

# Dispositivo para geração de filamento para impressoras 3D a partir de materiais recicláveis

ÉVERTON RAFAEL BREITENBACH\*

LUCAS STOLASKI†

## Resumo

O descarte de polímeros tem causado sérios danos ambientais e há o crescente emprego destes materiais na tecnologia de Manufatura Aditiva (MA), bem como insumos utilizados nesta modalidade de manufatura representam alto custo em relação ao investimento na aquisição do equipamento de impressão. Este trabalho objetiva uma redução no custo dos insumos bem como na do rejeito de materiais termoplásticos através do processamento por extrusão, onde os materiais antes rejeitados podem ser reciclados e transformados em filamento polimérico. Neste trabalho foi realizado o projeto e manufatura de uma mini extrusora para reutilização de material termoplástico.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, Reciclagem, Polímeros

## Abstract

The disposal of polymers has caused serious environmental damage and there is the growing use of these materials in Additive Manufacturing (MA) technology, as well as inputs used in this modality of manufacture represent a high cost in relation to the investment in the acquisition of the printing equipment. This work aims at a reduction in the cost of inputs as well as in the reject of thermoplastics through extrusion processing, where the previously rejected materials can be recycled and transformed into polymer filaments. In this work the design and manufacture of a mini extruder for the reuse of thermoplastic material.

**Keywords:** Additive manufacture, recycling, polymers

---

\* Prof. Dr. na Universidade Comunitária da Região de Chapecó

† Aluno do curso de bacharelado em Engenharia Mecânica na Universidade Comunitária da Região de Chapecó

## GERAÇÃO DE FILAMENTO PARA IMPRESSORAS 3D

### 1 INTRODUÇÃO

No que tange à reciclagem no Brasil, a pesquisa realizada no ano de 2015 pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), mostrou que 6,99 milhões de toneladas ou 9,64% do total de Resíduo Sólido Urbano (RSU) brasileiro corresponde a polímeros. Os fatores que incentivam a reciclagem de materiais derivam da necessidade de preservação dos recursos naturais e energéticos e da minimização de resíduos. Atualmente são utilizados três tipos de reciclagem: a energética (baseada no alto poder calorífico dos polímeros); a química (com hidrogenação e pirólise) e a mecânica (conversão de descarte em grânulos), sendo que esta última visa reutilização em outros produtos, como sacos de lixo, piso, componentes para automóveis, entre outros.

Em relação aos polímeros utilizados no Brasil, aproximadamente 62,9% (em 2016), são correspondentes a apenas dois tipos de materiais, o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). O polietileno (PE) é um material termoplástico muito utilizado na fabricação de embalagens de supermercado, saquinhos de leite, utensílios domésticos, entre outros, e corresponde a 40,6% do total de polímeros utilizados no país.

Tendo em vista esta realidade nacional do uso dos polímeros e o crescente uso da Manufatura Aditiva, pode-se pensar na possibilidade de propor o uso de polímeros recicláveis para a formação de filamentos para a impressão 3D. Filamentos compõe o maior custo agregado no uso desta tecno-

logia e a possível redução de custos com o uso de filamentos recicláveis pode contribuir significativamente com a popularização desta tecnologia inovadora.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em relação a Manufatura Aditiva (MA), pode-se defini-la como sendo todo processo de manufatura decorrente da adição de material em camadas planas sucessivas. Este tipo de fabricação se configura pela sobreposição de materiais, até que o objeto adquira o formato tridimensional desejado. A técnica consiste no desenvolvimento do produto, partindo de sua modelagem em um sistema CAD 3D (*Computer Aided Design* – Desenho Auxiliado por Computador). (VOLPATO, 2007; FERNANDES, 2001; VANDRESEN, 2003).

No mercado do “hobby” ou bricolagem, onde as pessoas se utilizam da tecnologia de impressão 3D para criar os mais diversos objetos com os mais diversos fins, o equipamento que teve maior difusão entre os usuários dessa tecnologia foi o equipamento baseado no sistema FDM - *Fused Deposition Modelling* (Modelagem por Fusão e Deposição), tendo em vista que é o equipamento com menor custo entre os sistemas. (PEDROSA, 2015). O sistema FDM tem como principais materiais os polímeros ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Poliácido Láctico) e outros policarbonatos em forma de filamentos.

Quanto aos polímeros, estes podem ser definidos como sendo a reação de monômeros entre si, que pela combinação de suas moléculas acabam criando outras ainda maiores (macromoléculas), tendo como característica a repetição de uma unidade básica, ou “mero”. (BLASS, 1988).

Existem várias maneiras de classificar os polímeros, segundo MANO (2004), esses materiais podem ser determinados pela sua origem, pelo número de monômeros, pelo método de preparação do polímero, pela estrutura química da cadeia polimérica, pelo encadeamento da cadeia polimérica, pela configuração dos átomos da cadeia polimérica, taticidade da cadeia polimérica, fusibilidade e/ou solubilidade do polímero e também pelo seu comportamento mecânico.

A viscosidade influencia fortemente no comportamento de um material e pode ser definida pela resistência oferecida ao fluxo ou à deformação. Em fluidos newtonianos a viscosidade permanece constante em pressões e temperaturas também constantes. (MANRICH, 2005).

Já a propriedade de viscoelasticidade é uma resposta à deformação onde ao mesmo tempo é observado o comportamento viscoso (quando não há recuperação da deformação após não haver mais tensão aplicada) e elástico (quando há recuperação total da deformação após o fim da aplicação de tensão) do material. (BRETAS, 2005; MANRICH, 2005).

A taxa de cisalhamento pode ser definida como sendo “o quanto o fluido deforma durante um determinado período de tempo”. (MANRICH, 2005).

A equação (1) define as relações para taxa de cisalhamento.

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{d\gamma}{dt}\right) = \left(\frac{dv}{dy}\right) : [s^{-1}] \quad (1)$$

Onde:

$\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento

$\gamma$  = deformação (adimensional)

t = tempo

v = velocidade (cm/s)

y = espessura (distância transversal) (cm)

Outro fator que deve ser levado em consideração, a temperatura de fusão ( $T_f$ ) e de transição vítrea ( $T_v$ ), sendo a  $T_f$  a temperatura mais alta na qual os cristais poliméricos existiriam, teoricamente, pois após a  $T_f$  o estado físico da matéria sofre mudanças. É um importante dado a se obter para os processos de transformação dos polímeros, pois são parâmetros para os requisitos do equipamento. (PIVA & WIEBECK, 2004).

A temperatura abaixo da qual o movimento dos segmentos de cadeia é “congelado” (bloqueado), é chamado de temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ). Abaixo das  $T_v$ s, as moléculas são virtualmente “congeladas” nas suas posições, reduzindo a mobilidade das cadeias e tornando o material frágil, quebradiço, como o vidro.

Para o processo de reciclagem mecânica dos polímeros citados, Piva & Wiebeck (2004), relatam que é composto pelas seguintes etapas:

Separação: Esta etapa é realizada manualmente e visa a separação dos diferentes tipos de polímeros de acordo com a identificação ou aspecto visual. O processo é realizado com o auxílio de uma esteira que transporta o material para a seleção. A eficiência do processo depende diretamente da prática das pessoas que executam a função. Outro fator importante é a fonte do material separado, pois isso é determinante para a qualidade, já que aqueles materiais oriundos de coleta seletiva são mais limpos que aqueles oriundos de lixões ou aterros.

Moagem: após a separação dos diversos tipos de polímeros, estes materiais passam por moagem/trituração sendo fragmentados em pequenas partes.

Limpeza: após a tritura o material passa por uma etapa de lavagem com água para a retirada dos contaminantes. A água desta

lavagem deve receber tratamento para sua reutilização ou emissão como efluente.

Aglutinação: é o processo seguinte a lavagem, nesta etapa, além de completar a secagem, o material é compactado, reduzindo desta maneira o volume que será enviado à extrusora. O aglutinador também é utilizado para incorporação de aditivos, como cargas, pigmentos e lubrificantes.

Extrusão: A extrusora funde o material tornando a massa “plástica” homogênea. Na saída do equipamento encontra-se o cabeçote, que proporciona a formação de um filamento contínuo, que na sequência é resfriado. O filamento então é triturado e transformado em *pellet* (grãos plásticos).

Para MICHAELI (2000), a extrusão pode ser classificada como um processo de moldagem, tendo em vista que o polímero é completamente fundido durante o processo adquirindo assim um formato novo. É um processo de transformação plástica com a finalidade de fundir e forçar a passagem de um material polimérico através de um orifício, sendo possível ainda uma fase seguinte de moldagem. Este processo é empregado também na adição de aditivos e pigmentos, remoção de umidade e de voláteis.

O resultado é a fabricação de semi-manufaturados contínuos, podendo ser utilizados tanto como produto final, quanto como matéria-prima para outros processos de moldagem, onde a gama de

produtos estende-se desde os mais simples, como filamentos, tubos e filmes até perfis das mais diversas complexidades. (MICHAELI, 2000; BLASS, 1988).

O processo de extrusão deve atender aos requisitos de fusibilidade dos polímeros. O PE possui temperatura de fusão ( $T_f$ ) variando entre 110°C para os de baixa densidade (PEBD) a 135°C para os de alta densidade (PEAD). A mistura (blenda) entre PEBD e PEAD é possível em qualquer proporção, tendo como resultado dessa mistura um material de flexibilidade intermediária. (ABIPLAST, 2016; PIVA & WIEBECK 2004).

A parcela do polipropileno (PP) entre os mais utilizados corresponde a 22,3%. O PP é um termoplástico, muito utilizado na fabricação de potes de iogurte, margarina, carcaça de baterias para automóveis, entre outros. A temperatura de fusão ( $T_f$ ) varia entre 165°C e 175°C. (ABIPLAST, 2016; PIVA & WIEBECK 2004).

Os materiais mencionados, conforme os dados já relatados, possuem alto índice de descarte e podem ser empregados na tecnologia de impressão 3D.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os principais componentes utilizados na construção da extrusora estão apresentados na tabela 1.

**Tabela 1:** Lista de componentes utilizados na construção do equipamento.

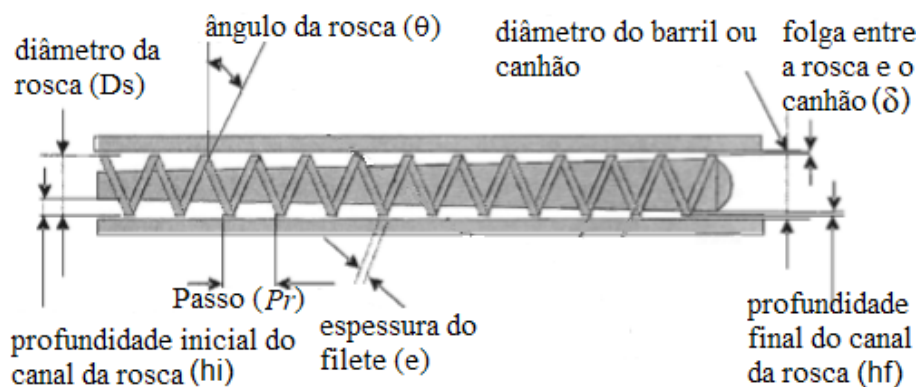
Quantidade	Item	Unidade
1	Controlador PID NOVUS, Modelo 1030	Pç
1	Relé de estado Sólido Novus	Pç
1	Termostato Tipo J	Pç
3	Resistores elétricos de 85 W (cada)	Pç
2	Rolamentos	Pç
300	Chapa de cobre	Gramas
5	Fio elétrico 2,5 mm	Metros
1	Motor elétrico 0,5 CV	Pç
2	Engrenagens	Pç
1	Corrente de elos (50 cm de comprimento)	Pç

Os métodos utilizados na construção do equipamento foram processos de usinagem convencional, realizados para a construção dos componentes principais da extrusora. As relações geométricas apresentadas no quadro 1.

**Quadro 1:** Principais componentes da extrusora, sua função e relações geométricas.

Componente	Função	Relação
Canhão/Barril	Proporcionar tensão suficiente no material, friccionando-o contra sua parede. Gerar calor e também transmitir, por condução, o calor gerado pelas mantas elétricas	Razão entre diâmetro (D) e comprimento (L), L/D Esta relação determina a potência da extrusora.
Restrição	Restringir vazão, gerando pressão	Diâmetro da saída
Termopar	Medir temperatura	Temperatura de fusão
Parafuso/Rosca	Homogeneização/plastificação do polímero através de cisalhamento; aquecimento do material para que este possa alcançar o estado plástico e assim permitir sua conformação; transportar o polímero partindo do funil da extrusora e seguindo até sua saída	Passo do parafuso ( $L_s$ ), profundidade do canal ( $H$ ) rotação ( $N$ ) constante, ângulo de rosca ( $\theta$ ). Influenciam diretamente na taxa de cisalhamento, no calor gerado por atrito e na vazão volumétrica do equipamento

Na Figura 1 está exemplificado uma rosca de extrusora.

**Figura 1:** Esboço de uma rosca única composta por um filete de passo constante.

Fonte: Adaptado pelo autor de MANRICH, 2005.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O equipamento de extrusão do presente trabalho, no que tange a sua dimensão, deve atender a dois dos principais requisitos, são eles: (1) ser de pequenas dimensões, para que possa ser utilizado em pequenos espaços, como em um cômodo de uma residência, por exemplo, e principalmente, (2) ter comprimento de rosca suficiente para o processamento do polímero.

Desta maneira, foi determinado um comprimento de rosca de 300 mm, o qual atende ao primeiro requisito e para que atenda ao segundo, outras variáveis serão consideradas e dimensionadas a partir do comprimento determinado.

A razão  $L/D$  é um importante parâmetro, visto que influencia em vários fatores na extrusão, como no tempo de residência do polímero no processo, na taxa de cisalhamento, na mistura e no gasto energético. MANRICH (2005), sugere que as razões de  $L/D$ , para termoplásticos, estejam dentro de uma faixa que varia de 20 a 30, visto que, empiricamente, são as que apresentam melhores resultados no caso de roscas quadradas ( $Pr = D$ ).

Deste modo, será utilizado um valor intermediário daquele sugerido por MANRICH, e assim, partindo de um comprimento e de uma igualdade de razão já definidos, pode ser determinado o diâmetro da rosca a partir da equação (2):

$$\frac{L}{D} = 25 \quad (2)$$

$$\frac{L}{25} = D \quad (2a)$$

$$\frac{300 \text{ mm}}{25} = D \quad (2a)$$

$$D = 12 \text{ mm}$$

Quando a rosca possui passo ( $Pr$ ) com a mesma dimensão do diâmetro ( $D$ ), esta é chamada de “rosca quadrada”. MANRICH (2005) afirma que empiricamente se chegou a este tipo de rosca pelo fato desta apresentar resultados satisfatórios para a maioria dos polímeros. Desta maneira,  $Pr = D$ , assim,  $Pr = 12 \text{ mm}$ .

$Pr$  também pode ser definido através da equação (3):

$$Pr = \pi * D * tg\theta \quad (3)$$

Outro valor obtido empiricamente e que influencia em muitas variáveis de processo é o ângulo da rosca ( $\theta$ ), sendo que no caso de roscas quadradas o valor de  $\theta$  é igual a  $17,66^\circ$ . O valor de  $\theta$  não tem bases científicas. (MANRICH, 2005).

Substituindo o valor de  $\theta$  na equação (3), pode-se verificar que é válida no caso de uma rosca quadrada:

$$Pr = \pi * 12 \text{ mm} * tg(17,66) \quad (3)$$

$$Pr = 12 \text{ mm} = D$$

É necessária a existência de uma folga suficiente entre a rosca e o barril, tanto para que não haja atrito entre as ferramentas (para evitar ruídos e desgaste), quanto para evitar que ocorra fuga do polímero entre esse espaço. Esta fuga do polímero fundido acaba gerando fluxo de escape, o que é prejudicial ao processo. Este espaço entre a rosca e o barril é representado pela letra grega  $\delta$  e esta distância, considerada razoável, é de 0,15 mm, estimada como sendo pequena o bastante para evitar que o polímero escape, visto que possui viscosidade relativamente alta durante o processo. Quando  $\delta > 0,2\text{mm}$ , já é possível que ocor-

ra vazamento do polímero entre as ferramentas. (MANRICH, 2005). Deste modo, será adotado o valor de  $\delta = 0,15$  mm.

A razão de compressão ( $R_c$ ), no caso de roscas com passo e diâmetro constante, pode ser determinada pela razão entre a altura do canal na zona de alimentação ( $h_i$ ) e altura do canal na zona de metering ( $h_f$ ), sendo  $R_c = h_i/h_f$ . No caso de uma rosca padrão, uma das suas características é a de adotar valor aproximado de  $R_c = 1,8:1$  à 4:1 e altura do canal de alimentação próximo de  $0,15.D$ , visto que esses valores atendem com qualidade aceitável a uma maior gama de polímeros. A razão de compressão ( $R_c$ ) deve ser maior do que a razão entre a densidade do polímero na zona de dosagem ( $\rho(i)$ ) pela densidade na zona de fusão ( $\rho(f)$ ), esta razão é representada por  $R_p$ .

O fator  $R_c$  afeta a formação de ilhas de sólido e contribui para forçar a massa polimérica contra as paredes das ferramentas, compactando o material e assim, aumentando a transferência de calor e o cisalhamento. (MANRICH, 2005; GILES et. al, 2005).

Desta forma, para efeito de cálculo, foi considerada a densidade do polímero ABS à  $25^\circ\text{C}$ , na zona de dosagem e sua densidade à  $210^\circ\text{C}$ , na zona de fusão, tendo em vista que um dos objetivos deste trabalho é que o polímero ABS sofra processo de extrusão.

$$R_p = \frac{\rho(i)}{\rho(f)}$$

$$\rho(i) = 1,25\text{g/cm}^3$$

$$\rho(f) = 0,9\text{g/cm}^3$$

$$R_p = \frac{1,25}{0,9}$$

$$R_p = 1,389:1$$

Como a faixa que atende ao maior número de polímeros varia de 1,8:1 à 4:1, foi adotado o valor mais próximo do obtido pela razão de densidade, visto que  $R_c$  precisa ser maior ou igual que  $R_p$ , então,  $R_c$  é igual a 1,8:1.

Para altura do filete no canal na zona de dosagem será adotado o valor sugerido por Manrich (2005), que é de  $0,15.D$ . Para esta faixa de altura, considerada elevada, a pressão máxima ocorrerá no limite da rosca de extrusão.

Desta maneira,

$$h_i = 0,15.12, \text{ logo, } h_i = 1,8 \text{ mm.}$$

Sendo  $h_i = 1,8$  mm e sendo  $R_c = 1,8:1$ , então,  $h_f = 1,8/1,8$ ,  $h_f = 1$  mm

A espessura do filete ( $e$ ) pode ser definida a partir do diâmetro da rosca ( $D$ ), onde  $e = 0,1.D$ . Desta maneira,  $e = 0,1 \cdot 12$ , logo,  $e = 1,2$  mm.

A largura do canal da rosca pode ser determinada a partir da seguinte relação:

$$W = (\pi.D.\text{tg}\theta.\cos\theta - e)$$

$$W = (\pi.12.\text{tg}(17,66).\cos(17,66) - 1,2)$$

$$W = 10,23 \text{ mm}$$

O comprimento helicoidal da rosca na zona de dosagem ( $Z$ ) pode ser definida da seguinte maneira:

$$Z = \frac{L}{\text{sen}\theta}$$

$$Z = \frac{300 \text{ mm}}{\text{sen}17,66}$$

$$Z = 988,89 \text{ mm}$$

A natureza não newtoniana de polímeros fundidos requer da matemática modelos teóricos complexos, onde novos métodos numéricos computacionais, baseados

nos princípios das equações de modelamento matemático para fluxo de fluidos poliméricos em canais de extrusoras de rosca simples, vêm sendo adotados. (DONATO, 2017)

Devido ao alto grau de complexidade matemático envolvendo fluidos não newtonianos, neste trabalho são seguidos os mesmos modelos e hipóteses adotados por DONATO (2017) e MANRICH (2005), os quais empregam o modelo simplificado da reologia de processamento aplicada ao processo de transporte do fundido polimérico, através do canal da extrusora na zona de dosagem e, respeitando a geometria da rosca dimensionada neste trabalho, restam exemplificadas as hipóteses assumidas: o fundido polimérico é Newtoniano, com fluxo isotérmico e incompressível; e o canal da zona de dosagem está repleto de fluido polimérico.

Referente à geometria da rosca dimensionada:

- A profundidade do canal e o passo da rosca são constantes;
- A profundidade do canal em relação a largura é pequena, o que significa que o fluxo de arraste nas paredes dos filetes da rosca é desprezível;
- Devido a pequena folga determinada entre o topo do filete e o barril ( $\delta = 0,15$  mm), pode ser considerado que não haverá fluxo de retorno.

A vazão volumétrica da extrusora pode ser descrita pela equação (4):

$$Q_{total} = Q_d \pm Q_p \pm Q_e \quad (4)$$

Roscas que no seu final apresentam valor máximo de pressão, possuem gradiente de pressão negativo, como é o caso da rosca

apresentada neste trabalho. Desta maneira, o sinal utilizado na equação é negativo. Assim, a equação da vazão é descrita:

$$Q_{total} = Q_d - Q_p - Q_e \quad (4A)$$

Onde:

$Q_d$  = Fluxo volumétrico de arraste (*drag*)

$Q_p$  = Fluxo volumétrico de contra-pressão

$Q_e$  = Fluxo volumétrico de escape

Conforme assumida a hipótese de não haver fluxo volumétrico de escape, o termo  $Q_e$  pode ser anulado ( $Q_e = 0$ ), restando:

$$Q_{total} = Q_d - Q_p \quad (4B)$$

A vazão no processo de extrusão é algo que depende diretamente da geometria da rosca, logo, a equação do fluxo volumétrico de arraste () pode ser expressa pela equação (5):

$$Q_d = K_d * h * N \quad (5A)$$

Onde

$h$ : Altura do filete na zona de dosagem, ou hf. (m)

$N$  = Rotação da rosca (RPM)

$$K_d = 0,5\pi^2 * D^2 * \text{sen}\theta * \text{cos}\theta \quad (5B)$$

Desta forma:

$$Q_d = 0,5\pi^2 * D^2 * h * N * \text{sen}\theta * \text{cos}\theta \quad (5C)$$

Fazendo as considerações pertinentes ao fluxo volumétrico de contrapressão, tais como pressão e viscosidade, temos a equação (6), que representa ( $Q_p$ ):



$$Qp = \frac{Kb * P * h^3}{\eta * L} \quad (6)$$

Onde

$P$  = Pressão máxima (Pa)

$\eta$  = Viscosidade do polímero fundido (Pa.s)

$L$  = Comprimento da rosca (m)

$$Kp = \frac{\pi * D * (\text{sen}\theta)^2}{12} \quad (6A)$$

Desta maneira, será definido pela equação (6B):

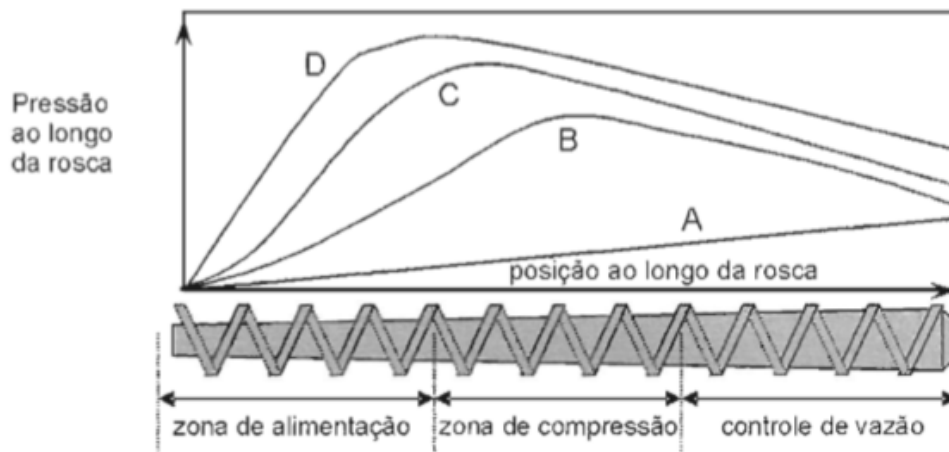
$$Qp = \frac{P * h^3 * \pi * D * (\text{sen}\theta)^2}{12 * \eta * L} \quad (6B)$$

Após a descrição de cada elemento que compõe a equação da vazão total, a mesma pode ser assumida da seguinte forma:

$$Q_{total} = (0,5\pi^2 * D^2 * h * N * \text{sen}\theta * \text{cos}\theta) - \left[ \frac{P * h^3 * \pi * D * (\text{sen}\theta)^2}{12 * \eta * L} \right] \quad (7)$$

Para uma extrusora com barril comum ou convencional, sendo a altura de filete ( $h$ ) alta na zona de dosagem ou zona de controle de vazão, ocorre um aumento gradativo de pressão até o final da rosca, onde o valor

é máximo, neste caso, o gradiente de pressão é negativo, como já mencionado. (MANRICH, 2005). Na Figura 2 está representada a variação de perfil de pressão.



**Figura 2:** Representação da variação de perfil de pressão ao longo comprimento da rosca.

Fonte: adaptado pelo autor de Manrich, 2005.

Neste caso, ocorrendo a pressão máxima no limite da rosca extrusora, a equação (8) permite determinar a pressão :

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 * \pi * D * N * L * \cotg\theta * \eta}{h^2} \quad (8)$$

Para este trabalho, considerando as pequenas dimensões de rosca e barril, foi estimado uma rotação de rosca relativamente baixa, para que ocorra tempo de residência suficiente do polímero no processo, gerando

assim o calor necessário à sua fusão, visto que, no caso de altas rotações, ocorreria uma maior vazão mássica, mas também baixa eficiência de plastificação.

Sendo assim, a rotação  $N$  adotada é de 30 RPM. A partir deste dado, podem ser definidas a vazão mássica  $Q_{total}$  e a pressão mássica  $P_{m\acute{a}x}$ .

$$30 \text{ RPM} = 0,5 \text{ Rev/s.}$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 * \pi * D * N * L * \cotg\theta * \eta}{h^2} \quad (9)$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 * \pi * 0,012m * 0,5\text{Rev/s} * 0,3m * \cotg(17,66) * 260\text{Pa.s}}{(0,001m)^2} \quad (9)$$

$$P_{m\acute{a}x} = 27,71\text{MPa}$$

O valor encontrado para  $P_{m\acute{a}x}$  pode ser inserido na equação (7), determinando a vazão mássica da extrusora:

$$Q_{total} = (0,5\pi^2 * D^2 * h * N * \text{sen}\theta * \text{cos}\theta) - \left[ \frac{P * h^3 * \pi * D * (\text{sen}\theta)^2}{12 * \eta * L} \right] \quad (7)$$

$$Q_{total} = (0,5\pi^2 * (0,012m)^2 * 0,001m * 0,5\text{Rev/s} * \text{sen}17,66 * \text{cos}17,66) - \left[ \frac{27,71 \times 10^6 \text{Pa} * (0,001m)^3 * \pi * 0,012m * (\text{sen}17,66)^2}{12 * 260\text{Pa.s} * 0,3m} \right] \quad (7)$$

$$Q_{total} = (1,02708 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}) - (1,02714 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{s}) \quad (7)$$

$$Q_{total} = 9,2437 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{s}$$

A extrusora é alimentada por polímero no estado sólido e em temperatura ambiente, 25°C. Este material, durante o processo, sofre variação de temperatura de aproximadamente 200°C, sendo fundido e transportado pela rosca até a matriz da extrusora. A maior parte da energia empregada na mudança de temperatura é proveniente da fricção entre a rosca, material e barril

(aproximadamente 80%), o restante é fornecido por aquecedores externos (mantas elétricas), fixados no barril. No entanto, quando se inicia a operação de extrusão, até que o sistema entre em regime, a maior parte do calor é fornecido pelas mantas.

A quantidade de energia envolvida na extrusão pode ser mensurada pela equação (10):

$$Pot = [\rho * Q * Cp * (Ts - Te)] + [\rho * Q * Hf] + [\Delta P * Q] \quad (10)$$

Onde

$T_s$  = Temperatura de saída (°C)

$T_e$  = Temperatura de entrada (°C)

$\rho$  = Densidade do material fundido (Kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Calor específico do material (J/Kg°C)

$H_f$  = Entalpia de fusão (J/Kg)

Desta maneira, exemplificando a operação de extrusão em ABS, o mesmo apresenta os seguintes valores:

$T_s$  = 210 (°C)

$T_e$  = 25 (°C)

$\rho$  = 900 (Kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = 1300 (J/Kg°C)

$H_f$  = 30000 (J/Kg)

Inserindo os valores na equação (X)

$$Pot = \left[ \frac{900Kg}{m^3} * \frac{9,24x10^{-8}m^3}{s} * \frac{1300J}{Kg°C} * (210°C - 25°C) \right] + \left[ \frac{900Kg}{m^3} * \frac{9,24x10^{-8}m^3}{s} * \frac{30000J}{Kg} \right] + \left[ 27,71MPa * \frac{9,24x10^{-8}m^3}{s} \right] \quad (10)$$

$$Pot = 20J/s + 2,495J/s + 2,56J/s$$

$$Pot = 25,055 W$$

Fazendo a conversão para CV;

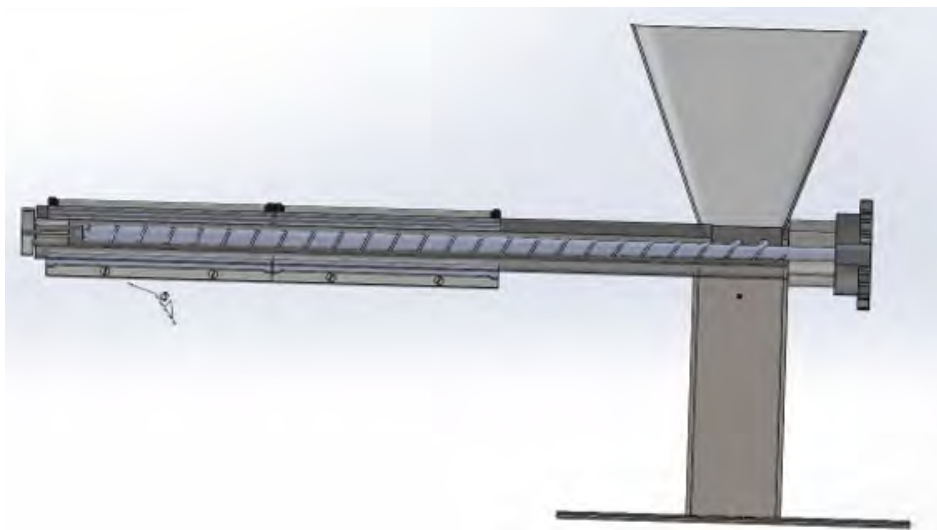
$$Pot = 0,034 CV$$

Estimando uma eficiência do motor de 70%, a potência será corrigida para:

$$Pot = 0,05 CV$$

Após todo o dimensionamento do equipamento, o mesmo pode ser detalhado através do auxílio do software de CAD (Computer Aided Design – Desenho auxi-

liado por Computador) *SolidWorks*, como demonstra a Figura 3, sendo apresentado o interior da extrusora. Nesta figura é possível verificar a geometria da rosca.



**Figura 3:** Corte de perfil utilizando software SolidWorks.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

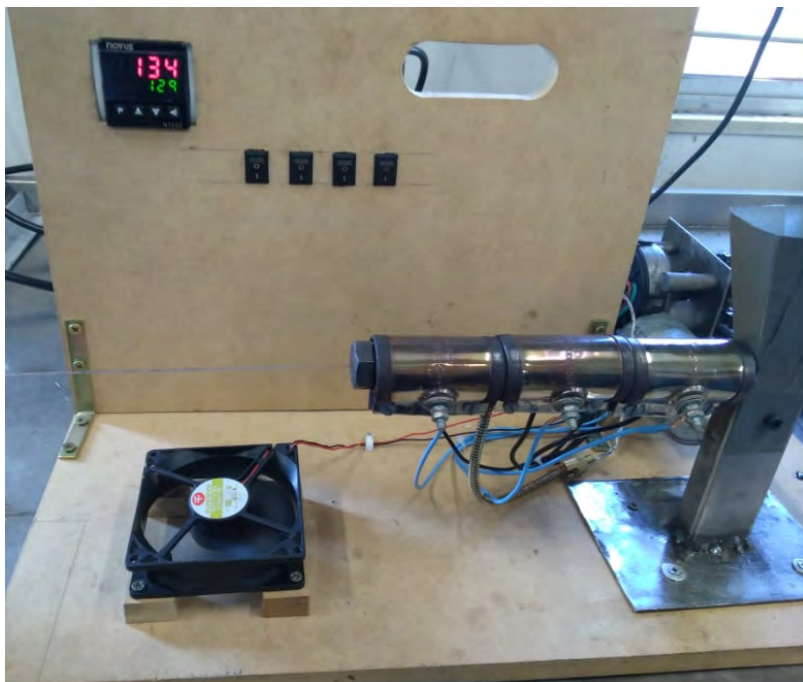
O controle de temperatura foi realizado através de um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), que recebia os dados de temperatura de um termostato do tipo J, o qual estava fixado entre o último e penúltimo resistor elétrico, na parede do barril.

O ventilador e o motor possuem o mesmo acionamento, sendo ligados ao mesmo tempo, já os resistores possuem acionamento independente e são também acionados pelo controlador.

A força motriz foi obtida através de um motor elétrico de corrente contínua de 0,5 CV e a transmissão se deu por meio de corrente de elos com redução por engrenagem

objetivando um aumento do torque na rosca de extrusão assim como o alcance da rotação desejada.

O passo seguinte, após dimensionamento e detalhamento, foi o da manufatura do equipamento, o qual foi realizado nas dependências do laboratório de manufatura da universidade. Na Figura 4 é possível verificar o estado final da extrusora, onde também é possível verificar a utilização de uma espécie de bancada de madeira com painel, onde estão inseridos os equipamentos eletrônicos de acionamento e controle, termostato, assim como motor e ventoinha para resfriamento do filamento.



**Figura 4 :** *Extrusora após manufatura, já em funcionamento.*

Fonte: Elaborado pelos Autores.

O equipamento se comportou de forma esperada já nos primeiros testes. O primeiro filamento polimérico processado pela máquina sofreu degradação térmica, devido ao tempo de residência dentro do

barril, algo que já se esperava, pois enquanto o sistema não entra em regime, o polímero permanece no interior do barril. O filamento degradado pode ser visualizado na Figura 5.



**Figura 5:** *Filamento degradado por tempo de residência no barril.*

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Após o sistema entrar em regime, a extrusora conseguiu produzir um filamento com boa qualidade, o qual era resfriado na saída da matriz por convecção forçada. A variação do diâmetro do filamento se alterava dependendo da força de tração na saída, variando de 1,1 mm a 1,9 mm. O filamento com diâmetro de 1,1 mm, o qual foi tracionado com maior força, possuía qualidade inferior ao de 1,9 mm (tracionado

com menor força), o filamento com diâmetro maior possuía melhor transparência e também melhor resistência à tração, além de possuir melhor qualidade superficial. Esta breve análise da força de tração aplicada ao filamento na saída da extrusora faz refletir quanto à sua importância na qualidade final do produto. Na Figura 6 pode ser observado o diâmetro do filamento.



**Figura 6:** Diâmetro do filamento produzido.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Inicialmente o calor foi fornecido por fonte externa, através das mantas térmicas, visto que o barril ainda não estava preenchido com polímero. Assim que o equipamento atingiu a temperatura especificada, o mesmo passou a ser alimentado de polímero através do funil, dando início ao processamento do material.

O equipamento alcançou um valor de vazão muito próximo do esperado, com um diâmetro de 1,9mm a uma velocidade linear de 1mm/s, obtendo uma vazão média de  $2,83.m^3/s$ , muito próximo dos  $9,24.m^3/s$  estimados inicialmente. Na Figura 7 pode-se verificar o filamento sendo formado na saída do equipamento.



**Figura 7:** Filamento na saída da extrusora em regime de trabalho alcançado.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

## 5 CONCLUSÕES

Durante os testes não foram encontrados no filamento sinais de zonas com misturas sólido/fundido, o que significa que o tempo de residência do polímero dentro do barril foi o adequado, assim também como a homogeneização realizada pela rosca. Estes resultados se devem, entre outros fatores, a rotação adotada na rosca de extrusão, que se mostrou eficiente.

O equipamento obteve um comportamento satisfatório, tanto em relação à vazão quanto em relação à fusibilidade do polímero, produzindo um filamento com boa qualidade. Deve-se considerar que, como a rosca é uma rosca universal, podem ser utilizados outros materiais poliméricos, tais como PP, PE e PLA.

## REFERÊNCIAS

BLASS, Arno. **Processamento de Polímeros**. 1ª. Ed. Editora da UFSC, 1988, 313p.

BRETAS, Rosário E. S., D'ÁVILA, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos**, 2ª. Ed. Editora Edufscar, São Carlos, SP, 2005.

MANRICH, Silvio; **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. Editora Artibler, São Paulo, 2005.

PEDROSA, Tiago F. S. **Conceção e desenvolvimento de equipamento de extrusão de filamento para impressora 3D**. Dissertação. Mestrado integrado em Engenharia Mecânica ramo automação. Universidade do Porto. Portugal, 2015.

PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2015. <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>> acessado em 10 de junho de 2017.

PIVA, A. M.; WIEBECK, H. (2004). **Reciclagem do plástico – Como fazer da reciclagem um negócio lucrativo**. São Paulo: Editora Artliber.

- RAUWENDAAL, C. **Conceitos Sobre Projetos de Roscas Para Extrusão**. Artigo. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, Jan/Mar 1993.
- SILVA, M. C., et. al. **Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA**. Artigo. Revista eletrônica de materiais e processos, v. 9, n. 2 (2014) 112-117. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- VANDRESSEN, M. **Aplicação do núcleo perdido de peças complexas, em moldes de ferramental rápido, a partir da estereolitografia**. Tese. (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2004.
- VIGNOL, Leonardo de A. **Desenvolvimento de modelos simplificados para estudo da extrusão de polímeros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio
- VOLPATO, N.; et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.
- WILLENMSE, R. C.; RAMAKER E. J. J.; VAN DAM, J.; DE BOER, A. P., Polymer 40 (1999). 6651 – 6659.