



DESENVOLVIMENTO DE UMA EXTRUSORA DE FILAMENTO PET PARA IMPRESSÃO 3D

SARAH EVEN OLIVEIRA BARBOSA FERNANDES

RESUMO

O consumo de plástico gera grande preocupação mundial, sendo pauta de discussões sobre seu uso consciente e reaproveitamento. Uma das formas de reduzir a quantidade de plástico descartada e seu impacto no meio ambiente é através da reciclagem. O polímero termoplástico PET (Polietileno tereftalato), comumente modificado com Glicol, pode ser utilizado como matéria-prima de filamentos para impressoras 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*). Com o intuito de reduzir resíduos produzidos, este trabalho desenvolveu um sistema de extrusão com controle de temperatura para reciclagem de garrafas PET e criação de filamentos para impressoras 3D. Sua estrutura mecânica foi modelada e impressa por Impressora 3D, dividindo-se em três partes principais: filetador, bobinador e carretel de Filamento. Seu esquema elétrico foi projetado para aquecer o bico extrusor até a temperatura de 220°C para a extrusão do PET reciclado utilizando Controle PID em malha fechada e alimentar um motor de passo para movimentar o bobinador para puxar o filamento extrudado com controle de um potenciômetro em malha aberta, a partir da programação de um Arduino Nano. O projeto foi concluído com êxito. Foram feitos 6 testes com 5 garrafas diferentes, alcançando o resultado de produção de 62 gramas de filamento a partir de garrafas PET de 1.5 litros e 2 litros, porém a qualidade do filamento não atendeu totalmente aos padrões para impressão 3D em impressoras FDM devido à variabilidade das garrafas PET. Velocidades de produção mais baixas foram consideradas mais adequadas, mas ainda resultaram em filamentos com formato achatado, devido ao arqueamento do filete durante a produção, o que pode afetar a qualidade de impressões 3D. O custo total do projeto foi de aproximadamente R\$ 513,15, contando com os custos de material das peças modeladas e filamentos e impressão das estruturas.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Reciclagem; Termoplásticos; Filamentos; Controle.

1 INTRODUÇÃO

Desde seu surgimento no século XIX, o plástico faz parte da vida cotidiana das pessoas, ele está presente em casa, no trabalho, no transporte, na alimentação. Graças a sua versatilidade, leveza, baixa temperatura de trabalho e principalmente seu preço, os polímeros possuem grandes vantagens sobre materiais como os metais e com isso, seu consumo aumentou cada vez mais com o tempo.

Atualmente, o mercado de plástico é colossal, porém, apesar de ser um material amplamente utilizado na sociedade, sua taxa de reaproveitamento ainda é limitada. Estima-se que já foram produzidos no mundo cerca de 9 bilhões de toneladas de plásticos, sendo o Brasil o quarto maior produtor mundial de plástico. Torna-se preocupante que desse montante, cerca de dois terços já foram descartados e somente cerca de 10% foram reciclados ou reutilizados em outras funções. (CONCEIÇÃO et al., 2019)

Graças a sua baixa degradabilidade, os plásticos permanecem na natureza por cerca de 450 a 500 anos, causando tanto poluição visual quanto química no ambiente. Por isso, a redução do impacto dos plásticos e o gerenciamento dos resíduos torna-se imperativa. (XAVIER et al., 2006).

Devido a demandas exigentes das empresas com relação aos custos de produção e resíduos produzidos no meio ambiente, a reciclagem de plástico é crescente no Brasil. Uma dessas demandas é a Lei no 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dispõe diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos que devem ser cumpridas por empresas públicas e privadas. Abrange a gerência de resíduos industriais, de construção civil, agropecuários, de saúde, domiciliares, saneamento público, e até os perigosos. Também apresenta soluções no gerenciamento de resíduos como reciclagem, redução, coleta seletiva, educação sanitária e ambiental e logística reversa. (BRASIL, 2010).

Essas empresas ganham incentivos para o cumprimento dessas soluções e além de terem reduções de recursos, evitando multas e sanções, otimizam sua imagem no mercado e auxiliam na preservação ambiental. Instituições que promovem a logística reversa encontram cada vez mais mecanismos para a reciclagem de resíduos. Muitas delas conciliando o reaproveitamento de plásticos com a tecnologia da Manufatura aditiva da Impressão 3D. Sendo o PET considerado o plástico mais utilizado do mundo, sendo comumente empregado na fabricação de garrafas de bebidas, porém também encontrado em fibras, materiais de construção civil devido sua alta resistência mecânica, o PET pode ser reciclado para ser utilizado como matéria-prima de filamentos usados em impressão 3D. (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)

O PET bruto não é utilizado com frequência como matéria-prima de filamentos. Seu derivado modificado com glicol PETG aumenta a performance do material, tornando-o mais claro, durável e flexível. Ambos são boas opções para filamentos como um meio termo entre o PLA e o ABS, com facilidade de impressão, resistência e não produzem fumaça ou odores fortes. (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)

Há diversos trabalhos desenvolvidos nesse campo para o desenvolvimento de extrusoras para fabricação de filamentos reciclados de vários materiais, focados em obter a maior qualidade desses filamentos e o menor custo a fim de obter nível competitivo e comercial. Neste contexto, este projeto visa a construção de uma extrusora para reciclagem de PET, em especial oriundo de garrafas, para a fabricação de filamentos de impressoras 3D do tipo FDM de forma automatizada com intuito educacional. Estes filamentos são normalmente produzidos utilizando materiais virgens, porém, considerando que defeitos de fabricação de peças são comuns e após a impressão, a peça é descartada como um bem de consumo, o impacto ecológico desses materiais também pode ser reduzido utilizando materiais reciclados para esse meio. Além de proporcionar uma redução do consumo de matéria prima virgem e economia de energia, o reaproveitamento dos resíduos contribui para a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável. (FERREIRA, 2020)

A obtenção dos filamentos reciclados de baixo custo também auxilia em aplicações dentro de uma universidade, para o fomento de novas pesquisas, oportunidade de aprendizado educacional e aumento do interesse dos alunos em áreas de tecnologia, em especial a manufatura aditiva.

Então, o objetivo geral do trabalho seria: Desenvolver uma extrusora para reciclagem de PET para a fabricação de filamentos de impressoras 3D do tipo FDM. Os objetivos específicos para o desenvolvimento são: Realizar um estudo bibliográfico do tema; Desenvolver o projeto de um equipamento filetador para reciclagem de garrafas PET; Manufaturar o projeto de um equipamento extrusor de filamentos; Construir uma estrutura mecânica de baixo custo e fácil manutenção, capaz de realizar a extrusão do material; Projetar um esquema elétrico que controle a estrutura mecânica; Desenvolver o controle de temperatura

para o bico extrusor capaz de fundir o PET em filamento; Programar o controle para funcionamento conjunto do equipamento extrusor e filetador, tornando o processo o mais automatizado possível; Extrudar o filamento com o material reciclado e testar as partes fabricadas em uma impressão 3D.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O progresso do projeto foi dividido em etapas definidas a partir de sua construção, onde são apresentados os materiais, instrumentos e métodos que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho: Desenvolvimento da Estrutura Mecânica, Desenvolvimento da Estrutura Elétrica, Implementação do Controle, Testes de Fabricação de Filamento e Testes de Impressão com o Filamento Produzido.

A estrutura mecânica do projeto será composta por três partes principais para o funcionamento do sistema: Filetador, responsável por cortar as garrafas em filete com tamanho adequado (5 mm) para fabricação do filamento; o Carretel de Filete, responsável por armazenar o filete cortado; e o Bobinador, um conjunto de peças responsável por puxar o filamento extrudado pelo bico e coletado em um carretel. Outras estruturas auxiliares foram modeladas no *software* “NX Siemens” durante o desenvolvimento do projeto como um suporte e apoio para o Bico Extrusor devido ao aquecimento do mesmo e para alinhamento das estruturas de Bobinador e Carretel.

Para a estrutura elétrica do projeto, o circuito elétrico consiste em alimentar cinco dispositivos principais: Arduino, bico extrusor, motor de passo, ventilador e display LCD. O esquemático do circuito foi feito na plataforma *online* gratuita *EasyEDA* e o circuito físico foi soldado e testado em uma placa universal perfurada.

A temperatura e a velocidade do processo de extrusão do filamento são as variáveis de controle mais importantes do projeto, assim como sua relação. Para o controle de temperatura, foi utilizado o PID para calcular um sinal de controle que ajusta a potência do bloco aquecedor com o objetivo de manter a temperatura medida o mais próximo possível da desejada no sistema. O ajuste é feito através dos parâmetros K_p , K_i e K_d , que influenciam nas características da resposta, na estrutura clássica de um controlador tipo PID. Para o controle de Velocidade do Bobinador que puxa o filete pelo bico extrusor para fabricar o filamento, foi utilizado o motor de passo NEMA 17, o qual foi acoplado na base do bobinador para o giro das engrenagens e o transporte do filamento para o carretel. Para fazer a determinação da velocidade e direção do motor, foi utilizado um potenciômetro cuja posição é mapeada e lida pelo microcontrolador *Arduino*.

Um *display* LCD mostrar tanto o valor de temperatura medida no sensor de temperatura do bloco aquecedor quanto o valor de velocidade do motor a partir da variação de tensão que o potenciômetro controla.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

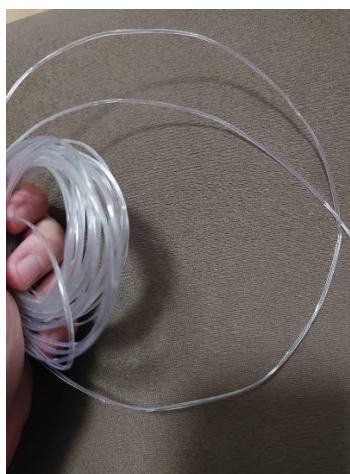
Antes da realização dos testes do processo de extrusão do filamento, as garrafas foram higienizadas, de forma que o rótulo foi retirado e a cola residual foi raspada para não interferir no filamento. O corte da garrafa com o filetador é um processo rápido se realizado em uma base fixa para o esforço necessário, dependendo da situação, pode ser necessário uma pessoa para segurar a base. O pré-aquecimento do bloco aquecedor antes da extrusão também é necessário para o processo, o bico extrusor começa a aquecer assim que o projeto inicia e a ponta do filete deve ser cortada em até 2 mm para a passagem através do bico. Ao chegar na temperatura de 220°C, o processo de extrusão pode ser iniciado e o filamento é preso na garra do bobinador. O protótipo final do projeto pode ser visualizado na figura 1:

Figura 1: Protótipo Final do Projeto



Foram feitos seis testes na Extrusora de Filamento com cinco tipos de garrafas diferentes: Garrafas de Suco, Refrigerante e Água. Os primeiros três testes serviram com o propósito de definir a velocidade apropriada para a extrusão, além de um teste separado para verificar a qualidade da estrutura do Filetador. Sem a utilização do filetador, com o corte manual das garrafas, o filete apresentou pontas devido ao desvio do corte e diferença de largura, resultando em um filamento de baixa qualidade, como apresentado na figura 2:

Figura 2: Filamento quebrado



Com a utilização do filetador, para os testes seguintes, o filete não apresentou pontas, resultando em um filamento sem falhas de tamanho, com formato circular e sem “espinhos”, um filamento com forma apropriada, como apresentado na figura 3. Porém devido aos resíduos de cola restantes na superfície das garrafas, alguns filamentos apresentaram manchas ao longo do seu corpo.

Figura 3: Filamento adequado



Para velocidades maiores que 3.5 mm/s, o filamento possui um formato curvado espinhoso, sem tempo suficiente para o PET se fundir em um formato circular, o filamento ficou rígido e com dobras. Para velocidades abaixo desta, o filamento produzido apresenta formato circular e tamanho consistente. Para reunir os resultados obtidos da realização dos testes de extrusão de forma resumida, foi elaborado a Tabela 1:

Tabela 1: Resultados dos testes de produção de filamento

Teste	Garrafa utilizada	Qtd. Filete	Tempo de Extrusão	Vel. de Extrusão	Qtd. de Filamento
1	Guaraná (2 litros)	-	-	-	-
2	Del Valle (1.5 litros)	15 gramas	25 minutos cada	3.3 mm/s e 4mm/s	14 gramas
3	Fanta (1.5 litros)	16 gramas	30 minutos	3.3 mm/s	14 gramas
4	Coca-cola (2 litros)	18 gramas	33 minutos	3.3 mm	17 gramas
5	Coca-cola (2 litros)	18 gramas	1 hora e 30 minutos	1.7 mm/s	17 gramas
6	Água Crim (2 litros)	18 gramas	2 minutos	3.3 mm/s	-

Os filamentos de impressora 3D FDM são os principais insumos utilizados na impressão 3D, por isso foi feito o teste final do filamento produzido onde ele foi utilizado na impressão de um modelo 3D para verificação da qualidade. Foram realizados dois tipos de testes com o filamento: Impressão com Caneta de Impressão a mão livre e Impressão com Impressora de Bancada.

Para a caneta de impressão, os filamentos foram impressos com temperatura de 235 °C com Mesa de Impressão em temperatura ambiente. As impressões foram feitas de forma dinâmica resultando em peças simples, com camadas desregulares, estrutura desalinhada, “gaps” e sem acabamento, como mostrado na figura 5. Apesar da qualidade das peças, o filamento não apresentou problemas na fabricação dos modelos, sem apresentação de manchas.

Figura 4: Impressões com Caneta de Impressão



Para as impressoras de bancada, os filamentos foram impressos com temperatura de 245

°C com mesa de Impressão com temperatura de 75 °C. Houve uma dualidade entre as impressões, pois enquanto algumas foram impressas sem problemas, com bom acabamento e sem falhas, algumas tiveram erro de subextrusão, como mostrado na figura 6. Esse erro é muito comum em impressoras que possuem sensor inteligentes de fluxo, que captam diferenças no filamento.

Figura 5: Impressão não finalizada



A causa pode ser diversos fatores como a velocidade ou a temperatura de extrusão, diâmetro do filamento, o fluxo de filamento ou o bico extrusor obstruído. No caso, o fluxo estava sendo interrompido pois mesmo que o diâmetro obtido do filamento estivesse dentro do parâmetro, utilizando uma velocidade de 1.7 mm/s, não é possível evitar que o filete assumia um formato arqueado. Dependendo da forma como o filete se arranja no bico, ele se dobra para ser extrusado, mantendo a largura correta do bico, porém sem a altura correta.

Os resultados dos testes de impressão podem ser visualizados de forma resumida na Tabela 2:

Tabela 2: Resultados Testes de Impressão

Tipo de Impressão	3D Printing Pen	Impressora Sethi 3DS4X	Impressora GTMAX 3D H5
Adesão a mesa	Ótimo	Bom	Bom
Temperatura Hot-end	235°C	245°C	245°C
Temperatura Mesa	25°C	75°C	75°C
Tempo de Impressão	6 minutos	10 minutos	1º 8 minutos 2º 35 minutos
Extrusão	Fluxo Uniforme	Fluxo Uniforme	Subextrusão
Camadas	Desreguladas e com falhas	Uniforme	Subextrusão
Vel. de Impressão	≈ 15 mm/s	60 mm/s (80%)	60 mm/s (80%)
Qualidade das peças	Baixa	Ótima	Boa - base queimada e subextrusão

4 CONCLUSÃO

Considerando que o projeto alcançou o status onde foi possível a fabricação de filamento a partir de garrafas PET, pode-se considerar que este trabalho foi parcialmente um sucesso.

A fabricação requer um controle do processo de reciclagem e cuidados na preparação

do PET pois ele pode conter impurezas como resíduos de cola, rótulos e outros contaminantes que precisam ser removidos através de limpeza e purificação.

Em sistemas onde a velocidade e a temperatura são variáveis relacionadas, sua interação deveria ser estudada com mais cuidado através da validação e teste para garantia da qualidade final. A largura e espessura do filete de PET, a velocidade de extrusão e temperatura do bico extrusor não são variáveis constantes e suas combinações precisam ser testadas para estudo da performance e desenvolvimento de um controle robusto que funcione conforme o esperado em uma variedade de condições operacionais, o que infelizmente não foi possível de realizar neste projeto por levar tempo.

Conclui-se que velocidades menores que 2 mm/s são as mais indicadas para a fabricação do filamento, pois a força de tração do bobinador não afetará de forma prejudicial o formato do filamento produzido.

REFERÊNCIAS

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2010. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12305&ano=2010&ato=e3dgXUq1keVpWT0f1>>.

CONCEIÇÃO, M. M. et al. O plástico como vilão do meio ambiente. *Revista Geociências - UNG-Ser*, v. 18, n. 1, p. 50–53, 2019.

FERREIRA, F. F. Estudo e desenvolvimento de filamento de pet reciclado para impressoras 3d fdm. 2020

XAVIER, L. H. et al. Legislação ambiental sobre destinação de resíduos sólidos: o caso das embalagens plásticas pós-consumo. XIII Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP Bauru, p. 1–11, 2006.