



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Greice Carvalho Caldovino

**ESTUDO DE CHAPAS PLANAS PRENSADAS A QUENTE A PARTIR DE
RESÍDUOS DE PLA ORIGINÁRIOS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR
EXTRUSÃO DE FILAMENTO**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2022

GREICE CARVALHO CALDOVINO

**ESTUDO DE CHAPAS PLANAS PRENSADAS A QUENTE A PARTIR DE
RESÍDUOS DE PLA ORIGINÁRIOS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR
EXTRUSÃO DE FILAMENTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Caldovino, Greice C

Estudo de chapas planas prensadas a quente a partir de resíduos de PLA originários do processo de impressão 3D por extrusão de filamento. / Greice C Caldovino. -- 2022.

83 f.

Orientador: Fabio Pinto da Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Impressão 3D. 2. Poli Ácido Láctico. 3. Fabricação Digital. 4. Reciclagem. I. Pinto da Silva, Fabio, orient. II. Título.

Greice Carvalho Calvino

**ESTUDO DE CHAPAS PLANAS PENSADAS A QUENTE A PARTIR DE
RESÍDUOS DE PLA ORIGINÁRIOS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR
EXTRUSÃO DE FILAMENTO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 07 de Dezembro de 2022.

Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva**

Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Profa. Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha

Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da UFRGS – Examinador Externo

Profa. Dra. Mariana Pohlmann de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS – Examinador Interno

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido

Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

A minha mãe que sempre me apoia em toda a minha trajetória acadêmica me motivando e incentivando a concluir meus objetivos.

A minha psicóloga que me ajuda a trazer para a consciência os motivos que me fizeram apostar na minha evolução pessoal.

Ao meu orientador que me orienta com muita precisão e não mede esforços para que o trabalho seja entregue na sua melhor versão.

A mim mesma, por não desistir de continuar estudando e contribuindo com a sociedade acadêmica.

A realização deste trabalho passou por diversas fases, todos os colegas e amigos que de alguma forma contribuíram foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil) pela concessão da bolsa de estudos.

EPÍGRAFE

“Agir localmente, pensar globalmente”.
(André Carvalhal)

RESUMO

CALDOVINO, G. C. **Estudo de chapas planas prensadas a quente a partir de resíduos de PLA originários do processo de impressão 3D por extrusão de filamento.** 2022. 83 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

As impressoras 3D por extrusão de filamento à base de polímeros se popularizaram em diversos contextos nos últimos anos, sobretudo nos *fab labs* e espaços *maker*. Ainda que estes sejam equipamentos de manufatura aditiva e operem com a sobreposição progressiva de material, por diversos motivos de execução e ou erro humano eles geram resíduos poliméricos. Portanto, este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade de produção de chapas planas a partir da prensagem a quente de resíduos originários do processo de impressão 3D por extrusão de filamento. Com a finalidade de aplicação no âmbito dos espaços *maker* para a produção de protótipos e peças para estudo de forma e volume. O material investigado foi o Poli Ácido Láctico (PLA), por este ser amplamente utilizado no contexto da impressão 3D. Para tanto, a metodologia empregada consistiu na coleta, separação e classificação dos resíduos de PLA, na trituração dos mesmos e na elaboração do molde, culminando no processo de prensagem a quente do material utilizando uma prensa sublimática. Foram também executados ensaios de caracterização do material; e foi feita a preparação dos corpos de prova por corte a laser para a realização de ensaios mecânicos. A partir dos resultados, é possível atestar a viabilidade de obtenção de chapas planas utilizando a metodologia apresentada, porém houve a ocorrência de bolhas em grande parte dos experimentos e a cor do material limitou a adoção de parâmetros padronizados para as chapas. Quanto à caracterização do material, por meio da análise DSC pode-se confirmar que o PLA possui baixa temperatura de transição vítrea, entretanto, observou-se alteração na cristalinidade do material e a diminuição da temperatura de fusão nas amostras ensaiadas. Nos ensaios mecânicos, de tração e impacto, observou-se que as chapas planas prensadas a quente são menos resistentes quando comparadas a outros processos analisados. Como conclusão, tem-se que as chapas planas obtidas pela metodologia podem ser utilizadas para aplicações com baixa solicitação mecânica, como no estudo de volumetria e protótipos.

Palavras-chave: Impressão 3D. Poli Ácido Láctico. Fabricação Digital. Reciclagem.

ABSTRACT

CALDOVINO, G. C. **Study of PLA residues originating from 3D printing filament extrusion process in sheet hot pressed.** 83 f. Thesis (Master in Design) – Engineering School / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Polymer-based filament extrusion 3D printers have become popular in many contexts in recent years, especially in fab labs and maker spaces. Although these are additive manufacturing equipment and operate with the progressive overlap of material, for various reasons of execution and or human error they generate polymeric waste. Therefore, this work aimed to investigate the viability of production of sheets from the hot pressing of residues originating from the 3D printing process by filament extrusion. With the purpose of application in the scope of the maker spaces for the production of prototypes and parts for the study of shape and volume. The material investigated was Poly Lactic Acid (PLA), because it is widely used in the context of 3D printing. For this, the methodology used consisted of the collection, separation and classification of PLA residues, the crushing of the PLA and the elaboration of the mold, culminating in the hot pressing process of the material using a sublimactic press. Tests were also performed to characterize the material; and the specimens were prepared by laser cutting for mechanical tests. From the results, it is possible to attest the feasibility of obtaining sheets using the methodology presented, but there was the occurrence of bubbles in most of the experiments and the color of the material limited the adoption of standardized parameters for the sheets. Regarding the characterization of the material, through the DSC analysis it can be confirmed that the PLA has low temperature of vitreous transition, however, there was a change in the crystallinity of the material and the decrease in melting temperature in the samples tested. In mechanical, tensile and impact tests, it was observed that hot pressed sheets are less resistant when compared to other processes analyzed. In conclusion, it is found that the sheets obtained by the methodology can be used for applications with low mechanical request, such as in the study of volumetry and prototypes.

Keywords: 3D Printing. Poly Lactic Acid. Digital Manufacturing. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento de uma impressora 3D por extrusão de filamento	20
Figura 2 – Parâmetros estruturais de peças impressas por extrusão de filamento	20
Figura 3 – Falhas e problemas em impressão 3D por extrusão de filamento	22
Figura 4 – Fórmula estrutural do Poli Ácido Lático (PLA)	25
Figura 5 – Rolos de Filamento de PLA	27
Figura 6 – Simbologia de identificação para materiais poliméricos	30
Figura 7 – Mapa de abrangência da Precious Plastic	32
Figura 8 – Comunidade Precious Plastic	32
Figura 9 – Produtos feitos com polímeros reciclados pela Viva Lab	33
Figura 10 – Chapa plana 100 x 100 cm pelo The Recycled Studio	33
Figura 11 – Chapa plana 100 x 100 cm pelo The Recycled Studio	34
Figura 12 – Experimentação de cores realizadas por Hadin e Nordang (2018)	35
Figura 13 – Exploração de cores em chapas recicladas por Jessica den Hartog	36
Figura 14 – Liquidificador doméstico utilizado para triturar resíduos poliméricos	37
Figura 15 – Triturador de polímeros open source e os ciclos de trituração	38
Figura 16 – Moldes em aço e em alumínio para conformação de chapas planas	39
Figura 17 – Métodos de obtenção de chapas planas recicladas	40
Figura 18 – Obtenção de chapa plana reciclada por prensagem a quente	41
Figura 19 – Derretimento do material polimérico em forno elétrico	42
Figura 20 – Prensagem a frio	42
Figura 21 – Procedimentos de corte, furação e dobra em chapas planas recicladas	45
Figura 22 – Fluxograma da metodologia empregada	47
Figura 23 – Desenho esquemático do molde utilizado para as chapas planas	49
Figura 24 – Resíduos de impressão 3D	51
Figura 25 – Resíduos x quantidade	52
Figura 26 – Espectros de FTIR do PLA impresso	53
Figura 27 – Análise Termogravimétrica do PLA Branco	55
Figura 28 – Termograma do PLA impresso na cor branca	56
Figura 29 – Termograma da chapa reciclada de PLA	57
Figura 30 – Molde em aço galvanizado aberto e fechado	58
Figura 31 – Pesagem do material antes da colocação no molde	59

Figura 32 – Molde sendo colocado na prensa	60
Figura 33 – Ensaio 01: chapa plana de PLA colorido	61
Figura 34 – Ensaio 02: chapa plana de PLA colorido	62
Figura 35 – Ensaio 03: chapa plana de PLA colorido	63
Figura 36 – Ensaio 04: chapa plana de PLA cinza	64
Figura 37 – Ensaio 05: chapa plana de PLA cinza	64
Figura 38 – Ensaio 06: chapa plana de PLA cinza	65
Figura 39 – Chapas de PLA preta e branca utilizando os mesmos parâmetros da cinza	67
Figura 40 – Gráfico Tensão x Deformação	68
Figura 41 – Corpos de prova após o ensaio de tração	69
Figura 42 – Corpos de prova após o ensaio de Impacto Izod	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Erros de impressão e geração de resíduos	23
Quadro 2 – Comparativo espectros PLA impresso x PLA filamentar	54
Quadro 3 – Parâmetros utilizados nos experimentos	66
Quadro 4 – Parâmetros utilizados para obter as chapas de PLA Cinza	66
Quadro 5 – Média e desvio padrão obtidos no ensaio de Impacto Izod	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
CAD	Design Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador (Computer-Aided Design)
CNC	Comando Numérico Computadorizado (Computer-Aided factoring)
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
T_c	Temperatura de Cristalização
T_g	Temperatura de Transição Vítea
T_m	Temperatura de Fusão
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PLA	Poli Ácido Láctico
PP	Polipropileno
STL	Linguagem Padrão do Triângulo (Standard Triangle Language)
TGA	Termogravimetria
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO	19
2.1.1 Resíduos poliméricos em impressão 3D por extrusão de filamento	21
2.2 POLI ÁCIDO LÁTICO (PLA)	25
2.3 RECICLAGEM DE POLÍMEROS	27
2.3.1 Reciclagem mecânica	29
2.4 CHAPAS PLANAS RECICLADAS	31
2.4.1 Etapa 1 – Preparação	36
2.4.1.1 Trituração	36
2.4.1.2 <i>Elaboração do molde ou matriz</i>	38
2.4.2 Etapa 2: Prensagem	40
2.4.3 Etapa 3: Aplicação	43
2.4.3.1 <i>Procedimentos de corte, furação e dobra</i>	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS	48
3.2 TRITURAÇÃO	48
3.3 PRENSAGEM	48
3.3.1 Matriz	48
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	49
3.4.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR	49
3.4.2 Termogravimetria - TGA	49
3.4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC	50
3.4.4 Ensaio de Tração	50
3.4.5 Ensaio de Impacto Izod	50
3.4.6 Corte a laser	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS DE IMPRESSÃO 3D	51
4.1.1 Trituração dos resíduos	52
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	52
4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR	53
4.2.2 Termogravimetria - TGA	54
4.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC	56
4.3 PRENSAGEM DOS RESÍDUOS EM CHAPAS PLANAS	58
4.3.1 Experimentos	60

4.3.1.1 <i>Descrição experimento 01</i>	61
4.3.1.2 <i>Descrição experimento 02</i>	61
4.3.1.3 <i>Descrição experimento 03</i>	62
4.3.1.4 <i>Descrição experimento 04</i>	63
4.3.1.5 <i>Descrição experimento 05</i>	64
4.3.1.6 <i>Descrição experimento 06</i>	65
4.3.2 Discussões acerca dos resultados	66
4.3.3 Ensaio de Tração	68
4.3.4 Ensaio de Impacto Izod	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE 1	82

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, o movimento *maker* aparece como uma nova tendência (PAPAVLASOPOULOU, GIANNAKOS e JACCHERI, 2017). Ele se manifesta por meio do comprometimento com a invenção local e colaborativa baseada na comunidade, que forma uma rede de compartilhamento de ferramentas, tecnologias e ideias, as quais se disseminam tanto em um nível virtual (comunidades online) quanto em um nível físico (*fab labs*) (GIUSTI, ALBERTI e BELFANTI, 2020). O movimento *maker* retrata a aparência de espaços que permitem a todos os tipos de usuários, incluindo amadores, engenheiros, *hackers*, artistas e estudantes, se expressarem criativamente projetando e construindo objetos digitais e materiais (MARTIN, 2015).

Para Browder, Aldrich e Bradley (2019), o movimento *maker* representa uma ruptura fundamental do trabalho artesanal realizado no passado e é baseado em três pilares: (1) social - intercâmbio e colaboração, (2) conhecimento - criação e compartilhamento de informação em espaços físicos ou virtuais e (3) tecnologia - produção de artefatos materiais usando recursos tecnológicos anteriormente restritos a instituições de pesquisa e desenvolvimento (P&D). De acordo com Papavlasopoulou, Giannakos e Jaccheri (2017), o rápido crescimento desse movimento está fortemente relacionado com os avanços das novas tecnologias de fabricação digital, que permitem o surgimento de ferramentas têxteis, eletrônicas, computacionais, de robótica e impressão 3D, além de microprocessadores e linguagens de programação.

Neste contexto, a comunidade RepRap é responsável por iniciar uma revolução na produção de impressoras 3D de código aberto, sobretudo a Fabricação por Filamento Fundido - FFF ou também chamada de impressão 3D por extrusão por filamento (REPRAP, 2020). Conforme Ligon et al. (2017), essa é uma tecnologia de manufatura aditiva equivalente a Modelagem por Fusão e Deposição - FDM patenteada em 1989 por Scott Crump, fundador da empresa Stratasys, a qual é pioneira na comercialização de impressoras 3D. Atualmente esta tecnologia é explorada por grupos em todo o mundo por meio de equipamentos acessíveis para escritórios, universidades e ambientes domésticos (LIGON et al., 2017).

O resultado de impressões 3D nem sempre são satisfatórios na primeira tentativa, portanto existe uma grande fonte de resíduos poliméricos associada à maioria das impressoras 3D por extrusão de filamento (HUNT et al., 2015). Teoricamente, de acordo com Song e Telenko (2017), o único desperdício de material neste tipo de tecnologia seria a estrutura de suporte, no entanto, como muitos usuários são inexperientes no que tange os procedimentos de impressão, o desperdício real de material pode ser maior do que em condições ideais de

operação sem erro humano ou de fabricação. Aliado a isso, conforme pesquisa realizada por Filamentive (2019) a prototipagem é a principal razão pela qual a maioria das impressoras por extrusão de filamento são utilizadas.

Peeters, Kiratli e Semeijn (2019) elencam como resíduos originários do processo de impressão 3D por extrusão de filamento, o filamento remanescente de uma impressão anteriormente realizada, a estrutura de suporte e impressões com falhas ou em excesso. Em adição, Sallenave et al. (2020), elucidam que a ocorrência de alguns resíduos durante a etapa de pré-impressão como sendo inerentes ao processo. Sendo assim, segundo Pakkanen et al. (2017), reciclar o excesso de material indesejado principalmente em novas matérias primas ou encontrar novos métodos para o material se degradar na natureza é imperativo, pois os mesmos problemas enfrentados na reciclagem de polímeros em geral são constatados no âmbito da geração de resíduos provenientes de impressão 3D por extrusão de filamento.

Entre a grande variedade de termoplásticos de engenharia aplicados em impressão por extrusão de filamento, o Poli Ácido Lático (PLA) está entre os tipos mais utilizados (LIGON et al., 2017). Tendo como base os códigos de identificação de resina vigentes pela norma ABNT NBR 13230:2008 este polímero se enquadra na categoria 7 - “outros” que, por sua vez, não é aceito para reciclagem em muitas localidades (ANDRADY, 2015). Além disso, polímeros geralmente precisam de mais de 20 anos para se degradarem sob condições ideais em aterros sanitários (TANSEL e YILDIZ, 2011). Existe ainda a preocupação de que estes polímeros podem não ser reciclados por falta de identificação específica, perspectiva sustentada por Hunt et al. (2015).

Conforme Despeisse et al. (2017), ainda há uma grande incerteza sobre se a trajetória atual da adoção da impressão 3D está criando fluxos de material mais circulares ou se está levando a um cenário alternativo no qual uma produção local menos ecoeficiente, demandas por mercadorias personalizadas e uma taxa mais alta de obsolescência do produto se combinam para aumentar o consumo de recursos. Assim, concluem que é fundamental que os princípios da Economia Circular sejam incorporados a este novo sistema de fabricação antes que sua adoção atinja um ponto crítico de inflexão no qual práticas negativas sejam consolidadas (DESPEISSE et al., 2017).

O conceito de Economia Circular se baseia no princípio de projetar eliminando o desperdício, conservar os produtos e materiais em uso e regenerar os sistemas naturais; ele sintetiza uma série de importantes escolas de pensamento, incluindo a filosofia de design *Cradle to Cradle* de William McDonough e Michael Braungart (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020). No âmbito da impressão 3D, a introdução da Economia Circular tem

sido explorada com o surgimento das *RecycleBots*. Elas estão disponíveis em código aberto e permitem que resíduos poliméricos sejam convertidos em filamentos, retroalimentando as impressoras 3D (UNRUH, 2018).

O funcionamento das *RecycleBots* consiste na utilização de resíduos poliméricos previamente triturados em grânulos, os quais alimentam um parafuso giratório aquecido, onde o material é comprimido e extrudado com um diâmetro determinado (ZHONG e PEARCE, 2018). Porém, conforme Ford e Despeisse (2016), o principal problema com essa abordagem é a contaminação de cores, uma redução nas propriedades do material polimérico e a necessidade de adicionar uma porcentagem de material virgem para manter as características mecânicas. Além do que, a obtenção de filamentos com diâmetro uniforme pode ser um grande desafio (ZANDER, GILLAN e LAMBETH, 2018). Para Pakkanen et al. (2017), no quadro de economia circular, pelo menos um ou dois ciclos de reciclagem para a reutilização do material deve ser garantida como uma alternativa ao descarte ecológico direto.

Conforme Chong et al. (2015), para que filamentos de impressão derivados de resíduos se alinhem com a sociedade e as necessidades ambientais e, ao mesmo tempo, com incentivos econômicos para a cooperação, a produção do filamento deve ser de alta qualidade e ética obedecendo a vários padrões. Neste contexto, conforme Pakkanen et al. (2017) a reciclagem correta e bem-sucedida do filamento pode ser uma operação muito mais complexa do que a impressão 3D por si só. O uso de equipamentos de baixo custo para esta finalidade é restritivo, pois nele há um controle limitado do conjunto de parâmetros de processamento, o que também limita a reciclagem de alguns tipos de materiais (PAKKANEN et al., 2017).

Explorando um cenário mais abrangente sobre reciclagem de polímeros, a Precious Plastic, uma comunidade *maker* com mais de 80.000 pessoas de várias partes do mundo, iniciada em 2014 por Dave Hakkens e uma equipe voluntária com mais de 100 profissionais como designers e engenheiros, tem como propósito à criação de soluções para o desperdício de materiais poliméricos na condição de resíduos (PRECIOUS PLASTIC, 2020a).

Além do compartilhamento de projetos de equipamentos de baixo custo para reciclagem (trituradores, injetoras, extrusoras, etc.) o usuário é encorajado a participar e colaborar de diversas maneiras de forma a descentralizar a reciclagem de materiais. Neste contexto, a democratização da fabricação digital permite que alguns consumidores atendam suas próprias necessidades de produção (MOTA, 2011) e, ainda, permite que os mesmos realizem a reciclagem direta dos seus próprios resíduos (ZHONG e PEARCE, 2018).

Sendo assim, o propósito desta pesquisa é explorar uma alternativa em termos de reciclagem para resíduos oriundos de impressão por extrusão de filamento do ponto de vista

maker, utilizando um método que já vem sendo aplicado para outros tipos de resíduos poliméricos, porém ainda pouco explorado no contexto de resíduos de impressão 3D.

Para tanto, este trabalho busca estudar o comportamento e as propriedades do PLA reciclado em chapas planas a partir da prensagem a quente utilizando uma prensa sublimática. Primeiramente, por este ser o material residual mais abundante no contexto onde está inserido, e por conta de que o processo de fabricação de chapas planas é uma alternativa mais fácil e acessível de reciclagem de polímeros no contexto de um ambiente *maker* se comparado a outras formas de reciclagem (PLASTIC SMOOTHIE, 2018).

A mistura de cores de materiais do mesmo tipo neste caso pode agregar valor ao produto final (SMILE PLASTIC, 2020) e o material reciclado na forma de chapa ou painel ainda pode ser processado por várias técnicas como corte a laser, modelagem térmica, perfuração, entre outros (MMID FOUNDATION, 2018).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Resíduos termoplásticos provenientes da tecnologia de impressão 3D por extrusão de filamento podem ser reciclados por prensagem a quente em chapas planas?

A partir desta pergunta, é estabelecida a seguinte hipótese: resíduos de Poli Ácido Lático (PLA) provenientes da tecnologia de impressão 3D por extrusão de filamento reciclados por prensagem a quente em chapas planas são uma opção viável para a produção de protótipos e peças para estudo de forma e volumetria em *fab labs* e espaços *maker*.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar e produzir chapas planas a partir da prensagem a quente de resíduos de PLA provenientes da tecnologia de impressão 3D por extrusão de filamento, considerando parâmetros de processo e caracterização do material identificando a sua aplicabilidade para prototipagem e estudo de forma e volumes em *fab labs* e espaços *maker*.

Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- A. Compreender o processo de reciclagem de chapas planas poliméricas recicladas;
- B. Estudar e definir os parâmetros de processo que serão utilizados para a prensagem a quente de chapas recicladas em PLA utilizando uma prensa sublimática;
- C. Produzir as chapas recicladas a partir dos parâmetros e metodologia escolhidos;

- D. Realizar a caracterização do material reciclado;
- E. Analisar os resultados e entender as possíveis aplicações do material.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem abordagem prático-teórica acerca da reciclagem de resíduos oriundos de um processo de fabricação emergente e contribui cientificamente em um contexto de constante transformação. Partindo do ponto de vista do que vem sendo realizado pelas comunidades *maker* no tocante da reciclagem de polímeros, este trabalho também corrobora para ampliar a visão do material e suas aplicações nas mais diversas áreas de desenvolvimento de produtos, na arquitetura, construção civil, no design de interiores, entre outras.

Segundo Santana et al. (2018), a impressão 3D baseada em extrusão se popularizou muito nos últimos anos devido ao surgimento de projetos de código aberto e máquinas de baixo custo, que tornaram a tecnologia acessível a todos os níveis de usuários. Paralelamente, novos materiais, em geral filamentos termoplásticos, são inseridos no mercado para utilização com esta técnica de fabricação, tornando cada vez mais necessário o desenvolvimento de estudos de caracterização dos materiais para fornecer dados técnicos aos utilizadores.

Sendo assim o PLA, foi escolhido para ser abordado neste trabalho por ser um material muito difundido no contexto da impressão 3D, porém foram encontrados poucos dados análogos da reciclagem de PLA por prensagem a quente em chapas planas, o que cria uma oportunidade e abre portas para novas descobertas. A conformação do material reciclado em chapas planas se justifica também por possuir características de planicidade, pela quantidade de plástico reciclado por metro quadrado, pela rapidez na fabricação, viabilidade e simplicidade no processo e fortalecimento da descentralização da reciclagem de resíduos poliméricos.

Em termos de abrangência sobre o problema referido neste trabalho, uma pesquisa feita pela Filamentive em 2019 com mais de 200 usuários mostra que 80,98% dos resíduos oriundos da tecnologia de impressão 3D são resultantes de impressão com falha, seguido de estrutura de suporte e impressões teste como sendo as formas mais comuns (FILAMENTIVE, 2019).

Ainda neste contexto, sobre a mesma pesquisa em 2021 no Reino Unido contabilizou-se 278.400 kg de resíduos de impressão 3D, totalizando 10% de tudo que foi impresso. Sendo assim, o intuito deste trabalho é também mostrar as possibilidades de aproveitamento deste material no contexto da reciclagem em um ambiente *fab lab* ou *maker spaces* para construção de protótipos ampliando as possibilidades de vida útil do material.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Foram revisados temas relacionados ao processo de manufatura aditiva de impressão 3D por extrusão de filamento e a geração de resíduos poliméricos neste contexto, a reciclagem de polímeros, as características e propriedades do polímero PLA, bem como experimentos de reciclagem de materiais em chapas planas compartilhadas por comunidades *maker*.

2.1 IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO

A tecnologia de impressão 3D por extrusão de filamento se dá por meio da extrusão de um material polimérico termoplástico (filamento) que ao atingir um estado fluído é depositado camada sobre camada em uma plataforma até formar (imprimir) a peça desejada (NGO et al., 2018).

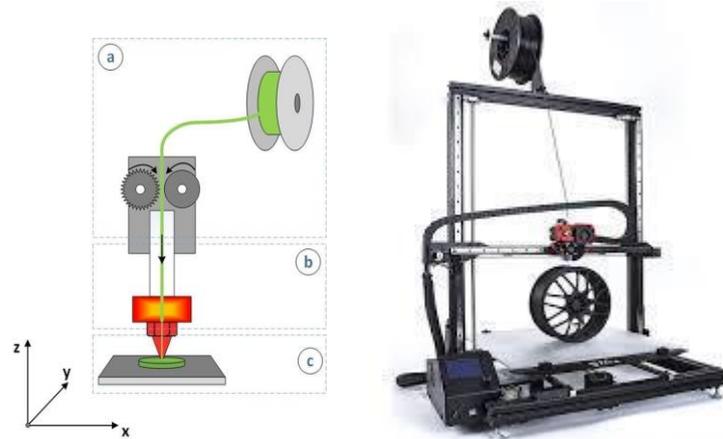
Conforme Daminabo et al. (2020), a abordagem camada por camada para a criação de objetos se dá a partir de um arquivo CAD (design assistido por computador) juntamente com o auxílio de um sistema de manufatura assistida por computador (CAM). O modelo CAD pode ser obtido por escaneamento ou através de modelagem tridimensional usando *softwares* específicos, em seguida o modelo deve ser processado em fatias por um *software* CAM, desta forma o caminho da impressão é planejado e definido por códigos de comando numérico computadorizado (CNC) chamado de *G-code* (DAMINABO et al., 2020).

Além disto, Tanzi, Farè e Candiani (2019) explicam que neste método de impressão o cabeçote de extrusão é conectado a um sistema de dois eixos, o que permite movimentos nas direções x-y, toda a vez que uma camada é finalizada, a plataforma de construção se move para baixo, isto é, na direção z, e uma nova camada é depositada (Figura 1). A extrusora é aquecida a uma temperatura de processo apropriada para o polímero utilizado: acima da temperatura de fusão (T_m) para polímeros semicristalinos ou acima da temperatura de transição vítrea (T_g) para polímeros amorfos (LIGON et al., 2017). A temperatura da plataforma também pode ser definida de 40 °C a 110 °C prevenindo o empenamento em alguns materiais (FRANCE, 2014).

No entanto, ainda existem algumas variáveis que devem ser definidas para a obtenção de um objeto por meio da impressão 3D por extrusão de filamento, tais variáveis são denominadas parâmetros de impressão. De acordo com Popescu et al. (2018), os parâmetros de impressão podem ser categorizados em: parâmetros de fatiamento (altura de camada, diâmetro do bico, velocidade de deposição, preenchimento, ângulo de *raster*, perímetro, entre outros), orientação de construção (horizontal, vertical, lateral) e condições de temperatura (bico extrusor

e a plataforma de construção). A determinação dessas variáveis afeta, entre outros aspectos, as propriedades mecânicas da peça requerida (RAHIMIZADEH et al., 2019).

Figura 1 – Funcionamento de uma impressora 3D por extrusão de filamento.

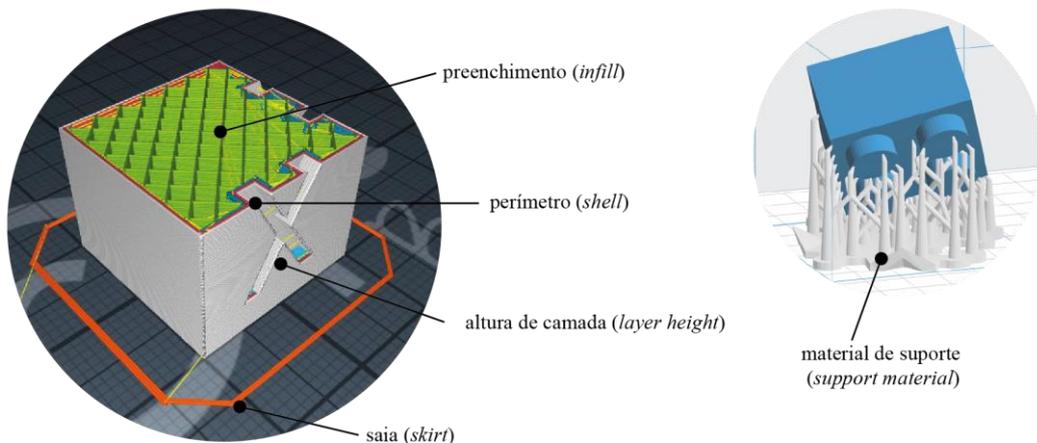


(a) Alimentação: o cabeçote de extrusão alimentado pelo filamento termoplástico, (b) Extrusão: o material derretido é extrudado através do bico, (c) Deposição: o material extrudado é depositado na plataforma e a camada subsequente é fundida com a anterior.

Fonte: Europe Makes Ceramics, 2019.

Os parâmetros de impressão são indispensáveis para uma impressão bem-sucedida, eles são responsáveis por determinar as características estruturais de uma determinada peça impressa. Conforme France (2014), existem algumas configurações básicas (Figura 2) de construção:

Figura 2 – Parâmetros estruturais de peças impressas por impressão 3D por extrusão de filamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

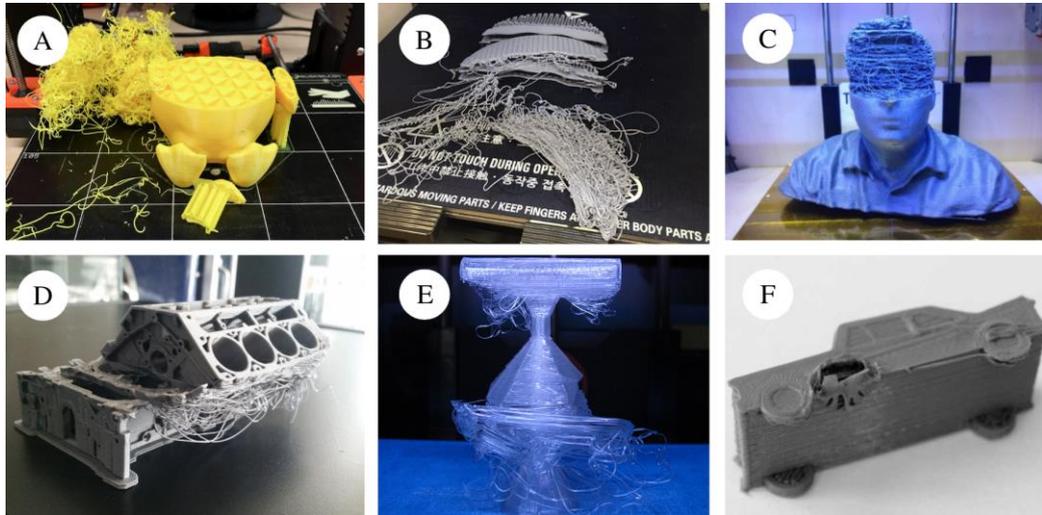
- Preenchimento (*Infill*): é a porcentagem de preenchimento de material em cada camada variando de 0% (peça completamente oca) a 100% (peça completamente preenchida). Além disso, existem tipos de padrões de preenchimento a serem escolhidos, os quais podem se adaptar conforme a aplicação da peça final.
- Perímetro (*Shell*): quantidade de contornos sólidos (casca) ao redor da peça em todas as camadas. Responsável por aumentar a resistência da superfície da peça impressa.
- Altura de camada (*Layer height*): distância que a plataforma z (ou extrusor) se move entre cada camada. Quanto mais baixo este valor mais suave e bem acabado será o resultado final, entretanto, levará mais tempo para imprimir. Camadas de cerca de 0,2 mm são um bom ponto de partida para uma variedade de peças.
- Saia (*Skirt*): contorno em torno do perímetro da peça realizada pela impressora antes de começar a impressão propriamente dita. É uma preparação da impressora e oportuniza ajustes finais caso seja detectado qualquer erro. Entretanto, este contorno é retirado da peça após a impressão sendo uma fonte de resíduos.
- Material de suporte (*Support material*): espécie de andaimes que são construídos juntamente com a peça para garantir uma base para saliências e angulações acima de 45°, após a impressão este material é sempre descartado da peça final gerando resíduos. Esta configuração pode ser gerada automaticamente ou ter definições particulares dependendo do software utilizado. Além disso, a quantidade de material de suporte muda com a orientação da peça e outras configurações da impressora ou do design (SONG e TELENKO, 2017).

2.1.1 Resíduos poliméricos em impressão 3D por extrusão de filamento

Apesar de todos os seus benefícios, a impressão 3D por extrusão de filamento gera uma quantidade significativa de resíduos (Figura 3). Parte do desperdício deve-se a impressões com falha, mas também há estruturas de suporte descartadas, sendo assim independentemente das falhas existem resíduos que são gerados. Além disso, muitas peças são criadas como protótipos

e, por conta da rapidez e baixo custo de produção, muitas iterações são frequentemente produzidas e, em seguida, descartadas (ANDERSON, 2017).

Figura 3 – Falhas e problemas em impressão 3D por extrusão de filamento.



Fonte: (a) (b) Fabbalio, 2017; (c) Filabot, 2018; (d) Reddit, 2019; (e) (f) Gambody, 2022.

Segundo Song e Telenko (2017), para a produção de peças de alunos em uma universidade durante 12 semanas, com 25 impressoras 3D por extrusão de filamento em funcionamento diário, foram utilizados 106 kg de filamento ABS. As autoras calculam que 34,6% do que foi produzido corresponde a resíduos causados pelo usuário, por erro da máquina, erro de projeto ou qualquer combinação desses três tipos de erros. Ou seja, elas concluíram que o volume de material perdido foi cerca de 2 vezes maior do que um processo ideal, estimando apenas a perda de material proveniente da estrutura de suporte. Não foram encontrados dados análogos para o PLA, mas acredita-se que a perda de material no processo de impressão seja semelhante.

Sallenave et al. (2020), no contexto de desperdício de material observam que em certas situações, tanto no cenário acadêmico quanto na indústria, a impressão 3D por extrusão de filamento é usada para criar iterações de um produto/peça e não para a produção de bens minimamente duráveis. À vista disso, conforme Hunt et al. (2015) a impressão 3D pode contribuir ainda mais para a geração de resíduos não reciclados e desperdiçados do que é criado atualmente pela indústria polimérica convencional. Isso, levando em conta que o resíduo termoplástico tem sido um problema considerável para a sociedade nos últimos anos (KUMAR et al., 2019).

Comunidades online se reúnem para discutir e criar guias informativos com as causas de determinados problemas recorrentes em peças impressas e também sugerir ações a serem tomadas visando à resolução de tais problemas. Diante de uma vasta lista foram selecionados os dez erros mais comuns em impressão 3D por extrusão de filamento (Quadro 1).

Quadro 1 – Erros de impressão e geração de resíduos (continua).

	<p>Camada deslocada (<i>Layer shifting</i>)</p>	<p>Na geração do g-code o caminho a ser percorrido está estabelecido e o sistema funcionará até chegar no ponto final. Se algo der errado durante o caminho, a impressora não terá como detectar e continuará imprimindo (SIMPLIFY 3D, c2020).</p>
	<p>Empenamento (<i>Warping</i>)</p>	<p>A borda próxima à parte inferior da superfície de impressão ou adjacente à base de impressão não está nivelada ou plana (MATTER HACKERS, c2020).</p>
	<p>Falta de extrusão (<i>Under extrusion</i>)</p>	<p>Sob extrusão a impressora não fornece a quantidade de material solicitada. O resultado disso são camadas ausentes, muito finas ou camadas que possuem pontos e orifícios aleatórios (3D VERKSTAN, c2020).</p>
	<p>Extrusão em excesso (<i>Over extrusion</i>)</p>	<p>Se as configurações de extrusão não estiverem configuradas corretamente, a impressora pode extrudar mais material do que o <i>software</i> espera. Essa extrusão excessiva resultará em excesso de material podendo danificar as dimensões externas da peça final (SIMPLIFY 3D, c2020).</p>
	<p>Separação de camada (<i>Layer separation</i>)</p>	<p>Rachaduras ocorrem quando as camadas se separam devido às forças exercidas na impressão quando as camadas esfriam a uma taxa diferente. As forças de deformação excedem a força de adesão da camada e as camadas simplesmente se separam (RIGD INK, c2020).</p>
	<p>Marcas na superfície (<i>Scars on top surface</i>)</p>	<p>O resíduo do filamento é “vazado” na parte superior da superfície de impressão (MATTER HACKERS, c2020).</p>

Continua.

Quadro 1 – Erros de impressão e geração de resíduos (conclusão).

	Ponte falha (<i>Poor bridging</i>)	Ponte é um termo que se refere a forma que precisa ser extrudada entre dois pontos sem nenhum suporte por baixo. É necessário garantir que a impressora esteja calibrada adequadamente para obter resultados satisfatórios (SIMPLIFY 3D, c2020).
	Superaquecimento (<i>Overheating</i>)	A impressão tem o formato geral correto, mas apresenta deformação em pontos onde superaqueceu (RIGD INK, c2020).
	Pontos na superfície (<i>Pimples on exterior surface</i>)	Bico extrusor entupido ou sujo (MATTER HACKERS, c2020).
	Impressão interrompida (<i>Printer stops</i>)	A impressora estava extrudando corretamente no início da impressão, mas de repente parou de extrudar. Isso pode ter sido causado por falta de filamento, filamento enroscado, bico entupido, superaquecimento do motor de extrusão, etc. (SIMPLIFY 3D, c2020).

Fonte: Elaborado pela autora.

Para Peeters, Kiratli, Semeijn (2019), a reciclagem na impressão 3D é um tópico emergente e a padronização dos processos de reciclagem depende de respostas a perguntas urgentes relacionadas a viabilidade técnica, econômica e a capacidade de reciclagem dos materiais em si (PEETERS, KIRATLI, SEMEIJN, 2019). Segundo Zhao et al. (2018), com suporte no estudo de Análise do Ciclo de Vida - ACV e conduzido por requisitos legais, a reciclagem em circuito fechado é a técnica mais adequada para descartar produtos impressos em 3D do ponto de vista ambiental.

Embora a reciclagem de resíduos tenha avançado, ainda existem limitações que impedem o rápido desenvolvimento da reciclagem de resíduos oriundos de tecnologias de

impressão 3D, incluindo a falta de padrões de material e controle de qualidade. Além disso, a falta de dados técnicos e o compartilhamento de habilidades são fatores cruciais que afetam a reciclagem destes resíduos. Estudos voltados para a reciclagem local de resíduos locais podem contribuir para melhorar significativamente a sustentabilidade da tecnologia de impressão 3D (KHOSRAVANI e REINICK, 2020).

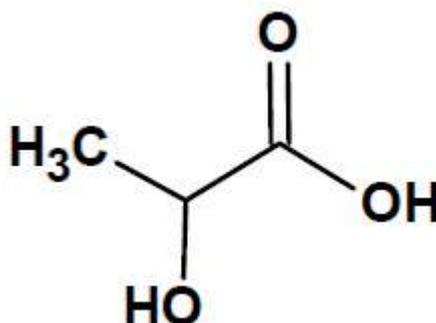
2.2 POLI ÁCIDO LÁTICO (PLA)

O PLA é um poliéster gerado por um processo de síntese química a partir do ácido lático obtido da fermentação bacteriana de glicose extraído do milho, sendo considerado um polímero biodegradável e oriundo de fontes renováveis (MAGRINI et al., 2012). Sendo assim, conforme Fechine (2013), a biodegradabilidade dos poliésteres está diretamente ligada à presença do grupo éster, facilmente hidrolisado. Esta reação de hidrólise conduz à redução de massa molar, que acontece, sobretudo, pela ação de enzimas do tipo esterase, encontradas no solo (FECHINE, 2013).

Segundo a American Chemical Society (2016), o PLA trata-se de um polímero que possui dois grupos funcionais: um grupo de ácido carboxílico e um grupo hidroxila (Figura 4), além disso é um polímero de condensação e libera uma molécula de água cada vez que uma ligação covalente se transforma na cadeia polimérica.

De acordo com Mano e Mendes (2004), polímeros de condensação têm pesos moleculares menores do que os polímeros de adição, muitas vezes se torna necessária a chamada "cura" ou reticulação do oligômero (polímero de baixo peso molecular) durante o processo de produção.

Figura 4 – Fórmula estrutural do Ácido Lático.



Fonte: American Chemical Society, 2016.

Os polímeros PLA são hidrofóbicos, semicristalinos, com apreciáveis propriedades mecânicas e térmicas. Eles são ideais como material de base para a fabricação de biomateriais

(BASU, LANGER e DOMB, 2016). Além disso, o PLA é um termoplástico rígido com temperatura de transição vítrea (T_g) em torno de 60 °C, e temperatura de fusão cristalina (T_m) entre 170 °C e 180 °C (FECHINE, 2013). Sua faixa de cristalinidade e propriedades mecânicas fica entre os polímeros de Poliestireno (PS) e Polietileno Tereftalato (PET) (FARAH, ANDERSON e LANGER, 2016). Devido sua semelhança com o PET, o PLA pode ser usado para produção de alguns dos mesmos itens, sendo eles: garrafas transparentes, recipientes para alimentos, fibras para tecidos e diversos outros (AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2016).

O baixo custo atribuído ao PLA de grau industrial, juntamente com sua alta resistência mecânica e boa processabilidade, permitem que ele seja usado como uma alternativa sustentável para produtos derivados de petróleo em aplicações de *commodities* (ZHANG; MOHANTY e MISRA, 2012). Entretanto, para que o PLA seja processado em linhas de produção de larga escala em aplicações como moldagem por injeção, moldagem por sopro, termoformagem e extrusão o polímero deve possuir estabilidade térmica adequada para prevenir a degradação e manter o peso molecular e boas propriedades (GARLOTTA, 2001).

O PLA é amplamente utilizado como insumo para impressoras 3D por extrusão de filamento, principalmente por apresentar baixo ponto de fusão, além de apresentar menor consumo de energia quando comparado a outros polímeros comumente utilizados em impressão 3D (CISNEROS-LÓPEZ, 2020). Em relação a outros polímeros utilizados em manufatura aditiva, o PLA apresenta algumas vantagens: não é obrigatório o aquecimento da mesa para impressão, as peças possuem dureza superficial elevada, ideal para criação de protótipos que não sofrerão com desgaste ou teste de carga e é um material indicado para iniciantes devida à facilidade de impressão (REVISTA NERD, 2021). O material é apresentado no formato de filamento para ser utilizado em diversos modelos de impressoras 3D por extrusão de filamento (Figura 5).

Geralmente, os termoplásticos usados em impressão 3D por extrusão de filamento estão restritos a polímeros amorfos ou com baixos níveis de cristalinidade. Isso ocorre principalmente porque estes polímeros exibem um baixo grau de encolhimento, essencial para a precisão dos componentes produzidos (SCHIRMEISTER et al., 2019). Segundo Ligon et al. (2017), para um determinado filamento, é essencial um equilíbrio cuidadoso da reologia do polímero fundido, da temperatura de processamento, da velocidade de construção e dos parâmetros de impressão para um processo de construção bem-sucedido. Sendo assim, a termoplaticidade do filamento polimérico é uma propriedade essencial para esse método de manufatura, o que permite que o filamento se funda durante a impressão e, após, se solidifique à temperatura ambiente (NGO et al, 2018).

Figura 5 – Rolos de Filamento de PLA.



Fonte: Revista Nerd, 2021.

Por apresentar a característica de biodegradabilidade, resíduos de PLA podem ser gerenciados por vários métodos, incluindo compostagem, combustão, reciclagem e despejo em aterros (ANDERSON, 2017). Entretanto, conforme Andrade (2015), o PLA é biodegradável sob condições de compostagem industrial, não se degrada nas condições de compostagem doméstica. Sem o calor necessário fornecido por um compostador industrial o processo torna-se lento, podendo levar até um ano. Em contrapartida, em condições ideais o processo se completa entre 3 e 6 meses, porém, muitas localidades não têm acesso a estes compostadores, o que inviabiliza o processo (AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2016).

Salienta-se também que não há nenhum benefício ecológico em transportar resíduos de PLA para o aterro sanitário (AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2016). Neste cenário, estudos preliminares indicam que a reciclagem do PLA é 50 vezes melhor do que a compostagem e 16 vezes melhor do que a combustão em termos de impactos ambientais (SLIJKOORD, 2015; VINK, 2013).

2.3 RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A reciclagem de polímeros contribui para a redução do impacto ambiental e o esgotamento de recursos. A reciclagem pode, portanto, diminuir o uso de energia e material por unidade de produção, levando a uma maior ecoeficiência (FRANCIS, GOPALAN e SIVADAS, 2017). De acordo com Goodship (2007), existem quatro categorias de reciclagem: primária, secundária, terciária, quaternária, em que cada uma possui particularidades no que tange a sua utilização.

Maris et al. (2018), explica que, a reciclagem primária envolve a reintrodução de resíduos de pré-consumo (sucata, bordas plásticas industriais ou de polímero único e peças) no ciclo de extrusão para produzir produtos do mesmo material, esse procedimento é comumente aplicado na linha de processamento pelo fabricante (ciclo fechado). Já a reciclagem secundária, é utilizada quando a matéria prima se trata de resíduos sólidos urbanos (ciclo aberto). Ressalta-se que, eventualmente, a matéria prima pode ser um resíduo industrial, porém, por definição o produto final é um material reciclado com propriedades finais inferiores à resina virgem (ZANIN e MANCINI, 2015).

A reciclagem terciária, por sua vez, promove o processo de despolimerização, em que há uma decomposição química controlada, tendo como produto oligômeros, monômeros e substâncias de baixa massa molar, que posteriormente poderão ser submetidos a novos processos de polimerização (ZANIN e MANCINI, 2015). E, finalmente, a reciclagem quaternária ocorre quando o processo utilizado para reciclar o polímero é baseado na combustão visando seu aproveitamento energético (ZANIN e MANCINI, 2015). Teoricamente, todos os termoplásticos podem ser reciclados. Porém, é a disponibilidade da infraestrutura de reciclagem, ao invés da viabilidade físico-química, que determina até que ponto um determinado produto será reciclado na prática. O custo da reciclagem, desde a coleta de produtos pós-consumo na calçada até o transporte dos *pellets* de polímero reciclado para fabricantes, invariavelmente determina o preço de mercado de a resina reciclada (ANDRADY, 2015).

De acordo com Manzini e Vezzoli (2015), existem dois percursos fundamentais da reciclagem, a reciclagem de ciclo aberto, em que os materiais são encaminhados para um sistema-produto diferente dos de origem; e a reciclagem de ciclo fechado, em que os materiais recuperados são utilizados no lugar de materiais virgens, ou seja, são usados na confecção dos mesmos produtos ou componentes de onde foram derivados (MANZINI VEZZOLI, 2011). Neste contexto, segundo Hopewell, Dvorak e Kosior (2009) é possível, em teoria, reciclar em ciclo fechado a maioria dos termoplásticos, entretanto este método é mais prático quando o constituinte do polímero pode ser (i) efetivamente separado de fontes de contaminação e (ii) estabilizado contra degradação durante o reprocessamento e o uso subsequente. Idealmente, o fluxo de resíduos de polímeros para reprocessamento também consistiria em uma faixa estreita de tipos de polímeros para reduzir a dificuldade de substituir diretamente a resina virgem (HOPEWELL, DVORAK e KOSIOR, 2009). Ou seja, não é possível falar de um fechamento completo de ciclo, já que de fato é difícil que o sistema se autoalimente por muito tempo sem o uso de recursos externos (MANZINI VEZZOLI, 2011).

Zanin e Mancini (2015), propõem uma hierarquia para promover a reciclagem de polímeros de uma forma mais sustentável:

- Primeiro nível hierárquico: reciclagem mecânica utilizando o polímero puro ou estabilizado, sem misturá-los a outros tipos de materiais ou aditivos/cargas para a sua modificação.
- Segundo nível hierárquico: reciclagem mecânica, pode-se reprocessando dois polímeros juntos formando uma blenda. Indicado quando há dificuldade de separação de dois tipos de polímeros e quando há a presença expressiva de dois tipos de polímeros em um artefato.
- Terceiro nível hierárquico: reciclagem mecânica reprocessando uma mistura de diferentes tipos de polímeros, primeiramente sem a presença de agentes compatibilizantes e posteriormente com a presença de agentes compatibilizantes, visando produtos com qualidade superior.
- Quarto nível hierárquico: esgotadas as chances de realização de reciclagem mecânica recomenda-se a reciclagem química, a qual promove um processo despolimerização.
- Quinto nível hierárquico: realização do processo de queima do material com reaproveitamento energético.

Salienta-se que na proposta dos níveis hierárquicos são consideradas diferentes abordagens, entretanto a aplicabilidade do material tem que ser levada em consideração durante a escolha. Conforme Goodship (2007), ainda que o material seja reprocessado como um fluxo de resíduos mistos ou em frações separadas, ele ainda precisa passar por algum tratamento. Uma rota típica de reciclagem para resíduos plásticos pode ser dividida em dois tipos de processo (1) tratamento físico/mecânico para preparar e homogeneizar os resíduos, e (2) derretimento. Entretanto existem alguns estágios intermediários a serem percorridos os quais descrevem a reciclagem mecânica, sendo um dos métodos amplamente utilizados na reciclagem polimérica e à qual será explorada no item 2.3.1 que segue.

2.3.1 Reciclagem mecânica

A reciclagem mecânica implica a utilização do material reciclado, sem alteração em sua estrutura química para uma nova aplicação (FRANCIS, GOPALAN e SIVADAS, 2017), ou seja, ela envolve tratamento físico do material (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2009).

Sendo assim, de acordo com Francis, Gopalan e Sivadas (2017), existem quatro importantes estágios a serem realizados inicialmente na reciclagem mecânica, sendo eles: coleta (recolhimento dos resíduos), limpeza (retirada de contaminantes), classificação (separação por tipo) e redução de tamanho (trituração). Esses estágios podem ocorrer em uma ordem diferente, várias vezes ou não ocorrem, dependendo da origem e composição dos resíduos (RAGAERT, DELVA, VAN GEEM, 2017).

Para o estágio de coleta e limpeza dos resíduos poliméricos existem dois cenários a serem considerados no que tange a sua origem: os de pré-consumo e os de pós-consumo. Na prática, os resíduos de pré-consumo geralmente são de matéria prima única, bem identificados, limpos e homogêneos (MARIS et al., 2018), ou seja, adaptados a uma reciclagem de alta qualidade (MANZINI e VEZZOLI, 2011). Portanto, nesse caso a limpeza (lavagem) dos resíduos não se torna necessária (ASHTON, 2017). Já os resíduos de pós-consumo provêm de produtos e embalagens eliminadas pelo consumidor final, geralmente, são de baixa qualidade e, portanto, mais difíceis de serem reciclados (MANZINI e VEZZOLI, 2011).

De acordo com Al-Salem, Lettieri e Baeyens (2009), a classificação é o passo mais importante no ciclo de reciclagem. Alguns polímeros têm grandes reduções de propriedades físicas quando contaminados por outros polímeros, então devem ser completamente separados; outros não se fundem e não podem ser reciclados, ainda há os que reduzem o monômero original quando aquecidos (LA MANTIA, 2002). Sendo assim, para a correta identificação dos materiais a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a partir da NBR 13.230:2008 estabelece diretrizes (Figura 6).

Figura 6 – Simbologia de identificação para materiais poliméricos.



PET: Poli (tereftalato de estireno), PEAD: Polietileno de alta densidade, PVC: Poli (cloreto de vinila), PEBD: Polietileno de baixa densidade, PP: Polipropileno, PS: Poliestireno.

Fonte: Adaptado de NBR 13.230:2008.

No caso de resíduos poliméricos oriundos do processo de impressão 3D por extrusão de filamento devido à barreira da codificação (HUNT et al., 2015) é interessante que a segregação seja efetuada no momento de descarte. Estes, em sua grande maioria, fazem parte da categoria #7 o que dificulta ainda mais sua identificação. Para esta problemática Hunt et al. (2015) discutem que, no sistema de códigos utilizado nos EUA (equivalente ao brasileiro) há uma ausência de codificação ampla para a maioria dos polímeros utilizados como insumo de

impressoras 3D, enquanto esses mesmos polímeros são cobertos pelo sistema da China. Ou seja, esta lacuna necessita ser preenchida de modo a facilitar o sistema de reciclagem destes resíduos.

Seguindo para a etapa de trituração, esta envolve a redução de tamanho dos resíduos para uma forma mais adequada, como *pellets*, pó ou flocos, isso geralmente é alcançado através de fresagem ou moagem (FINK, 2018). Este processo pode ser realizado em moinhos de baixa velocidade quebrando o material original em pedaços de 50 a 100 mm (FRANCIS, et al. 2017). Goodship (2007) explica que a redução de tamanho é necessária, porque as partículas de material devem ter um tamanho adequado para processamento posterior.

Adiciona ainda que o processo pode envolver alguns estágios: primeiro usando um triturador para produzir partículas grandes de cerca de 25-50 mm. Em seguida cortadores rotativos são comumente empregados, tratam-se de um dispositivo bastante simples que consiste no rotor e facas rotativas, facas estacionárias (estator), a câmara de trituração e uma tela. Além disso, um cortador rotativo deve ser capaz de dissipar o calor gerado pela ação de cisalhamento das lâminas. O tamanho do floco é determinado pelo tamanho da malha da tela, sendo um tamanho comum de cerca de 5 por 5 mm. É importante que as facas possam ser rapidamente recolocadas ou removidas para afiação, pois podem sofrer desgaste considerável, além de permitir a limpeza evitando contaminação (GOODSHIP, 2007).

Após o processamento, esses materiais são ainda submetidos a várias técnicas tais como extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro e moldagem de filme. Finalmente, os materiais processados são convertidos em vários produtos, como canos, tubos, bolsas, folhas e itens diversos (FRANCIS, GOPALAN e SIVADAS, 2017).

2.4 CHAPAS PLANAS RECICLADAS

A definição de chapa é bastante abrangente, de acordo com o dicionário trata-se de “qualquer peça plana, mais ou menos espessa, feita de material rígido ou resistente.; lâmina, placa”. Nesta pesquisa, utiliza-se o método de prensagem a quente utilizando uma prensa sublimática para a fabricação de chapas planas recicladas, sobretudo com referência em métodos *do it yourself* difundido em comunidades *maker*. Neste nível as máquinas utilizadas são de baixo custo, passíveis de serem reproduzidas e a produção é em pequena escala.

A Precious Plastic traz diversas iniciativas no que tange a reciclagem de polímeros, inclusive contribuindo com equipamentos *open source* que atendem todas as etapas do processo

levando autonomia para pessoas ou organizações que pretendem reciclar seus resíduos. Para entender a abrangência deste projeto a Figura 7 traz um mapa interativo de espaços de reciclagem vinculados à Precious Plastic, nesses locais os resíduos poliméricos são transformados em diversos produtos. Alguns locais possuem um viés sem fins lucrativos, outros se transformam em uma fonte de renda para os envolvidos.

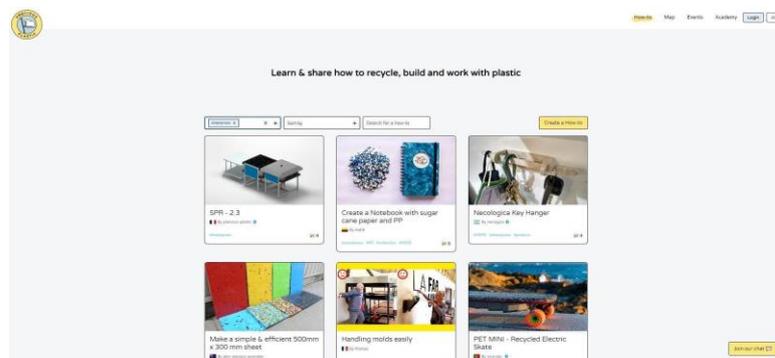
Figura 7 – Mapa de abrangência da Precious Plastic.



Fonte: Precious Plastic (2022a).

Sobre a reciclagem de polímeros em chapas planas, através da Precious Plastic foram encontrados diversos exemplos de chapas recicladas com resíduos principalmente de PEAD, PS e PP. Muitos desses exemplos foram encontrados na comunidade Precious Plastic, onde as pessoas compartilham seus resultados e incentivam outras pessoas a tentarem realizar seus experimentos. A comunidade pode ser acessada através do site da Precious Plastic, onde é possível buscar informações sobre materiais, máquinas e produtos. A Figura 8 mostra a interface e a gama de assuntos que podem ser encontrados, qualquer pessoa pode ser cadastrada e contribuir com projetos e relatórios de experimentos de reciclagem.

Figura 8 – Comunidade Precious Plastic.



Fonte: Precious Plastic 2022b.

Além disso, como mencionado anteriormente, alguns locais vinculados a Precious Plastic se transformam em laboratórios de reciclagem e comercializam produtos e máquinas. A Viva Lab em Portugal é um exemplo disso, liderado pelos fundadores Alexandra Baltazar, João Leão, Miguel Almeida e Tauan Bernardo, o laboratório tem diversos produtos desenvolvidos através da reciclagem de polímeros em chapas planas. A Figura 9 mostra como o material pode dar vida a novos produtos, como raquetes para frescobol e prancha de *skate board*.

Figura 9 – Produtos feitos com polímeros reciclados pela Viva Lab.



(a) Raquetes de frescobol; (b) Prancha de skate.
Fonte: Viva Lab (2022).

Outro espaço de reciclagem com foco na reciclagem de resíduos em chapas planas é o The Recycled Studio na Costa Rica. Eles comercializam chapas recicladas de 100 x 100 cm (Figura 10) que podem ser utilizadas para diversas aplicações de mobiliários a produtos de design.

Figura 10 – Chapa plana 100 x 100 cm pelo The Recycled Studio.



Fonte: The Recycled Studio, (2022).

No âmbito da pesquisa acadêmica, alguns estudos foram também encontrados abordando este tema. Dois deles com um viés no reaproveitamento de resíduos de impressão 3D, o que corrobora diretamente com o objetivo geral deste trabalho. E um terceiro, uma tese de mestrado, denominada Plastic Island. Este último, de autoria de Erik Hadin e Emily-Claire Nordang, trata da fabricação de chapas planas por meio do reaproveitamento de resíduos poliméricos retirados do oceano, trazendo uma perspectiva mais abrangente para o problema do plástico no mundo e testando aplicações no âmbito da arquitetura.

O problema do desperdício de material por conta de falhas em impressão 3D motivou os experimentos de Agustin Arroyo na TecnoLab La Rueca Asociación, que encontrou uma solução para estender o ciclo de vida do PLA. Ele nomeou o experimento de Plastic Smoothie e relatou todos os passos para transformar os resíduos de impressão em chapas utilizando equipamentos domésticos como liquidificador para triturar os resíduos e forno elétrico para derreter o polímero. Em seguida, ele utilizou uma máquina de corte a laser para transformar a chapa plana em produtos. A Figura 11 mostra os resultados obtidos por Agustin durante o processo de fabricação das chapas recicladas em um espaço *maker*.

Figura 11 – Chapa plana 100 x 100 cm pelo The Recycled Studio.



Plastic Smoothie, 2018.

Seguindo na linha acadêmica, o artigo de Manrique et al. (2019) também tem como objetivo reutilizar o polímero PLA excedente do processo de impressão 3D. No estudo foram realizados os processos de trituração, fundição e posteriormente foram criadas placas que foram manipuladas na cortadora a laser tendo como produto modelos geométricos com cunho educacional. Sendo assim, o objetivo principal do trabalho era testar formas de reaproveitamento deste material nestas condições visando à reutilização no próprio laboratório a fim de ampliar o ciclo de vida dos materiais e criando possibilidades de interação e criação de materiais didáticos para as aulas.

Ainda sobre pesquisa acadêmica neste âmbito, Hadin e Nordang (2018), em Plastic Island consideram que, a conservação da identidade de resíduos poliméricos reciclados em chapas planas, é importante para que as pessoas possam perceber a origem dos resíduos e contribuir para uma mudança de percepção e consciência da poluição marinha. Os autores, têm como objetivo explorar as possibilidades arquitetônicas de chapas planas recicladas e enfocam seus experimentos utilizando resíduos de PEAD retirados do oceano. Propõem também a fabricação de chapas com misturas incluindo redes de pesca e mix de outros polímeros com tipos não identificados. Assim, aspectos como identidade, translucidez, textura, transformação e cor são investigados.

A conservação da identidade trazida por Hadin e Nordang (2018), trata-se do planejamento do tamanho dos grânulos dos materiais, posicionamento e principalmente do comportamento do polímero durante o processo de fusão. Eles exemplificam este aspecto mostrando uma chapa plana em que uma tampa de garrafa mantém seu formato circular e a logo do fabricante, permitindo que a memória daquele resíduo permaneça no novo material. Foram explorados também efeitos de iluminação, o que gera um valor estético significativo para o projeto, texturas como ondulações, maciez e rugosidade, além da observação dos graus de transformação dos resíduos durante o processo de fusão. Por último, a possibilidade de tirar proveito das cores permitiu diversas intervenções na superfície do material (Figura 12).

Figura 12 – Experimentação de cores realizadas por Hadin e Nordang (2018).



Fonte: Hadin e Nordang (2018).

Em se tratando de cor e superfície das chapas, para a designer Jessica den Hartog, as variações de cores conseguidas com a reciclagem de resíduos são extremamente valiosas. Em seu trabalho “ReColored”, ela conduziu uma extensa pesquisa sobre a separação de cores e as aplicações estéticas de resíduos poliméricos (HARTOG, 2019a). Para a autora, experimentar materiais, cores e tecnologia sempre traz novas percepções, resultados e possibilidades de aplicá-lo de forma inovadora. A pesquisa iniciada por ela funciona como uma biblioteca de cores e materiais em um processo sem fim, pois ela vê o trabalho realizado em “ReColored” como um ponto de partida para ela e para outros designers e empresas. “A biblioteca de cores

e materiais deve parecer um convite para começar, o foco está na interpretação pessoal do material plástico reciclado” (HARTOG, 2020). A Figura 13 mostra alguns resultados da exploração de cores em chapas recicladas criadas pela autora.

Figura 13 – Exploração de cores em chapas recicladas por Jessica den Hartog.



Fonte: Hartog (2019b).

Sendo assim, estes projetos serviram como inspiração para a fabricação de chapas planas recicladas utilizando métodos semelhantes e, posteriormente, para a realização de ensaios de caracterização de material em laboratório visando alcançar os objetivos específicos propostos.

2.4.1 Etapa 1 – Preparação

Nesta etapa os resíduos são triturados e a matriz na qual a chapa plana será conformada é elaborada. A trituração dos resíduos influencia na aparência final da chapa, bem como no comportamento do material durante o processo de aquecimento. O molde ou matriz, por sua vez, além de determinar o dimensionamento da chapa, deve ser elaborado utilizando um material que proporcione uma boa condutividade térmica. Os itens que seguem explicam os passos realizados em cada etapa.

2.4.1.1 Trituração

De acordo com os experimentos realizados por alunos da Universidade de Berkeley (SCOTT, 2017) e por Agustin Flowaslistik do projeto Plastic Smoothie, para a trituração dos

resíduos foi utilizado um liquidificador doméstico de 1250 W de potência e sistema com seis lâminas revestidas de titânio (Figura 14). As peças tiveram que passar por uma pré-trituração manual antes da trituração final, pois alguns resíduos eram muito densos. Em ambos os casos foram utilizados resíduos de PLA oriundos de impressão 3D por extrusão de filamento para a reciclagem em filamento e chapas planas, respectivamente.

Figura 14 – Liquidificador doméstico utilizado para triturar resíduos poliméricos.



Fonte: Plastic Smoothie, 2018.

Assim, em se tratando do tamanho de granulos, conforme Agustin Flowaslistik relata que os grânulos pequenos derretem mais rapidamente, proporcionam uma espessura mais consistente a chapa e evitam o aparecimento de bolhas (PLASTIC SMOOTHIE, 2018). Porém, se os grânulos não forem uniformes, é necessário despejar os grânulos maiores no centro do molde e os menores nas bordas, segundo ele isso ajuda no processo de fusão.

A Precious Plastic (2020b), por sua vez, utiliza um moinho de facas de 1,5 kW de potência, 300 N.m de torque e 70 rpm para fragmentar resíduos poliméricos (Figura 15a). O moinho de facas alcança como resultado em três ciclos de trituração grânulos grandes (30 mm), médios (10 mm) e pequenos (7 mm) (Figura 15b). Todos os tamanhos são indicados para a reciclagem em chapas planas com testes realizados com os polímeros PEAD, PEBD, PP e PS (PRECIOUS PLASTIC, 2020b).

Figura 15 –Triturador de polímeros *open source* e os ciclos de trituração.



(a) Triturador; (b) Tamanhos de grânulos.

Fonte: Precious Plastic (2020b).

Conforme Precious Plastic (2020b), durante o processo de trituração, recomenda-se observar a temperatura das lâminas, mancais, caixa e motor. Caso a temperatura das lâminas exceda 90 °C ou se o polímero começar a derreter é necessário parar a trituração, em geral a temperatura de trabalho recomendada é 55 °C (PRECIOUS PLASTIC, 2020b).

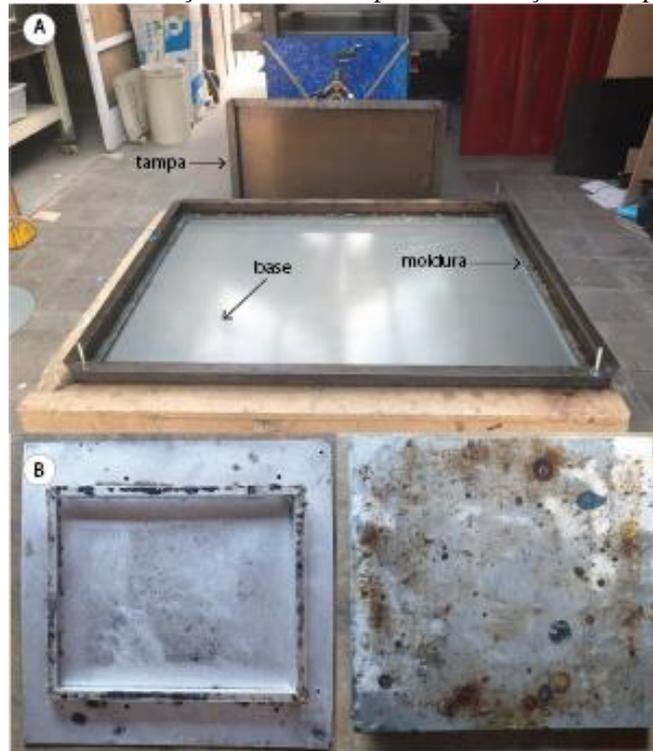
2.4.1.2 *Elaboração do molde ou matriz*

De acordo com Groover (2013), em moldagem por compressão os moldes são geralmente sincronizadores com os seus equivalentes de moldes de injeção. Porém, não existe um sistema de canal em um molde de compressão e o processo em si é geralmente limitado a geometrias de peças mais simples devido às menores capacidades de fluxo dos materiais termofixos de partida. No entanto, é necessário prever o aquecimento do molde, geralmente realizado por aquecimento por resistência elétrica, circulação de vapor ou óleo quente.

Entretanto, é possível observar que um molde para conformação de chapa plana é constituído de três partes: base, moldura e tampa (Figura 16a). A diferença está no material utilizado para sua elaboração. Seguindo os projetos analisados, recomenda-se o uso de aço

galvanizado, pois esse material possui boa resistência à corrosão e geralmente vêm com um acabamento de superfície polido, o que é muito favorável para esta aplicação (PRECIOUS PLASTIC, 2018a). Chapas de alumínio também são próprias para os moldes (Figura 16b) (PRECIOUS PLASTIC, 2020c).

Figura 16 – Moldes em aço e em alumínio para conformação de chapas planas.



(a) Molde em aço galvanizado, (b) Molde em alumínio.
Fonte: (a) Precious Plastic (2018a); (b) Precious Plastic (2020c).

A Figura 16a mostra um molde em aço galvanizado com base de 500 mm por 500 mm e espessura de 3mm, a moldura, ou seja, a estrutura que proporciona a espessura da chapa plana a ser conformada, que foi dimensionada com 20 mm de borda e a tampa possui as mesmas dimensões da base, porém com espessura de 1,5 mm. Na Figura 16b o molde em alumínio de base 400 por 400 mm e 5 mm, moldura de 300 x 250 x 10 mm e tampa de 400 x 400 x 3 mm. Moldes de alumínio apesar de serem funcionais para esta aplicação são mais caros e necessitam de mais cuidados com a limpeza da superfície, além de apresentarem arranhões facilmente e apresentarem possíveis problemas de aderência (PRECIOUS PLASTIC, 2018a).

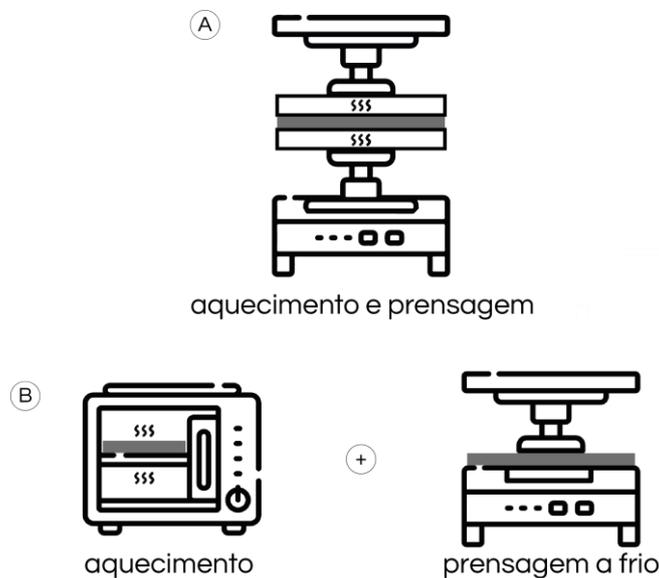
Indica-se ainda o uso de óleo de silicone como desmoldante (PRECIOUS PLASTIC, 2020d) e a presença de um sistema de fixação lateral para unir as partes superiores e inferiores da matriz (MMID FOUNDATION, 2018). É favorável que o molde seja dimensionado alguns

centímetros a mais do que a dimensão preterida devido ao encolhimento do material durante a solidificação (PRECIOUS PLASTIC, 2018a).

2.4.2 Etapa 2: Prensagem

A partir das informações analisadas seguem dois métodos de abordagem no que tange a conformação de resíduos poliméricos em chapas planas recicladas, sendo elas: (a) prensagem a quente ou (b) prensagem a frio (figura 17).

Figura 17 – Métodos de obtenção de chapas planas recicladas.



(a) Representação equipamento de prensagem a quente,
(b) Aquecimento em forno e representação de equipamento de prensagem a frio.
Fonte: Elaborado pela autora.

No primeiro caso (Figura 17a) o aquecimento do molde é realizado no mesmo equipamento em que a prensa é instalada, assim como acontece no processo de moldagem por compressão. Ou seja, quando o molde atinge a temperatura adequada de aquecimento a prensagem é realizada. No segundo caso (Figura 17b) o aquecimento do molde é realizado em um forno elétrico e, ao atingir a temperatura de fusão do material polimérico, o mesmo é levado para a prensa a frio, onde permanece até a solidificação.

A Precious Plastic (2020d), explora a opção de transferência de calor e prensagem simultâneas, utilizando como fonte de calor cartuchos de 300 W distribuídos em uma placa de alumínio formando uma plataforma de transferência de calor por condução (Figura 18a). O número de cartuchos (fontes de calor) é proporcional ao tamanho da plataforma requerida.

No projeto foi relatado que uma unidade de cartucho equivalente a 300 W realiza a transferência uniforme para uma chapa plana de de 240 por 240 mm e espessura de 10 mm (Figura 18b).

Figura 18 – Obtenção de chapa plana reciclada por prensagem a quente.



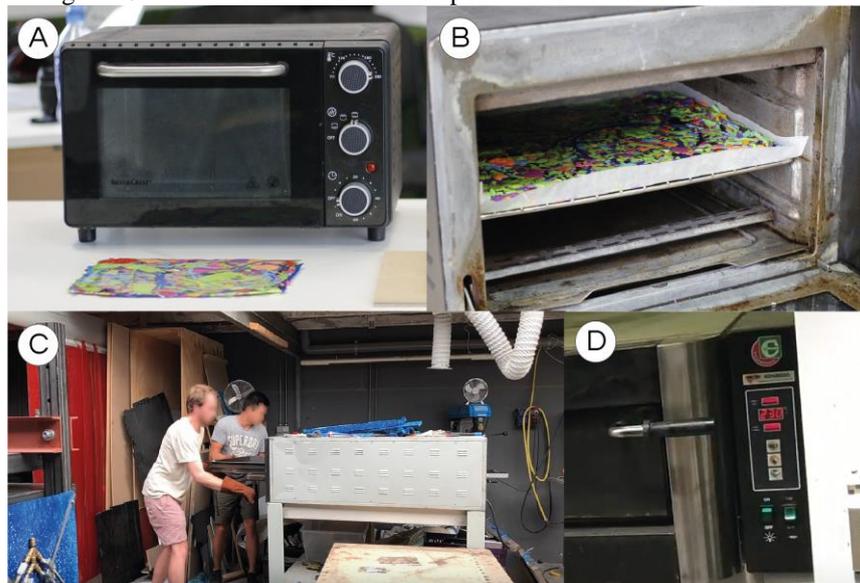
(a) *Sheetpress*, equipamento para prensagem a quente;
(b) Colocação do molde no equipamento.

Fonte: (a) Onearmy, 2020a, (b) Onearmy, 2020b.

No equipamento denominado *Sheetpress* (figura 18a) conforme Precious Plastic (2020d), são utilizadas duas plataformas (superior) e (inferior), onde são adicionadas porções de lã mineral, o que garante o isolamento da temperatura. Com porte robusto o equipamento possui capacidade de produção de chapas planas de 1000 por 1000 mm e espessuras que variam de 4 a 35 mm. A temperatura pode chegar a 300 °C atuando com uma corrente de 32 A, potência de 1.5 kW e voltagem 400 V. O sistema utiliza um macaco hidráulico de garrafa com aríete longo e conexão de olhal de 8 toneladas atingindo 10 kPa de pressão (PRECIOUS PLASCTIC, 2020d).

Já no experimento realizado no projeto Plastic Smoothie (2018) é utilizado um mini forno doméstico (Figura 19a) com capacidade para 8 litros, potência 800 V e barras de aquecimento (superior e inferior) feitas de quartzo que elevam a temperatura até 230 °C para produzir chapas de PLA (Figura 19b). Da mesma forma, o MMID Foundation (2018) utiliza um forno de pizza (Figura 19c), devido às dimensões da chapa, porém a temperatura utilizada para derreter o material testado também chega a 230 °C (Figura 19d).

Figura 19 – Derretimento do material polimérico em forno elétrico.



(a) Forno elétrico doméstico; (b) Chapa plana em forno elétrico;
(c) Forno de pizza; (d) Temperatura de derretimento do material.

Fonte: (a, b) PLASTIC SMOOTHIE, 2018; (c, d) MMID Foundation, 2018.

Assim, que o molde atinge sua temperatura de fusão o mesmo deve ser levado para a prensagem à frio. No caso do projeto Plastic Smoothie (2018) esta etapa foi realizada sem a ajuda de uma prensa hidráulica (Plastic Smoothie, 2018). Na Figura 20a é possível observar uma prensa projetada por Mark Bertbach em 2018 para a MMID Foundation, a qual é utilizada para a prensagem de chapas planas de grandes dimensões (MMID Foundation, 2018). Em alternativa, na Figura 20b observa-se uma prensa hidráulica fria menos robusta disponível no mercado, a qual é utilizada pela empresa Gomi design para realizar a prensagem do molde de um produto (caixas de som).

Figura 20 – Prensagem a frio.



(a) Prensa fria, criada por Mark Bertbach; (b) Prensa hidráulica fria disponível no mercado.

Fonte: (a) MMID Foundation, 2018; (b) Gomi Design, 2019.

Vicente Varella, designer de produto e voluntário na Precious Plastic, lista alguns pontos positivos e negativos do processo de aquecimento e prensagem simultâneas em relação a prensagem a frio. Como ponto positivo o processo é mais eficiente, pois não há necessidade de resfriamento da máquina a cada peça confeccionada, o processo torna-se mais rápido e o resultado final é mais preciso. Pontos negativos, dependendo do tamanho da chapa plana o processo é mais difícil de ser executado, além de exigir mais equipamentos de segurança e transporte, a necessidade de um molde separado pode encarecer o processo (PRECIOUS PLASTIC, 2018b). Em geral para ambos processos se adiciona a necessidade da presença de um sistema de isolamento devido aos compostos voláteis emitidos durante o processo de reciclagem de alguns polímeros (HE et al., 2015). Após o procedimento de prensagem a chapa permanece no molde até o total resfriamento.

2.4.3 Etapa 3: Aplicação

Chapas planas recicladas com resíduos termoplásticos podem ser utilizadas para diversas aplicações em design. Depois de processadas podem ser realizados cortes, furos, dobras, polimento, lixação etc. Além disso, a superfície pode ser elaborada levando em conta a combinação de cores e padrões singulares, desta forma a liberdade de criação é estimulada.

2.4.3.1 Procedimentos de corte, furação e dobra

Aqui serão abordados os procedimentos de (1) corte, (2) furação e (3) dobra. O material utilizado para a fabricação da chapa plana tem influências sobre os parâmetros a serem usados, as informações a seguir serão descritas conforme testes realizados pela comunidade Precious Plastic e os materiais utilizados serão mencionados em cada caso (Figura 22).

(1) Corte: Serras tico-tico são muito versáteis e oferecem cortes retos, curvos e até mesmo a possibilidade de realizar furos internos (Figura 21a). Entretanto, conforme a Precious Plastic (2020e) ao selecionar a lâmina de corte, vários fatores devem ser levados em consideração:

- Tipo de lâmina: recomenda-se o uso de lâminas de aço de alto carbono (HCS) e lâminas de aço rápido (HSS) para esses trabalhos.

- Dentes por polegada (TPI): para materiais frágeis, é necessária uma quantidade relativamente grande de TPI, cerca de 10-13, a fim de permitir um corte seguro e limpo, já os polímeros mais resistentes requerem uma quantidade menor.
- Forma e direção da lâmina: a lâmina pode apontar para cima ou para baixo e produzir um corte mais liso na lateral da peça que está sendo cortada, já em materiais quebradiços pode produzir lascas do outro lado.
- Ângulo de corte: recomenda-se o uso de lâminas em que o ângulo de corte dos dentes é negativo ou próximo de zero.

Para cortar chapas planas poliméricas é necessário escolher uma velocidade que garanta facilidade de corte (alta) e que não derreta o polímero (baixa) sendo 4 uma velocidade intermediária para alguns polímeros. Para o corte de ação orbital, a velocidade deve ficar entre 1 ou 2 para peças de até 10 mm em chapas de PS, e para peças de até 20 mm para chapa de PEAD e PP. Ações orbitais mais altas tornarão o trabalho mais rápido e fácil, mas nem sempre garantirão um corte limpo. O corte deve ser realizado próximo da bancada para evitar o máximo de vibração possível e permitir estabilidade. Para chapas mais espessas (em torno de 10 mm) pode ser necessário o uso de um compressor de ar para evitar o derretimento do material durante o corte (PRECIOUS PLASTIC, 2020e).

Outra possibilidade é utilizar uma serra de bancada (Figura 21b), segundo a Precious Plastic (2020f), para os polímeros PS, PEAD e PP os testes que tiveram sucesso apresentaram as seguintes configurações: ângulo de corte (α) negativo ou pelo menos 0° para reduzir a tensão durante o corte e evitar que os cavacos derretam. O número de dentes (Z) depende da espessura da peça que se deseja cortar, então para uma lâmina de $\varnothing 300$ mm valores entre 84 e 96 dentes funcionam bem para espessuras de até 25 mm. Em oposição, para peças sólidas mais espessas, é necessária uma lâmina com menor número de dentes em torno de 72, já que é necessário mais espaço entre os dentes para remover maiores quantidades de material.

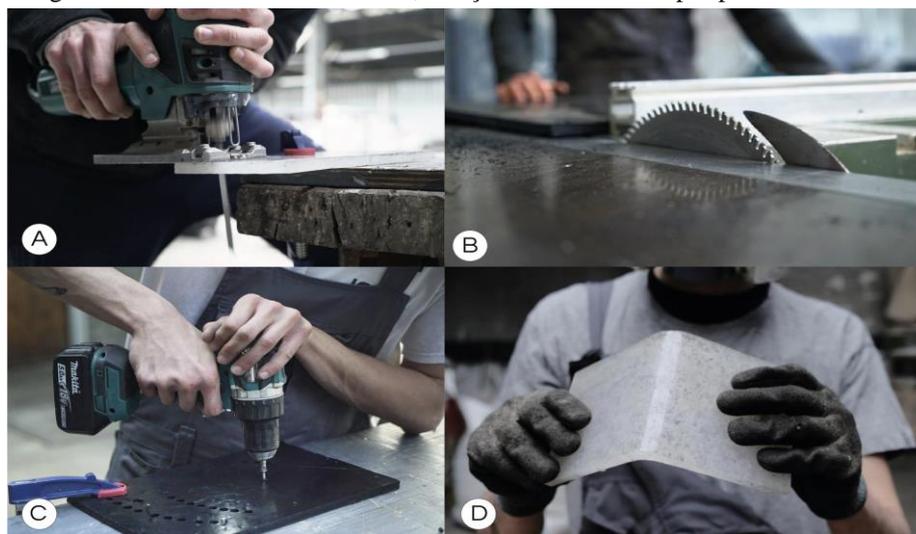
Em termos de velocidade, cerca de 3000 rpm combinado com um avanço rápido proporciona bons resultados. Ao posicionar a lâmina em relação a chapa plana a ser cortada, quanto mais a lâmina ficar acima da placa menor será o resultará em cortes mais limpos. Neste caso, é necessário também manter a chapa plana firme na base durante a realização do corte para evitar vibrações (PRECIOUS PLASTIC, 2020f).

(2) Furação: A ferramenta a ser utilizada aqui trata-se de uma furadeira manual (Figura 21c) ou de bancada. Ao iniciar o furo, para evitar qualquer deformação e a possibilidade de quebrar a

peça, recomenda-se perfurar um orifício com um diâmetro ligeiramente menor do que o parafuso (por exemplo, para um parafuso de madeira de 3 mm o orifício será de 2 mm). Sendo assim, a melhor maneira de perfurar uma chapa plana polimérica é combinando uma broca de metal com a máquina em alta velocidade. Ainda, se existe a necessidade de adicionar parafusos na chapa, pode-se usar uma broca escariadora para escarear um lado do furo (PRECIOUS PLASTIC, 2020g).

(3) Dobra: A dobradeira é uma máquina que conta com dois elementos de aquecimento para aquecer a chapa apenas o suficiente para realizar uma dobra sem quebrar a peça. O primeiro passo é definir a temperatura correta da máquina, assim recomenda-se para o PS (90-100°C) e para os polímeros PEAD e PP (50-60°C), temperaturas acima do ponto de fusão. Assim que a máquina atinge a temperatura desejada, coloca-se chapa plana entre os dois elementos de aquecimento. Conforme a Precious Plastic (2020h), o polímero PS geralmente leva de 6 a 10 minutos para aquecer, enquanto o PEAD leva cerca de 30 a 40 minutos para a mesma espessura de chapa (10 mm). Para conseguir uma boa dobra, segure a peça na posição desejada até que a placa esfrie, se a placa for aquecida corretamente, ela manterá sua forma. A qualidade da chapa também afeta o resultado, quanto mais homogêneo for o material, melhor será a curvatura (Figura 21d). Além disso, a espessura do material também afetará quanto o mesmo poderá ser dobrado, chapas espessas podem não dobrar muito sem atingir grandes deformações (PRECIOUS PLASTIC, 2020h).

Figura 21 – Procedimentos de corte, furação e dobra em chapas planas recicladas.



(a) corte chapa plana com serra tico-tico; (b) corte de chapa plana com serra de bancada;
(c) furação em chapa plana; (d) dobra em chapa plana.

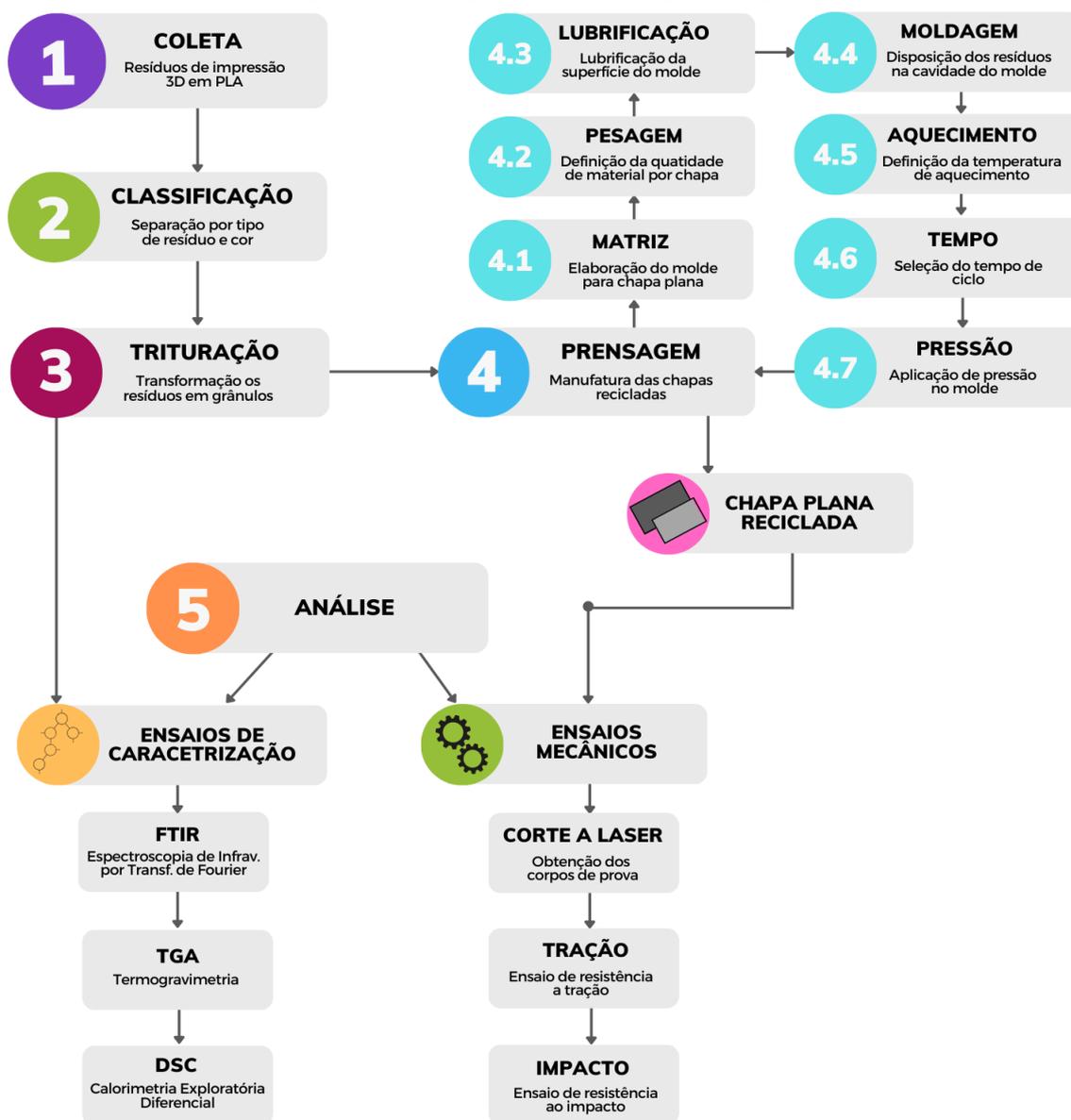
Fonte: (a) Precious Plastic (2020e); (b) Precious Plastic (2020f);
(c) Precious Plastic (2020g); (d) Precious Plastic (2020h).

O presente trabalho não pretende se ater na testagem de todos os procedimentos acima mencionados, mas sim nos aspectos relacionados ao material oriundo de impressão 3D por extrusão de filamento. Desta forma, a seguir serão apresentadas a metodologia que será utilizada neste estudo, tendo como abordagem principal a caracterização do PLA reciclado em chapas planas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada consiste primeiramente na preparação do material através da coleta, classificação por cor e trituração dos resíduos de PLA. O equipamento utilizado para a fabricação das chapas recicladas de PLA foi uma prensa sublimática. Foram realizados ensaios de caracterização do material e ensaios mecânicos. Para a realização dos ensaios mecânicos foi utilizado corte a laser para produzir os corpos de prova com dimensões especificadas pelas normas. A Figura 22 apresenta um fluxograma de cinco fases, o qual foi empregado neste trabalho.

Figura 22 – Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Foram coletados resíduos de PLA originados pelo processo de impressão 3D por extrusão de filamento, tais como: peças defeituosas, material de suporte, resíduos de pré-impressão, entre outros. O recolhimento dos resíduos foi feito à medida que foram sendo gerados por duas *startups* parceiras localizadas na cidade de Porto Alegre/RS e pelo Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS. Após o recolhimento, os resíduos passaram por uma etapa de classificação de modo a serem separados em pequenos, médios e grandes e foram separados por cor.

3.2 TRITURAÇÃO

A trituração do material foi realizada em um moinho de facas de 1,5 kW de potência, 300 N.m de torque e 70 rpm para fragmentar os resíduos poliméricos, idêntico ao modelo da Precious Plastic descrito na revisão da literatura. Esta etapa foi realizada em conjunto com a empresa Likso localizada em Porto Alegre, vinculada à comunidade Precious Plastic.

3.3 PRENSAGEM

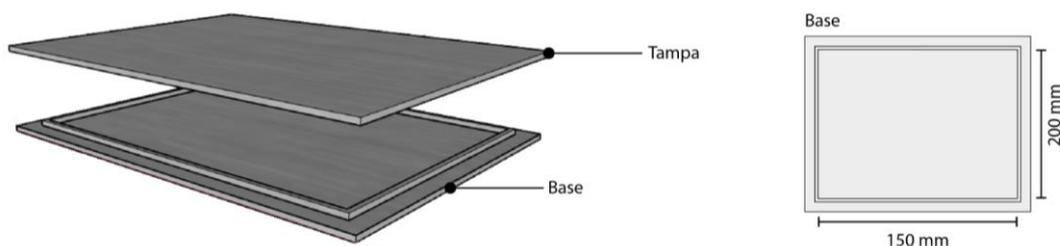
Para a prensagem dos grânulos foi utilizada uma Prensa Sublimática com temperatura e pressão controladas adquirida pela autora. O equipamento é da marca nacional Maquinatec com as seguintes especificações técnicas: área útil de 40 cm por 35 cm, potência 1.800 W, temperatura de 0 a 250 °C e tempo programável de 0 a 999 segundos. Os parâmetros de tempo e temperatura foram variados nos diversos experimentos realizados e foram sendo ajustados conforme os resultados foram sendo obtidos, os quais serão descritos no tópico de resultados e discussões deste trabalho.

3.3.1 Matriz

O material escolhido para a elaboração do molde foi o aço galvanizado por possuir boa condutividade térmica. O molde foi elaborado utilizando duas chapas de 1,5 mm de espessura e de 150 mm de largura x 200 mm de comprimento. As dimensões de largura, comprimento e altura do molde foram pensadas visando melhor aproveitamento de área para posteriormente

cortar à laser os corpos de prova para os ensaios de tração e impacto. A figura 23 mostra um desenho esquemático do molde.

Figura 23. Desenho esquemático do molde utilizado para as chapas planas.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os ensaios foram divididos em ensaios químicos e mecânicos. Sendo assim, após a trituração do material foram realizados os ensaios químicos de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier, Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial utilizando o material na sua forma granular. Em um segundo momento, após a etapa de prensagem do material em chapas planas recicladas, foram realizados os ensaios mecânicos de tração e impacto visando entender o comportamento do material diante dessas solicitações.

3.4.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

Trata-se de uma das mais importantes técnicas experimentais para a caracterização de polímeros em termos de identificação e/ou determinação de suas características estruturais. O equipamento utilizado foi o Spectrum 100, da Perkin Elmer, com resolução de 4 cm^{-1} , pertencente ao LDSM/UFRGS.

3.4.2 Termogravimetria - TGA

Esse ensaio mede a variação de massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da variação de temperatura imposta ao material analisado. As análises térmicas foram realizadas no equipamento TGA-Q50/TA Instruments, no Instituto de Química da UFRGS, no Campus

do Vale. As amostras, de aproximadamente 10 mg, foram analisadas em uma atmosfera de nitrogênio, aquecidas na faixa de 23 a 600 °C e em uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

3.4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

Ensaio utilizado para determinar principalmente as propriedades de temperatura de Transição Vítreia (T_g), Temperatura de Fusão (T_m) do material, ou seja, para medir o fluxo de calor associado com as transições térmicas dos materiais em função da temperatura e do tempo. Os ensaios foram realizados no equipamento DSC Netzsch, modelo DSC 404 F1 Pegasus (cadinho de platina), no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. As amostras foram analisadas em uma atmosfera de nitrogênio, aquecidas na faixa de 23 a 250°C e em uma taxa de aquecimento de 10 K/min.

3.4.4 Ensaio de Tração

O equipamento utilizado foi a Máquina Universal de Ensaio da marca Shimadzu, com capacidade de 5 kN e velocidade de 5 mm/min, pertencente à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS. Os corpos de prova seguiram a norma ASTM D638-2a tipo IV.

3.4.5 Ensaio de Impacto Izod

O ensaio tem o intuito de medir a propriedade de resistência ao impacto do material. O equipamento utilizado pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS, da marca Instron, CEAST 9050, com martelo de 5,5 J. Os corpos de prova seguiram a norma ASTM D256.

3.4.6 Corte a laser

Foi utilizado o Laser CO₂ de 150 W da marca Katto da empresa Cut Lab em Porto Alegre/RS. A potência utilizada considerando os melhores parâmetros de corte para o material em chapa foi 30 W e velocidade de corte de 20 mm/s.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização bem como os resultados obtidos durante a manufatura das chapas planas utilizando resíduos de PLA em um molde de aço galvanizado por prensagem a quente conforme descrito na metodologia. Além disso, serão apresentados ainda os resultados dos ensaios mecânicos realizados e as discussões pertinentes referentes ao tema.

4.1 PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS DE IMPRESSÃO 3D

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, o material utilizado neste estudo são resíduos de PLA originários de impressão por extrusão de filamento. Estes resíduos foram coletados, separados por tipo e por cor. Conforme a Figura 24 as cores obtidas foram branco, preto, cinza e, em menor quantidade e cores diversas como amarelo, azul e verde. Em termos de tipos de resíduos, temos peças defeituosas, material de suporte e peças inacabadas.

Figura 24 – Resíduos de impressão 3D.



(a) Resíduos coletados sem separação; (b) Resíduos coletados sem separação;
(c) PLA branco, à esquerda peças defeituosas ou inacabadas e à direita material de suporte; (d) PLA preto, peças defeituosas ou inacabadas; (e) PLA cinza, peças descartadas, inacabadas e material de suporte; (f) PLA de cores diversas, peças defeituosas ou inacabadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

Obtendo o material, o próximo passo foi a trituração dos resíduos, para reduzir as peças em grânulos ou *pellets*, para posteriormente utilizá-los em um molde para obter as chapas planas recicladas utilizando a prensa sublimática como equipamento base.

4.1.1 Trituração dos resíduos

Foram necessários dez ciclos de trituração para obter grânulos que mais se aproximaram de *pellets*, algumas peças grandes e densas demoraram mais a serem reduzidas em grânulos. De acordo com as peças coletadas foi possível obter 996 g de PLA branco, 906 g de PLA preto, 567 g de PLA cinza e 686 g de PLA de cores diversas. Conforme a figura 25, os resultados obtidos na trituração do material foram homogêneos com grânulos bem pequenos medindo cerca de 7,5 x 7,0 x 2,2 mm.

Figura 25 – Resíduos x quantidade.



(a) PLA branco 996 g; (b) PLA preto 906 g; (c) PLA cinza 567 g; (d) PLA colorido 686 g

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a trituração, o material foi colocado em recipientes plásticos vedados, separados por cor e longe do abrigo do sol.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier foi utilizada para comprovar a formação do polímero, em seguida a Termogravimetria para revelar as temperaturas de degradação do material, já a Calorimetria Exploratória Diferencial para apresentar as temperaturas de transição vítrea (T_g), de cristalização (T_c) e de fusão (T_m). Os ensaios mecânicos de tração e impacto foram utilizados para obter os parâmetros de resistência do material diante de solicitações mecânicas.

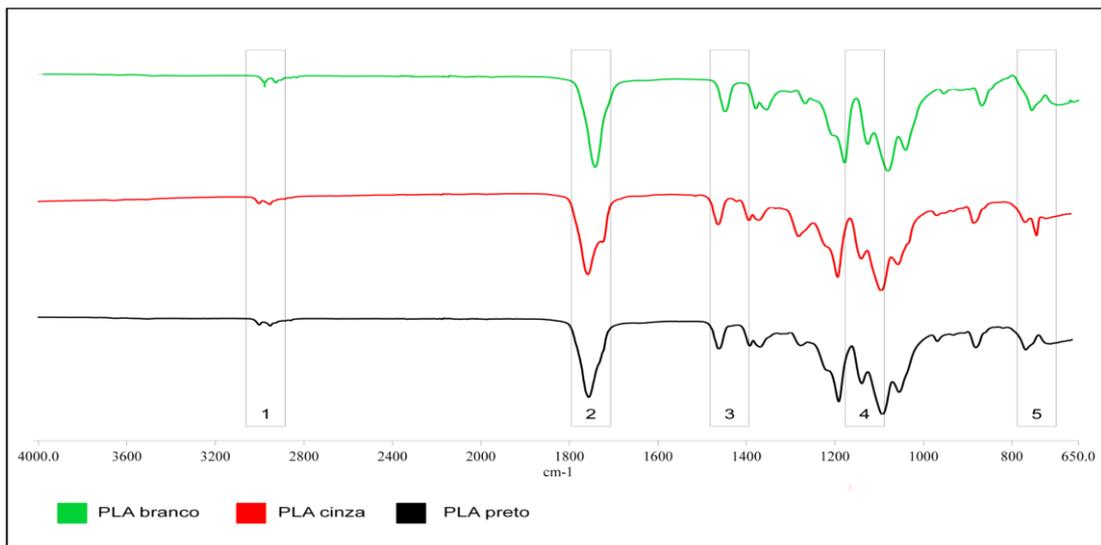
4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

Nesta sessão, foram analisadas as curvas FTIR conforme o ensaio realizado para o PLA em três cores distintas: branco, cinza e preto. A figura 38 representa os espectros obtidos neste ensaio, divididos em cinco regiões. Para a análise dos resultados, buscou-se na literatura avaliações sobre o PLA no contexto da impressão 3D e verificou-se que os espectros de FTIR obtidos neste trabalho se encontram próximos aos alcançados por Santana et al. (2018). Isso mostra que há concordância entre os dados de ambos os estudos e corrobora para que se comprove a veracidade dos resultados.

Entretanto, o ensaio do presente trabalho foi realizado apenas com PLA impresso, diferentemente de Santana et al. (2018), que avaliou o material no seu estado filamentar e impresso. Por outro lado, pode-se comparar os resultados das duas situações para entender se houve mudança na qualidade estrutural do material após o processamento por impressão 3D ou se ele manteve as suas características em condição filamentar.

Sendo assim, o quadro 2 traz os comprimentos de ondas obtidos em cada uma das 5 regiões conforme observadas no gráfico (figura 26) e compara os valores do PLA impresso com os do PLA em estado filamentar, segundo Santana et al. (2018).

Figura 26 – Espectros de FTIR do PLA impresso.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 2 – Comparativo espectros PLA impresso x PLA filamentar.

Regiões	Comprimento de ondas (cm ⁻¹) PLA impresso	Comp. de ondas (cm ⁻¹) PLA Filamento Santana et al. (2018)
1	2997, 2944, 2855	2997, 2947, 2856
2	1747	1748
3	1451, 1382, 1358	1453, 1383, 1359
4	1181, 1128, 1081, 1042	1181, 1128, 1081, 1041
5	867, 755	868, 755

Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, observa-se que os valores obtidos para o PLA impresso e filamentar são praticamente idênticos, podendo ser inseridos no mesmo grupo funcional. Os grupos funcionais correspondentes às bandas obtidas foram analisados de acordo com Santana et al. (2016) e Cuiffo et al. (2017). Sendo assim, os picos contidos na faixa de valores da Região 1 correspondem ao estiramento -CH (grupo CH₃). As bandas da Região 2 são associadas ao estiramento carbonilo C=O do grupo -CO-O- do PLA. O intervalo observado na Região 3 está relacionado às vibrações de flexão CH₃. Na Região 4 são encontrados espectros classificados como o estiramento C-O-C. A Região 5, apresenta uma banda em 867 cm⁻¹, equivalente à vibração C-COO, e outra em 755 cm⁻¹ como vibrações esqueléticas dos grupos metileno.

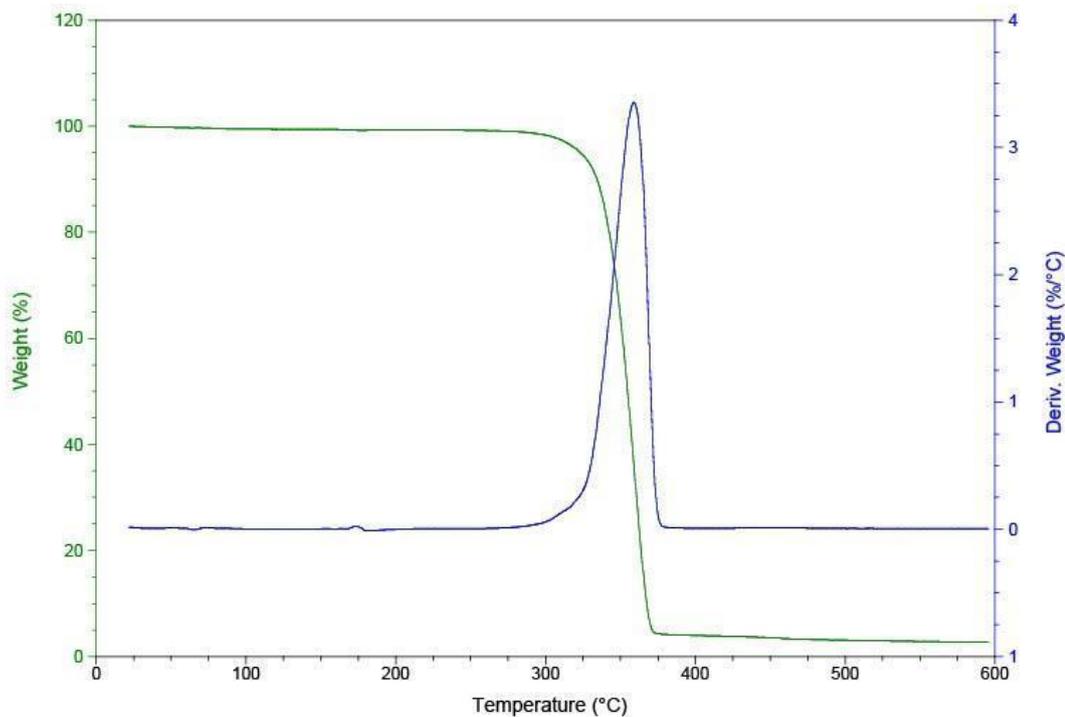
Com isso, através da análise dos espectros obtidos identifica-se que a estrutura molecular dos polímeros não foi alterada pelo processo de impressão 3D. Da mesma forma também não foram encontradas grandes divergências entre as três cores analisadas sendo elas branco, preto e cinza. Conforme Soares et al. (2018) diferenças devido a pigmentos ou outros aditivos são tênues (por ter em pouca quantidade) e não afetam os principais grupos funcionais dos polímeros.

4.2.2 Termogravimetria - TGA

As amostras de PLA seguiram o mesmo critério das avaliações do material no ensaio de FTIR, sendo ensaiadas na condição de após serem impressas por meio de impressão 3D e em três cores diferentes. A partir das curvas termogravimétricas obtidas pode-se perceber que as cores não influenciaram consideravelmente no resultado final, sendo assim a análise dos resultados foi feita levando em conta apenas o gráfico de TGA do PLA na cor branca (Figura

27). Porém, é importante observar que pequenas diferenças nas perdas de massa e residuais das amostras em diferentes cores podem indicar a influência de aditivos e corantes. Sendo assim, os demais gráficos podem ser observados no Apêndice 1 deste trabalho.

Figura 27 – Análise Termogravimétrica do PLA Branco.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da análise das curvas contidas no gráfico (Figura 27) observa-se que o estágio de decomposição térmica do PLA inicia-se a uma temperatura (T_{onset}) de aproximadamente 300 °C e finaliza (T_{endset}) em 380 °C, com uma variação da quantidade inicial de material de aproximadamente 95%. O segundo estágio de degradação ocorre entre 380 °C até a temperatura final do ensaio em 600 °C, com uma perda de massa de aproximadamente mais 2,5%, restando um total de 2,5% da massa inicial.

Comparando os resultados com o estudo de Santana et al. (2018) nota-se que os valores iniciais de degradação (T_{onset}) são bem próximos, além disso verifica-se que em ambos os estudos entre 300 °C e 400 °C mais de 90% de massa é perdida. Em última análise, comparou-se os resultados obtidos por Andrade et al. (2015) primeiramente com o PLA virgem, em que a degradação inicia em 348 °C (T_{onset}) e finaliza em 365 °C (T_{endset}), onde encontra seu pico máximo. Em seguida, tem-se o PLA após o processo de extrusão em que a T_{onset} se dá em 346

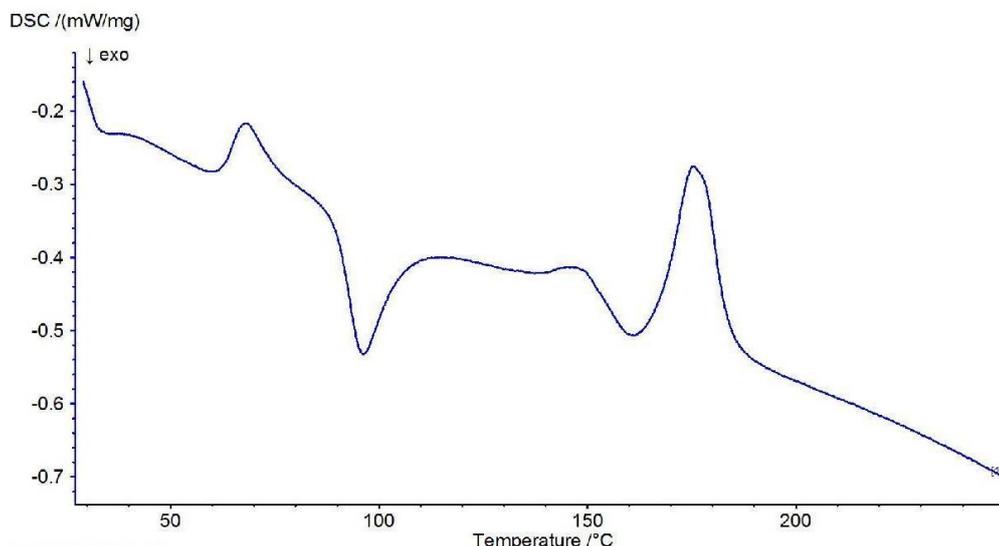
°C e a T_{endset} se dá em 365 °C. Assim, conclui-se que os resultados obtidos neste trabalho se encontram conforme o esperado para este material.

4.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

Através da análise do termograma obtido pelo ensaio de DSC realizado foi possível encontrar a temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura cristalização (T_c) e temperatura de fusão (T_m) do material. Assim como nos outros ensaios realizados neste trabalho, as amostras avaliadas passaram por uma vez pelo processo de impressão 3D, porém ainda foi realizado um segundo ensaio, desta vez utilizando as chapas recicladas.

Os dados obtidos no termograma do PLA branco com amostra impressa (Figura 40) foram confrontados e comparados com os de Santana et al. (2018) que também estudou o material nesta condição. Sendo assim, as temperaturas obtidas aqui foram respectivamente (T_g), (T_m) e (T_c) 62 °C, 170 °C e 98 °C, em contrapartida, os resultados obtidos por Santana et al. (2018) foram 61,9 °C, 170,0 °C e 101,2 °C respectivamente.

Figura 28 – Termograma do PLA impresso na cor branca.



Fonte: Elaborado pela autora.

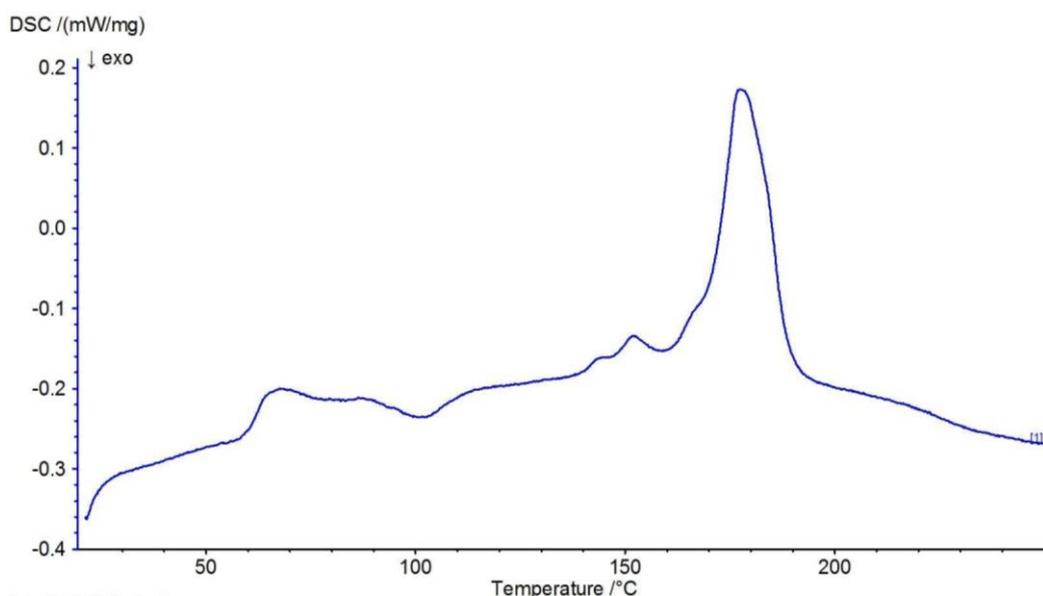
Colocando os resultados para discussão, assim como Santana et al. (2018), outros autores tiveram resultados bem próximos dos encontrados para as temperaturas de transição vítrea, cristalização e fusão do PLA após algum tipo de processamento (extrusão, injeção e impressão 3D). Desta forma, segundo Song (2017) existe um comportamento típico do PLA extrudado e moldado por injeção que é um pico exotérmico relativamente acentuado em torno

de 100 °C durante o primeiro aquecimento, o que é atribuído à temperatura cristalização do material. No termograma deste trabalho (figura 28) é possível observar com clareza que em torno de 98 °C o pico relatado aparece. Nos estudos de Santana et al. (2018) pode-se concluir desta forma que o PLA é um polímero semicristalino, o que também pode ser atestado neste trabalho.

Verificando os resultados obtidos por Santana et al. (2018) e Song et al. (2017), os quais analisam o PLA no estado filamental, impresso e injetado, sendo que Song et al. (2017) ainda obtiveram termogramas após o primeiro e segundo aquecimento do PLA em tais condições, observa-se informações interessantes. Santana et al. (2018) trazem que há um aumento nas temperaturas de transição vítrea e de fusão, e redução da temperatura de cristalização em relação ao estado inicial quando se compara o comportamento do PLA filamental, impresso e injetado. Já Song et al. (2017), verificam que a (T_g) do PLA diminui em torno de 2 graus a cada vez que o material sofre algum processo de aquecimento, já a (T_m) permaneceu constante. De acordo com os dados obtidos por Song et al. (2018) amostras impressas de PLA no primeiro aquecimento apresentaram T_g e T_m de 64 °C e 169 °C, já no segundo aquecimento a T_g caiu para 62 °C enquanto a T_m se manteve constante em 169 °C.

Neste trabalho, visando entender se haveria alguma alteração nas propriedades do material, foram ensaiadas uma amostra da chapa reciclada na cor branca, que apresentou comportamento frágil assim logo após o desmolde (Figura 29).

Figura 29 – Termograma da chapa reciclada de PLA.



Fonte: Elaborado pela autora.

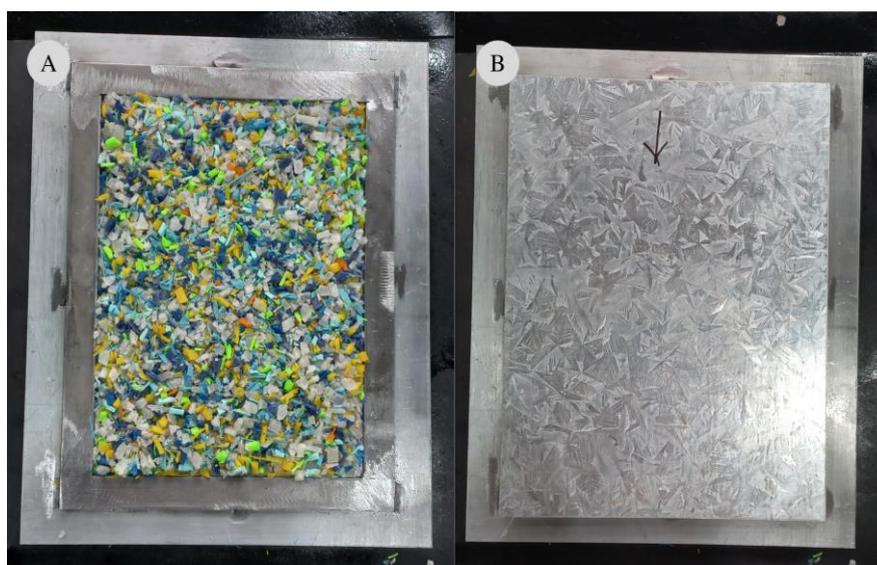
Comparando o termograma da amostra em chapa (Figura 29) e o termograma inicial do material em estado impresso (Figura 28), o gráfico mostra picos pouco acentuados no que tange às temperaturas de transição vítrea (T_g) e temperatura de cristalização (T_c), apesar de aparecerem quase que nos mesmos pontos do termograma anterior. Porém, a temperatura de fusão retrocedeu cerca de $10\text{ }^\circ\text{C}$ passando de 170 para $160\text{ }^\circ\text{C}$.

Sendo assim, conclui-se que o PLA analisado no contexto da impressão 3D apresentou resultados similares aos já encontrados na literatura, confirmando que o material possui baixa temperatura de transição vítrea. Entende-se também que mesmo após um segundo processamento, a T_g e a T_c do PLA se mantiveram praticamente as mesmas, entretanto a diminuição da T_m revela um ponto de atenção. Isso pode reduzir a aplicação do material em maiores temperaturas, visto que pode diminuir a resistência à tração, módulo elástico e rigidez do material.

4.3 PRENSAGEM DOS RESÍDUOS EM CHAPAS PLANAS

Primeiramente, o molde foi elaborado para definir as dimensões das chapas que seriam obtidas após a prensagem. O molde em aço galvanizado foi dividido em duas partes: base e tampa e medindo $27 \times 22,5 \times 1,5\text{ mm}$. Em termos de área útil as dimensões utilizadas foram $20 \times 15 \times 3\text{ mm}$, sendo estas as dimensões finais das chapas. A figura 30 ilustra o molde aberto e fechado, respectivamente.

Figura 30 – Molde em aço galvanizado aberto e fechado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Antes da colocação dos resíduos no molde foi definido a quantidade de material suficiente para ser acomodada na cavidade do molde, para isso foi utilizado uma balança doméstica de capacidade de até 10 kg para pesar o material (Figura 31). Sempre que uma nova chapa era prensada, algumas camadas de spray desmoldante eram aplicadas na superfície do molde a fim de facilitar o desmolde. O desmoldante utilizado da marca Ultralub Silispray tem característica desmoldante, lubrificante, protetivo e anticorrosivo.

Figura 31 – Pesagem do material antes da colocação no molde.

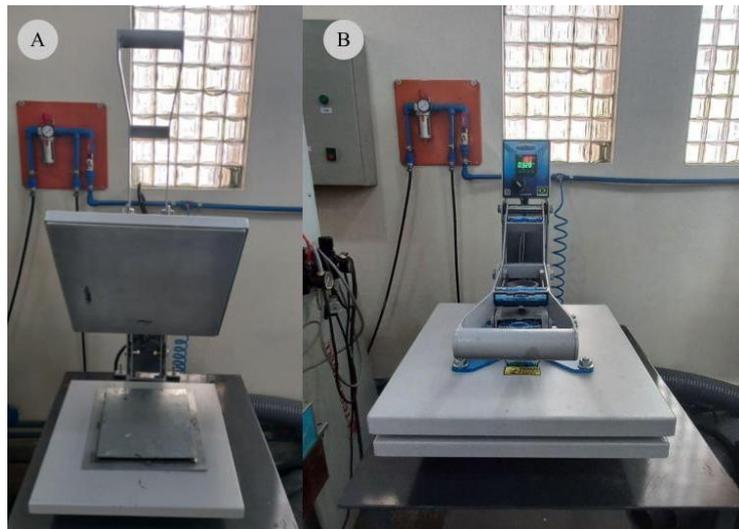


Fonte: Elaborado pela autora.

Após a preparação do material no molde, alguns parâmetros foram definidos no display da prensa sublimática para começar o processo de aquecimento e prensagem. A prensa foi colocada sobre uma bancada e ligada em uma fonte de tensão de 220 V. Os parâmetros de tempo e temperatura foram ajustados antes de começar, a pressão foi o último parâmetro a ser considerado, após a colocação do molde na base da prensa.

O equipamento utilizado conta com um manípulo que controla a pressão e, após este ajuste a alavanca deve ser baixada pressionando o molde sobre a base. O aquecimento se dá apenas na parte superior da prensa sendo necessário virar o molde a cada final de ciclo. A figura 32 mostra a prensa aberta com o molde dentro e a prensa fechada quando o processo de prensagem e aquecimento ocorre.

Figura 32 – Molde sendo colocado na prensa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os tópicos a seguir trazem a descrição dos experimentos realizados para obter chapas planas, foram realizadas diversas tentativas a fim de obter os melhores resultados.

4.3.1 Experimentos

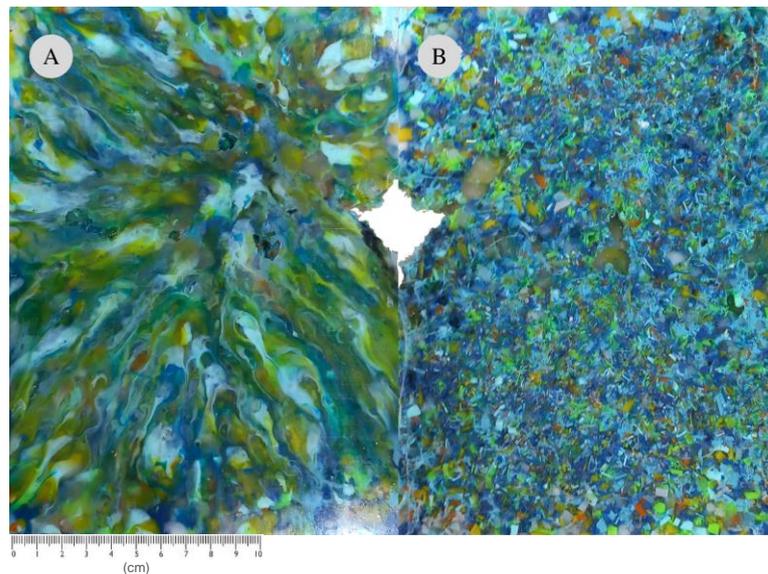
Os primeiros quatro ensaios foram feitos utilizando resíduos de PLA colorido, a prensa foi programada para aquecer a 200 °C e o tempo selecionado foi 20 minutos. A prensa levou em torno de 15 minutos para chegar nessa temperatura de trabalho. Em seguida houve a preparação do molde com camadas de desmoldante spray na superfície interna, laterais e tampa deixando absorver por 5 minutos. O material em forma de grânulos foi pesado e adicionado na cavidade do molde verificando se não havia espaços sem preenchimento e deixando um volume extra para fora da tampa, o qual seria compensado após o material ser aquecido e prensado. Por último, o manípulo de pressão foi rosqueado em seu fechamento máximo.

Outros parâmetros levados em consideração dizem respeito à quantidade de ciclos de aquecimento, se o molde recebeu calor na parte superior ou inferior ou em ambas as partes e por quanto tempo e como foi feito o resfriamento do molde após a prensagem. Aqui vale ressaltar que para o molde receber calor de ambos os lados era necessário virá-lo cada final de ciclo, já que a prensa sublimática utilizada no estudo só transfere calor pela bandeja superior. Foram realizados sete experimentos, nos quais os parâmetros foram sendo alterados a fim de otimizar os resultados.

4.3.1.1 Descrição experimento 01

Para fins de teste, o experimento 01 foi realizado apenas com aquecimento superior utilizando 2 ciclos de aquecimento de 20 minutos. O material fundiu e misturou melhor na parte superior onde recebeu calor direto, porém na parte de inferior os grânulos se juntaram, mas não houve a fusão completa do material. A cavidade do molde foi preenchida com 152 g de material, porém depois de finalizada a prensagem, foi possível observar a presença de buracos na superfície da peça, indicando que o material não foi bem distribuído em alguns pontos. O resfriamento foi feito de forma natural por 20 minutos. O resultado foi uma chapa rígida com a superfície superior lisa e a inferior extremamente rugosa (Figura 33).

Figura 33 – Ensaio 01: chapa plana de PLA colorido.



- (a) Superior: superfície lisa, aquecimento direto;
(b) Inferior: superfície rugosa, aquecimento indireto, presença de buracos ao longo da peça.

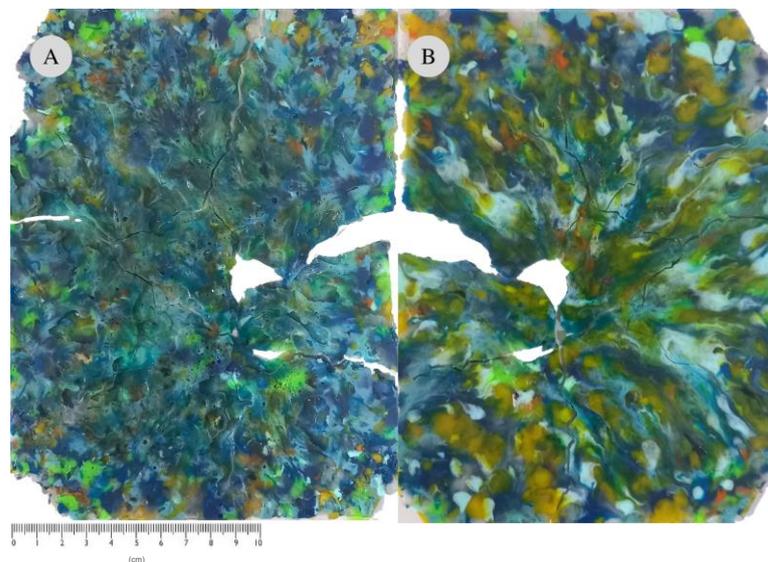
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.2 Descrição experimento 02

No experimento 02 foram alterados alguns parâmetros a fim de validar algumas hipóteses, a primeira mudança se refere ao aquecimento em ambos os lados da peça, diferentemente do ensaio anterior em que o aquecimento foi realizado apenas na parte superior da peça. Outras duas mudanças foram a quantidade de material adicionada na cavidade do molde que agora foi menor (139 g) quanto a forma de resfriamento, aqui foi utilizado um soprador para agilizar o processo. Com o resultado pode-se constatar que é necessário o

aquecimento em ambos os lados a fim de alcançar uma peça homogênea. A quantidade de material também tem influência no resultado da peça, mesmo que haja um cuidado para que o material se espalhe bem na cavidade do molde, devido à diferença nos tamanhos e formatos dos grânulos, alguns locais podem acabar desprovidos de material acarretando buracos na peça. Todavia, ocorreram novas hipóteses a serem investigadas já que a peça desta vez ficou quebradiça e não foi possível retirar a chapa do molde sem que ela se partisse em diversos pontos. Verificou-se que esta fragilidade observada poderia estar relacionada com a temperatura de trabalho, já que a Tg do PLA é 180 °C e os ensaios estão sendo realizados a 200 °C. Além disso, o resfriamento forçado pelo soprador pode ter alterado o processo natural de cura do material. A figura 34 mostra os resultados obtidos no ensaio 02.

Figura 34 – Ensaio 02: chapa plana de PLA colorido.



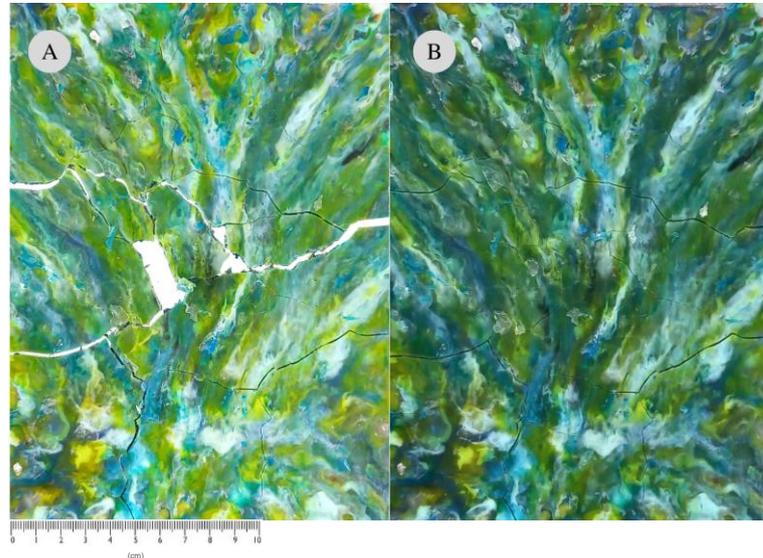
- (a) Superior: superfície lisa, peça quebradiça;
(b) Inferior: superfície rugosa, presença de buracos em alguns pontos.
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.3 Descrição experimento 03

No experimento 03 foi utilizado um ciclo de pré-aquecimento (prensa fechada, mas sem o uso de pressão por 20 minutos) e mais dois ciclos de 20 minutos, superior e inferior ainda utilizando 200 °C. Ainda, foram testadas duas hipóteses: primeiro foi depositada maior quantidade de material na cavidade do molde (175 g) e segundo, o resfriamento foi realizado durante 40 minutos sem ajuda do soprador. O resultado foi uma peça semelhante a obtida no ensaio 02, mas sem buracos na superfície. Porém, quando a tampa do molde foi retirada, foi possível verificar que a chapa estava novamente rachada em diversas partes, e só foi possível

retirá-la em pedaços. Tendo isso como base, o próximo parâmetro a ser alterado foi a temperatura, já que a peça ainda estava muito frágil (Figura 35).

Figura 35 – Ensaio 03: chapa plana de PLA colorido.



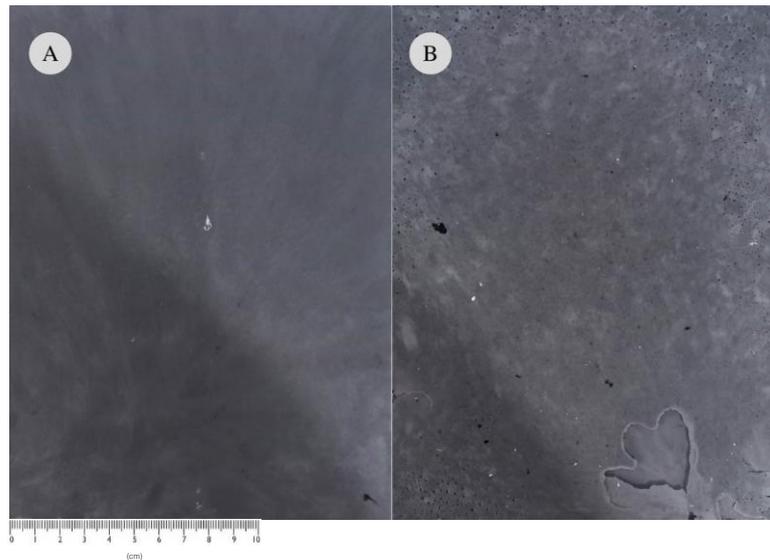
- (a) Superior: superfície lisa com a presença de rachaduras;
- (b) Inferior: superfície lisa com a presença de rachaduras.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.4 Descrição experimento 04

Tendo em vista a necessidade de alterar a temperatura de trabalho para 180 °C, a partir do experimento 04 isso foi levado em consideração. No ensaio 04 o peso foi mantido em 175 g, tendo como base o ensaio 03. A quantidade de ciclos e o aquecimento em ambos os lados foi mantido, porém o tempo de ciclo foi alterado para 30 minutos e não houve o ciclo de pré-aquecimento. O tempo de resfriamento (natural) também foi alterado para 30 minutos, tentando manter um padrão entre os dois parâmetros e garantir a solidificação completa da peça. Desta vez a cor do material a ser testado foi cinza. O resultado foi uma peça maciça e com as superfícies superior e inferior igualmente lisas, porém na superfície inferior possivelmente uma bolha de ar tenha se formado por alguma fresta do molde ou durante o processo de resfriamento, deixando uma marca com aspecto de buraco localizado na parte inferior da peça. Existe ainda a presença de micro buracos nas laterais de toda a parte inferior da peça. No geral, a parte central da peça apresenta bom acabamento em ambos os lados (Figura 36).

Figura 36 – Ensaio 04: chapa plana de PLA cinza.

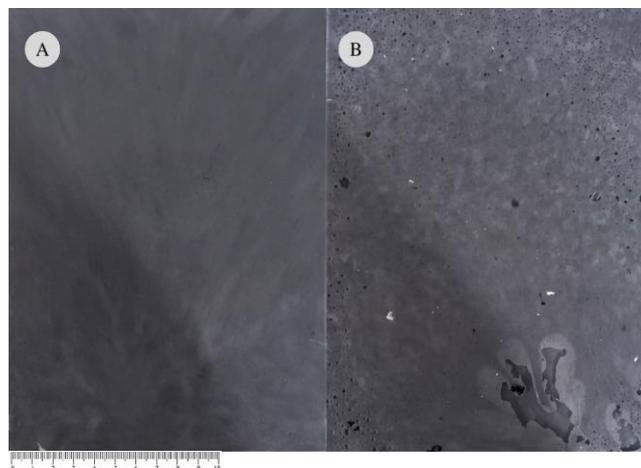


- (a) Superior: superfície completamente lisa;
(b) Inferior: superfície lisa com a presença de buracos possivelmente causados por bolhas de ar.
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.5 Descrição experimento 05

No experimento 5 repetiu-se o mesmo procedimento, a fim de verificar se no ensaio 04 a presença da bolha de ar foi um evento aleatório ou se algo durante o resfriamento pode ter causado bolhas de ar na superfície inferior. Assim, o resultado foi muito semelhante ao experimento 04, no que se refere também à localização da bolha de ar e a presença de micro buracos na superfície (Figura 37).

Figura 37 – Ensaio 05: chapa plana de PLA cinza.



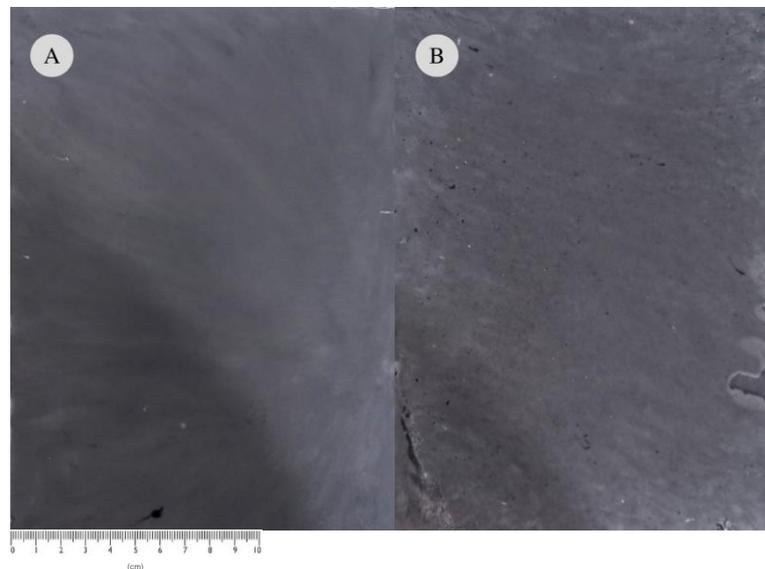
- (a) Superior: superfície completamente lisa; (b) Inferior: superfície com a presença de buracos.
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.6 Descrição experimento 06

Tendo como base os resultados dos experimentos 04 e 05 optou-se por modificar a posição do molde na prensa, em todos os ensaios anteriores o molde foi posicionado de forma vertical em relação a base, a partir do experimento 06 a posição foi modificada para horizontal.

Conforme descrito, o experimento 06 foi realizado com o molde na posição horizontal, porém os parâmetros seguiram os mesmos utilizados nos ensaios 4 e 5, sendo eles: peso 175 g, temperatura 180 °C, dois ciclos de aquecimento (superior e inferior) de 30 minutos cada e tempo de resfriamento natural de 30 minutos. Neste ensaio, percebeu-se que o local das bolhas mudou, agora elas são menores e aparecem nas laterais da peça. Porém, nesta configuração se conseguiu uma melhor área de aproveitamento da chapa. Uma hipótese levantada se refere a transmissão de calor pela superfície aquecida da prensa, o calor não é perfeitamente uniforme. Quando medido com um termômetro infravermelho observou-se que a parte central mantém mais calor que as bordas. Sendo assim, quanto mais próximo da borda, maior a chance de a temperatura não alcançar os exatos 180 °C como atinge a região central, o que pode acarretar o resultado final da peça (Figura 38).

Figura 38 – Ensaio 06: chapa plana de PLA cinza.



(a)Superior: superfície lisa. (b)Inferior: superfície lisa com a presença de rachaduras.

Fonte: Elaborado pela autora.

Este mesmo ensaio foi realizado mais duas vezes e os resultados foram muito semelhantes. O quadro 3 traz um compilado dos parâmetros utilizados em todos os ensaios descritos.

Quadro 3 – Parâmetros utilizados nos experimentos.

Experimentos	01	02	03	04	05**	06***
Temperatura	200 °C	200 °C	200 °C	180 °C	180 °C	180 °C
Ciclos de aquecimento	2	2	3*	2	2	2
Modo de aquecimento	Superior	Superior	Superior	Superior	Sup. e Inf.	Sup. e Inf.
Tempo de aquecimento	20 min	20 min	20 min	30 min	30 min	30 min
Quant. grânulos no molde	152 g	139 g	175 g	175 g	175 g	175 g
Tempo de resfriamento	20 min	7 min	40 min	30 min	30 min	30 min
Modo de resfriamento	Natural	Soprador	Natural	Natural	Natural	Natural
Cor	Multi	Multi	Multi	Cinza	Cinza	Cinza

*O primeiro foi considerado um ciclo de pré-aquecimento com o molde fechado na prensa, mas sem aplicar pressão, os outros dois ciclos seguiram com aplicação de pressão.

** Duplicata do ensaio 4 para averiguar se o aparecimento de uma bolha de ar foi um evento aleatório.

*** Neste ensaio mudou-se apenas a posição do molde na prancha de aquecimento, antes era vertical e passou a ser horizontal a fim de entender se poderia influenciar no aparecimento de bolhas localizadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos parâmetros utilizados pode-se observar que a partir do ensaio 5 os parâmetros começaram a ser estabelecidos, já que os experimentos começaram a apresentar uma resposta positiva ainda que apresentassem bolhas na bordas.

4.3.2 Discussões acerca dos resultados

Após a realização dos testes e conforme a evolução dos resultados foram estabelecidos estes parâmetros como apropriados para obter os corpos de prova necessários para os ensaios de tração e impacto, os quais serão descritos no tópico de ensaios mecânicos. Os parâmetros considerados adequados seguem conforme o Quadro 4:

Quadro 4 – Parâmetros utilizados para obter as chapas de PLA Cinza.

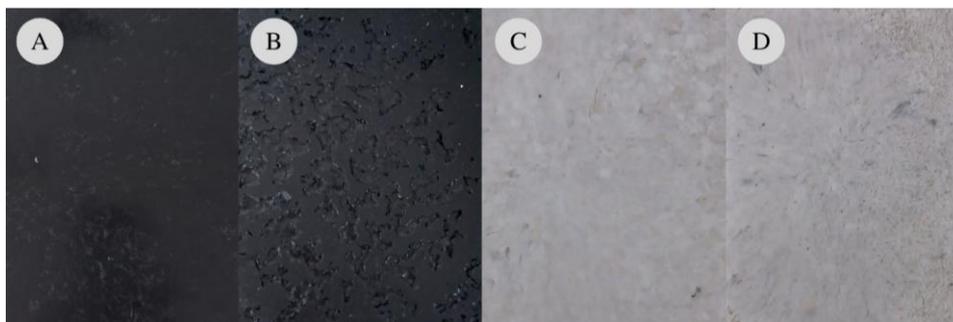
Peso	175 g
Temperatura de aquecimento	180° C
Ciclos de aquecimento	2 ciclos
Tempo de ciclo	30 minutos
Modo de aquecimento	30 minutos
Resfriamento	Superior e Inferior
Tempo de resfriamento	Natural

Fonte: Elaborado pela autora

Após a seleção dos parâmetros considerados ideias para este estudo, os ensaios seguiram com as cores preta e branca considerando os mesmos parâmetros dos ensaios realizados na cor cinza. Porém, os resultados obtidos aqui foram muito distintos entre si e em comparação às chapas obtidas na cor cinza. A parte superior da chapa em ambas as cores teve bom resultado, porém a inferior na cor preta apresentou a ocorrência de diversos buracos grandes espalhados por toda a superfície. Considerando a parte inferior da chapa na cor branca, parte da peça apresentou a fusão completa dos grânulos de material e outra parte apresentou fusão incompleta, resultando em uma superfície com regiões lisas e rugosas.

Foram realizados no total dois ensaios para cor preta e para branca utilizando estes parâmetros e nas duas tentativas obteve-se resultados semelhantes aos descritos acima, a figura 39 ilustra os resultados obtidos nos ensaios.

Figura 39 – Chapas de PLA preta e branca utilizando os mesmos parâmetros da cinza.



- (a) Superior: superfície lisa sem presença de rachaduras; (b) Superfície rugosa com a presença de furos; (c) Superfície lisa sem presença de rachaduras; (d) Superfície rugosa com a presença de furos;

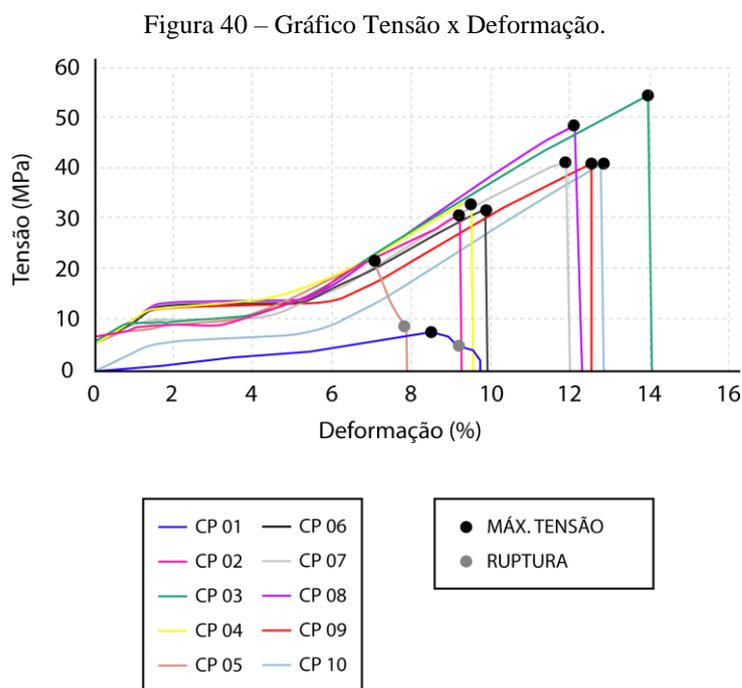
Fonte: Elaborado pela autora.

A influência da cor nos resultados de peças fabricadas por impressão 3D já foi estudada por Soares et al. (2018), conforme os autores, os acabamentos nas peças variam com a cor e a regularidade da altura da camada também é afetada. Outro ponto confirmado através dos ensaios realizados pelos autores, que corrobora para a discussão deste trabalho, é que diferentes parâmetros são necessários, como temperatura, para ter uma maior qualidade de acabamento nos produtos. Assim, os parâmetros ditos ideais para a obtenção das chapas na cor cinza podem não ser os ideais para as chapas pretas e brancas, conforme pode-se observar nos resultados obtidos.

Diante disso, foram selecionadas as chapas com os melhores resultados na cor cinza para serem direcionadas ao corte a laser e terem como resultado os corpos de prova pretendidos para a realização dos ensaios mecânicos do material.

4.3.3 Ensaio de Tração

A partir do gráfico *tensão x deformação* (Figura 40) podemos observar que as 10 amostras ensaiadas tiveram comportamentos bem diferentes. De maneira geral, as amostras apresentaram no mesmo ponto os valores de máxima tensão e ruptura, porém as amostras 1 e 5 tiveram o ponto de máxima tensão em aproximadamente 8 MPa e ruptura em 21 MPa respectivamente. Já a ruptura na amostra 1 se deu em 8 MPa e na amostra 5 se deu em 9 MPa.



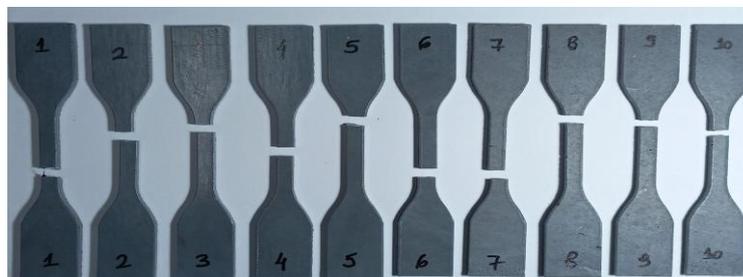
Fonte: Elaborado pela autora.

Outro ponto a se observar é que se formaram grupos de valores aproximados, por exemplo as amostras 2, 4 e 6 tiveram valores de tensão máxima em torno de 30 MPa com uma deformação de aproximadamente 10%. O outro grupo, formado pelas amostras 7, 9 e 10 apresentaram máxima tensão em torno de 40 MPa com deformação de 12%. As amostras 3 e 8 tiveram os valores mais altos no que se refere a máxima tensão e ruptura, sendo a máxima tensão de 52 MPa para amostra 1, com 14% de deformação e 49 MPa com deformação de aproximadamente 12% de deformação para a amostra 8. Isso indica que, devido à disposição dos grânulos de material durante a prensagem, as chapas ficam com regiões de propriedades heterogêneas.

As amostras ensaiadas tiveram a ruptura em pontos diferentes. As amostras 1, 6 e 7 tiveram ruptura na parte mais inferior da haste central, enquanto as amostras 2, 3, 5, 9 e 10

tiveram sua ruptura no ponto mais alto da haste. Apenas a amostra 4 teve a ruptura bem no centro da haste, conforme pode ser observado pela figura 41.

Figura 41 – Corpos de prova após o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de trazer um comparativo com outros autores, conforme os estudos de Santana et al. (2018), em amostras de PLA injetado (*pellets* PLA virgem) a tensão máxima foi de 55 MPa. Porém, a diferença entre a tensão máxima das peças impressas diminuiu em relação às injetadas em cerca de 18%, 31%, e 7,5% nas condições filamentar, impressa e injetado. Assim, no presente estudo, as peças que ficaram no agrupamento com maior resistência mecânica estão de acordo com o esperado. Por outro lado, sendo que o valor médio de tensão máxima obtido nos ensaios foi de 34 MPa, conclui-se que as chapas planas prensadas a quente são menos resistentes do que os outros processos analisados.

4.3.4 Ensaio de Impacto Izod

No ensaio de impacto dos corpos de prova em PLA, as 10 amostras romperam completamente na primeira colisão e todos apresentaram fratura limpa sem deformações. A forma como romperam também foi muito semelhante entre as amostras (Figura 42).

Figura 42 – Corpos de prova após o ensaio de Impacto Izod.



Fonte: Elaborado pela autora.

Foi calculada a média e desvio padrão das 10 amostras ensaiadas levando em consideração os parâmetros Energia absorvida (E abs), Resistência ao impacto (Re) e Energia de impacto (Energia), conforme pode ser observado no quadro 5.

Quadro 5 – Média e desvio padrão obtidos no ensaio de Impacto Izod.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão
E abs (%)	1,504	0,773
Re (kJ/m ²)	2,504	1,286
Energia (J)	0,0825	0,042

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos por Popa et al. (2022), os quais ensaiaram o material impresso em 3D em três espessuras diferentes, mostram que em corpos de prova de 10 mm a resistência ao impacto foi de 1,074 kJ/m². Já neste trabalho obteve-se 2,504 kJ/m², utilizando aproximadamente a mesma espessura, mais que o dobro da resistência após o mesmo material passar pelo processo de prensagem a quente. Porém, esses valores reforçam que o PLA é um material com características de baixa resistência ao impacto quando comparado a outros polímeros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo contribuir positivamente para a discussão dentro de um tema de bastante importância, visto a quantidade de polímeros que não são destinados à reciclagem de forma efetiva. A impressão por extrusão de filamento é uma tecnologia emergente que vem avançando em termos de acessibilidade. A partir da difusão desta tecnologia cada vez mais pessoas e instituições podem produzir uma infinidade de peças utilizando equipamentos com ótimo custo-benefício dentro das suas casas, laboratórios e espaços de criação aberta. Porém, ainda que esta seja uma tecnologia de manufatura aditiva, ela traz consigo alguns impactos no que tange o desperdício de material.

Através deste trabalho foi possível trazer um panorama geral sobre o que tem sido feito acerca do tema reciclagem de polímeros, não somente no âmbito da impressão 3D propriamente dita, mas também sobre iniciativas para o reaproveitamento de resíduos poliméricos em um cenário *maker* e *do it yourself*, outra vertente que este trabalho procura abordar. Um dos objetivos deste trabalho era explorar uma forma de reaproveitar o material considerando-o 100% sem a adição de material virgem e então realizar experimentos com o intuito de transformar o material em chapas planas. Assim, buscou-se uma forma de fabricar este material utilizando equipamentos acessíveis e trazer uma abordagem técnico-científica realizando ensaios de caracterização do material.

Em termos de resultados pode-se considerar que o objetivo geral deste trabalho foi atingido, uma vez que foram fabricadas chapas planas conforme o método estabelecido. O processo produtivo revelou-se fácil de ser replicado em ambientes *maker*. Porém em termos de aplicação, conforme os resultados obtidos nos ensaios de caracterização o material apresentou características muito frágeis, sendo assim, aplicações que exigem esforços mecânicos devem ser evitadas. Neste ponto vale ressaltar que a fragilidade do material pode não ser só devido a cristalinidade, mas também pode ter havido estresse térmico nas chapas, uma vez que a prensa utilizada só aquecia no plano superior exigindo que a peça fosse virada a cada novo ciclo de aquecimento.

Pode-se concluir que a aplicação mais adequada para chapas planas de PLA recicladas utilizando uma prensa sublimática seria para a fabricação de modelos e protótipos para interações em que não fossem necessários esforços mecânicos, tais como o estudo de volumetria e forma de projetos de produtos e artefatos em ambientes *maker* de fabricação digital.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros visando dar continuidade ao estudo já realizado.

- Estudar outros materiais como o polímero ABS, também amplamente utilizado em impressão 3D por extrusão de filamento;
- Estudar outras prensas e modelos de moldes variando os formatos e material do molde;
- Explorar outras partes do processo como o controle mais aprimorado da temperatura de aquecimento da prensa, controle de resfriamento da chapa, etc;
- Testar o material depois de passar um certo tempo em uma estufa, para aprimorar o controle de absorção de umidade característico do material;
- Fazer um corte transversal na chapa e aprofundar a discussão sobre o aparecimento de bolhas nas amostras utilizando ensaios de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV);
- Entender a influência nas variações dos resultados em relação ao molde;
- Explorar uma gama maior de cores e distribuição de material na composição das chapas;
- Explorar a influência de contaminantes no material em relação ao sucesso dos resultados.
- Acrescentar uma porcentagem de material virgem para verificar a melhora de propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

- 3D VERKSTAN. **A visual ultimaker troubleshooting guide**. Disponível em: <<https://support.3dverkstan.se/article/23-a-visual-ultimaker-troubleshooting-guide#underextrusion>>. Acesso em: 12 agosto 2020.
- AL-GHAMDI, K. **Sustainable FDM additive manufacturing of ABS components with emphasis on energy minimized and time efficient lightweight construction**. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 2, 338-345, 2019.
- AL-SALEM, S.; LETTIERI, P. e BAEYENS, J. **Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PWS): a review**. Waste management, 29, 2625-2643, 2009.
- Ambientais dos produtos industriais. 1. ed. 3. reimp.- São Paulo: Edusp, 2011.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Química para um futuro sustentável**. American Chemical Society, 8 ed. 2016. 8 ed.
- ANDERSON, I. **Mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled polylactic acid**. 3D Printing and Additive Manufacturing, v. 4, n. 2, p. 110-115, 2017.
- ANDRADE, M. **Estudo da avaliação de ciclo de vida do PLA: comparação entre reciclagem química, mecânica e compostagem**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2015.
- ANDRADY, A. **Plastics and Environmental Sustainability**. John Wiley & Sons, Inc. Nova Jersey, USA, 2015.
- ASHTON, E. **Design, inovação e sustentabilidade: estudo da reciclagem de produtos multi-materiais poliméricos sem separação prévia**. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Design. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2017.
- BAGNATO, V. **Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia**. Editora Livraria da Física, 2008.
- BARBOSA, M. **Princípios fundamentais da transferência de calor**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/trabalho_transcal.pdf>. Acesso em: 14 junho 2020.
- BARROS, K. e ZWOLINSKI, P. **Influence of the use/user profile in the LCA of 3d printed products**. Procedia CIRP 50, 318 – 323, 2016.
- BARROS, K. **Identification of the environmental impacts contributors related to the use of Additive Manufacturing technologies**. 2017. Tese (doutorado). Chemical and Process Engineering. Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2017.
- BASU, A.; LANGER, R. e DOMB, A. **Special issue: Polylactide (PLA) Based Biopolymers**. Advanced Drug Delivery Reviews 107, 1-2, 2016.

BERKELEY NEWS. **As 3D printing grows, so does need to reclaim plastic waste.** 2017. Disponível em: <[https://news.berkeley.edu/2017/02/15/3d-printer-filament-reclamation - project/](https://news.berkeley.edu/2017/02/15/3d-printer-filament-reclamation-project/)>. Acesso em: 11 junho 2020.

BHATTACHARYYA, B. e DOLOI, B. **Machining process utilizing thermal energy.** Modern Machining Technology. Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology, 161-363, 2020.

BRASIL ESCOLA. **Condução de calor sólido.** Disponível em: <[https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/img/2019/12/conducao-de-calor-solido\(1\).jpg](https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/img/2019/12/conducao-de-calor-solido(1).jpg)>. Acesso em: Acesso em: 15 agosto 2020.

BROWDER, R.; ALDRICH, H. e BRADLEY, S. **The emergence of the maker movement: Implications for entrepreneurship research.** Journal of Business Venturing 34, 459–476, 2019.

BURKE, J. **Makerspaces: a practical guide for librarians.** Rowman & Littlefield, 2014.

CAMPO, E. **Polymeric Materials and Properties.** Selection of Polymeric Materials: how to select design properties from different standards. Plastic Design library. 1-39, 2008.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e**

CARISTAN, C. **Laser cutting guide for manufacturing.** Society of manufacturing engineers, 2004.

CHEN, D. et al. **Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications.** Journal of Cleaner Production, v. 107, p. 615-625, 2015.

CHONG, S. et al. **Cradle to Cradle® Design for 3D Printing.** Chemical Engineering Transactions, 45, 1669-1674, 2015.

CISNEROS-LÓPEZ, E. et al. **Recycled poly (lactic acid)–based 3D printed sustainable biocomposites: A comparative study with injection molding.** Materials Today Sustainability, v. 7, p. 100027, 2020.

COSTA, C.; OLIVEIRA, V. e ARAÚJO, M. **Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 9, n. 2, p. 112-117, 2014.

CUIFFO, A. et al. **Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure,** Applied Sciences, v.7, n.6, p. 579, Jun. 2017.

DAMINABO, S. et al. **Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems.** Materials Today Chemistry, 16, 100248, 2020.

DESPEISSE, M. et al. **Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda.** Technological Forecasting & Social Change, 115, 75-84, 2017.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-shSLvLOsoQ>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular economy**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>>. Acesso em: 21 maio 2020.
engenheiros, 3a edição. São Paulo: Artliber, 2010.

EUROPE MAKES CERAMICS. **Fused Deposition Modeling**. Disponível em: <<https://www.euroceram.org/images/fig1-.jpg>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

FABBALLO. **How to persistent 3D print failure? Here's what to look for**. Disponível em: <<https://www.fabbaloo.com/2017/11/how-to-persistent-3d-print-failure-heres-what-to-look-for>>. Acesso em: 10 setembro 2022.

FARAH, S.; ANDERSON, D. e LANGER, R. **Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications: A comprehensive review**. *Advanced drug delivery reviews*, v. 107, p. 367-392, 2016.

FECHINE, J. **Polímeros biodegradáveis: tipos, mecanismos, normas e mercado mundial**. SciELO-Editora Mackenzie, 2013.

FERRANTE, M. e WALTER, Y. **A materialização da ideia: noções de materiais para design de produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FILABOT. **Where Failed 3D Prints Go To Die (And What You Can Do About It)**. <<https://www.filabot.com/blogs/news/where-failed-3d-prints-go-to-die-and-what-you-can-do-about-it>>. Acesso em: 10 Setembro 2022.

FILAMENTIVE, 2019. **The 3D Printing Waste Problem**. Disponível em: <<https://www.filamentive.com/the-3d-printing-waste-problem/>>. Acesso em: 10 Setembro 2022.

FINK, J. **Polymer waste management**. 2018 by John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA and Scrivener Publishing LLC, 100 Cummings Center, Suite 541J, Beverly, MA 01915, USA.

FLAT ICON. **3 PVC free icon**. Disponível em: <https://www.flaticon.com/free-icon/3-pvc_91377?term=recycle%20plastic&page=1&position=33>. Acesso em: 15 agosto 2020.

FRANCE, A. **Make: 3D printing**. The essential guide to 3D printers. Maker Media, Inc. Sebastopol, CA. 1 ed. 2014.

FRANCIS, L. **Chapter 1: Introduction to Materials Processing**. *Materials Processing*. A unified approach to processing of metals, ceramics and polymers. 1-20, 2016.

FRANCIS, R. et al. **Recycling of Polymers: methods, characterization and applications**, 1 ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim - Germany. 2017. 264 pg.

FRANCIS, R.; GOPALAN, G. e SIVADAS, A. **Recycling of Polymers: methods, characterization and applications**, 1 ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim - Germany. 2017. 264 pg.

GAMBODY. **20 epic 3D printing fails**. Disponível em: <<https://www.gambody.com/blog/20-epic-3d-printing-fails/>>. Acesso em: 10 setembro 2022.

GARLOTTA, D. **A literature review of poly (lactic acid)**. Journal of Polymers and the Environment, v. 9, n. 2, p. 63-84, 2001.

GEBLER, M; UITERKAMP, A. e VISSER, C. **A global sustainability perspective on 3D printing technologies**. Energy Policy, v. 74, p. 158-167, 2014.

GIUSTI, J.; ALBERTI, F. e BELFANTI, F. **Makers and clusters**. Knowledge leaks in open innovation networks. Journal of Innovation & Knowledge 5, 20–28, 2020.

GOMI DESIGN. **How Nonrecyclable Plastic Bags Are Being Turned Into Speakers**.

GOODSHIP, V. **Introduction to plastics recycling**. iSmithers Rapra Publishing, 2007.

GROOVER, M. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 5th ed. Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, c2013. xv, 1101 p. : il.

HADIN, E. e NORDANG, C. **Plastic Island: three structures based on transformed ocean plastic**. 2018. Dissertação (mestrado). School of Architecture Department of Architecture and Civil Engineering Göteborg, Sweden. 2018.

HARTOG, J. **ECO-Oh recycled plastics**. 2019b. Disponível em: <<https://jessicadenhartog.nl/wp-content/uploads/2019/06/envisions-ECO-oh-recycled-plastics-in-process-photography-Ronald-Smits-05.jpg>>. Acesso em: 17 agosto 2020.

HARTOG, J. **Portfolio**. 2020. Disponível em: <<https://jessicadenhartog.nl/portfolio-item/recolored/>>. Acesso em: 17 agosto 2020.

HARTOG, J. **Recolored, a new of recycling**. 2019a. Disponível em: <<https://jessicadenhartog.nl/product/book-recolored-a-new-way-of-recycling/>>. Acesso em: 17 agosto 2020.

HE, Z. et al. **Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops**. Environment International 77, 85-94, 2015.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R. e KOSIOR, E. **Plastics recycling: challenges and opportunities**. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 364, n. 1526, p. 2115-2126, 2009.

HUNT, E. et al. **Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers**. Resources, Conservation and Recycling, 97, 24–30, 2015.

IF UFRGS. **Condução**. Disponível em:

<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008_02/Beatriz/conducao.htm>. Acesso em: 14 junho 2020.

JOHNSON, W.; STANDIFORD, K. **Practical heating technology**. 2 ed. Cengage Delmar Learning. 2008.

KEVIN, H.; FRKETIC, J. e BROWN, J. **Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing Additive Manufacturing**. Volume 21, May 2018, Pages 536-543

KHOSRAVANI, R. e REINICKE, T. **On the environmental impacts of 3D printing technology**. Applied Materials Today, v. 20, p. 100689, 2020.

KREIGER, M. e PEARCE, J. **Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products**. ACS Sustainable Chem. Eng. 1, 1511–1519, 2013.

KUMAR, R.; SINGH, R. e FARINA, I. **On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications**. PSU Research Review, Vol. 2, No. 2, 115-137, 2018. Emerald Publishing Limited 2399-1747.

LA MANTIA, F. **Handbook of Plastics Recycling**. Rappa Technology Limited. 1ed. 2002. Shawbury, UK.

LAMIKIZ, A. et al. **Thermal advanced machining processes**. Modern Machining Technology. Woodhead Publishing, 2011. p. 335-372.

LEFTERI, C. **Como se faz: 92 técnicas de fabricação para design de produtos**. Editora Blucher, 2013.

LIGON, S. et al. **Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing**. Chem. Rev., 117, 10212–10290, 2017.

LOKENS GARD, E. **Industrial plastics: theory and applications**. Cengage Learning, 2016.

MAGRINI, A. et al. **Impactos ambientais causados pelos plásticos: uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos**. Editora E-papers, 2012.

MANO, B. e MENDES, C. **Introdução a Polímeros**, 2 ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

MANRIQUE, M. et al. **Plástico Precioso: prototipagem rápida e reciclagem de resíduos de manufatura aditiva**. 7º Simpósio Design Sustentável. Recife, 2019.

MANZINI, E. e VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: os requisitos**

MARIS, J. et al. **Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes**. Polymer degradation and stability 147, 245-266, 2018.

MARTIN, L. **The Promise of the Maker Movement for Education**. Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER), 5, Article 4, 2015.

MATTER HACKERS. **3D Printer Troubleshooting**. Disponível em: <<https://www.matterhackers.com/articles/3d-printer-troubleshooting-guide>>. Acesso em: 12 agosto de 2020.

MCDONOUGH, W e BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Criar e reciclar ilimitadamente**. 246 pg. ed. 1. editora GG São Paulo. 2014.

MEYER, B. **Prototyping the Environmental Impacts of 3D Printing: Claims and Realities of Additive Manufacturing (2015)**. Student Theses 2015-Present. 14.

MMID Foundation. **Plate press: converting plastic waste into construction material**. 2018. Disponível em: <<http://mmidfoundation.org/projects/plate-press/>>. Acesso em: 14 junho 2020.

MMID FOUNDATION. **Plate press: converting plastic waste into construction material**. Disponível em: <<http://mmidfoundation.org/projects/plate-press/>>. Acesso em: 21 maio 2020.

MOTA, C. **The rise of personal fabrication**. Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition. C&C'11, 3–6, 2011, Atlanta, Georgia, USA.

NGO, T. et al. **Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges**. Composites Part B, 143, 172-196, 2018.

ONEARMY. **Sheetpress**. 2020a. Disponível em: <<encr.pw/4V3eo>>. Acesso em: 28 de novembro 2020.

ONEARMY. **Sheetpress**. 2020b. Disponível em: <<11nq.com/Efxp4>>. Acesso em: 28 de novembro 2020.

PAKKANEN, J. et al. **About the use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D printing**. Sustainable Design and Manufacturing 2017, Smart Innovation, Systems and Technologies 68, 776–785, 2017.

PAPAVLASOPOULOU, S.; GIANNAKOS, M. e JACCHERI, J. **Empirical studies on the Maker Movement, a promising approach to learning: A literature review**. Entertainment Computing 18, 57–78, 2017.

PEETERS, B.; KIRATLI, N. e SEMEIJN, J. **A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective**. Journal of Cleaner Production, 241, 118313, 2019.

PLASTIC SMOOTHIE. **Plastic Smoothie - DIY Plastic Recycling**. 2018. Disponível em: <<https://www.instructables.com/id/Plastic-Smoothie-DIY-Plastic-Recycling/>>. Acesso em: 14 junho 2020.

POPA, C. et al. **Influence of thickness on the IZOD impact strength of FDM printed specimens from PLA and PETG**. Procedia Structural Integrity, 41, 557-563, 2022.

POPESCU, D. et al. **FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review**. Polymer Testing, 69, 157-166, 2018.

PRECIOUS PLASTIC. **Bend plastic sheets**. 2020h. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to/bend-plastic-sheets>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Build a sheet press**. 2020d. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/academy/build/sheetpressbuild>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Build Shredder**. 2020b. Disponível em:
<<https://onearmy.github.io/academy/build/shredder>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Community**. 2022a. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/map>>. Acesso em: 20 setembro 2022.

PRECIOUS PLASTIC. **Cut plastic with the table saw**. 2020f. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to/cut-plastic-with-the-table-saw>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Cut plastic: Jigsaw**. 2018b. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to/cut-plastic-jigsaw>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Drill and screw through plastic**. 2020g. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to/drill-and-screw-through-plastic>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Global Community**. 20220a. Disponível em:
<<https://preciousplastic.com/people/global-community.html>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **How to**. 2022a. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to>>. Acesso em: 20 setembro 2022.

PRECIOUS PLASTIC. **V4 Sheet-press: mould development**. 2018a. Disponível em:
<<https://davehakkens.nl/community/forums/topic/v4-sheet-press-mould-development/>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **V4 Sheets interesting results**. 2020e. Disponível em:
<<https://davehakkens.nl/community/forums/topic/v4-sheets-interesting-results/>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

PRECIOUS PLASTIC. **Zero Plastic Australia's Sheet Machine**. 2020c. Disponível em:
<<https://community.preciousplastic.com/how-to/zero-plastic-australias-sheet-machine>>. Acesso em: 15 agosto 2020.

RAGAERT, K.; DELVA, L. e VAN GEEM, K. **Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste**. Waste management, 69, 24-58, 2017.

RAHIMIZADEH, A. et al. **Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing**. Composites Part B, 175, 107101, 2019.

REDDIT. **My coolest failed print**. Disponível em: <encr.pw/TQMse>. Acesso em: 10 setembro 2022.

REPRAP Wiki. **RepRap**. Disponível em: <http://reprap.org/>. Acesso em: 14 abril 2020.
REVISTA NERD, 2021. **Tipos de Filamento mais usados em impressão 3D**. Disponível em: <l1nq.com/Me1T1>. Acesso em: 10 setembro 2022.

RIGD INK. **44 Issues explained- get your prints looking perfect**. Disponível em: <https://rigid.ink/pages/ultimate-troubleshooting-guide#cracking-or-layer-separation-18>. Acesso em: 12 agosto 2020.

SANTANA, L. et al. **Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras 3D de código aberto**. In: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Ceará, Brasil, 21 a 25 de Agosto de 2016.

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

SCHIRMEISTER, C. et al. **3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication**. Additive Manufacturing, 28, 152-159, 2019.

SETHI, B. **Recycling of Polymers: methods, characterization and applications**, 1 ed. 264 pág. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, Germany, 2017.

SIMPLIFY 3D. **Layer shifting**. Disponível em: <Layer Shifting | Simplify3D Software>. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

SLIJKOORD, J. **Is recycling PLA really better than composting?** Online News post. Disponível em: <encr.pw/Gh4oE>. Acesso em: 11 agosto 2020.

SMILE PLASTIC. **Inspirational Hand-crafted Materials** Disponível em: <https://smile-plastics.com/>. Acesso em: 14 junho 2020.

SOARES, J. et al. **Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing**. Rapid Prototyping Journal, 2018.

SONG, R. e TELENKO, C. **Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers**. Journal of Cleaner Production, 148, 895–904, 2017.

SONG, Y. et al. **Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA**. Materials & Design, v. 123, p. 154-164, 2017.

TANSEL, B. e YILDIZ, B. **Goal-based waste management strategy to reduce persistence of contaminants in leachate at municipal solid waste landfills**. Environ Dev Sustain, 13, 821–831, 2011.

TANZI, C.; FARÈ, S. e CANDIANI, G. **Foundations of biomaterials engineering**. Academic Press, Elsevier Ltd., 2019.

THE RECYCLE STUDIO. **Upcycled Design Materials**. Disponível em: <<https://www.trs.cr/en/sheet-materials>>. Acesso em: 20 setembro 2022.

TOLINSKI M. **Plastics and sustainability: towards a peaceful coexistence between Bio-based and Fossil Fuel-based plastics**. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. 2012. 277pg.

UNRUH, G. **Circular Economy 3D Printing, and the Biosphere Rules**. California Management Review, 60(3), 95-111, 2018.

VINK, E. et al. **Applications of life cycle assessment to NatureWorks polylactide (PLA) production**. Polym Degrad Stab 2003; 80:403–419.

VIVA LAB. **Precious Plastic Portugal**. Disponível em: <<https://www.vivalabporto.com/preciousplasticportugal>>. Acesso em: 20 setembro 2022.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2017.

WIKIPÉDIA. **ABS Monomers**. Disponível em: <File:ABS Monomers V2.svg - Wikimedia Commons>. Acesso em: 15 agosto 2020.

WOODFORD, C. **Heating elements**. Disponível em: <<https://www.explainthatstuff.com/heating-elements.html>>. Acesso em: 14 junho 2020.

XANTHOS, M. **Polymer processing**. Applied polymer science: 21st century, 355-37, 2000.

YILBAS, S. **The Laser Cutting Process: Analysis and Applications**. Elsevier, 2017.

ZANDER, N.; GILLAN, M. e LAMBETH, R. **Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material**. Additive Manufacturing, 21, 174–182, 2018.

ZANIN, M. e MANCINI, S. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. SciELO-EdUFSCar, 2015.

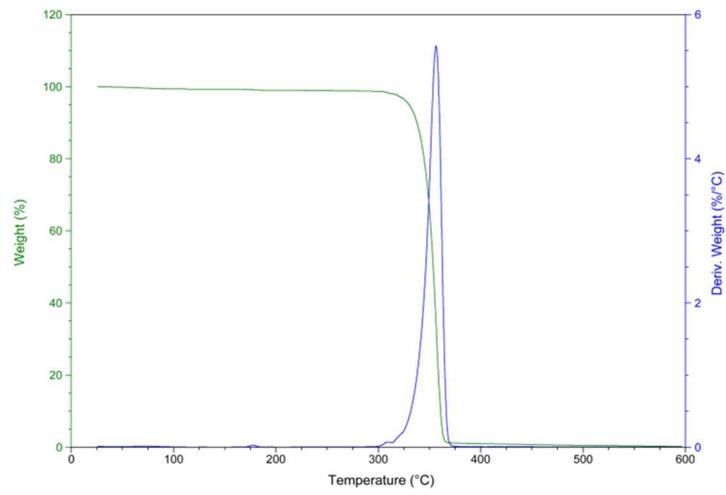
ZHANG, K.; MOHANTY, A.; MISRA, M. **Fully biodegradable and biorenewable ternary blends from polylactide, poly (3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and poly (butylene succinate) with balanced properties**. ACS applied materials & interfaces, v. 4, n. 6, p. 3091-3101, 2012.

ZHAO, P. et al. **Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment**. Journal of Cleaner Production, 197, 1046–1055, 2018.

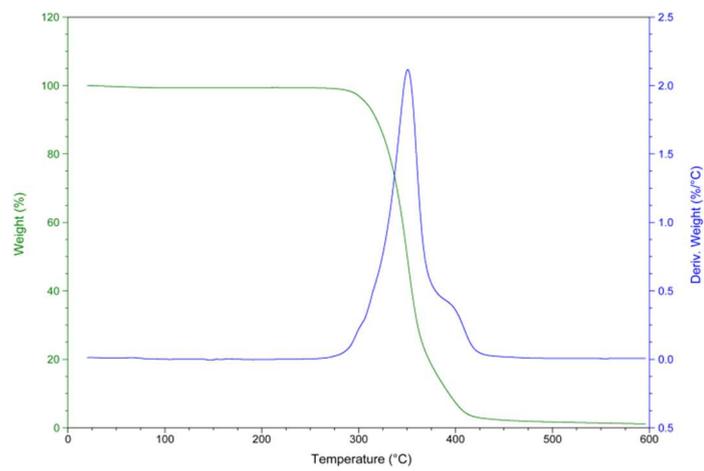
ZHONG, S. e PEARCE, J. **Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing**. Resources, Conservation & Recycling, 128, 48–58, 2018.

APÊNDICE 1

Análise Termogravimétrica do PLA Transparente.



Análise Termogravimétrica do PLA Cinza.



Análise Termogravimétrica do PLA Preto.

