



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Iniciativas sustentáveis em relação ao uso da impressão 3D

Autor: Hugo Perez Neto

Orientadora: Jordana Corralo Spada

Porto Alegre, novembro de 2021

Autor: Hugo Perez Neto

Iniciativas sustentáveis em relação ao uso da impressão 3D

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à COMGRAD/ENQ da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientadora: Jordana Corralo Spada

Banca Examinadora:

André Rodrigues Muniz, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Liliane Damaris Pollo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

À todos os meus amigos e amigas, a minha segunda família. Às minhas irmãs de outras mães, Júlia P., Júlia A., Júlia W. (o mundo é das Júlias e sem vocês não sei quem eu seria), Milena, Klara e Marcela; ao Butzke, Helo, Fabi, Júlia R., Fi, Gabi C., Gabi Z., Ana, AnaLu, Clari, Pedro e Rickson, meu núcleo Só Química?! que passou junto comigo por muitas crises e noites em claro que a Engenharia Química nos proporciona, a companhia de vocês foi de longe o melhor que esse curso me trouxe. À minha Família, Ce, Becker, Isa, Scherer e Ro, por uma vida de amizade e muitas viagens à cachoeiras; à Helena, Renan e todos os outros que me acompanharam durante a minha vida e que eu poderia passar 10 páginas agradecendo.

Aos meus pais Hugo e Adriane, por sempre terem me apoiado naquilo que eu decido fazer e terem formado meu caráter, moldando a pessoa que eu sou hoje. Aos meus irmãos, Camila e Henrique, por me suportarem por mais de duas décadas e me aguentarem reclamando da faculdade e outras mil coisas à cada 5 minutos.

Às minhas tias e meu tio, Beatriz, Consuelo, Léa, Carmen e Jorge, por sempre terem me dado um amor incondicional e me ensinado que a felicidade e a busca dos nossos sonhos são as coisas mais importantes nessa vida.

Ao meu avô Hugo, que eu nunca conheci, mas cujo nome eu carrego. Espero algum dia deixar uma fração do impacto positivo dele que, mesmo depois de tanto tempo, ainda é presente. À minha avó Léa, por uma infância cheia de carinho e por ter me ensinado que a culinária é afeto.

Aos meus avós Vera e Henrique, por muitas memórias maravilhosas e todo cuidado que sempre tiveram comigo. À todos os meus primos e tios pelos momentos de companheirismo.

Aos álbuns, filmes, séries e livros que ajudaram a formar quem eu sou e sem os quais eu não sei como teria passado por vários tempos difíceis durante estes anos de graduação.

À minha orientadora Prof. Jordana, por toda a paciência, apoio, contribuições e por ter feito dessa experiência de escrever um trabalho de conclusão a melhor que eu poderia ter pedido.

É o meu nome que está nesse TCC, mas tenho plena certeza de que sem todas essas pessoas na minha vida esse trabalho não seria hoje uma realidade. Do fundo do meu coração, meu muito obrigado.

RESUMO

A impressão 3D é uma tecnologia em ascensão, utilizada principalmente para a manufatura de protótipos e modelos de escala reduzida. A facilidade desta tecnologia em relação a outras disponíveis anteriormente vem tornando-a a principal solução para diversas aplicações industriais e domésticas. No entanto, sua popularização também está relacionada a problemas ambientais causados pelo descarte incorreto de plásticos, que acabam em locais impróprios como o oceano. Além disso, a utilização de filamentos poliméricos, independente da escala, contribui para a geração de compostos voláteis e formação de nanoplásticos. Com o objetivo de tornar a manufatura aditiva menos poluente ou mais sustentável, foram encontradas na literatura algumas alternativas e/ou iniciativas consideradas relevantes, como a reciclagem de filamentos, o uso de biocompósitos e programas de conscientização. A reciclagem de polímeros como PLA, ABS e a utilização de fontes como o PEAD de sacolas plásticas mostraram resultados promissores na impressão por Manufatura de Fusão e Deposição, apresentando filamentos ou peças com propriedades similares aquelas do plástico virgem. Após alguns ciclos de extrusão e impressão, propriedades mecânicas como resistência à tração e alongamento permaneceram praticamente inalteradas, diferente da viscosidade, que sofreu redução significativa. Além do crescente uso do PLA, que é um material biodegradável e reciclável, o desenvolvimento de filamentos biocompósitos biodegradáveis vem ganhando importância no mercado. A mistura de biomateriais, além de possibilitar uma melhora das propriedades mecânicas dos filamentos pode ser aliada à questão ambiental; muitos biocompósitos presentes no mercado apresentam fibras naturais provindas de resíduos agrícolas que geralmente são enviados a aterros, compostagem ou destinados para produção de ração animal. Por fim, iniciativas vinculadas a programas de conscientização de crianças e adolescentes sobre o plástico nos oceanos e o uso de extrusoras domésticas se mostraram como ótimas aliadas para o aumento da sustentabilidade da impressão 3D. Até o momento, conclui-se que as iniciativas relacionadas à reciclagem de polímeros e aplicação de biocompósitos é muito benéfica sob a perspectiva ambiental. No entanto, estudos relacionados à análise do ciclo de vida e a avaliação caso a caso das tecnologias de manufatura aditiva precisam ser melhor explorados antes da solidificação destas tecnologias como uma alternativa vantajosa.

Palavras-chave: *impressão 3D, manufatura aditiva, iniciativas sustentáveis, reciclagem de filamentos, biocompósitos.*

ABSTRACT

3D printing is an up-and-coming technology, used mainly for the manufacture of prototypes and small-scale models. The simplicity of this technology in comparison with the ones formerly available has been turning it into the main solution for several industrial and domestic applications. However, its growing popularity is also linked to environmental issues caused by the incorrect disposal of plastics, which end up in improper places as the ocean. Besides, the use of polymeric filaments, regardless of scale, contributes to the generation of volatile compounds and the formation of nanoplastics. With the goal of turning additive manufacturing less polluting or more sustainable, some alternatives and/or initiatives considered relevant were found in literature, as the recycling of filaments, the use of biocomposites, and awareness programs. The recycling of polymers such as PLA, ABS, and the use of sources like HDPE of plastic bags showed promising results when printing using the fused deposition modeling technology, resulting in filaments or parts with similar properties as those made with virgin plastic. After a few cycles of extrusion and printing, mechanical properties such as tensile strength and stretching remained practically unaltered, unlike the viscosity, which suffered a significant reduction. Aside from the increasing use of PLA, which is a biodegradable and recyclable material, the development of biodegradable biocomposite filaments has been gaining significance in the market. The mix of biomaterials, as well as improving the mechanical properties of the filaments, can be coupled with the environmental cause; several biocomposites present in the market use natural fibers derived from agricultural residues which are usually sent to landfills, composting, or destined to the production of animal feed. Finally, initiatives linked to awareness programs of children and teenagers focusing on plastics in the ocean and the use of domestic extruders have proved to be great allies to the increase in the sustainability of 3D printing. So far, the conclusion is that initiatives related to the recycling of polymers and the application of biocomposites are very beneficial from the environmental perspective. Yet, studies related to the life cycle analysis and the case-by-case evaluation of each of the additive manufacturing technologies need to be better explored before solidifying these technologies as an advantageous alternative.

Keywords: *3D printing, additive manufacturing, sustainable initiatives, filament recycling, biocomposites.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via estereolitografia, e b) Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via Sinterização Direta a Laser de Metal. ..9	9
Figura 2: Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via Modelagem por Fusão e Deposição..... 10	10
Figura 3: Fotografia de uma impressora 3D com tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) mostrando os principais componentes da máquina. 11	11
Figura 4: Representação de um conjunto do extrusor com indicação dos diferentes componentes presentes no mesmo. 12	12
Figura 5: Fotografias de dois modelos de impressoras 3D via Modelagem por Fusão e Deposição; a) Creality Ender 3 e b) Raise3D E2 14	14
Figura 6: a) Fotografia de um prédio sendo impresso pela tecnologia FDM utilizando cimento, e b) Fotografia de uma prótese de orelha sendo impressa pela tecnologia FDM 15	15
Figura 7: Módulo de elasticidade de três formulações de pellets de PLA ao longo dos vinte ciclos de extrusão. 20	20
Figura 8: Variação de viscosidade do PLA natural em função da taxa de cisalhamento em três diferentes temperaturas..... 21	21
Figura 9: Imagens obtidas por microscopia ótica 3D das variações de altura nas superfícies de peças de PLA virgem e reciclado..... 23	23
Figura 10: Fotografias mostrando a mudança da coloração de pellets de ABS ao longo dos cinco ciclos de extrusão..... 25	25
Figura 11: Resistência ao impacto de amostras com diferentes percentuais de ABS reciclado..... 26	26
Figura 12: Fotografias das sacolas coletadas (A); das sacolas após passarem pelo cilindro (B); dos filamentos após a extrusão (C); do teste na impressora (D); e do filamento processado pela impressora (E) 27	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mecanismos de funcionamento, materiais, resolução e faixa de custo dos equipamentos das diferentes tecnologias de impressão 3D.....	5
Tabela 2: Pontos fortes, limitações e aplicações das diferentes tecnologias de impressão 3D.....	7
Tabela 3: Características e custo das impressoras 3D via Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	13

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- PLA – Poliacido láctico
- ABS – Acrilonitrila butadieno estireno
- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- SLA – Estereolitografia
- FDM – Modelagem por Fusão e Deposição
- DMLS – Sinterização Direta a Laser de Metal
- EBM – Feixe de Elétrons
- SLS – Sinterização Seletiva a Laser
- LOM – Fabricação de Objetos Laminados
- DLP – Processamento de Luz Direta
- SLM – Derretimento Seletivo a Laser
- PCL – Policaprolactona
- PETG – Politereftalato de etileno - glicol
- PP – Polipropileno
- PVA – Acetato de polivinila
- PSAI – Poliestireno de alto impacto
- UV – Ultravioleta
- DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial
- TGA – Termogravimetria

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica	3
2.1	Manufatura aditiva	3
2.2	Modelagem por Fusão e Deposição	9
2.2.1	Máquinas disponíveis no mercado e polímeros usados	10
2.2.2	Áreas de aplicação e perspectivas de uso	14
2.2.3	Problemas, riscos e limitações da tecnologia	16
3	Metodologia	17
4	Iniciativas sustentáveis	18
4.1	Reciclagem de polímeros	18
4.1.1	PLA	19
4.1.2	ABS	23
4.1.3	PEAD	26
4.2	Uso de biocompósitos	28
4.3	Outras iniciativas	30
5	Conclusão	31
6	Referências bibliográficas	33

1 Introdução

Durante a última década, a impressão 3D vem se consolidando como uma importante alternativa no processo de prototipagem rápida. Esta tecnologia permite a criação de formas complexas com menores custos e de forma mais eficiente, dispensando a criação de um molde específico à peça como ocorre no processo de injeção, comumente empregado até então. Esse crescimento da aplicação da manufatura aditiva na indústria vem acompanhado por um grande interesse por parte de pesquisadores, que buscam novos usos para essa tecnologia, além de maneiras para torná-la mais acessível a uma maior parcela da população.

Várias pesquisas têm sido documentadas, sendo que quase todas abordam questões relacionadas às categorias de impressão 3D, aos parâmetros de processo, à qualidade dos filamentos e peças, aos benefícios de custo e, na maior parte, às áreas de aplicação, que vão desde a elaboração de alimentos até a construção civil. No entanto, estudos relacionados ao impacto ambiental desta nova tecnologia ainda são escassos, mesmo com a sua popularização em um maior número de ambientes.

Apesar de ter sido criada nos anos 80, a tecnologia ainda está em desenvolvimento exponencial e é jovem quando comparada a meios de manufatura já estabelecidos. Enquanto o uso para fins educacionais e para a produção de protótipos já se justifica, as tecnologias de manufatura aditiva como um todo ainda não chegaram ao ponto de ter todos os seus usos bem explorados, sendo necessárias futuras análises de caso a caso para solidificar a tecnologia como uma substituição realmente vantajosa.

Um dos grandes desafios que surge com a popularização das impressoras 3D no meio doméstico é a quantidade de peças que passará a ser impressa. A facilidade de se imprimir peças com pequenas alterações, apesar de vantajosa sob o ponto de vista produtivo, incentiva que se imprima cada vez mais, o que gera um descarte ainda maior, em uma sociedade onde o modelo de consumo já é desenfreado. Diante deste cenário, faz-se cada vez mais necessária a busca de alternativas para tornar o processo mais sustentável, visto que o uso descontrolado desses materiais acaba agravando problemas ambientais relacionados ao descarte incorreto de materiais plásticos.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo elencar iniciativas a nível acadêmico ou já disponíveis no mercado que visam encontrar possíveis maneiras de mitigar os possíveis problemas ambientais vinculados ao uso da impressão 3D. Para este fim, nesta revisão bibliográfica serão abordadas algumas alternativas sustentáveis relacionadas à manufatura aditiva, como a reciclagem de filamentos poliméricos, o emprego de biocompósitos e a criação de programas que buscam conscientizar a população e facilitar o processo da reutilização de plástico na casa do consumidor.

2 Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica

Neste trabalho serão abordadas, inicialmente, informações a respeito da manufatura aditiva, como definição, materiais, mecanismos de funcionamento e uma visão geral dos diferentes tipos de tecnologia. Depois, ao focar na tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição, serão abordados a estrutura das impressoras deste tipo, além de algumas máquinas e polímeros disponíveis no mercado.

As áreas de uso da tecnologia de manufatura aditiva e as perspectivas para o futuro também serão abordadas, além dos problemas e limitações associados a este processo. Por fim, serão discutidas as iniciativas sustentáveis que vem sendo desenvolvidas para diminuir o impacto ambiental da impressão 3D.

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, consiste em um processo de criar objetos em três dimensões pela junção de materiais, geralmente ocorrendo através da impressão de camadas sucessivas bidimensionais. A primeira etapa do processo corresponde à criação de um modelo 3D em um software de edição que divide a peça/modelo em camadas diferentes de duas dimensões. Essa tecnologia foi descrita pela primeira vez por Charles Hull, em uma patente publicada pelo mesmo em 1986 (Hull, 1986). A impressão 3D envolve vários métodos, equipamentos e materiais diferentes e evoluiu muito desde a sua concepção, sendo considerada por alguns como uma inovação que vai dar início à uma nova Revolução Industrial (Rifkin, 2012).

A tecnologia foi desenvolvida com o objetivo de se construir protótipos rápidos para a indústria, visto que ela permite a criação de infinitas formas e estruturas que não poderiam ser criadas ou seriam fabricadas com muita dificuldade através de tecnologias tradicionais (Mallakpour et al., 2021). No entanto, atualmente, o seu uso já ultrapassou a finalidade inicial, visto que esta tecnologia está sendo aplicada na construção civil, na área de alimentos, medicina, bioengenharia, eletrônicos, ciência forense, etc.

Os materiais e métodos utilizados na manufatura aditiva são diversos. Dependendo da tecnologia usada, as impressoras podem realizar a extrusão de materiais líquidos de diferentes viscosidades através de um bocal, curar uma resina

de fotopolímero com lasers ou outras fontes de luz, induzir à fusão entre partículas de pó a partir de uma fonte de energia térmica, unir camadas de pó por um processo derivado da impressora 2D a jato de tinta ou ainda laminar camadas de diferentes materiais como metal, plástico e papel (Coakley e Hurt, 2016).

O primeiro método desenvolvido nos anos 80 foi a estereolitografia (SLA), sendo seguida por diversos outros métodos como Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS), Fusão de Feixe de Elétrons (EBM), Polyjet, Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Fabricação de Objetos Laminados (LOM), Processamento de Luz Direta (DLP), Derretimento Seletivo a Laser (SLM) e Jato de Tinta (Inkjet) (Bhatia e Sehgal, 2021).

Na Tabela 1 encontra-se um resumo das diferentes tecnologias de impressão 3D com seus respectivos mecanismos de funcionamento, materiais que podem ser usados, resolução e faixa de custo do equipamento.

Tabela 1: Mecanismos de funcionamento, materiais, resolução e faixa de custo dos equipamentos das diferentes tecnologias de impressão 3D.

Tecnologia	Mecanismo de funcionamento	Material usado	Resolução (μm)	Custo do Equipamento (USD)	Referências
SLA Estereolitografia	Fotopolímeros são aquecidos para se tornarem semilíquidos; ao entrarem em contato com um laser UV endurecem formando o objeto	Resina de fotopolímero curável	10	2500-200000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
FDM Modelagem por Fusão e Deposição	Um material, que geralmente consiste em plástico derretido, é extrusado através de um bocal, formando o objeto através da deposição de camadas sucessivas de polímero	Diversos termoplásticos como PLA e ABS, vidro derretido, cimento, cera, alimentos	50-200	350-4000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
DMLS Sinterização Direta a Laser de Metal	Um pó metálico é fundido seletivamente por um laser, produzindo objetos de ligas metálicas	Pó metálico de ligas metálicas como aço inoxidável	80-250	> 200000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
EBM Fusão de Feixe de Elétrons	Um pó metálico é fundido seletivamente por um feixe de elétrons, produzindo objetos de um único elemento metálico.	Pó metálico de elementos como titânio e ligas como Inconel 718 e Inconel 625	80-250	> 200000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
SLS Sinterização Seletiva a Laser	Um pó de polímero próximo da sua temperatura de fusão é sinterizado por uma fonte de energia térmica, sendo solidificado e formando o objeto camada por camada	Pó termoplástico (Poliamidas como Nylon 6, Nylon 11 e Nylon 12; policaprolactona (PCL)	80-250	> 200000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016

Tabela 1: Mecanismos de funcionamento, materiais, resolução e faixa de custo dos equipamentos das diferentes tecnologias de impressão 3D. (continuação)

Tecnologia	Mecanismo de funcionamento	Material usado	Resolução (μm)	Custo do Equipamento (USD)	Referências
LOM Fabricação de Objetos Laminados	Camadas de papel revestidas por plásticos ou laminados de metal são fundidas e posteriormente cortadas no formato desejado por uma faca ou um laser	Papel, metais laminados, filme de plástico	100-190	> 30000	Bhushan e Caspers, 2017; Coakley e Hurt, 2016
DLP Processamento de Luz Direta	Fotopolímeros são aquecidos para se tornarem semilíquidos, e ao entrarem em contato com a luz de um projetor de luz digital endurecem formando o objeto	Resina de fotopolímero curável	35-100	2000-20000	Formlabs, 2021; Aniwaa; 2021
SLM Derretimento Seletivo a Laser	Um pó metálico é fundido seletivamente por um laser, produzindo objetos de um único elemento metálico	Pó metálico de elementos como titânio e alumínio	80-250	> 200000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
Polyjet	Um fotopolímero líquido é jateado em camadas, sendo simultaneamente curado por um laser UV, formando o objeto	Resina de fotopolímero curável	16	6000-75000	Proto3000, 2021; 3DSourced, 2021
Inkjet Jato de Tinta	Um material aglutinante líquido é seletivamente depositado sobre uma camada de pó de resina plástica, fundindo-a à camada inferior	Pó de resina plástica	5-200	15000-30000	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016

Na Tabela 2 foram elencados alguns prós e contras, assim como as aplicações das tecnologias de impressão 3D apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2: Pontos fortes, limitações e aplicações das diferentes tecnologias de impressão 3D.

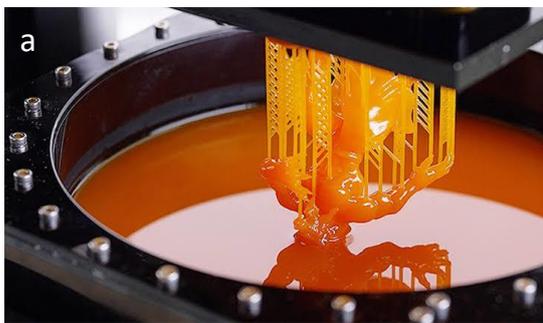
Tecnologia	Pontos Fortes	Limitações	Aplicações	Referências
SLA e DLP	Grande nível de detalhes e complexidade, acabamento superficial suave, operação silenciosa	Os materiais são limitados, o pós processamento não é tão preciso e os objetos formados são frágeis	Protótipos, moldes de joias, aplicações dentárias, aparelhos auditivos	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016; Formlabs, 2021; Aniwaa; 2021
FDM	Baixo custo, agilidade e simplicidade	Uso limitado a materiais com uma viscosidade que ofereça suporte à estrutura e que possa ser extrusada; geometrias mais complexas requerem a impressão de suportes que podem ser difíceis de remover	Fabricação de diversos tipos de peças e protótipos com aplicações nas áreas de construção civil, alimentos, medicina, etc.	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
DMLS e EBM	Formação de peças fortes e funcionais, podendo envolver geometrias complexas	Limitado a objetos pequenos com custos mais altos que as outras tecnologias	Peças de metal funcionais para usos na indústria aeroespacial e automotiva, aplicações na medicina e odontologia	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016
SLS e SLM	Formação de peças funcionais com boas propriedades mecânicas e geometrias complexas; fácil remoção da estrutura de suporte	Custo alto e processo mais lento	Peças para as indústrias biomédica, aeroespacial e de eletrônicos, fabricação de trocadores de calor	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016

Tabela 2: Pontos fortes, limitações e aplicações das diferentes tecnologias de impressão 3D. (continuação)

Tecnologia	Pontos Fortes	Limitações	Aplicações	Referências
LOM	Pode imprimir em cores, não requer estrutura de suporte, custos baixos, tempo reduzido de manufatura	Apresenta limitação em geometrias 3D e formas complexas, menor qualidade de superfície e precisão	Fabricação de objetos de papel, eletrônicos e estruturas inteligentes	Bhushan e Caspers, 2017; Coakley e Hurt, 2016
Polyjet	Temperaturas de operação mais baixas que o SLA; permite a impressão de peças com cores e materiais diferentes, peças complexas e com ótimo acabamento	Apresenta um alto custo de impressão	Protótipos em cor, produção de peças realistas como modelos de órgãos humanos	Proto3000, 2021; 3DSourced, 2021
Inkjet	Permite a impressão em alta resolução a cores; não requer estruturas de suporte	Alto custo de materiais, relativamente frágil, pós processamento de menor precisão	Protótipos, aplicações biomédicas e fabricação de circuitos elétricos	Wang et al., 2017; Coakley e Hurt, 2016

As impressoras 3D apresentam aspectos visuais bastante distintos dependendo da tecnologia de impressão empregada. Na Figura 1a está ilustrado o processo de impressão por estereolitografia e na Figura 1b, o processo de impressão por Sinterização Direta a Laser de Metal.

Figura 1: a) Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via estereolitografia, e b) Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via Sinterização Direta a Laser de Metal.



Fonte: 3DLab (2021)



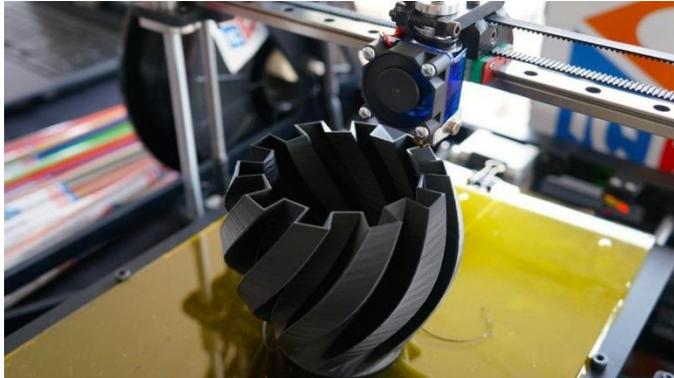
Fonte: Beamler (2021)

2.2 Modelagem por Fusão e Deposição

Entre as diversas tecnologias, aquela que mais se popularizou e pode ser encontrada mais facilmente no mercado é a tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), podendo ser usada tanto em casa como em laboratórios e indústrias. Devido ao domínio dessa tecnologia no mercado atual e o fato dela apresentar a maior gama de aplicações, tanto estabelecidas como em desenvolvimento, essa será a tecnologia abordada com maior detalhamento no presente trabalho.

Como explicado brevemente na Tabela 1, a tecnologia de FDM consiste na extrusão de um filamento de polímero através de um bocal, sendo o objeto formado camada por camada a partir de um modelo digital. A peça resultante apresenta uma aparência característica, podendo ser percebidas as camadas de impressão; a orientação dessas camadas determinada no momento da manufatura influencia nas propriedades mecânicas como a resistência estrutural da peça (Ngo et al., 2018). A Figura 2 mostra uma peça sendo formada pela tecnologia de impressão 3D via Modelagem por Fusão e Deposição, com o uso de um filamento polimérico cinza.

Figura 2: Fotografia mostrando uma peça sendo formada por tecnologia de impressão 3D via Modelagem por Fusão e Deposição.



Fonte: All3DP (2021)

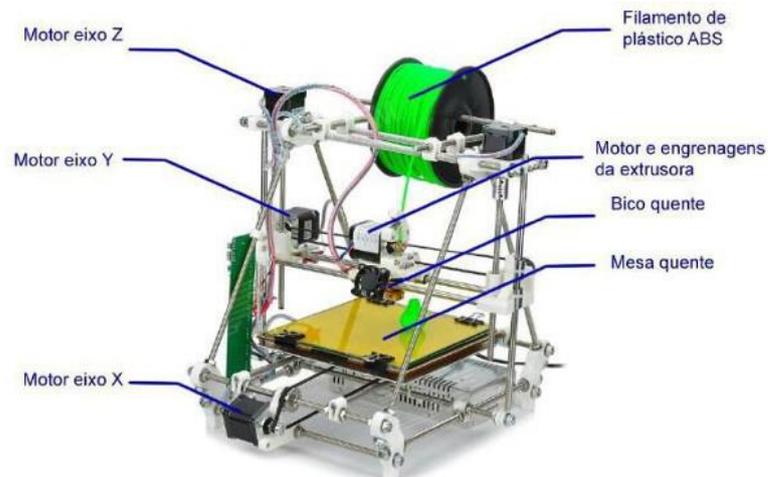
2.2.1 Máquinas disponíveis no mercado e polímeros usados

Os filamentos mais comumente usados para a impressão com a tecnologia FDM são feitos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) ou poli (ácido láctico) conhecido como PLA, dois termoplásticos amplamente disponíveis, mas existem outras diversas alternativas disponíveis no mercado com temperaturas de fusão e propriedades mecânicas variadas (Coakley e Hurt, 2016). Alguns dos outros filamentos disponíveis atualmente no mercado são feitos de poli (tereftalato de etileno - glicol) (PETG), poli(propileno) (PP), Nylon, acetato de polivinila (PVA) e poliestireno de alto impacto (PSAI) (Leapfrog 3D Printers, 2021). O diâmetro destes filamentos geralmente se encontra entre 1,75 mm e 3 mm, sendo comercializados em carretéis de pesos variados, como o carretel de 1 kg, que pode representar um comprimento de 100 m a 400 m dependendo do polímero usado e do diâmetro do filamento (3D Fila, 2021).

As máquinas nas quais esses filamentos podem ser usados também variam consideravelmente em preço e funcionalidades, apesar de todas seguirem o mesmo princípio de impressão. Esse princípio consiste em um “robô cartesiano”, ou seja, uma máquina que consegue se movimentar nos três eixos cartesianos (x, y e z). Para realizar esse movimento, as máquinas contam com um motor de passo que pode se mover com uma grande precisão, o que garante uma boa resolução do objeto final. O posicionamento nos eixos x e y é feito por um sistema de polias ou correias, enquanto no eixo z se utilizam parafusos ou hastes roscadas (Evans, 2012). A Figura 3 mostra

os principais componentes de uma impressora 3D via Modelagem por Fusão e Deposição.

Figura 3: Fotografia de uma impressora 3D com tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) mostrando os principais componentes da máquina.

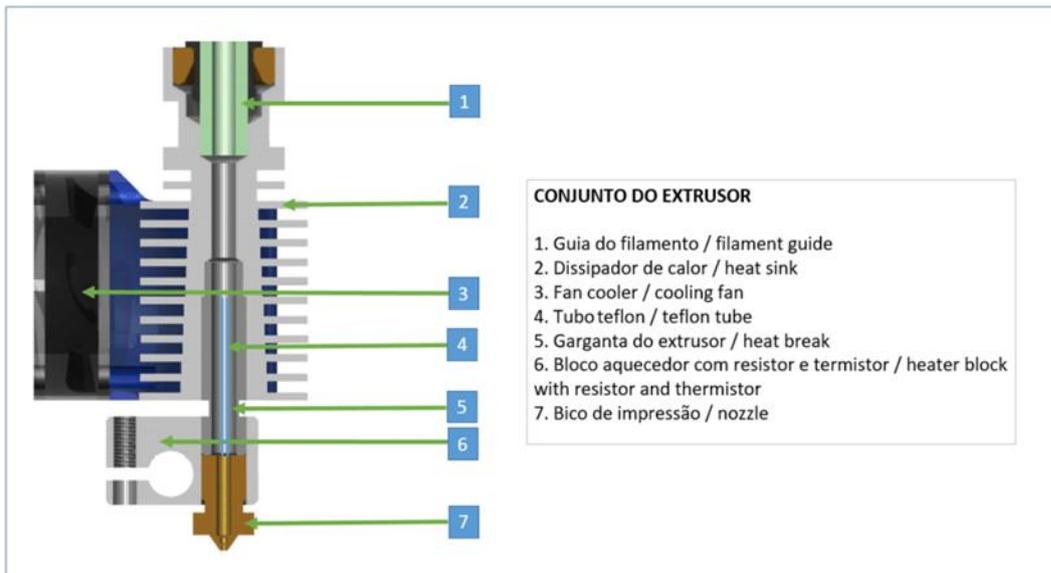


Fonte: Brasil Escola (2018)

A próxima parte presente em todas as máquinas é o bocal extrusor dos termoplásticos. Esse extrusor contém um guia do filamento, através do qual o polímero vai sendo puxado do carretel por um motor de passo, e o bloco aquecedor, região onde o plástico vai ser levado até o estado semilíquido para a extrusão. Neste bloco aquecedor, o filamento será aquecido até uma temperatura que geralmente se encontra entre 170 °C e 220 °C, dependendo do plástico a ser extrusado (Evans, 2012).

Após o polímero chegar no estado semilíquido, ele é finalmente extrusado através do bocal, que apresenta uma abertura de 0,35 mm a 0,5 mm, e depositado em uma mesa aquecida no formato previsto pela modelagem digital. A mesa aquecida é utilizada para prevenir qualquer deformação ou rachadura que poderia ocorrer durante o resfriamento do objeto impresso e também para criar uma melhor adesão entre as primeiras camadas impressas e a superfície da mesa, que geralmente é feita de vidro ou alumínio para garantir uma distribuição uniforme de calor (Evans, 2012). A Figura 4 apresenta os principais componentes do conjunto extrusor presentes em uma impressora 3D por FDM.

Figura 4: Representação de um conjunto do extrusor com indicação dos diferentes componentes presentes no mesmo.



Fonte: 3DLab (2021)

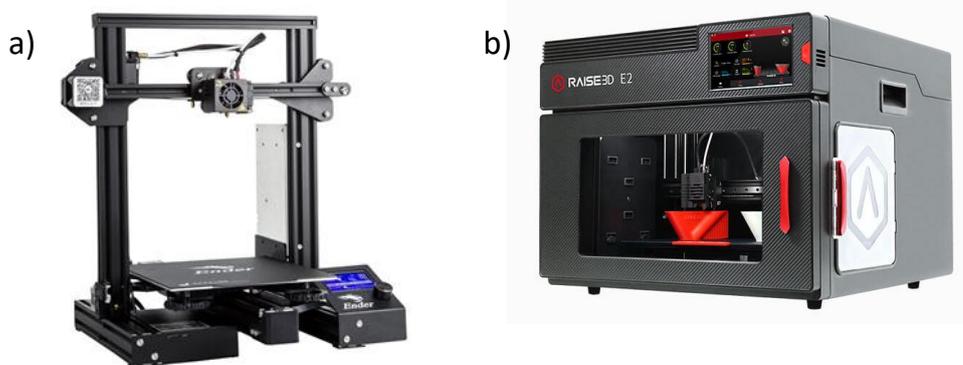
Os modelos iniciais das impressoras FDM eram extremamente básicos, sendo que alguns eram feitos via impressão 3D, como era o caso do RepRap Darwin criado em 2007 (Evans, 2012). Com a evolução da tecnologia, existe atualmente uma infinidade de modelos disponíveis no mercado, com funcionalidades e preços diferentes dependendo da complexidade da máquina. Na Tabela 3, estão elencadas as características e preços de algumas das impressoras mais populares do ano de 2021.

Tabela 3: Características e custo das impressoras 3D via Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).

Modelo	Características	Custo (USD)	Referência
Creality Ender 3	Líder de mercado entre as impressoras mais baratas, possui a configuração mais básica possível apenas com o bocal e a mesa aquecida	189	All3DP, 2021
Monoprice Voxel	Fácil de ser instalada e operada imediatamente, podendo ser usada por iniciantes, mas ainda apresentando uma qualidade razoável de impressão	399	All3DP, 2021
Artillery Sidewinder X1 V4	Uma impressora com aquecimento rápido e operação silenciosa, permite a impressão de camadas mais grossas e objetos maiores	399	All3DP, 2021
Original Prusa i3 MK3S+	Possui sistemas de detecção e redução de erros, imprime rapidamente e permite a impressão com até 5 materiais ou cores diferentes por objeto	749	All3DP, 2021
CEL-UK RoboxDual	Impressora com um bocal de extrusão duplo, autoalimentação de filamento, nivelamento automático e mesa aquecida flexível	1.100	TechRadar, 2021
Dremel DigiLab 3D45	Apresenta um filtro de partículas, uma área de impressão fechada, uma câmera e um visor sensível ao toque para acompanhar a impressão	1.899	All3DP, 2021
Ultimaker S3	Focada para usos educativos e comerciais, possui bocais trocáveis, uma tela sensível ao toque, além de uma ótima qualidade e velocidade de impressão	4.080	TechRadar, 2021
Raise3D E2	Possui dois bocais, podendo imprimir dois objetos diferentes simultaneamente ou um único objeto, além de possuir uma mesa aquecida auto niveladora, calibração por vídeo e medidas de segurança como um filtro	4.790	TechRadar, 2021

A Figura 5 apresenta a fotografia de dois modelos apresentados na Tabela 3, (a) Creality Ender 3, o de menor custo, e (b) Raise3D E2, o de maior custo, respectivamente.

Figura 5: Fotografias de dois modelos de impressoras 3D via Modelagem por Fusão e Deposição; a) Creality Ender 3 e b) Raise3D E2



Fonte: Filipeflop (2021)

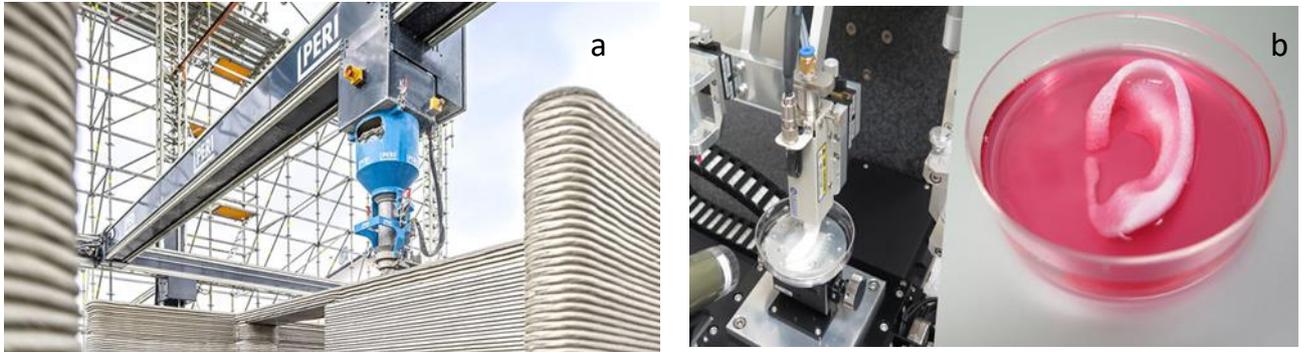
Fonte: Rais3d (2021)

Os modelos abordados na Tabela 3 são os mais vendidos no mundo e todos eles são manufacturados por empresas estrangeiras, mas no Brasil também existem marcas nacionais disponíveis no mercado, como é o caso da GTMax3D. A empresa paulista oferece diversos modelos de impressoras 3D com níveis de complexidade e recursos variáveis. O modelo mais simples é comercializado por aproximadamente 5 mil reais, enquanto o mais caro é encontrado por mais de 41 mil reais (GTMax3D, 2021). Existem ainda outras marcas nacionais de impressoras 3D, como a Sethi3D, a Voolt3D, a Moustá e a Boa Impressão 3D, sendo estas apenas alguns exemplos de várias empresas atuantes no país (EngiPrinters, 2021).

2.2.2 Áreas de aplicação e perspectivas de uso

Além do uso de polímeros para a prototipagem rápida, a tecnologia de impressão 3D FDM é aplicada atualmente em diversas áreas, como: construção civil, na construção de prédios e casas usando cimento no lugar do polímero; medicina, com a produção de próteses e réplicas educacionais; produção de alimentos; biomanufatura; mercado automotivo; peças aeroespaciais; aplicações em arqueologia; ciência forense, e até na manufatura de roupas. A Figura 6 mostra o uso de impressoras 3D FDM na construção civil (a) e na produção de próteses (b).

Figura 6: a) Fotografia de um prédio sendo impresso pela tecnologia FDM utilizando cimento, e b) Fotografia de uma prótese de orelha sendo impressa pela tecnologia FDM



Fonte: The Construction Specifier (2020)

Fonte: Orthopedics This Week (2016)

O número de aplicações nos diferentes ramos citados cresce continuamente, sendo publicados nos anos recentes inúmeros trabalhos que desenvolveram novos usos para a tecnologia, como: criação de biossensores vestíveis, como oxímetros e sensores de glucose (Kalkal et al., 2021); a impressão de culturas específicas de micro-organismos para uso em processos fermentativos (Gao et al., 2021); customização de alimentos para as necessidades nutricionais de cada pessoa (Lipton, 2017); impressão de refeições por extrusão utilizando um cilindro preenchido com os ingredientes (Godoi et al., 2016); impressão de réplicas do coração de pacientes para simular uma cirurgia coronária (Oliveira-Santos et al., 2018); impressão de remédios sob medida e próteses para amputados (Al-Dulimi et al., 2021), e o desenvolvimento de membranas para dessalinização de água (Yanar et al., 2020).

Paralelos a esses estudos de novas aplicações, a tecnologia clássica de impressão de objetos poliméricos também segue sendo desenvolvida. Algumas das inovações recentes sendo testadas são: impressão 4D, que consiste na impressão de objetos 3D com resposta a estímulos, podendo alterar seu formato e dimensões a partir de alguma mudança de circunstância e condições externas, sendo o tempo a quarta dimensão (Mallakpour et al., 2021); desenvolvimento de uma impressora 3D que imprime objetos diretamente através de pellets de plástico ao invés de utilizar filamentos (Singamneni et al., 2021); e a impressão 3D em 5 eixos, com o desenvolvimento de uma máquina com dois eixos rotacionais além dos três eixos

cartesianos, possibilitando assim a impressão livre das limitações do atual processo camada à camada (Asif et al., 2018).

2.2.3 Problemas, riscos e limitações da tecnologia

Assim como todas tecnologias que oferecem benefícios e conveniência à sociedade, a impressão 3D também apresenta alguns problemas e limitações que devem ser levados em consideração antes de ser usada. O primeiro problema que essa tecnologia traz é a emissão de compostos orgânicos voláteis e partículas ultrafinas que podem piorar a qualidade do ar no ambiente onde a impressora é operada e inclusive trazer riscos de saúde às pessoas presentes naquele ambiente. Um estudo realizado pelo Instituto de Tecnologia da Geórgia, nos Estados Unidos, identificou 216 compostos orgânicos voláteis diferentes através da medição da concentração dos mesmos no ar com o tempo dentro de uma câmara de controle para testes (Davis et al., 2019). Esse mesmo estudo identificou a liberação e presença de 30 compostos cancerígenos ou irritantes como formaldeído, estireno e diclorometano. A concentração medida destes compostos em ambientes internos ultrapassou os limites ligados a efeitos adversos de saúde.

O mesmo problema foi percebido ao se fazer a caracterização das emissões de extrusoras de filamento, que permitem que o consumidor produza o seu próprio filamento a partir de pellets de plástico. Em um estudo realizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), além da emissão de compostos orgânicos voláteis, foram medidos níveis de emissão de partículas ultrafinas comparáveis àqueles das impressoras 3D (Byrley et al., 2020). Esses dados indicam um risco adicional à saúde daqueles que usam tanto a extrusora de filamento quanto a impressora 3D num mesmo ambiente, já que estes aparelhos em geral não apresentam nenhum tipo de sistema de filtração para estes compostos e partículas.

Outro problema ligado à manufatura aditiva de objetos é a formação de nanoplasticos gerados no pós-tratamento das peças, que podem se tornar um problema ambiental e um risco à saúde pública (Rodríguez-Hernández et al., 2020). Essas partículas de plástico na ordem de grandeza de nanômetros apresentam riscos não apenas para a saúde humana, mas também para plantas e animais, principalmente animais marinhos, que vivem em ambientes com as maiores

concentrações de nanoplásticos. A formação deste tipo de partícula ocorre na etapa de finalização dos objetos, ao se passar uma solução de álcool ou acetona na superfície dos mesmos, sendo assim formada uma mistura de álcool e resina que, ao entrar em contato com a radiação UV do sol, pode gerar nanoplásticos (Rodríguez-Hernández et al., 2020). O descarte dos materiais contendo essa mistura geralmente não é feito da forma correta, muitas vezes acabando em corpos hídricos. Durante o corte de rebarbas e estruturas de suporte das peças poliméricas, também pode ocorrer a formação de microplásticos, partículas que, assim como os nanoplásticos, também podem trazer diversos danos ao meio ambiente.

Uma grande limitação dessa tecnologia, e uma das principais razões pela qual ela não substituiu os métodos tradicionais de manufatura, é a baixa resistência mecânica de objetos impressos com filamentos de polímeros puros, que consistem na maioria dos filamentos oferecidos no mercado atualmente. Estes objetos, por apresentarem uma tolerância baixa a carga, acabam não podendo substituir peças completamente funcionais e com uma boa resistência mecânica. Essa limitação faz com que os produtos 3D obtidos através desse tipo de filamento sejam utilizados apenas como protótipos conceituais, restringindo assim as possibilidades de uso em grande escala na indústria. Aqueles que desejam fabricar objetos com uma maior performance mecânica através dessa tecnologia ficam dependentes da utilização de compósitos poliméricos na impressão, que resultam em uma peça final mais resistente e funcional do que aquelas formadas pelos polímeros puros (Wang et al., 2017).

3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma pesquisa extensiva de trabalhos acadêmicos e iniciativas encontradas atualmente no mercado que buscam tornar a impressão 3D um processo mais sustentável. Inicialmente foram buscados os termos de sustentabilidade e impressão 3D, para analisar os tipos de iniciativas que estavam sendo feitas nessa área. Pode-se perceber que a maioria dos artigos tratavam sobre a reciclagem de filamentos de plástico. Com a leitura sobre as propriedades mecânicas desses materiais reciclados e a necessidade de se alterar algumas delas, chegou-se no estudo dos compósitos e, a partir disso, finalmente nos biocompósitos, que envolvem mais a perspectiva de sustentabilidade buscada no presente trabalho.

Na discussão das alternativas sustentáveis encontradas serão abordados a reciclagem de filamentos plásticos de PLA, ABS e PEAD; o uso de biocompósitos; a criação de programas que buscam conscientizar a população e, por fim, um modo de facilitar o processo da reutilização de plástico doméstica.

4 Iniciativas sustentáveis

Devido à facilidade do uso da impressão 3D, ela acaba incentivando a produção desenfreada de muitas iterações de peças, ou seja, é possível fazer qualquer tipo de alteração, não sendo necessário criar um novo molde para alterar uma peça como ocorre nos métodos de manufatura tradicionais. Também são descartados suportes de estruturas impressos e peças com algum erro de impressão.

Levando em consideração essa elevada produção de peças e a preocupação crescente das indústrias com o uso em excesso do plástico, muitos estudos sobre a viabilidade da reciclagem de filamentos e polímeros, ou ainda sobre a utilização de biomateriais para impressão 3D foram publicados ou estão em desenvolvimento. Além das claras vantagens ambientais com a redução do consumo de plástico, reciclar filamentos e usar biomateriais também traz uma vantagem econômica, já que reduz a necessidade de adquirir filamentos feitos de plástico virgem com um alto valor agregado e custo elevado. Com isso, o processo se torna mais sustentável e acessível.

4.1 Reciclagem de polímeros

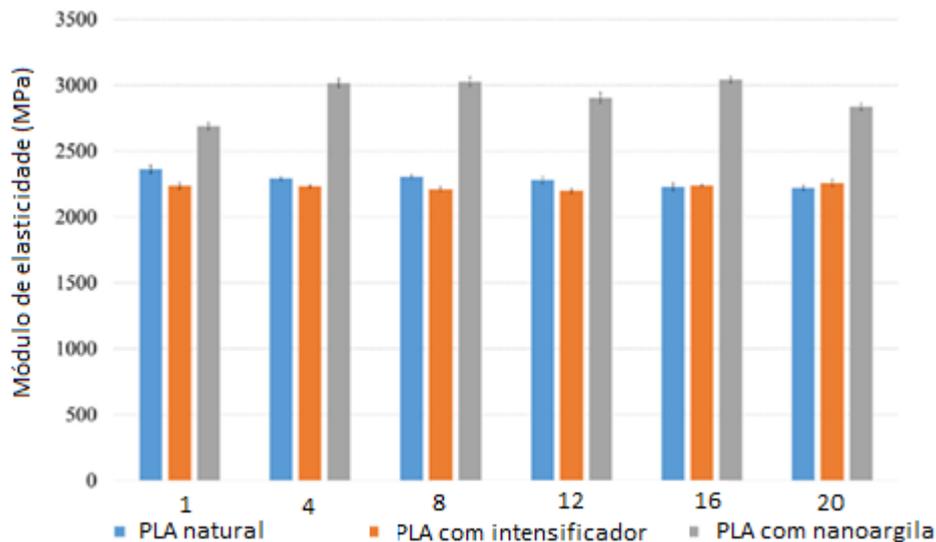
A reciclagem de polímeros para a produção de novos filamentos é feita essencialmente da mesma forma, independente do material original. Esse processo inicia com a moagem do plástico, transformando as peças a serem recicladas em pedaços menores, e a posterior extrusão do plástico triturado, seguindo as condições de temperatura recomendadas para cada tipo de polímero. Ao sair da extrusora, o filamento já está pronto para ser utilizado no processo de impressão 3D. Na teoria, todo termoplástico poderia ser reprocessado de forma a criar um filamento, mas este reprocessamento acarreta em uma mudança nas propriedades mecânicas e reológicas dos materiais, ponto que será discutido nos tópicos seguintes.

4.1.1 PLA

O poli (ácido láctico) ou ácido polilático, conhecido como ou PLA, é um poliéster alifático biodegradável produzido a partir do ácido láctico (Zhang, 2015; Sin e Tueen 2019). Este biopolímero é o mais popular entre os polímeros biodegradáveis, por já existir considerável domínio sobre sua produção em massa e por apresentar propriedades comparáveis aos polímeros convencionais (Sin e Tueen, 2019). A utilização do PLA está presente na fabricação de utensílios, peças, embalagens, e materiais para biomedicina (Masutani e Kimura, 2015; Sin e Tueen, 2019). Apesar do PLA ser biodegradável e poder ser destinado à compostagem, o processo de reciclagem é considerado mais viável e com o menor impacto ambiental, visto que o processo de biodegradação requer um local adequado e leva um certo tempo para ocorrer; caso a compostagem não seja feita corretamente na presença de oxigênio suficiente, será produzido mais dióxido de carbono e metano (Lanzotti et al., 2019).

Peinado e colaboradores (2015) analisaram as propriedades do PLA natural e de outras duas formulações, uma contendo um aditivo intensificador da capacidade de fusão e outra com nanoargilas. Após a extrusão em uma extrusora de dupla rosca por vinte vezes, foram coletadas amostras de 4 kg a cada quatro ciclos de extrusão para estudar o comportamento de pellets desse polímero e dos compósitos conforme o número de extrusões. A Figura 7 mostra o comportamento do módulo de elasticidade dos materiais citados ao longo dos ciclos de extrusão. Nota-se que os resultados do módulo de elasticidade mostraram que o número de ciclos de extrusão afetou minimamente esses valores. Os resultados foram similares para a resistência à flexão, com exceção do compósito com nanoargilas, que apresentou um aumento na resistência com o número de extrusões, provavelmente pela melhor dispersão e homogeneização desse aditivo com o tempo. Em relação à resistência à tração, os três materiais apresentaram um comportamento quebradiço, sendo aquele com as nanoargilas o mais fraco de todos, mas os valores dessa resistência entre o material extrusado uma vez e vinte vezes permaneceram muito próximos, mostrando um efeito mínimo da extrusão nas propriedades mecânicas (Peinado et al., 2015).

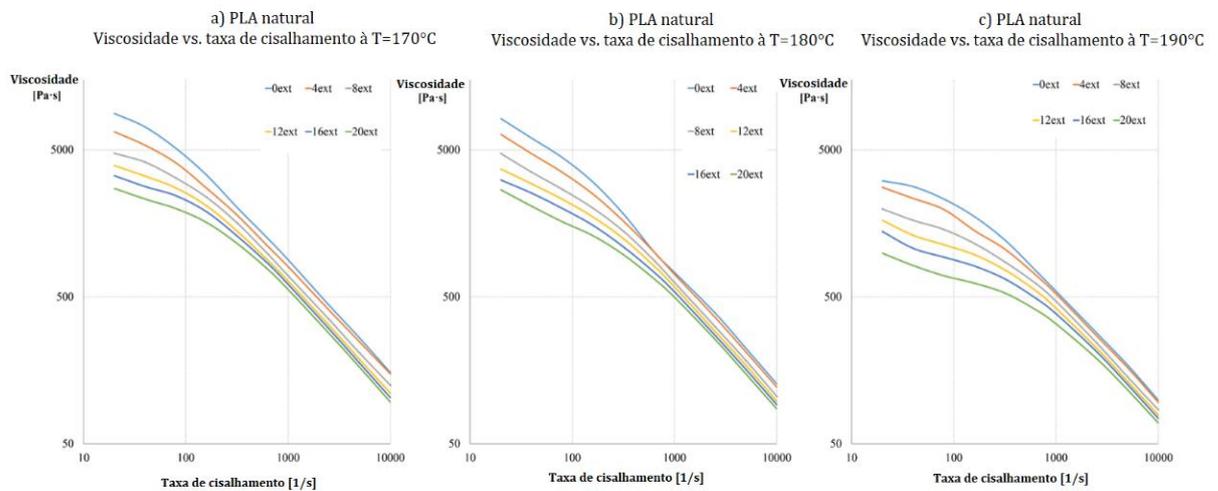
Figura 7: Módulo de elasticidade de três formulações de pellets de PLA ao longo dos vinte ciclos de extrusão.



Fonte: Peinado et al. (2015)

Apesar das propriedades mecânicas terem permanecido quase constantes, o mesmo não ocorreu com a viscosidade do material. Através da cisão de cadeias a cada extrusão, a viscosidade do material foi diminuindo cada vez mais, o que gera problemas na hora da impressão como o controle da vazão de polímero e o entupimento do bico de impressão. Este comportamento foi observado tanto para o PLA natural quanto para os compósitos. Essa queda nos valores de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o PLA natural pode ser visualizada na Figura 8; os gráficos apresentam os resultados da análise em três temperaturas diferentes (170°C, 180°C e 190°C) para 4, 8, 12, 16 e 20 ciclos de extrusão.

Figura 8: Variação de viscosidade do PLA natural em função da taxa de cisalhamento em três diferentes temperaturas.



Fonte: Peinado et al. (2015)

Lanzotti et al. (2019) realizaram um estudo de comparação entre peças impressas com PLA virgem e PLA reciclado, sendo este obtido através da trituração das peças virgens e reprocessamento em uma extrusora caseira. Assim como no outro estudo citado, foram analisadas propriedades mecânicas relacionadas à flexão da peça (Lanzotti et al., 2019) em um ensaio de três pontos. As peças recicladas uma e duas vezes mostraram uma tensão máxima à flexão comparável às peças manufaturadas de material virgem, sendo o valor da peça reciclada uma vez de 106 ± 9 MPa e 108 ± 10 MPa o daquela reciclada duas vezes, enquanto o das peças virgens foi de 119 ± 6 MPa. A partir do terceiro processo de reciclagem, as peças começaram a apresentar um comportamento muito inferior, com uma tensão de flexão de 75 ± 16 MPa. Além de se tornarem mais frágeis, essas peças apresentaram uma variabilidade de resultados muito maior do que aquelas feitas nos dois primeiros ciclos de extrusão.

Ainda analisando os comportamentos e propriedades mecânicas do PLA, Anderson (2017), que buscou analisar as diferenças entre as peças impressas de material virgem e reciclado, realizou medidas de resistência à tração. Os testes de tração mostraram que a impressão 3D utilizando PLA reciclável pode ser uma opção viável. O filamento reciclado apresentou propriedades não muito inferiores ao filamento virgem, tendo resultados de resistência à tração 10,9 % menores do que o filamento virgem, uma tensão de cisalhamento 6,8 % maior e uma dureza 2,4% menor.

O módulo de Young não apresentou diferenças estatísticas significativas. Um problema que foi percebido assim como no estudo mencionado anteriormente foi a maior variabilidade de resultados nos testes realizados nas peças recicladas, além de problemas de impressão que não ocorriam com o filamento virgem como o entupimento do bico de impressão. Todos estes testes foram realizados em uma impressora básica, sem nenhum recurso especial, e apesar de ter sido utilizado um filamento que foi reprocessado uma única vez, a obtenção de peças com boa qualidade de impressão mostra como promissor o uso de filamentos reciclados (Anderson, 2017).

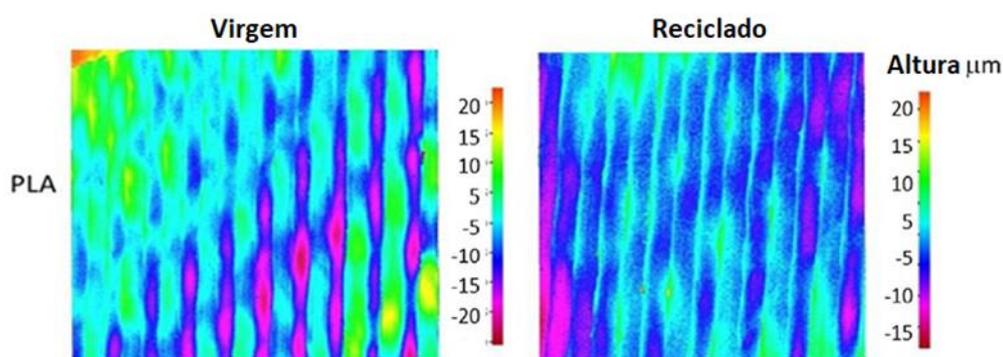
Um potencial problema da utilização de filamentos reciclados é o aumento da emissão de partículas ultrafinas em relação aos filamentos virgens. Estudos indicam uma maior emissão desse tipo de partícula quando são utilizados filamentos reciclados, possivelmente pela presença de contaminantes nos mesmos (Anderson, 2017). Além disso, como foi mencionado na seção 2.2.3, a própria extrusora de filamentos também emite partículas ultrafinas e compostos orgânicos voláteis, fazendo com que o usuário se exponha toda vez que realizar um ciclo de reciclagem.

Seguindo uma abordagem um pouco diferente dos anteriores, um estudo realizado por Pinho et al. (2020) na Universidade de Coimbra, em Portugal, analisou a viabilidade de se utilizar plásticos que estavam no final do seu ciclo de vida, como embalagens de alimentos e painéis de carros, para fazer filamentos reciclados, ao invés de apenas reciclar o plástico obtido de objetos impressos com plástico virgem. Nessa abordagem, além de encontrar uma forma de manufaturar filamentos reciclados, eles também encontraram uma alternativa para mitigar o problema do descarte dessas peças de plástico, que provavelmente iriam para lixões. Os filamentos não foram feitos pela equipe do estudo, mas adquiridos da Recycle Company, em Rotterdam na Holanda (Pinho et al., 2020). Os polímeros analisados foram o PLA e o ABS, que será tratado no próximo tópico.

As análises das propriedades mecânicas foram realizadas tanto em filamentos quanto em corpos de prova impressos. Os objetos impressos com filamentos de PLA advindos de material reciclado apresentaram propriedades mecânicas piores do que aquelas obtidas com o material virgem, assim como os outros estudos já indicavam. Foi observada uma diminuição de 48 % na resistência à flexão e 26 % no módulo de

flexão das peças recicladas em relação às peças virgens. Devido à menor viscosidade do PLA reciclado, causada pela menor massa molar em relação ao material virgem, a superfície dos objetos impressos com esse filamento reciclado é mais uniforme, o que pode ser considerado um benefício, já que reduz a necessidade de pós-processamento da peça. Na Figura 9, que mostra imagens de microscopia ótica 3D, é possível identificar as menores variações de altura na superfície da peça reciclada em comparação à peça de material virgem pelas diferenças de cor.

Figura 9: Imagens obtidas por microscopia ótica 3D das variações de altura nas superfícies de peças de PLA virgem e reciclado.



Fonte: Pinho et al. (2020)

Contudo, Pinho et al. (2020) conseguiram comprovar que apesar das peças impressas com filamentos de origem reciclada terem tido suas propriedades mecânicas reduzidas, as mesmas ainda se encontram dentro da faixa de valores recomendada para o uso em embalagens e painéis de carro, as aplicações originais destes materiais. O PLA, por exemplo, sofreu uma redução na resistência à tração, indo de $38,4 \pm 1,2$ MPa nas peças virgens para $25,9 \pm 0,9$ MPa nas peças recicladas, mas a faixa recomendada de resistência à tração para embalagens de PLA é de 16 – 78 MPa (Pinho et al., 2020).

4.1.2 ABS

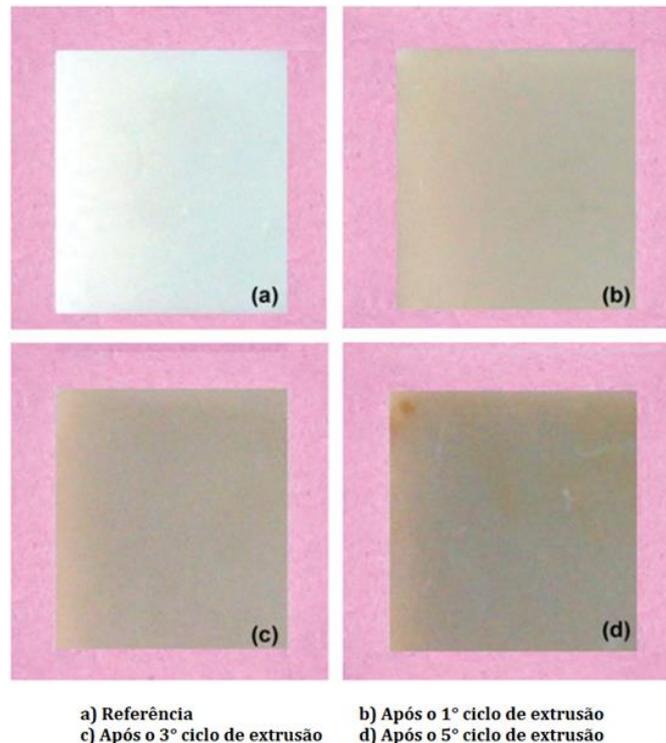
O termoplástico acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é formado pela copolimerização de três diferentes monômeros, a acrilonitrila, o butadieno e o estireno. Por possuir boas propriedades mecânicas e apresentar um baixo custo ele é um dos polímeros mais comumente utilizados para a manufatura de filamentos para impressão 3D. Além dessa utilização, ele também é encontrado em painéis de carros,

brinquedos, móveis para jardim, carcaças de eletrodomésticos, capacetes de segurança, etc. (Mais Polímeros, 2021).

Como mencionado anteriormente, Pinho et al. (2020) também analisaram filamentos reciclados de ABS. O processo de reciclagem de polímeros induz à ruptura de cadeias, o que traz mais mudanças aparentes em propriedades e características para polímeros semicristalinos do que para o ABS que é um copolímero amorfo. O estudo mostrou que a introdução de aditivos no ABS apresentou uma consequência maior nas propriedades do polímero do que o processo de reciclagem em si. Os testes realizados nas peças de ABS virgem e reciclado não mostraram diferenças significativas nas propriedades mecânicas avaliadas. A performance mecânica dessas peças é inferior às peças obtidas com filamentos de PLA, o que se deve principalmente à estrutura completamente amorfa do ABS e ao espaçamento entre as macromoléculas adjacentes (Pinho et al., 2020).

Karahaliou e Tarantili (2006) também analisaram o comportamento do ABS no formato de pellets após alguns ciclos de processamento. Na tentativa de simular o processo de reciclagem, o polímero foi submetido a cinco ciclos de extrusão em uma extrusora de dupla rosca. Os autores concluíram, assim como os pesquisadores citados anteriormente, que o processamento do material em cinco ciclos não afetou significativamente as características mecânicas do produto final, sendo observados valores de resistência à tração e módulo de Young praticamente constantes. A maior alteração durante o processamento desse material foi a coloração final do polímero devido à formação de produtos de oxidação (Karahaliou e Tarantili, 2006). Com isso, o material foi escurecendo, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10: Fotografias mostrando a mudança da coloração de pellets de ABS ao longo dos cinco ciclos de extrusão.



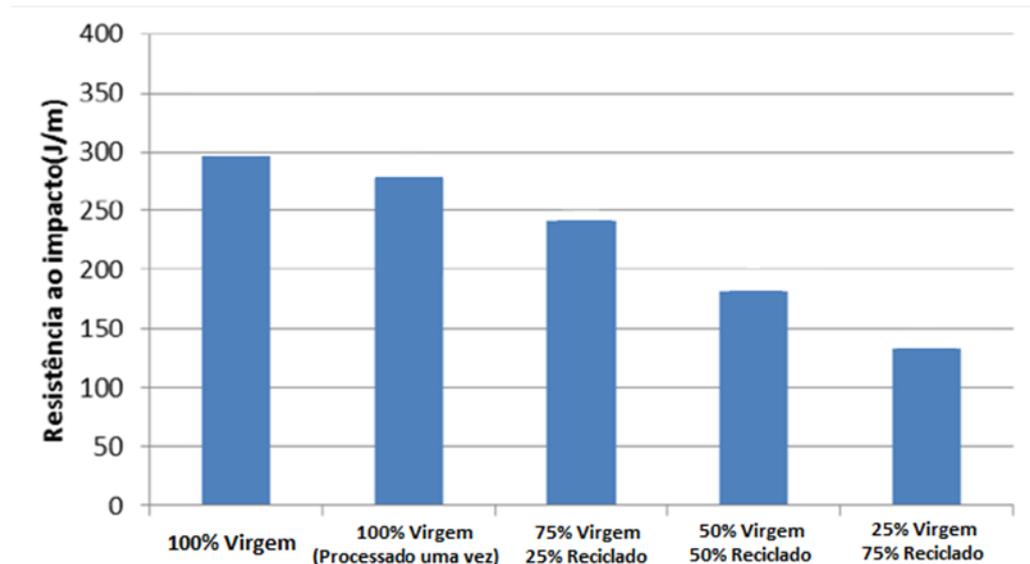
Fonte: Karahaliou e Tarantili (2006)

As propriedades mecânicas do ABS, após a sua reciclagem, também foram avaliadas por Paiva et al. (2015) através da produção de peças com diferentes proporções de material virgem e reciclado. Os materiais utilizados, tanto o virgem quanto o reciclado, foram comprados, sendo obtidos de fornecedores diferentes. Os grânulos comprados foram então processados na mesma máquina para a obtenção dos filamentos de 2,7 a 2,95 mm. Foram produzidas amostras com porcentagens de ABS reciclado variando de 0 % a 75 %, e ainda uma amostra de ABS virgem que foi processada mais uma vez na extrusora antes da impressão (Paiva et al., 2015).

Ao se reprocessar o ABS virgem, notou-se uma diminuição da resistência à tração, deformação, módulo de elasticidade e resistência ao impacto em relação à amostra virgem não reprocessada. Já nas amostras com ABS reciclado, ao aumentar o percentual desse material, percebe-se um aumento no módulo de elasticidade e uma diminuição na resistência ao impacto, como apresentado no gráfico da Figura 11. A

viscosidade das amostras, como já discutido em tópicos anteriores, diminuiu ao se adicionar mais material reciclado.

Figura 11: Resistência ao impacto de amostras com diferentes percentuais de ABS reciclado.



Fonte: Paiva et al. (2015)

Apesar das alterações encontradas em algumas propriedades mecânicas, a capacidade de processamento e utilização dos materiais para a impressão 3D foi mantida. Considerando-se que o custo destes filamentos com material reciclado podem ser reduzidos em até 37,5 % em relação ao filamento virgem, o estudo aponta a vantagem de se usar este material para a impressão de objetos 3D em usos domésticos ou até profissionais.

4.1.3 PEAD

Os filamentos de PLA e ABS dominam o mercado atualmente, logo a grande maioria dos estudos foca na análise destes dois polímeros mais populares. No entanto, estão surgindo pesquisas voltadas à utilização de outros polímeros para produção de filamentos reciclados como no estudo de Silva et al. (2019) que analisaram a possibilidade de se utilizar sacolas plásticas de polietileno de alta densidade (PEAD).

Devido à grande variação entre a composição de diferentes sacolas plásticas, a primeira etapa do estudo foi uma caracterização das mesmas, através das técnicas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TGA). Com isso, obtiveram-se os dados de temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão cristalina, entalpia de fusão e entalpia de cristalização, calor específico e cristalinidade. Além disso, pode-se monitorar a perda de massa em função da temperatura e tempo (Silva et al., 2019).

Após caracterização da matéria-prima, foi realizado o processamento das sacolas através da extrusão para a formação de filamentos. Com a adição de todos os pedaços de sacolas plásticas na extrusora e a fusão do material, obteve-se um filamento que, apesar de homogêneo, apresentou muitas variações de espessura, o que atrapalhou o seu processamento na impressora 3D, impossibilitando uma alimentação eficiente. Devido a isso, não foi possível avaliar as propriedades mecânicas do filamento impresso, mas a aparência do mesmo pode ser verificada na Figura 12.

Figura 12: Fotografias das sacolas coletadas (A); das sacolas após passarem pelo cilindro (B); dos filamentos após a extrusão (C); do teste na impressora (D); e do filamento processado pela impressora (E)



Fonte: Silva et al. (2019)

Os resultados positivos observados na maioria dos estudos de polímeros reciclados corroboram aquilo que é atualmente encontrado no mercado, visto que existem algumas empresas que vendem filamentos feitos de material reciclado.

Um exemplo é a PrintGreen3D, a primeira empresa nacional a produzir filamentos sustentáveis. Este processo é feito com o uso de matérias-primas como peças automotivas, resíduos eletrônicos e de impressão 3D, além da adição de alguns aditivos, que buscam deixar a formulação com as características de um filamento virgem (PrintGreen3D, 2021). Existem inclusive sites que comercializam filamentos e possuem uma sessão inteira dedicada apenas aos filamentos reciclados, oferecendo uma seleção de diversas marcas diferentes, como é o caso do comércio online espanhol “Impresoras3D.com”, que atua em toda a Europa (Impresoras3D.com, 2021).

4.2 Uso de biocompósitos

Na tentativa de tornar o processo de impressão 3D ainda mais sustentável, além da reciclagem de polímeros, uma solução para a redução do consumo de plásticos que vem sendo estudada é a utilização de biocompósitos para a produção de filamentos. Essa abordagem consiste na utilização de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos. A fibra natural, além de diminuir a porcentagem de plástico usada no compósito, serve para melhorar as propriedades físicas do material, formando um produto que pode substituir plásticos convencionais em diversas aplicações (Kumar et al., 2022).

Essas fibras naturais, muitas vezes provenientes de restos agrícolas, seriam normalmente descartadas, então além do benefício da redução de plástico tem-se também a vantagem da geração de um menor volume de lixo. Algumas dessas fontes de fibras são as cascas de arroz (Alaneme et al., 2013); cascas de amendoim (Guna et al., 2020); bambu (Binti et al., 2016); soja (Vinod et al., 2021); cinzas das caldeiras de processamento do óleo de palma (Rizal et al., 2020); algas (Albano et al., 2005); cascas de frutas cítricas (Ali et al., 2016); e várias outras formas de biomassa. Os testes realizados até então com todas essas fontes de fibras mencionadas tiveram resultados promissores, trazendo melhorias nas propriedades mecânicas quando comparadas às alternativas sintéticas. Existem ainda outras fontes de fibras sendo pesquisadas, como conchas de ostras (Li et al., 2020); e cascas de coco

(Sundarababu et al., 2021); por exemplo. As propriedades do biocompósito final são diretamente afetadas pelo processo de tratamento que a fonte de biomassa recebeu para a obtenção da fibra (Kumar et al., 2022).

A aplicação dos biocompósitos na manufatura aditiva não é apenas algo que está sendo estudado a nível acadêmico, mas algo que já pode ser encontrado atualmente no mercado. Existem várias alternativas de filamentos disponíveis para comprar, por exemplo: o *FilaSoy*, feito de casca de soja; o *Algix* da marca *3DFuel* e o *SeaWeed*, feitos de algas; o *Laywood*, que utiliza 40 % de fibras de madeira na sua composição; e ainda outras alternativas que utilizam plásticos biodegradáveis, como o *WoodFill* e o *BambooFill* da empresa *ColorFabb* com, respectivamente, 70 % de PLA e 30 % de fibra de madeira, e 50 % de PLA e 50 % de fibra de bambu (Aniwa, 2021).

Park et al. (2020) testaram as propriedades mecânicas de filamentos elaborados com pellets do biocompósito de policarbonato chamado *Durabio*, da marca *Mitsubishi Chemical*, que usa na sua formulação isossorbida proveniente do sorbitol, encontrado naturalmente em diversas frutas. Para medir e comparar as propriedades mecânicas foram impressas três peças de quatro materiais diferentes, sendo eles PLA, ABS, policarbonato de fontes fósseis e o biocompósito de policarbonato. Neste estudo, foram realizados ensaios de tração e flexão a fim de verificar as propriedades mecânicas das peças impressas. Em todos os testes realizados, as peças de biocompósito de policarbonato apresentaram os melhores resultados entre os quatro materiais, tendo a maior resistência à tração, alongamento e módulo de Young. Além das vantagens mecânicas, as peças feitas com o *Durabio* apresentaram emissões de compostos voláteis mais baixas do que aquelas observadas para os outros materiais, e uma emissão de partículas ultrafinas não detectável, tornando este filamento o mais atrativo para o uso doméstico (Park et al., 2020).

Buscando unir as vantagens dos biocompósitos com outras alternativas sustentáveis, Maldonado-Garc et al. (2021) desenvolveram uma pesquisa com um filamento composto por plásticos reciclados removidos do oceano e carbono obtido pela pirólise de cascas de soja. Fazendo isso, várias soluções ambientais são aplicadas simultaneamente, a quantidade de plástico usada em filamentos é reduzida, o plástico presente nos oceanos, que é um dos maiores problemas ambientais da

atualidade, é removido do ambiente marítimo e reutilizado, e as cascas de soja, que seriam descartadas, encontram um melhor destino. Para realizar os testes, o plástico foi comprado da empresa *Oceanworks*, que trabalha com uma rede global de coletores para remover plástico do oceano e reciclá-lo (Oceanworks, 2021). O filamento criado pela mistura de 80 % de plástico reciclado (70 % de PEAD e 30 % de PP) com 20 % do carbono resultou em peças impressas por manufatura aditiva com ótimas propriedades mecânicas e reológicas (Maldonado-García et al., 2021).

4.3 Outras iniciativas

A iniciativa de se retirar plásticos do oceano para criar filamentos não é limitada a grandes empresas e aos estudos que desenvolvem biocompósitos. Um projeto na Escócia buscou engajar as comunidades de cidades costeiras para recolher plásticos presentes na praia e usar eles para a impressão 3D. Realizando visitas nas praias com crianças e adolescentes, estes restos de plástico descartados foram coletados e posteriormente transformados em quaisquer objetos que os jovens desejassem, usando esse incentivo pessoal para ensinar. Através desse programa eles foram conscientizados sobre os problemas ambientais que o descarte incorreto de polímeros causa e começaram a pensar sobre todo o plástico descartado que poderia ser usado para fins de impressão 3D. Esse é um modelo que pode muito facilmente ser replicado em outras cidades costeiras, para que o uso do plástico seja reduzido e não chegue até o oceano (Vones et al., 2018).

Programas como o mencionado anteriormente também podem inspirar as pessoas a usarem esse tipo de solução a nível domiciliar. A possibilidade de se reciclar plástico em casa para imprimir novos objetos tem um grande potencial de reduzir a quantidade desse material que é descartado pela população. Com a liberdade de se ter uma extrusora de filamento de bancada, como o modelo *ProtoCycler* da marca canadense *ReDeTec*, qualquer um pode desenvolver novos objetos à base de termoplásticos que acabariam, possivelmente, em aterros ou largados no meio ambiente (ProtoCycler, 2021). Com o tempo, isso resulta em vantagens financeiras e ambientais, eliminando a necessidade da compra de filamentos de plástico virgem.

5 Conclusão

No presente trabalho foi proposta a análise de iniciativas sustentáveis relacionadas ao uso da impressão 3D. Foram elencadas diferentes estratégias e estudos com fins distintos, como o reaproveitamento de filamentos, desenvolvimento de novos materiais, e programas e projetos de conscientização. A análise do uso de filamentos feitos de polímeros reciclados mostrou que, na maioria dos casos, as propriedades mecânicas não sofreram um grande prejuízo em relação àquelas dos polímeros virgens, tornando esse processo algo bastante benéfico sob o ponto de vista ambiental. Porém, a viscosidade dos materiais quase sempre sofreu uma redução, o que dificulta o processo da impressão 3D por Manufatura de Fusão e Deposição por irregularidade do fluxo de escoamento do filamento derretido. Esse fato justifica a necessidade do desenvolvimento de compósitos que aumentem a viscosidade do material reciclado, principalmente biocompósitos, que trazem uma maior vantagem sob o ponto de vista de sustentabilidade.

Existe, na maioria dos casos, uma grande preocupação por parte dos estudos atuais em relação às propriedades mecânicas dos filamentos reciclados, mas não com os impactos ambientais que a impressão 3D em geral causa. Os estudos sobre o comportamento de filamentos de plástico reciclados ainda se concentram muito sob o PLA e o ABS, sendo necessária a avaliação de outros possíveis materiais concorrentes, como garrafas e tampas plásticas, que representam uma grande parcela dos plásticos usados atualmente e que acabam em lugares impróprios como o oceano. Os filamentos de biocompósitos ainda são minoria nesses estudos, tendo-se percebido um aumento no interesse sobre esse assunto apenas nos últimos anos. Atualmente, algumas empresas estão trabalhando com filamentos biodegradáveis feitos de polímeros e fibras provindos da biomassa ou resíduos agroindustriais. Diante deste cenário, percebe-se uma vasta possibilidade de estudos nesta área; sugere-se a caracterização de diferentes resíduos agrícolas de fontes locais para esse fim.

Além dos estudos elencados, outro ponto interessante é que a impressão 3D possui bancos de dados com desenhos dos mais variados tipos de protótipos, o que permite que um determinado bem (protótipos de equipamentos, próteses) possa ser produzido em partes remotas do globo terrestre, reduzindo, assim, emissões de

poluentes ocasionados pelo transporte do material/produto, além do tempo relacionado à logística.

Apesar das iniciativas que visam um melhor uso dos filamentos e/ou produção de filamentos advindos de materiais renováveis de baixo custo, a grande variabilidade das tecnologias de impressão 3D e os materiais utilizados nas mesmas faz com que ainda não se tenha um consenso sobre a sustentabilidade deste processo, visto que o impacto ambiental gerado também varia para cada uma delas. É preciso avaliar o ciclo de vida completo das peças impressas por manufatura aditiva em comparação às peças manufaturadas por tecnologias tradicionais, não sob um aspecto puramente econômico, mas sim incluindo impactos ambientais e sociais. A economia circular e a existência de empresas que recebem plástico para a produção de filamentos reciclados também ainda é pouco explorada, sem existir uma grande bibliografia sobre a análise do impacto que toda essa logística de transporte envolve.

6 Referências bibliográficas

3D FILA. **Quantos metros de filamento tem em um carretel para impressora 3d?**

Disponível em: <<https://3dfila.com.br/quantos-metros-de-filamento-tem-em-um-carretel/>>. Acesso em: 2 out. 2021.

3DLAB. **Impressora 3D SLA: entenda tudo sobre essa tecnologia.** Disponível em: <<https://3dlab.com.br/impressora-3d-sla/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

3DLAB. **Glossário de impressão 3D: 42 termos que precisa conhecer.** Disponível em: <<https://3dlab.com.br/glossario-de-impressao-3d/>>. Acesso em: 6 nov. 2021b.

3DNATIVES. **ProtoCycler; a recycling system for your 3D printer.** Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/protocycler-recycling-system-3d-printer-3d-prints-plastic-waste-151120185/#!>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

3DSOURCED. **Material Jetting (PolyJet) 3D Printing: Everything You Need To Know.** Disponível em: <<https://www.3dsourced.com/guides/polyjet/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

AL-DULIMI, Z.; WALLIS, M.; TAN, D. K.; et al. 3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications. **Drug Discovery Today**, v. 26, n. 2, p. 360–383, 2021.

ALANEME, K. K.; AKINTUNDE, I. B.; OLUBAMBI, P. A.; et al. Fabrication characteristics and mechanical behaviour of rice husk ash – Alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 1, p. 60–67, jan. 2013.

ALBANO, C.; KARAM, A.; DOMÍNGUEZ, N.; et al. Thermal, mechanical, morphological, thermogravimetric, rheological and toxicological behavior of HDPE/seaweed residues composites. **Composite Structures**, v. 71, n. 3–4, p. 282–288, 1 dez. 2005.

ALI, A.; AMBREEN, S.; MAQBOOL, Q.; et al. Zinc impregnated cellulose nanocomposites : Synthesis , characterization and applications. **Journal of Physical and Chemistry of Solids**, v. 98, p. 174–182, 2016.

ALL3DP. **Best 3D Printers in 2021 – Buyer’s Guide.** Disponível em: <<https://all3dp.com/1/best-3d-printer-reviews-top-3d-printers-home-3-d-printer-3d/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

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.

ANIWAA. **Best resin 3D printers in 2021 - SLA, DLP, and LCD**. Disponível em: <<https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/the-best-resin-3d-printer-sla-and-dlp/>>. Acesso em: 6 nov. 2021a.

ANIWAA. **Eco-friendly 3D filament guide - what are the possibilities and innovations**. Disponível em: <<https://www.aniwaa.com/guide/am-materials/eco-friendly-3d-filament/>>. Acesso em: 1 nov. 2021b.

ASIF, M.; LEE, J. H.; LIN-YIP, M. J.; et al. A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer. **Additive Manufacturing**, v. 23, n. August, p. 355–361, 2018.

BEAMPLER. **DMLS 3D Printing**. Disponível em: <<https://www.beamler.com/3d-printing-capabilities/processes/dmls-direct-metal-laser-sintering/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

BHATIA, A.; SEHGAL, A. K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2021.

BHUSHAN, B.; CASPERS, M. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. **Microsystem Technologies**, v. 23, n. 4, p. 1117–1124, 2017.

BINTI, R.; TAKAGI, H.; NORIO, A. Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf , bamboo and coir fibers. **Industrial Crops & Products**, v. 94, p. 562–573, 2016.

BRASIL ESCOLA. **IMPRESSORA 3D PRUSA MENDEL i2**. Disponível em: <<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/computacao/impressora-3d-prusa-mendel-i2.htm>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

BYRLEY, P.; GEER WALLACE, M. A.; BOYES, W. K.; et al. Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. **Science of the Total Environment**, v. 736, p. 139604, 2020.

COAKLEY, M.; HURT, D. E. 3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware. **Journal of Laboratory Automation**, v. 21, n. 4, p. 489–495, 2016.

CONSTRUCTION SPECIFIER. **Germany's first 3D-printed building is now under construction**. Disponível em: <<https://www.constructionspecifier.com/germanys-first-3d-printed-building-is-now-under-construction/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

DAVIS, A. Y.; ZHANG, Q.; WONG, J. P. S.; et al. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers. **Building and Environment**, v. 160, n. March, p. 106209, 2019.

ENGIPRINTERS. **As 5 Melhores Impressoras 3D Nacionais**. Disponível em:

<<https://engprinters.com.br/as-5-melhores-impressoras-3d-nacionais/>>. Acesso em: 31 out. 2021.

EVANS, B. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*. 2012.

FILIFELOP. **Impressora 3D Ender 3 Pro - Creality no Brasil**. Disponível em: <<https://www.filifelep.com/produto/impressora-3d-creality-ender-3-pro/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

FORMLABS. **SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers**. Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

GAO, H.; ZHANG, W.; YU, Z.; et al. Emerging Applications of 3D Printing in Biomanufacturing. **Trends in Biotechnology**, v. xx, n. xx, p. 1–3, 2021.

GODOI, F. C.; PRAKASH, S.; BHANDARI, B. R. 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. **Journal of Food Engineering**, v. 179, p. 44–54, 2016.

GRAMES, E. **What is FDM 3D Printing?** Disponível em: <<https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

GTMAX3D. **Impressoras 3D**. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/?gclid=Cj0KCQjw_filBhDOARIsAF4khR2GrNRo85q4tTTR0lwyeL7Ut0h5SuNBwMsOPPcra223z6F_jZTPgbkaAnBaEALw_wcB>. Acesso em: 31 out. 2021.

GUNA, V.; ILANGOVAN, M.; RATHER, M. H.; et al. Groundnut shell / rice husk agro-waste reinforced polypropylene hybrid biocomposites. **Journal of Building Engineering**, v. 27, n. April 2019, p. 100991, jan. 2020.

HULL, C. W. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereo Thography. **Patent**, n. 19, p. 16, 1986.

IMPRESORAS3D.COM. **Filamento reciclado para impressora 3D**. Disponível em: <<https://www.impresoras3d.com/pt/filamento/reciclado/>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

KALKAL, A.; KUMAR, S.; KUMAR, P.; et al. Recent advances in 3D printing technologies for wearable (bio)sensors. **Additive Manufacturing**, v. 46, n. May, p. 102088, 2021.

KARAHALIOU, E.-K.; TARANTILI, P. A. Stability of ABS Compounds Subjected to Repeated Cycles of Extrusion Processing. **Society**, p. 1–10, 2006.

KUMAR, S. N.; JAIN, R.; ANAND, K.; et al. Utilization of Agro Waste for the

Fabrication of Bio Composites and Bio plastics---Towards a Sustainable Green Circular Economy. In: SANDHU, K. et al. (Eds.). . **Sustainability for 3D Printing**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 131–147.

LANZOTTI, A.; MARTORELLI, M.; MAIETTA, S.; et al. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA.

Procedia CIRP, v. 79, p. 143–146, 2019.

LEAPFROG 3D PRINTERS. **3D Printer Filament Types and Uses**. Disponível em: <<https://www.lpfrg.com/guides/3d-printer-filament-types/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

LI, Y.; HUANG, P.; GUO, S.; et al. A promising and green strategy for recycling waste oyster shell powder as bio-filler in polypropylene via mycelium-enlightened interfacial interlocking. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122694, 1 nov. 2020.

LIPTON, J. I. Printable food: the technology and its application in human health.

Current Opinion in Biotechnology, v. 44, p. 198–201, abr. 2017.

MAIS POLÍMEROS. **Plástico ABS: O que é, Composição, Características, Aplicações e mais!** Disponível em:

<<http://www.maispolimeros.com.br/2018/09/24/plastico-abs-e-suas-principais-caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 31 out. 2021.

MALDONADO-GARCÍA, B.; PAL, A. K.; MISRA, M.; et al. Sustainable 3D printed composites from recycled ocean plastics and pyrolyzed soy-hulls: Optimization of printing parameters, performance studies and prototypes development. **Composites Part C: Open Access**, v. 6, p. 100197, out. 2021.

MALLAKPOUR, S.; TABESH, F.; HUSSAIN, C. M. 3D and 4D printing: From innovation to evolution. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 294, n. June, p. 102482, 2021.

MASUTANI, K.; KIMURA, Y. Chapter 1 PLA Synthesis. From the Monomer to the Polymer. In: **Poly(lactic acid) Science and Technology: Processing, Properties, Additives and Applications**. [s.l.] The Royal Society of Chemistry, 2015. p. 1–36.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, n. December 2017, p. 172–196, 2018.

OCEANWORKS. **About Oceanworks**. Disponível em:

<<https://oceanworks.co/pages/about-oceanworks>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

OLIVEIRA-SANTOS, M.; OLIVEIRA SANTOS, E.; MARINHO, A. V.; et al. Patient-specific 3D printing simulation to guide complex coronary intervention. **Revista**

- Portuguesa de Cardiologia (English Edition)**, v. 37, n. 6, p. 541.e1-541.e5, 2018.
- ORTHOPEDECS THIS WEEK. Custom 3D Printer Used to Print Living Tissue.** Disponível em: <<https://ryortho.com/breaking/custom-3d-printer-used-to-print-living-tissue/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.
- PAIVA, D. A. .; SOUZA, E. W.; FERREIRA, A. C. B.; et al. Compostos de abs virgem e reciclado para impressão em 3d. **13° Congresso Brasileiro de Polímeros**, v. 1, n. January, p. 3–7, 2015.
- PARK, S. J.; LEE, J. E.; LEE, H. B.; et al. 3D printing of bio-based polycarbonate and its potential applications in ecofriendly indoor manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 31, n. July 2019, p. 100974, 2020.
- PEINADO, V.; CASTELL, P.; GARCÍA, L.; et al. Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of a reinforced poly(lactic acid): Reprocessing and recycling of biobased materials. **Materials**, v. 8, n. 10, p. 7106–7117, 2015.
- PINHO, A. C.; AMARO, A. M.; PIEDADE, A. P. 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components. **Waste Management**, v. 118, p. 426–434, 2020.
- PRINTGREEN3D. **Filamentos Sustentáveis - Nosso Processo.** Disponível em: <<https://www.printgreen3d.com.br/>>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- PROTO3000. **PolyJet High Resolution 3D Printing Technology.** Disponível em: <<https://proto3000.com/service/3d-printing-services/technologies/polyjet/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.
- RAISE3D. **All-in-One IDEX Desktop 3D Printer.** Disponível em: <<https://www.raise3d.com/products/e2/>>. Acesso em: 6 nov. 2021.
- RIFKIN, J. The Third Industrial Revolution: How the internet, green electricity, and 3-D printing are ushering in a sustainable era of distributed capitalism. **World Financial Review**, p. 1–8, 2012.
- RIZAL, S.; FIZREE, H. M.; HOSSAIN, S.; et al. The role of silica-containing agro-industrial waste as reinforcement on physicochemical and thermal properties of polymer composites. **Heliyon**, v. 6, n. December 2019, p. e03550, 2020.
- RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, A. G.; CHIODONI, A.; BOCCHINI, S.; et al. 3D printer waste, a new source of nanoplastic pollutants. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 1–9, 2020.
- SILVA, L. N. DA; MOMBACH, S. I.; ROCHA, T.; et al. Avaliação da viabilidade da obtenção de filamento para impressora 3D a partir de polietileno reciclado.

Engenharia no Século XXI - Volume 5, v. 5, p. 37–56, 2019.

SIN, L. T.; TUEEN, B. S. Polylactic Acid: A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA. **Plastics Design Library, Polylactic Acid**, 1 jan. 2019.

SINGAMNENI, S.; BEHERA, M. P.; TRUONG, D.; et al. Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 936–949, 2021.

SUNDARABABU, J.; ANANDAN, S. S.; GRISKEVICIUS, P. Evaluation of mechanical properties of biodegradable coconut shell/rice husk Powder polymer composites for light weight applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 1241–1247, 1 jan. 2021.

TECHRADAR. **Best 3D printer of 2021: top choices for work and home use**.

Disponível em: <<https://www.techradar.com/best/best-3d-printers>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

VINOD, A.; SANJAY, M. R.; SIENGCHIN, S.; et al. Fully bio-based agro-waste soy stem fiber reinforced bio-epoxy composites for lightweight structural applications : Influence of surface modification techniques. **Construction and Building Materials**, v. 303, n. August, p. 124509, 2021.

VONES, K.; ALLAN, D.; LAMBERT, I.; et al. 3D-printing ‘Ocean plastic’—Fostering childrens’ engagement with sustainability. **Materials Today Communications**, v. 16, n. April, p. 56–59, 2018.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; et al. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites Part B: Engineering**, v. 110, p. 442–458, 2017.

YANAR, N.; KALLEM, P.; SON, M.; et al. A New era of water treatment technologies: 3D printing for membranes. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 91, p. 1–14, 2020.

ZHANG, C. Biodegradable Polyesters: Synthesis, Properties, Applications. In: **Biodegradable Polyesters**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. p. 1–24.