um capuz de exaustão para dissipar vapores químicos e evitar a inalação de substâncias tóxicas.

3.1 Elaboração e preparação dos materiais

Os resíduos de PLA e ABS foram separados e identificados no Fab Lab da Universidade Estadual de Maringá, campus de Cianorte, para execução dos experimentos práticos.

Figura 2 - Resíduos de PLA e ABS



Fonte: A autora (2024)

Após identificação, os resíduos foram classificados em densos e finos, e triturados utilizando um liquidificador convencional para obter fragmentos menores e uniformes. Esses fragmentos foram então filtrados através de um funil de 7 mm para separação, e tanto o material inicial quanto o resultante foram pesados para fins comparativos e analíticos. O PLA foi triturado rapidamente em cerca de 30 segundos, enquanto o ABS exigiu de 2 a 4 minutos devido à sua maior resistência.

Para os resíduos densos, foi necessário um processo adicional de trituração. Essas peças foram cortadas em fragmentos menores usando uma caneta de solda para derretê-las. Este método, embora demorado, foi eficaz. Medidas de segurança, como ventilação adequada, uso de máscara e óculos de proteção, foram adotadas devido à fumaça gerada. O ABS mostrou-se mais resistente que o PLA durante o derretimento.

Após a obtenção de fragmentos menores, eles foram triturados novamente no liquidificador. O PLA levou cerca de 3 minutos, enquanto o ABS levou aproximadamente 4 minutos para alcançar fragmentos uniformes.

Figura 3 - Etapas de processamento PLA e ABS



Fonte: A autora (2024)

Os fragmentos triturados foram armazenados em recipientes plásticos para posterior dissolução com solventes químicos. O peso total dos resíduos de PLA foi de 199g, e o de ABS foi de 302g.

Figura 4 - Resíduos de PLA e ABS pós processamento



Fonte: A autora (2024)

Os próximos passos envolveram testar diferentes medidas de solvente em relação à quantidade de resíduos, começando com quantidades menores e aumentando conforme necessário. Foi analisada a reação dos solventes com os resíduos de PLA e ABS, seguida pela aplicação da massa gerada em peças impressas, determinação do tempo de secagem e análise final pós-secagem.

4 Desenvolvimento

4.1 Estudo da Interação entre Resíduos PLA/ABS e D-Limoneno

Após a trituração dos resíduos de PLA e ABS, avançou-se para os testes de interação com diferentes solventes, começando pelo D-Limoneno. O objetivo desses testes é avaliar e determinar os solventes viáveis para o desenvolvimento de uma massa de acabamento.

Os experimentos foram realizados em potes de vidro, utilizando diversas combinações de resíduos e solvente, conforme demonstrado na Tabela 3. Após 24 horas de interação, constatou-se que o PLA permaneceu inalterado, enquanto o ABS apresentou uma leve mudança, com sinais de amolecimento e aglutinação dos resíduos.

Tabela 3. Design experimental preliminar com D-Limoneno

Mistura	Resíduos de filamentos plásticos: PLA	Resíduos de filamentos plásticos: ABS	D-Limoneno / Limoneno
P1	15g	0	12g
P2	3g	0	12g
A1	0	15g	17g

Fonte: A autora (2024)

Com base nessas observações, foram conduzidos novos experimentos, com destaque para o teste A2 com ABS e o teste AP1 com a mistura de PLA e ABS, conforme detalhado na Tabela 4. Após 72 horas, verificou-se uma dissolução parcial dos resíduos de PLA, enquanto o ABS demonstrou uma maior aglutinação dos resíduos.

Tabela 4. Design experimental com D-Limoneno

Mistura	Resíduos de filamentos plásticos: PLA	Resíduos de filamentos plásticos: ABS	D-Limoneno / Limoneno
A2	0	3g	2g
AP1	7,5g	7,5g	15g

Fonte: A autora (2024)

4.1.1 **Conclusões da Interação PLA/ABS X D-Limoneno**

Os resultados finais indicaram que a interação entre os resíduos de PLA/ABS e o D-Limoneno não foi eficaz na produção de uma massa, resultando, no caso do PLA, apenas em uma coloração alaranjada no solvente proveniente do corante do polímero. Entretanto, observou-se que o ABS em interação com o D-Limoneno apresentou uma resposta singular, com sinais superficiais de amolecimento, sugerindo possíveis aplicações futuras. As propriedades do solvente e a polaridade dos materiais influenciaram os resultados, destacando a complexidade das interações entre solventes e polímeros e a necessidade de estudos adicionais.

Figura 5 - Observações finais das amostras com D'Limoneno



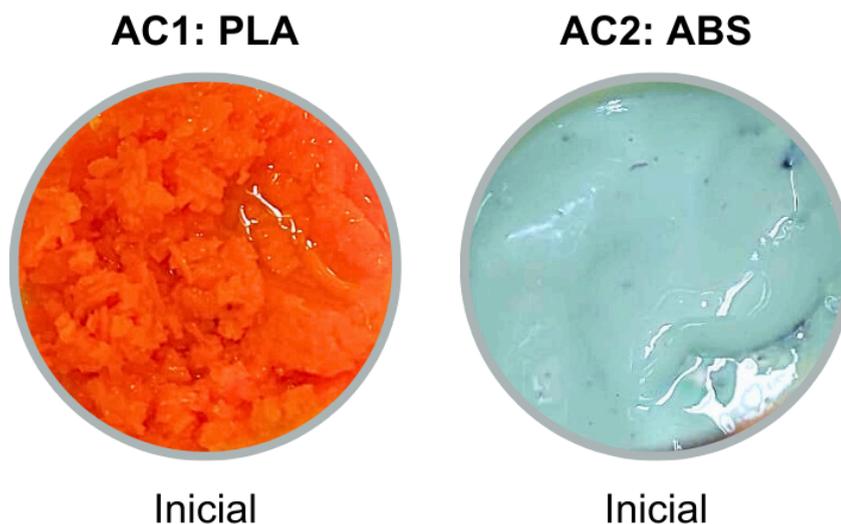
Fonte: A autora (2024)

4.2 Estudo Preliminar da Interação entre Resíduos de PLA/ABS e Solventes Acetona e Acetato de Etila

4.2.1 Interação com Acetona

A acetona foi um dos solventes selecionados para testar a interação com resíduos poliméricos. Nos testes iniciais (AC1), 15g de resíduos de PLA foram misturados com 10g de acetona. A reação foi instantânea, dissolvendo parcialmente o material, que rapidamente se agrupou e endureceu. Após armazenar e observar a amostra por 1 hora, verificou-se que o solvente havia evaporado e o material não apresentava novas reações. Para tentar promover maior dissolução, foram adicionados mais 11g de solvente, mas o resultado permaneceu inalterado. O material dissolvia parcialmente, mas logo se agrupava e endurecia.

Figura 6 - Observações Iniciais das Amostras de PLA e ABS em Acetona

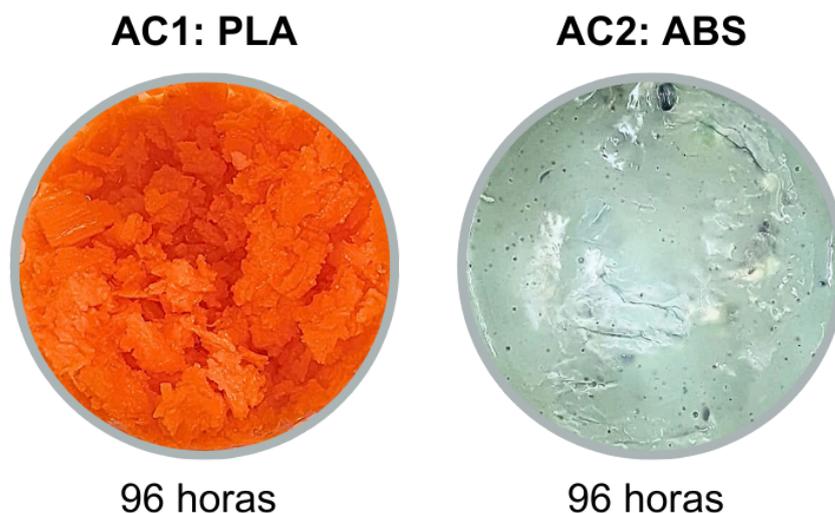


Fonte: A autora (2024)

Para os testes com ABS (AC2), foram utilizados 15g de resíduo inicialmente misturados com 5g de acetona. Devido à alta volatilidade do solvente, foi necessário adicionar mais 8g, totalizando 13g de acetona. A mistura foi feita para garantir maior homogeneização, resultando em uma consistência mais pastosa. A amostra foi então reservada para observação. Após cerca de 1 hora, a amostra manteve-se pastosa, mas tornou-se mais densa ao ser exposta ao ar.

Após 96 horas de observação, os resíduos de PLA apresentaram-se mais secos e menos granulados. No caso do ABS, a massa, que inicialmente era mais líquida, havia secado completamente e endurecido, tornando-se inutilizável na forma apresentada.

Figura 7 - Observações após 96 h das Amostras de PLA e ABS em Acetona



Fonte: A autora (2024)

Diante da completa secagem do material, realizou-se um experimento complementar para avaliar a possibilidade de restauração do material mediante a adição de solvente. Assim, foram adicionados mais 4g de acetona à mistura de ABS (AC2), resultando na geração de uma nova massa (AC2*) que transicionou de um estado sólido e inutilizável para um estado pastoso, similar ao estado original.

Além disso, foi conduzido um novo experimento para investigar se a proporção entre a quantidade de resíduo e a quantidade de solvente influencia na qualidade e na consistência da massa resultante. Para essa nova amostra (AC3), utilizou-se 5g de resíduo ABS e inicialmente 5g de acetona. Após a mistura, adicionou-se mais 6g de solvente, totalizando 11g de acetona na nova massa. Observou-se uma reação instantânea, semelhante ao experimento anterior com os mesmos componentes.

A testagem e a mistura do material ocorreram em recipiente aberto, onde a quantidade reduzida de solvente resultou em endurecimento rápido e aumento da viscosidade da massa. Isso dificultou a aplicação uniforme nas peças, levando a um acabamento irregular e comprometendo sua qualidade, o que tornou este resultado inadequado para o trabalho. A volatilidade do solvente e sua proporção em relação à massa são cruciais para alcançar uma consistência adequada, essencial para a aplicação uniforme e regular no acabamento das peças.

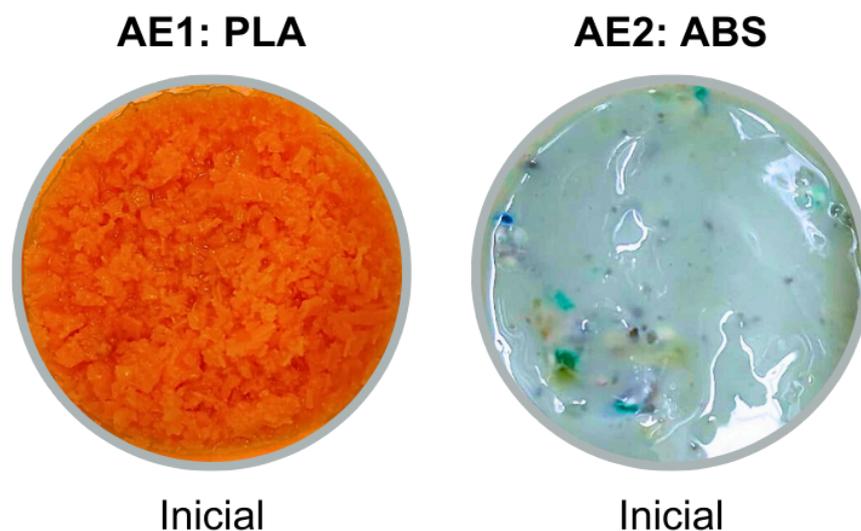
4.2.2 **Interação com Acetato de Etila**

O acetato de etila foi testado para interação com resíduos de ABS e PLA. Após misturar 15g de PLA com 8g de acetato de etila (AE1), houve uma reação rápida, onde o material se dissolveu parcialmente e endureceu, formando uma textura esfarelada com pequenas partículas aglutinadas. Apesar de adicionar mais 17g de solvente para melhorar a solubilidade, totalizando 25g, a reação não produziu uma massa líquida. Após 1 hora de observação, o solvente evaporou

completamente, deixando um resíduo esfarelado e aglutinado. A adição de mais 4g de solvente não alterou a reação, sem formação de uma massa líquida.

Para os resíduos de ABS, 15g foram misturados com 10g de acetato de etila (AE2), resultando rapidamente em uma consistência pastosa. Para melhorar a reação, foram adicionados mais 14g de solvente, totalizando 24g. Após misturar superficialmente, a amostra foi tampada e reservada para observação. Após 1 hora, a amostra apresentou uma consistência ainda mais pastosa, aproximando-se do resultado desejado para o projeto.

Figura 8 - Observações Iniciais das Amostras de PLA e ABS em Acetato de Etila



Fonte: A autora (2024)

Após 96 horas (Figura 9), a amostra de PLA em acetato de etila não apresentou alterações significativas em sua aparência inicial. Em contraste, a amostra de ABS mostrou-se mais seca, indicando uma possível evaporação parcial do solvente devido à falta de vedação hermética do recipiente. Essa condição permitiu a evaporação lenta dos vapores do solvente, levando ao endurecimento gradual da massa de ABS.

Figura 9 - Observações após 96 h das Amostras de PLA e ABS em Acetato de Etila



Fonte: A autora (2024)

No entanto, a massa gerada ainda manteve uma textura pegajosa, semelhante a uma cola. Devido a esta consistência, decidiu-se testar seu uso como uma cola plástica para peças impressas em ABS/PLA, avaliando assim seu potencial adesivo e sua viabilidade para aplicações práticas (Figura 13).

Figura 10 - Teste Preliminar Cola Plástica de ABS em Acetato de Etila



Fonte: A autora (2024)

Com base nessas considerações, foi concebido um teste aprimorado com ABS e acetato de etila (AE3), utilizando proporções reduzidas de resíduo em relação ao solvente (4g de ABS com 6g de acetato de etila), para investigar como essas variações influenciam a formação da massa. Este experimento visa fornecer uma compreensão detalhada da relação entre a quantidade de resíduo e a eficácia do solvente na obtenção de uma massa homogênea e utilizável, contribuindo para o aprimoramento do processo de reciclagem de resíduos poliméricos.

Observa-se, assim como na testagem com acetona em proporções reduzidas, que a massa com acetato de etila começa a endurecer e adquirir viscosidade inadequada em poucos minutos devido à menor quantidade de solvente na mistura. Comparativamente, o acetato de etila demonstra uma volatilidade ligeiramente menor em relação à acetona. Esses resultados destacam a importância crítica de avaliar não apenas a proporção dos ingredientes na mistura, mas também a volatilidade do solvente e sua quantidade em relação à massa para garantir a obtenção de uma consistência adequada.

Tabela 5. Design experimental preliminar com Acetato de Etila e Acetona

Amostra	Resíduos de filamentos plásticos: PLA	Resíduos de filamentos plásticos: ABS	Acetato de etila	Acetona
AC1	15g	0	0	21g
AC2	0	15g	0	13g
AC2*	0	15g	0	17g (13g + 4g)
AC3	0	5g	0	11g
AE1	15g	0	29g	0
AE2	0	15g	24g	0
AE3	0	4g	6g	0

Fonte: A autora (2024)

4.2.3 Conclusões PLA/ABS X Acetona/Acetato de Etila

Após uma análise preliminar dos experimentos envolvendo a interação de resíduos de ABS com acetato de etila e acetona, constatou-se que ambos os solventes foram eficazes na formação de uma massa pastosa. Este resultado foi observado exclusivamente na interação com os resíduos de ABS e não com os de PLA, sugerindo uma maior afinidade do ABS com esses solventes, possivelmente devido às suas propriedades químicas e estruturais.

Durante os testes preliminares, identificou-se um potencial promissor para a massa gerada ser utilizada como cola plástica. Um teste realizado com uma peça de Fab Lab demonstrou sucesso, com a cola aderindo eficazmente em apenas 5 minutos. Com o aumento do tempo de cura, a cola apresentou endurecimento progressivo e alta resistência mecânica, indicando propriedades adesivas adequadas. Este achado sugere que, além de reciclar resíduos poliméricos, o material pode ser aplicado como adesivo, o que será melhor explorado nas próximas etapas da pesquisa.

Dada a eficácia do acetato de etila na interação com os resíduos de ABS e os resultados satisfatórios obtidos com a massa AE2, utilizando a proporção de 24g de solvente para 15g de resíduo, bem como considerando os potenciais benefícios ambientais do acetato de etila em

comparação com a acetona, os experimentos subsequentes foram exclusivamente direcionados a essa combinação. Esta escolha visa explorar o diferencial desta pesquisa em relação ao uso mais comum de acetona, além de buscar soluções mais sustentáveis e eficazes.

4.3 Estudo Intermediário da Interação entre Resíduos de ABS e Solvente Acetato de Etila

4.3.1 Primeiros Testes de Aplicação da Massa

Com base nos resultados obtidos nos estudos preliminares, avançou-se para uma investigação mais detalhada das combinações que demonstraram maior potencial e satisfação projetual. Esse estudo focou nas interações entre ABS e acetato de etila. Para avaliar a eficácia da massa obtida como massa de acabamento, foi realizado um teste em maiores proporções, denominado AE4, destinado ao revestimento de uma peça impressa em 3D para testes de acabamento superficial. Nesse teste, foram utilizados 54g de resíduos de ABS e 74g de acetato de etila. A mistura foi levemente homogeneizada e então reservada para permitir a completa dissolução dos componentes.

Após 24 horas, observou-se que a massa havia absorvido melhor o solvente, começando a dissolver os componentes e formando um composto mais uniforme. Ao ser misturada, a massa apresentou uma consistência mais homogênea, permitindo sua aplicação nas peças.

Figura 11 - Avaliação Massa em Proporções Maiores de ABS em Acetato de Etila



Fonte: A autora (2024)

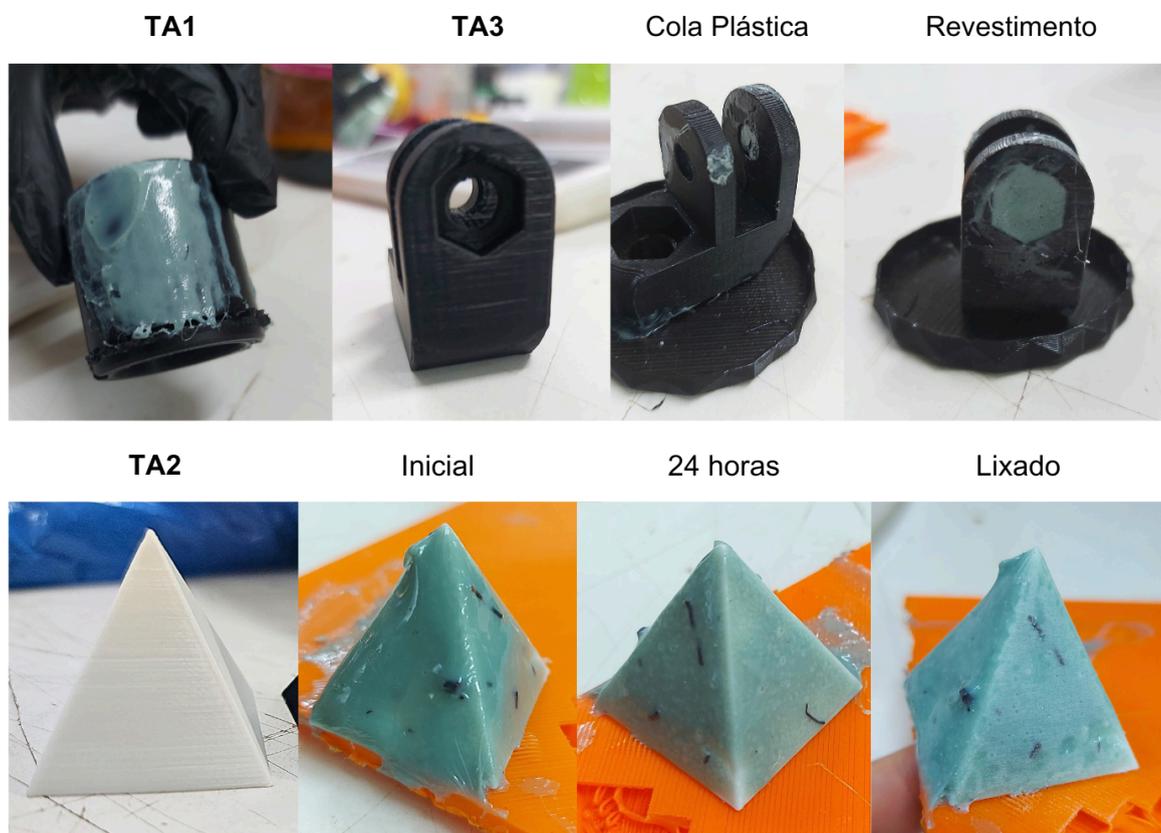
Em seguida, o resultado gerado foi testado como massa de acabamento e revestimento, utilizando diferentes métodos de aplicação. Primeiramente, a massa foi aplicada com uma

espátula, notando que devido à alta volatilidade do solvente, a massa se tornava cada vez mais densa ao contato com o ar, dificultando a aplicação. Foram necessárias várias demãos em um mesmo sentido e com delicadeza para obter um acabamento adequado (TA1).

Outro método de aplicação foi testado em uma pirâmide impressa em PLA branco (TA2), que foi mergulhada no pote de massa AE4 e então retirada e deixada de ponta cabeça para remover o excesso, resultando em uma aplicação mais uniforme. O último teste (TA3) avaliou a massa para fins de revestimento, preenchendo falhas e buracos na peça, além de um novo teste como cola plástica.

Após 24 horas, observou-se que a amostra TA1 apresentou um bom aspecto estético, brilhante e liso, com uma aparência plástica rígida. A amostra TA2 manteve o mesmo aspecto plástico e brilhante, mas evidenciou resíduos não dissolvidos, possivelmente devido à mistura de diferentes tipos de polímeros durante a trituração inicial. Foi realizado um teste de lixamento em uma das faces da pirâmide para avaliar seu comportamento sob esta ação. Foi identificado uma leve mudança no aspecto da peça, com a superfície mais lisa, mas houve a perda do brilho e aparência plástica que possivelmente pode ser corrigido com métodos de acabamento como o polimento. A amostra TA3 cumpriu seu propósito de revestimento e adesivo, mas, assim como nos outros testes, destacou a necessidade de estudos futuros sobre pigmentação para que a massa e a peça tenham a mesma cor, possibilitando ao usuário uma aplicação esteticamente satisfatória.

Figura 12 - Testes de Acabamento com massa de ABS em Acetato de Etila



Fonte: A autora (2024)

4.3.2 Tempo de Cura da Massa

Para definir o tempo de cura do material desenvolvido, foram realizadas três amostras com 15g de resíduo ABS e 25g de solvente acetato de etila, condicionadas de formas distintas em potes de vidro utilizados para conserva, com tampas de metal e anel de vedação. A primeira (TC1) foi lacrada, a segunda (TC2) teve a tampa apenas colocada em cima sem vedação, e a terceira (TC3) foi deixada totalmente aberta. Além disso, um teste adicional (TA) foi realizado para verificar a reatividade com água, misturando 15g de ABS com 24g de acetato de etila e 50g/ml de água, mas observou-se que os dois solventes possuem densidades distintas, impedindo uma reação adequada.

Durante o processo, algumas observações importantes foram feitas. Misturar a massa com o pote aberto resulta na evaporação do solvente antes de dissolver completamente o resíduo, sendo ideal adicionar o solvente, misturar levemente, vedar o pote e aguardar um tempo de reação. No caso destes testes, TC1 foi aberto somente após 1 hora, enquanto TC2 e TC3 foram abertos após 30 minutos, e então misturados novamente para homogeneização. Quanto mais tempo o produto ficar exposto ao ar, mais rápido ele secará.

A amostra TC1, após 24 horas, apresentou-se no mesmo estado, ainda em condições normais para uso. Somente após 96 horas começou a mostrar sinais de secagem, possivelmente influenciada pela abertura do pote para verificação do estado, além de que a pequena quantidade de massa possa ter influenciado na sua duração. Considerando a vedação do recipiente, a massa pura pode durar pelo menos 168 horas (1 semana) antes de se tornar significativamente rígida.

A amostra TC2 começou a apresentar um aspecto mais rígido após 24 horas, mas ainda estava em um estado utilizável. Após 48 horas, não apresentava condições satisfatórias para uso, mesmo não estando totalmente seca.

Em cerca de 3 horas de observação, a amostra TC3, que ficou totalmente aberta, já havia secado superficialmente, mas a parte inferior, sem contato direto com o ar, ainda estava mole. Em menos de 24 horas, a massa estava completamente inutilizável.

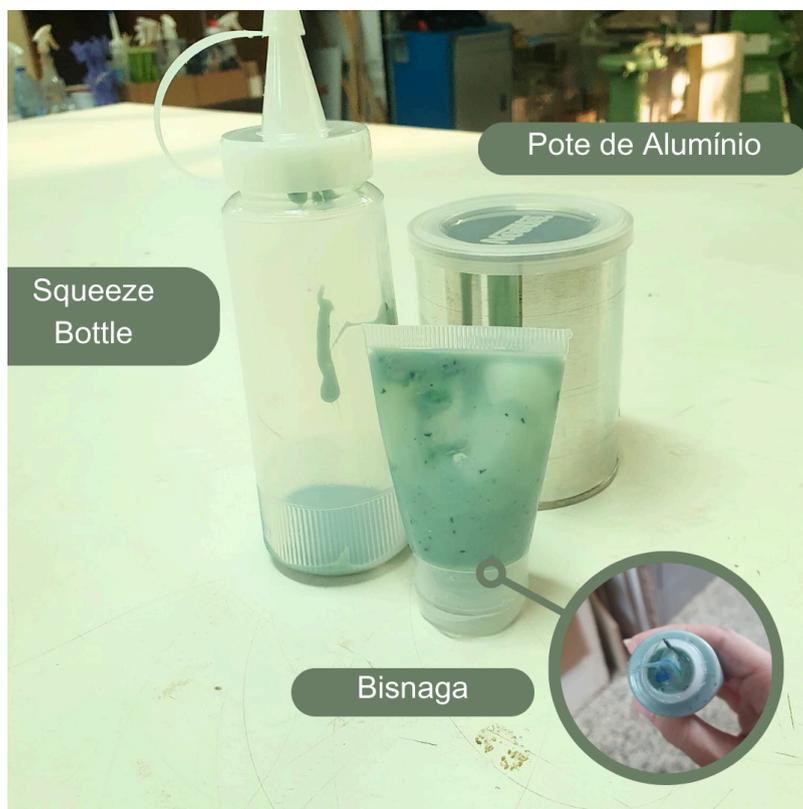
Figura 13 - Avaliação Tempo de Cura da Massa ABS em Acetato de Etila

TC1	TC2	TC3
		
Fechado	Semi-aberto	Aberto
 24 horas	 24 horas	 24 horas
 48 horas	 48 horas	 48 horas

Fonte: A autora (2024)

Com o objetivo de investigar a estabilidade temporal da massa em diferentes condições de armazenamento e aplicação, foram conduzidos novos experimentos utilizando bisnaga, squeeze bottle e pote de alumínio. Após 96 horas, observou-se que a massa armazenada na squeeze bottle começou a apresentar sinais de endurecimento, não sendo indicada para uso subsequente. Após 360 horas, somente a massa armazenada na bisnaga manteve-se em estado viscoso, demonstrando ser a forma mais adequada para preservar a integridade e funcionalidade do material reciclado entre as opções avaliadas, além de facilitar sua aplicação nos objetos.

Figura 14 - Testes Formas de Armazenamento da Massa



Fonte: A autora (2024)

4.3.3 Testes da Massa como Cola Plástica em Outros Materiais

Após todas essas análises, foi possível definir que o material desenvolvido possui grande potencial como uma cola plástica. Com isso, iniciou-se um estudo mais avançado focado em sua aplicação, avaliando os tipos de materiais que este produto é capaz de colar e como se comporta em cada situação. Inicialmente, foram realizados testes gerais em tecido, madeira e papel.

No teste com tecido, foi utilizado uma fita de lona de algodão de 38mm. O material se comportou muito bem. Em menos de 5 minutos após a aplicação, a cola havia secado e aderido fortemente. Devido à espessura do tecido, o material não vazou para o outro lado, evitando inconvenientes. Um detalhe observado foi que a área colada ficou rígida e perdeu parte da elasticidade original do tecido, resultando em uma aderência semelhante à de uma cola instantânea.

Para o teste com madeira, foram utilizados palitos de madeira de reflorestamento vendidos comumente como material escolar. Embora a cola tenha cumprido sua função, não demonstrou muita resistência, soltando-se com um nível moderado de esforço.

Em relação ao papel, foi utilizado o papel tipo Holler de 2mm. A cola aderiu bem, mas durante um teste simples de resistência, a parte inferior do papel, onde não havia contato com a massa, rasgou. Isso indica que a cola pode não ser ideal para este tipo de material devido à sua incapacidade de manter a integridade do papel sob esforço.

Figura 15 - Testes Cola Plástica em Materiais Genéricos



Tecido

Madeira

Papel

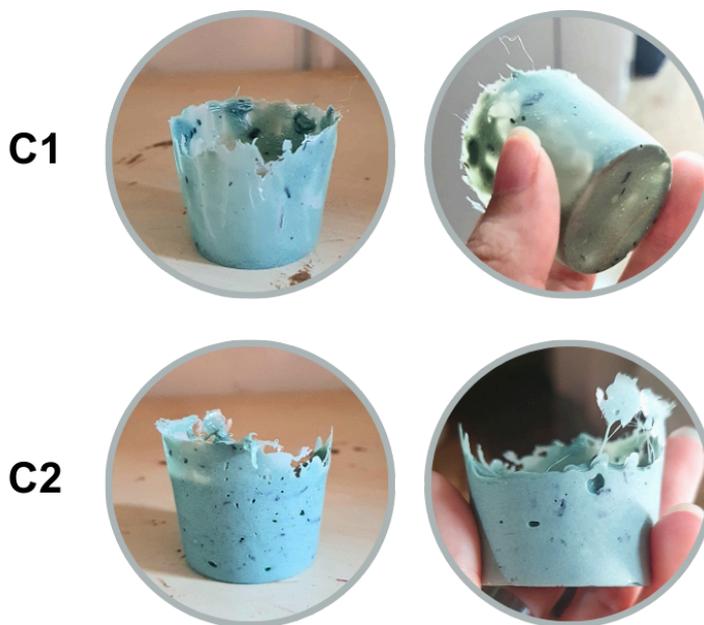
Fonte: A autora (2024)

4.3.4 Testes da Massa como Compósito de ABS e Acetato de Etila

Outra vertente explorada pelo projeto, com base nos desdobramentos experimentais, consistiu em analisar a massa resultante como um compósito, isto é, um material inovador formado pela combinação de resíduos de ABS e solvente acetato de etila, no intuito de gerar novos produtos. Para tal finalidade, foi adquirido um molde de silicone, no qual a massa foi aplicada em dois procedimentos distintos. Na primeira aplicação (C1), a massa foi distribuída de maneira mais superficial, abrangendo as laterais e a parte traseira do molde. Já na segunda aplicação (C2), todo o conteúdo foi depositado uniformemente no interior do molde, resultando em uma densidade maior.

As amostras foram então deixadas para secar e posteriormente observadas. Após 24 horas, foi realizada a primeira análise, na qual a peça C1 já havia secado devido à baixa densidade das camadas. Entretanto, a peça C2 ainda não estava completamente seca, sendo decidido aguardar mais um dia para desenformar a peça. Após 48 horas, ambas as peças foram desenformadas, apresentando resultados altamente satisfatórios. Esteticamente, ambas as peças exibiram características agradáveis: a peça C1 demonstrou uma delicadeza semelhante ao plástico PET, enquanto a peça C2, mais densa, exibiu maior resistência e menos brilho.

Figura 16 - Testes como Compósito



Fonte: A autora (2024)

Esses resultados corroboram a potencialidade do material desenvolvido como um novo compósito sustentável, originado a partir de resíduos que, anteriormente, seriam descartados. Embora análises mais aprofundadas sobre suas propriedades e aplicações sejam necessárias, esse resultado preliminar abre novas possibilidades para pesquisas futuras.

5 Considerações Finais

Os estudos realizados proporcionaram insights valiosos sobre a interação entre resíduos de PLA/ABS e solventes como D-Limoneno, acetona e acetato de etila, além de evidenciar as potenciais aplicações da massa resultante. Constatou-se que o D-Limoneno não formou uma massa de acabamento satisfatória com os resíduos de PLA/ABS, resultando apenas em uma coloração alaranjada no solvente. No entanto, a interação diferenciada do ABS com o D-Limoneno sugere possíveis aplicações futuras desse composto, destacando a necessidade de explorar diferentes solventes naturais.

A complexidade das interações entre solventes e polímeros foi evidenciada, com ênfase nas propriedades do solvente e na polaridade dos materiais. Essa compreensão mais profunda ressalta a importância de estudos adicionais para explorar a eficácia de diferentes solventes na dissolução e recuperação de plásticos, especialmente considerando os benefícios ambientais.

Os experimentos com acetona e acetato de etila apresentaram resultados satisfatórios ao interagir com o ABS, com o acetato de etila se destacando por seu menor impacto ambiental e potencial de inovação. Testes de aplicação da massa em proporções maiores revelaram seu potencial como massa de revestimento para peças impressas em 3D. Além disso, o tempo de cura

da massa, influenciado por fatores como tipo de recipiente, vedação, exposição ao ar e forma de aplicação mostrou-se crucial para garantir a eficácia do produto.

A exploração da massa como cola plástica em diferentes materiais e como compósito de ABS e acetato de etila demonstrou resultados promissores, abrindo novas possibilidades para aplicações industriais. O desenvolvimento desse compósito sustentável a partir de resíduos plásticos oferece uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental e criar novos materiais com diversas aplicações.

Em suma, esta pesquisa foi capaz de desenvolver um processo para a reutilização de resíduos provenientes da manufatura aditiva de maneira prática e eficaz, promovendo a economia circular e uma prática sustentável. Esses resultados não apenas contribuem para a redução de impactos ambientais, mas também apresentam a relevância e o potencial da reciclagem química no contexto industrial atual.

6 Referências

ALZHRANI, M. et al. Additive manufacture of recycled poly (ethylene terephthalate) using pyromellitic dianhydride targeted for FDM 3D-printing applications. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5004, 1 jan. 2023. DOI: doi.org/10.3390/su15065004

BARROZO, A. C. F.; SANTOS, D. B. Extração e purificação do limoneno – Parte I. Instituto de Química, Unesp, Araraquara, 2008, 22p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/329315123/Extracao-Do-Limoneno-Do-Oleo-de-Laranja-LIC-2008>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BATANI, F.; AHMAD, F.; YAHYA, A. S.; AZMI, M. Performance of oil palm empty fruit bunch fibres coated with acrylonitrile butadiene styrene. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1824-1829, abr. 2011. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.080

BORTOLUZZI, R. L.; CARVALHO, D. M. L.; BARCELOS, J. J. Estudo de tração em métodos de ligação de peças 3D impressas em ABS. In: MICHELS, Expedito; BORTOLUZZI, Rodolfo Lucas; SANTOS, Andreza dos (org.). **Pesquisa aplicada**. 1. ed. Capivari de Baixo: UNIVINTE CENTRO, 2021. v. 1, p. 75-93.

CUNICO, M. W. M. et al. Development and characterisation of 3D printing finishing process applying recycled plastic waste. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 14, n. 1, p. 37–52, 2019. DOI: doi.org/10.1080/17452759.2018.1521248

DI, L.; YANG, Y. Towards closed-loop material flow in additive manufacturing: recyclability analysis of thermoplastic waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 132427, 24 mai. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132427

GOLA, D. et al. The impact of microplastics on marine environment: a review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 16, p. 100552, dez. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100552

LAVECCHIA, F.; GUERRA, M. G.; GALANTUCCI, L. M. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 7, p. 65-75, 28 jul. 2021. DOI: doi.org/10.1007/s40964-021-00213-2

LEE, D. et al. Thermal and mechanical degradation of recycled polylactic acid filaments for three-dimensional printing applications. **Polymers**, v. 14, n. 24, p. 5385, 9 dez. 2022. DOI: doi.org/10.3390/polym14245385

LIMA, M. A. M. **Introdução aos materiais e processos para designers**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2006.

INSIGHTS, C. M. Polymers for additive manufacturing market analysis. 2021. Disponível em: <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/polymers-for-additive-manufacturing-market-4496>. Acesso em: 08 mar. 2024.

RASHID, A. A.; KOÇ, M. Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste. **Materials Today Sustainability**, v. 24, dez. 2023, p.100529. DOI: doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100529

SANTANA, L. et al. Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos PLA para impressoras 3D de código aberto. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9., 2015. **Anais...**, jan. 2015.

SILVA, Joyce Conceição da; FREITAS, Gabrielly Vieira de Freitas; ROCHA, Jeniffer Vanelle dos Santos Sfredo da. Dissolução do poliestireno expandido com o solvente D-limoneno. **Revista Eletrônica Multidisciplinar UNIFACEAR**, Araucária, v. 2, n. 11, ago. 2022, p. 1-5. ISSN: 2316-2317

SIMPLIFY3D. **Filament properties table**. c2024. Disponível em: www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table. Acesso em: 24 nov. 2023.

ŽIGON, J.; KARIŽ, M.; PAVLIC, M. Surface finishing of 3D-printed polymers with selected coatings. **Polymers**, v. 12, n. 12, 2020. DOI: doi.org/10.3390/polym12122797