



EXTRUSÃO PARA APLICAÇÃO DIRETA EM IMPRESSÃO 3D

Ronaldo Augusto Maggioni, eusouronald@hotmail.com¹

Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95184-274, Farroupilha – RS.

Resumo: *Este trabalho tem por objetivo apresentar uma impressora 3D com extrusão direta, que permite a utilização de grânulos poliméricos como material. O projeto demonstra cálculos para a construção de um protótipo. Os cálculos utilizados são de formulação global e semi-empírico. Conta com desenhos e maquetes do conjunto de extrusão e simulação numérica de aquecimento. É apresentado um conjunto de barril e rosca para extrusão.*

Palavras-chave: *impressora 3D, extrusão, polímeros, grânulos, peças tridimensionais.*

1. INTRODUÇÃO

A popularização das impressoras tridimensionais por deposição de camadas fundidas de material (FDM) é recente no mercado, datada de 2010, quando uma patente referente a este sistema caiu em domínio público, dando assim origem a impressoras de plataforma aberta (*open source*), com apoio de uma comunidade de entusiastas. O principal material depositado por estas camadas é o polímero, que é de fácil moldagem, não exigindo componentes de alta tecnologia e de elevados custos. Para facilitar, o material é fornecido em rolos de filamentos com dimensões padronizadas, a fim de permitir a impressão 3D em qualquer lugar do mundo. A impressora é capaz de demonstrar resultados satisfatórios para prototipagem e produtos, independentemente de ser uma máquina profissional e importada ou produzida localmente com recursos limitados.

A impressão 3D por filamento esbarra na capacidade técnica de se produzir um filamento que possa ser tracionado por um motor de passo, além de necessitar da precisão dimensional do filamento. Filamentos quebradiços, de baixa qualidade ou fora de tolerância dimensional podem ocasionar contratempos para o usuário da máquina.

Por outro lado, a extrusão e injeção de materiais é um processo conhecido, que é estudado a mais de 80 anos, com avanços significativos nos últimos 60 anos, quando vários fenômenos complexos puderam ser compreendidos com o uso da computação. Atualmente, esses processos respondem pela grande parte dos produtos que consumimos e estão disponíveis nos mais variados formatos de produção e em quantidades que podem variar desde poucas gramas até algumas toneladas.

Neste artigo pretende-se ilustrar um processo que combina a impressão 3D com a extrusão simultânea do material granulado, eliminando a necessidade de se confeccionar previamente o filamento de material a ser impresso. Trata-se de uma metodologia ainda em desenvolvimento e praticamente sem nenhum uso em escala comercial.

É preciso lembrar que um processo novo ou pouco conhecido de impressão tridimensional tende a ter dificuldade de aceitação devido a sua complexidade e custo. Sendo assim, os objetivos específicos deste trabalho são de verificar se a impressão por extrusão direta é factível de ser construída, bem como avaliar o dimensionamento adequado para uso em uma impressora 3D. Para se atingir algumas etapas intermediárias foram realizadas, a saber: uma revisão geral dos conceitos sobre impressão 3D, extrusão, Fenômenos de Transporte e Ciência dos Materiais; dimensionamento dos componentes; construção e adaptação do protótipo; adaptação dos parâmetros do software utilizado e, finalmente, testes do equipamento.

É preciso, ainda, registrar que o mercado de impressão 3D que se formou no Brasil, tem custo de impressão ainda alto no que diz respeito à matéria prima. Esta que é a maior responsável pelo valor final da produção de peças. Junta-se a isso, a quantidade e variedade do material, que também corrobora para o encarecimento dos produtos finais. O resultado é que a operacionalização fica limitada ao tradicional que é oferecido, ou seja, materiais como a acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o poli(acido lático) (PLA). Com uma extrusora diretamente acoplada à impressora, a mistura do material fica a critério do operador da máquina. Desta forma, pode-se abrir mão do uso de filamentos pré-fabricados e propiciando novas alternativas para a obtenção de matéria-prima para impressão 3D.

Nos tempos atuais, com a recente pandemia de COVID-19, materiais importados como PLA e o Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), tornaram-se escassos no mercado (CARRANÇA, 2020), fazendo com que muitas impressoras ficassem sem material, visto que existem dificuldades de se reaproveitar o material impresso e descartado no atual modelo de impressão por filamento. Em especial para as produções em pequena escala, de pequenas empresas.

É, ainda, importante lembrar que o Brasil é um dos países que mais recicla no mundo (PROVATTI, 2012). Sendo assim, a tecnologia aqui proposta pode ser amplamente vantajosa para o uso de materiais recicláveis, que podem ser

moídos e serem diretamente reutilizados nas extrusoras. O mercado para o setor de reciclagem pode ganhar novos horizontes no qual comunidades de recicladores fornecem materiais a um custo acessível e em grande escala, de forma direta, sem passar por intermediários. Como se trata de uma extrusora de baixo custo de implementação e operação, com peças intercambiáveis a popularização deste método de impressão pode ocorrer rapidamente e aproveitar estruturas existentes no mercado para fornecimento de matéria-prima com preços competitivos. Outra melhoria digna de nota é que é possível se trabalhar com uma grande gama de tamanhos de roscas, cilindros e resistores de aquecimento, a fim de se obter os resultados desejados.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Revisão Bibliográfica

2.1.1. Mercado Atual

Por ser uma tecnologia recente e em desenvolvimento acadêmico e comercial, ainda é difícil encontrar material bibliográfico ou aplicações mercantis deste produto. Nos seguintes parágrafos faz-se um breve relato sobre o atual momento. A impressão tridimensional por rosca é um processo que necessita de um controle rigoroso de propriedades de impressão e possui muitos parâmetros a serem administrados para se obter resultados satisfatórios, sendo assim, ele é pouco utilizado em aplicações genéricas, ainda restrito praticamente apenas a pesquisas acadêmicas.

Dentre as empresas que utilizam este processo, existe a Mahor XYZ (2019), fabricante europeia, que mostra pouquíssimos resultados e vídeos de seu funcionamento, mas apresenta um modelo em terceira geração, robusto e aparentemente funcional, por € 500. No Brasil, existe um projeto, datado de 2013 sobre esse tipo de impressão, de Inforçatti (2013). Na época, a impressão 3D ainda estava se difundindo e a maioria delas eram construídas de forma rudimentar (a impressora construída à época foi denominada Fab@home). No entanto, este projeto englobava todos os aspectos da impressão por rosca, de forma simples e funcional, porém, necessitando de melhoramentos, entre eles, o dimensionamento mais acurado, para atender aos requisitos do mercado atual de impressão de polímeros, tanto em velocidade como em dimensões extrusadas. Este projeto de mestrado, demonstra de forma adequada um protótipo piloto, que serviria de base primordial para futuras máquinas.

Em um trabalho um pouco mais recente de Freitas (2015), a impressora apresentada na dissertação de mestrado de Inforçatti (2013), é aprimorado, mantendo seu formato original, com mudanças no peso, diâmetros de bico, rosca e uso de materiais mais específicos. Vale ressaltar que a impressora tridimensional utilizada é ainda a mesma, atualmente impraticável devido a sua complexidade e uso de componentes antigos. Já existem formas de construção com dimensões diminutas, otimizadas e mais precisas que a impressora Fab@home no mercado. Isso facilitaria sua utilização em massa num sistema de impressão por rosca, aperfeiçoando assim um modelo economicamente viável.

Atualmente, é possível controlar as variáveis de impressão por um *firmware open source* (de código aberto) chamado Marlin (2011), que é largamente empregado nas impressoras de entusiastas de impressão (makers). O referido programa permite o controle por código ou via tela de cristal líquido (LCD) de diversos parâmetros de velocidade, posição e temperatura com apenas um simples toque, o que facilita o teste de novos modelos de extrusoras.

Economicamente falando, os projetos aqui demonstrados, não ofereceram dimensões e um valor financeiramente compatível para seu uso em larga escala. Portanto, a impressão 3D ainda não atingiu seu potencial no que se refere à popularização desse método de impressão. Com cabeçotes de impressão pesados e grandes, de difícil deslocamento acaba-se fugindo do propósito inicial de se ter um equipamento simples e funcional. Esta informação é evidenciada no cabeçote de impressão construído por Inforçatti (2013, p. 90).

2.1.2. Exemplo de uma impressora 3D

Nesta seção é apresentada uma pequena descrição do funcionamento de uma impressora 3D, bem como do que está se propondo neste trabalho.

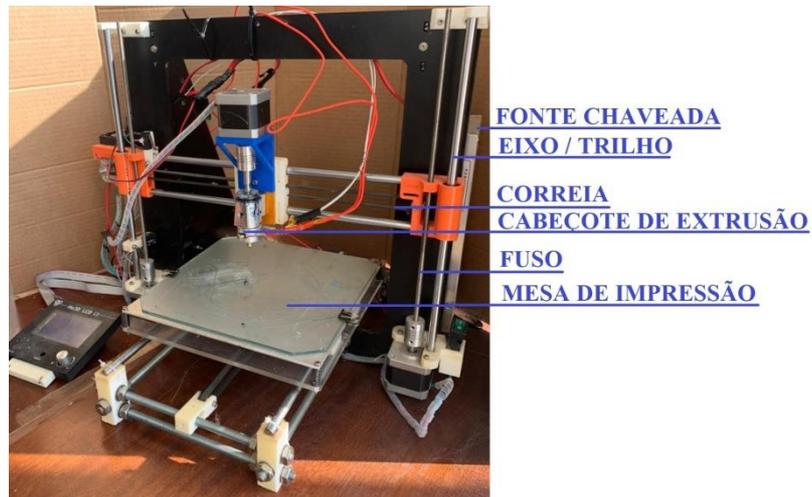


Figura 1. Impressora 3D com cabeçote de extrusão por grânulos.

A Figura 1 representa uma impressora 3D de filamento adaptada para extrusão de grânulos, modelo construído com peças impressas em 3D e equipamentos adaptados. Da primeira geração de impressoras que chegaram ao mercado, datada de 2014.



Figura 2. Impressora 3D por deposição de filamento.

A Figura 2 ilustra um modelo comercial de impressora, modelo Ender 3 da Creality (2017), de fácil montagem, ampla linha de acessórios e baixo custo de manutenção. É facilmente encontrada em lojas e possui uma grande comunidade de entusiastas na internet. Atualmente é um dos modelos mais modernos existentes.

As impressoras demonstradas nas Figs. 1 e 2, possuem estruturas semelhantes entre si. São dotadas de motores de passo a fim de que ocorram as movimentações nas três coordenadas espaciais e na extrusão de polímero. Possuem trilhos, fusos e correias de movimentação por onde a mesa aquecida e o cabeçote de impressão se movimentam e motores para a elevação do cabeçote (movimentação em eixo Z, altura). Apresentam, ainda, acessórios como resistores e bicos. Elas utilizam uma fonte chaveada, própria para energia de corrente contínua. Todas as funções das impressoras citadas são gerenciadas com o uso de um microcontrolador associado ao *firmware* Marlin (2011) e podem receber comandos via interface USB ou cartão de memória.

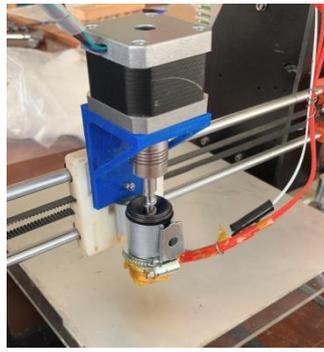


Figura 3. Cabeçote de extrusão com Nema 17 acoplado a uma impressora 3D.

A Figura 3 mostra a extrusora direta acoplada na impressora da Fig. 1, com os detalhes da adaptação realizada, que incluem suporte para motor e conjunto de extrusão, encaixe para resistor e sensor de temperatura.

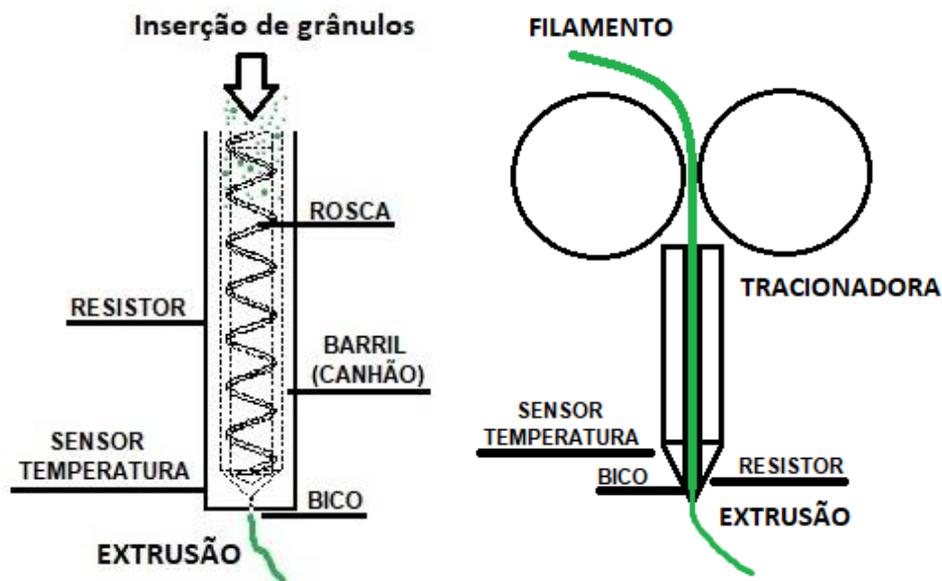


Figura 4. Principal diferença do cabeçote extrusão por (a) grânulos e (b) filamento.

Para facilitar o entendimento, a Fig. 4 apresenta duas formas distintas de se obter o mesmo resultado de impressão. Uma por filamento previamente extrudado para um diâmetro e outra por grânulos, processados diretamente para extrusão final. Em ambos os casos, a estrutura de movimentação dos eixos e controle do motor são as mesmas, com modificação em *firmware* de controle e cabeçote de impressão.

Uma vez explicada de forma sucinta como funciona uma impressora 3D, pode-se passar para as próximas seções.

2.1.3. Parâmetros de impressão

Nesta seção serão definidos alguns parâmetros de impressão necessários para o dimensionamento inicial do sistema de extrusão por rosca. As variáveis mais importantes são velocidade de impressão, altura de camada de impressão e diâmetro do bico extrusor, normalmente utilizados e indicados por *softwares* de impressão 3D como Cura (2015), Repetier Host (2013), por experiência pessoal do autor e por recomendação do fabricante dos filamentos. Isso pode garantir uma velocidade razoável de impressão, qualidade do produto final e boa adesão entre as camadas impressas na maioria dos filamentos comerciais para impressão, que são o PLA, PETG e ABS.

As especificações, fornecidas pelo *software* e utilizadas foram as seguintes: velocidade de impressão: 50 mm/s e altura de camada: 0.2 mm. Já o diâmetro do bico, de 0.4 mm, é medida padrão, que já vem pré determinada com a impressora, por garantir velocidade de impressão e qualidade do impresso.

A velocidade de impressão é responsável por limitar a velocidade máxima de deslocamento do bico extrusor, no momento em que deposita o material extrudado, não deve ser confundida com a velocidade de movimentação que o cabeçote faz quando se desloca de um ponto a outro sem extrudar. A altura da camada de impressão está ligado de forma muito importante ao aspecto visual do impresso (quanto menor este valor, melhor o resultado) e ao tempo de impressão. O diâmetro do bico é o diâmetro em que o material é expelido pela ponta do extrusora.

O material polimérico selecionado para este projeto, devido a características de fácil impressão, biodegradável, ótima adesão entre camadas, é o poli(acido lático) (PLA). Na Tabela 1, estão listadas as principais propriedades físicas e mecânicas do polímero e parâmetros de impressão para o PLA Premium da empresa F3DBR Filamentos (2020).

Propriedades Físicas	Valor	Unidade	Método/Norma
Densidade	1,24	g/cm ³	D 638
Fluidez	7 - 9	g/10 min (190°C)	D 882
Viscosidade Relativa	4	g/DL (Clorof 30°)	D 256

Tabela 1. Propriedades físicas do poli(acido lático) (Fonte: F3DBR Filamentos, 2020).

Comparado com o ABS e PETG, o PLA possui uma densidade semelhante ao PETG e 20% maior que o ABS da mesma fabricante, sendo o material adequado para um dimensionamento de conjunto de extrusão.

Propriedades Mecânicas	Valor	Unidade	Método/Norma
Resistência à Tração	51	MPa	D 638
Alongamento à Ruptura	3,3	%	D 882
Resistência ao Impacto (Izod)	118	J/m	D 256
Temperatura Distorção Térmica	40-50	°C	E 2092
	0,45 MPa		

Tabela 2. Propriedades mecânicas do poli(acido lático) (Fonte: F3DBR, 2020).

Entre os materiais citados, PLA é um material intermediário quando a resistência à tração é evidenciada, mas possui uma boa adesão entre camadas do material na impressão, característica de suma importância para a obtenção de um produto final de qualidade. De acordo com a experiência pessoal do autor em impressão 3D, o PLA consta com a menor contração quando em contato com a temperatura ambiente, resultando em reduzida possibilidade de descolamento da peça na mesa de impressão durante o trabalho e melhor preservação do dimensional da peça impressa.

Parâmetros de Impressão	Mínimo	Máximo	Unidade
Temperatura Nozzle	205	230	°C
Temperatura Mesa	25	60	°C
Velocidade	20	70	mm/s
Tempo mínimo camada	10	20	s
Multiplicador de Extrusão	1,0	1,1	

Tabela 3. Parâmetros de impressão para filamento de PLA (Fonte: F3DBR, 2020).

A temperatura de impressão do poli(acido lático) é ligeiramente inferior aos demais materiais, tanto para nozzle (palavra em inglês utilizada para designar o bico de impressão), como para a mesa, o que facilita a extrusão e reduz o consumo de energia elétrica durante a operação da impressora 3D. O autor ainda cita, que o PLA dispensa o uso de uma câmara para impressão como o ABS, por conta das temperaturas de trabalho e facilidade de descolamento e empenamento das camadas de impressão. Se utilizada uma mesa de vidro para impressão e um fixador baseado em etanol, a mesa pode trabalhar em temperatura ambiente, desligando o sistema de aquecimento da mesa de impressão.

Propriedades Mecânicas/ Parâmetros de Impressão	ABS	PETG	Método/Norma
Densidade	1,04 g/cm ³	1,27g/cm ³	ASTM D 792
Resistência à Tração	65 MPa	50 MPa	D 638
Temperatura Nozzle	230-240°C	220-250°C	
Temperatura Mesa	80-100°C	30-70°C	

Tabela 4. Propriedades e parâmetros de impressão para filamentos de ABS e PETG (Fonte: F3DBR, 2020).

Com os dados definidos nesta seção pode-se partir para o dimensionamento propriamente dito do equipamento, o que será feito a seguir.

2.2. Determinação das vazões

Baseado nos dados anteriores descreve-se que a vazão volumétrica do material a ser depositado pode ser dada pela Eq. (1) (POLYGN0, 2018):

$$\dot{V} = V \cdot h \cdot D \quad (1)$$

Onde:

V = Velocidade de 50 mm/s

h = Altura da camada de 0.2 mm

D = Diâmetro de 0.4 mm

Com a vazão volumétrica definida, pode-se obter a vazão mássica, dependendo apenas da densidade do material a ser aplicado na extrusora, e assim saber qual a quantidade necessária para alimentar por um período de tempo, a fim de se obter uma extrusão constante. A Equação (2) da vazão mássica é dada por:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (2)$$

Onde:

\dot{V} = Vazão Mássica

ρ = Densidade de 1,24 kg/m³

A Tabela 5 abaixo ilustra os valores calculados, utilizando as equações 1 e 2 para o poli(acido l'atico).

Vazão Volumétrica	4 mm³/s
Vazão Mássica	0,00496 g/s

Tabela 5 – Vazões do polímero.

2.3. Determinação das especificações do motor

Uma vez definidas as grandezas das seções anteriores, o próximo passo é o dimensionamento do fuso – rosca – de extrusão. Para estimar o diâmetro mínimo necessário para sua construção da rosca, deve-se levar em consideração o tipo de material e suas propriedades mecânicas. Rauwendaal (2013, p. 92) propõe a utilização de aços inoxidáveis que são adequados para os esforços a serem submetidos e, se devidamente usinados de forma a se obter um bom acabamento superficial, conseguem um baixo coeficiente de atrito, característica indispensável para o funcionamento adequado da extrusora. O motor escolhido para tracionar a rosca é o motor Nema 17, que é compacto e de larga utilização em impressoras 3D.

Fatores fundamentais para a escolha do motor Nema são a baixa rotação que implica em baixa vazão do material que o conjunto apresenta. Na sequência serão demonstrados cálculos que confirmam estas informações. Já a impressora [Fab@home](#), que utiliza um motor de torque máximo de 1 Nm em seu conjunto, possui uma maior vazão mássica.

O motor de passo selecionado para este projeto demonstrou que atende às condições de produtividade quando equiparado proporcionalmente à impressora Fab@home.

A fonte chaveada a ser utilizada é de 24 volts de corrente contínua, sendo assim, o torque do motor para baixas rotações fica na linha azul da figura 5 – datasheet – apresentado na Figura 5.

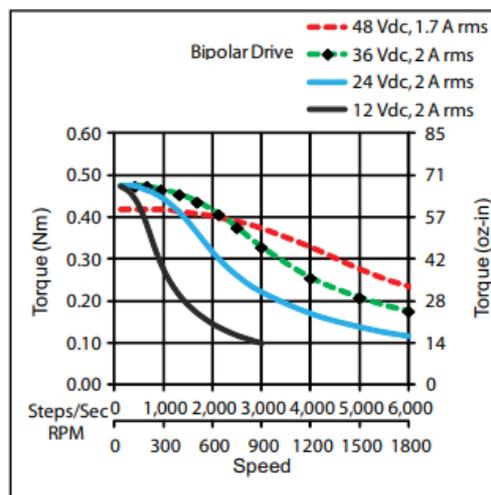


Figura 5. Datasheet torque por rotação do motor de passo nema 17 (Fonte: MOON'S, 2020).

A Figura 5 mostra que o maior torque disponível do motor, é próximo a menor rotação do motor e com tensão maior.

2.4. Determinação do diâmetro mínimo da rosca

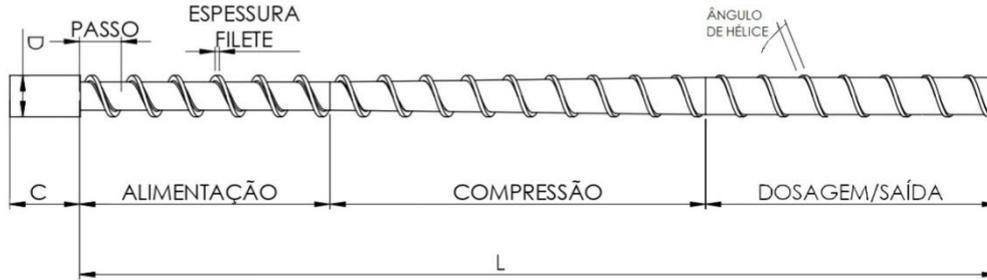


Figura 6. Representação da rosca e tamanhos.

A Figura 6 representa a rosca de extrusão, onde:

D = Diâmetro externo

C = Comprimento da seção de acoplamento com motor

L = Comprimento da rosca

Neste trabalho será utilizada uma liga de aço inoxidável 304 para o dimensionamento de uma rosca de extrusão. As equações para definição do diâmetro devem partir de uma avaliação do material, suportando esforços como a torção. Para não ficarmos longe de um valor inicial ideal, devemos partir de um quantitativo mais realístico possível. Utilizando a equação de (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 430) torção para o diâmetro de eixo para parafusos de potência, para uma aproximação:

$$\tau_{adm} = \frac{16.T}{\pi * D^3} \quad (3)$$

Onde:

T = Torque aplicado

τ_{adm} = Tensão admissível de cisalhamento do material

D = Diâmetro

Isolamos o diâmetro na Eq. (3) e obtemos:

$$D = \sqrt[3]{\frac{16.T}{\tau_{adm}.\pi}} \quad (4)$$

É obtido um diâmetro de eixo de 2,2 mm. Esse valor de diâmetro de eixo é o mínimo que a rosca deve ter para o aço inoxidável resistir à torção em caso extremo de entupimento do sistema. É uma aproximação bem grosseira, sendo utilizada para nortear o projeto inicial e garantir que ele não sofra deformações durante o processo de funcionamento. Outro fator importante para se levar em conta nesta estimativa é a usinagem, que devido ao diâmetro, fica limitada à capacidade de um centro de usinagem e equipamentos. Devido à potência do motor é importante manter o menor peso possível do conjunto. Com o exposto, podemos considerar o diâmetro entre o mínimo do eixo de 4 mm e máximo de 6mm.

Rauwendaal (2013, p. 549) recomenda, devido à dificuldade de dimensionamento e resultados satisfatórios, a utilização dos seguintes parâmetros:

- Comprimento total da rosca de 20 à 30D;
- Comprimento da seção de alimentação de 4 à 8D;
- Comprimento da seção de dosagem de 6 à 10D;

A seção de alimentação e a seção de dosagem possuem um diâmetro que não varia conforme o comprimento da rosca.

- Seção de alimentação, canal de 0,10D a 0,20D;
- Espessura do filete do canal de 0,1D;
- Ângulo de hélice de rosca de 17,66° graus;

O ângulo de hélice da rosca também é fixo e é proposto por Rauwendaal (2013, p. 509) ao valor de 17,66°, sendo conhecido como a rosca de passo quadrado. A rosca, de acordo com Manrich (2005, p. 107), é única ou chamada de mono-rosca, dotada de um único canal que é utilizada para a mistura, homogeneização e transporte do polímero.

Com essas informações interligadas ao diâmetro do conjunto, permite-se calcular as dimensões das principais seções da rosca. Rauwendaal (2013, p. 549) não cita valores baseados em diâmetro para a seção de compressão da rosca. Porém, possui uma variação em ângulo, que de acordo com Manrich (2005, p. 129), onde o material é comprimido, sofrendo forças de atrito que o aquecem e transportam até a zona de dosagem. É definido que o barril deve ter em sua parede interna o maior coeficiente de atrito possível, enquanto a rosca deve ter o menor, fazendo com que o material “deslize” no canal da rosca transportadora.

Outro dado importante é a taxa de compressão criada dentro do cilindro pela rosca de extrusão. Para isso é necessário calcular a altura da rosca, na seção de alimentação e na seção de dosagem.

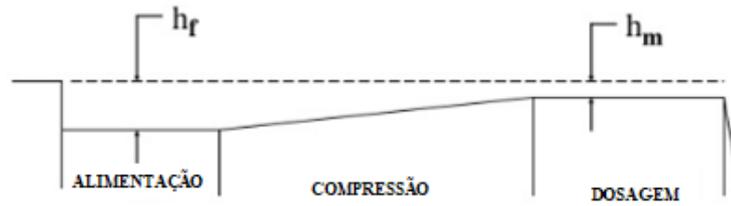


Figura 7. Demonstrativo de alturas na zona de alimentação e dosagem (Adaptado de: Rauwendaal, 2013).

A equação (RAUWENDAAL, 2013, p. 546) que define esses valores é:

$$C.R. = \frac{h_f}{h_m} \quad (5)$$

Onde:

$C.R.$ = Taxa de Compressão (Compression Ratio)

h_f = Folga no canal de alimentação

h_m = Folga no canal de dosagem

Segundo Rauwendaal (2013, p. 547), a taxa de compressão possui valores entre 1 e 3 entre a entrada e saída da rosca. Neste projeto foi convencionada a utilização de uma taxa de compressão igual a 3, visto que a rosca é de dimensões reduzidas e h_f sendo 0,96mm, valor estimado pelo autor, obtendo na equação acima um h_m de 0,32 mm.

Com iterações avaliando parâmetros de rotação, vazão constante de 4 mm³/s, com a Eq. (6) abaixo de Rauwendaal (2013, p. 520), que leva em consideração o gradiente de pressão e atrito do material no conjunto, é obtida a seguinte estimativa:

$$\dot{V} = 0.5 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot H \cdot (\pi \cdot D \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - p \cdot w \cdot \cos(\varphi)) - \frac{H^3 \cdot P}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot (\pi \cdot D \cdot \sin^2(\varphi) - p \cdot w \cdot \sin(\varphi)) \quad (6)$$

Onde:

\dot{V} = Vazão volumétrica

D = Diâmetro da rosca

H = Folga uniforme da rosca

N = Rotação em hertz

φ = Ângulo de hélice

p = Quantidade de roscas

w = Largura do canal da rosca

P = Pressão

μ = Viscosidade do material

L = Comprimento de trabalho da rosca

Para uma rotação de 20 rpm, pode-se recomendar o diâmetro da rosca de 6 mm e mantê-la com L/D de 22, razão entre comprimento e diâmetro adequada para aplicação proposta de acordo com Rauwendaal (2013, p. 547).

Uma próxima avaliação a ser feita na rosca é a da pressão de flambagem, determinada por Leonard Euler (1707 – 1783), dada pela fórmula:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot I \cdot E}{L^2} \quad (7)$$

Onde:

P_{cr} = Carga crítica

E = Módulo de elasticidade

I = Inércia do sólido

L = Comprimento de trabalho da rosca

Comparada com a fórmula do gradiente de pressão que se forma no sistema, de Rauwendaal (2013, p.187):

$$P = \frac{8 \cdot \mu \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^4} \cdot \sin \varphi \cdot L p \quad (8)$$

Onde:

\dot{V} = Vazão volumétrica

D = Diâmetro da rosca

P = Pressão

μ = Viscosidade do material

L_p = Comprimento da seção de compressão e saída no sistema

O resultado desta comparação deve ser $P_{cr} > P$, fazendo com que o sistema suporte a força axial ao qual o sistema é submetido quando ocorre a pressurização da extrusora. Os cálculos efetuados, mostraram que a desigualdade obrigatória das pressões acima foi satisfeita.

Foi obtido um resultado otimizado com a variação dos valores de entrada na Eq. (6). Conforme a necessidade, outras variáveis além da rotação e diâmetro podem ser testadas. De acordo com Rauwendaal (2013, p. 521), a Expressão 6 pode exibir resultados divergentes num experimento real devido às inúmeras variações e incertezas do projeto. Dentre elas, podem ser citadas: tipo de material polimérico, tratamento térmico, acabamento superficial inadequado do conjunto, degradação do polímero, controle não preciso da temperatura e temperatura incorreta de operação. Para se obter um resultado final satisfatório é necessário testar inúmeras variações e protótipos de conjunto.

Com os valores propostos, foi possível chegar ao seguinte projeto da rosca:

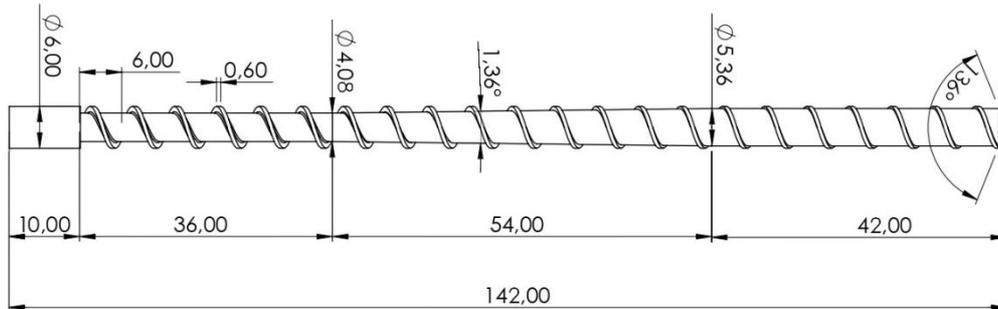


Figura 8. Desenho técnico de rosca para as condições descrita acima.

A Figura 8 exibe todas as dimensões como proposto pelas equações descritas anteriormente. Foi adicionado uma seção extra de 10mm de comprimento e 6mm de diâmetro (extremidade esquerda do desenho) para acoplar a rosca ao motor Nema 17.

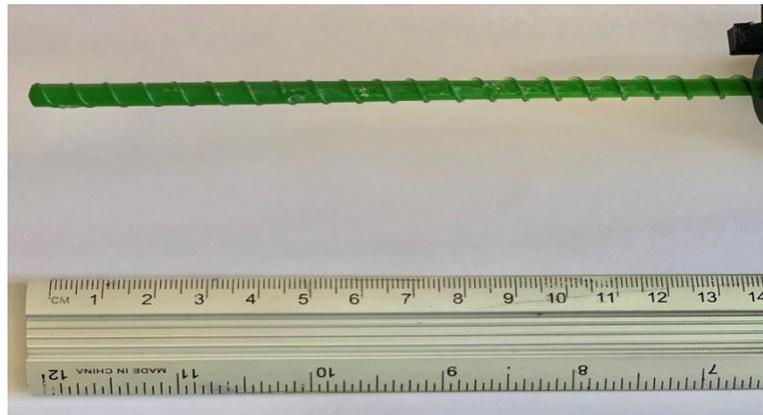


Figura 9. Modelo experimental impresso em resina para avaliação visual.

A rosca foi modelada no software Solidworks da Dassault e impressa em resina. A Figura 9 apresenta uma fotografia da maquete em tamanho real da rosca impressa com o objetivo de verificar visualmente sua geometria. Este modelo possui uma qualidade de representação dimensional fiel à peça real a ser fabricada. O fuso confeccionado em resina permitiu detalhar e visualizar o diâmetro interno que varia ao longo da rosca, bem como verificar a altura e espessura do filete único. Devido à geometria variável da rosca, a impressão por cura UV foi a única forma de conseguir uma amostra física do objeto de estudo.

O barril, ou canhão como é conhecido, pode ser fabricado com vários tipos de aço, Manrich (2005, p. 256) propõe que a dureza do material de confecção do barril pode ser superior à do usado na rosca, atingindo até 70 HRc. A folga entre o conjunto rosca e canhão deve variar entre 0,013mm e 0,05mm de acordo com Rauwendaal (2013, p. 70). O diâmetro externo do canhão descrito por Manrich (2005, p. 256) é estimado em 1,5 à 2,5 vezes o diâmetro da rosca.

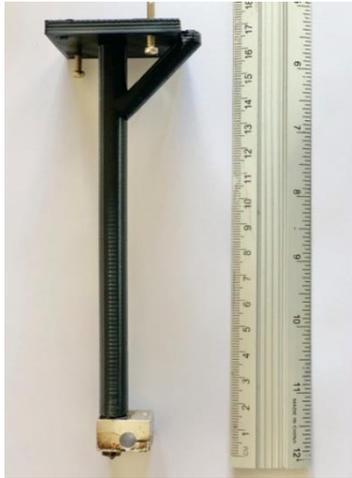


Figura 10. Primeiro modelo impresso com canal de alimentação menor e hotend.

Depois da primeira maquete impressa por FDM, foi alterada uma dimensão no desenho técnico, o canal de alimentação foi aumentado. Esta foi a única modificação realizada que não afetou as demais condições do projeto.

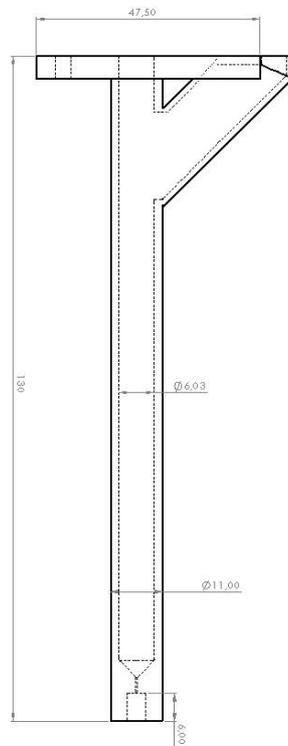


Figura 11. Desenho técnico barril.

As Figuras 10 e 11 representam respectivamente uma foto da maquete, e desenho do canhão confeccionado. A região inferior do canhão, onde ocorre a dosagem, é construída de maneira a acoplar um bloco de alumínio por intermédio de rosca, conforme Fig. 11. Isso facilita a adaptação no canhão, permite o uso do resistor de cartucho original da impressora 3D e substituição do bico de extrusão quando necessário. Desta forma facilita a manutenção, mantém a simplicidade e também as partes intercambiáveis com uma impressora FDM.

O resistor, o bico da extrusora e o bloco de aquecimento estão exemplificados nas Figs. 12, 13 e 14:



Figura 12. Resistor de aquecimento do tipo cartucho.

O resistor de cartucho é a mais conhecida forma de aquecimento das impressoras 3D. É de rápida e fácil substituição. O seu formato permite adaptação e aquecimento concentrado e em pouco tempo de uma região específica. Durante a movimentação da impressora esse resistor fica firme devido a construção robusta. A potência deste modelo varia entre 20 e 60 watts.



Figura 13. Bico da extrusora de latão.

O bico de extrusão, é um elemento intercambiável da extrusora. As principais causas do mau funcionamento são o desgaste natural por uso ou entupimento causado pelo polímero. A escolha do diâmetro de saída vai depender da dimensão demandada, ou seja, conforme a necessidade de projeto e acabamento, o que irá afetar de forma direta na vazão de polímero da extrusora, conforme Equação 1. Os principais materiais usados para a construção do bico poderão ser latão ou aço inoxidável.



Figura 14. Bloco de alumínio.

O bloco de aquecimento que comumente é construído em alumínio, possui furos para encaixar o resistor de cartucho e o sensor de temperatura. Na parte inferior possui uma rosca usada para a troca do bico de extrusão. Este por sua vez, pode ser trocado para manutenção ou por outro com diferente diâmetro, conforme a necessidade de extrusão. Na parte superior possui uma haste roscada para o encaixe na estrutura do barril. Os três componentes demonstrados nesta seção (bico, bloco e resistor) não diferem em nada de uma impressora convencional por filamento.

2.3. Sistema de aquecimento

O material polimérico granulado inserido na extrusora deve ser aquecido progressivamente tanto pelo atrito no barril, quanto pelos resistores ali instalados. Essa temperatura não pode ser excessiva na parte de entrada do material, pois assim acarretará na dificuldade da extrusão e até possível degradação do polímero nas próximas seções da rosca. Foi proposto um sistema de aquecimento gradativo, onde cada setor tem uma temperatura a ser controlada. Foram utilizadas três zonas de aquecimento ao longo do canhão e um resistor de cartucho na parte inferior, sendo essa última chamada de zona 4. A Figura 15 mostra o sistema de aquecimento progressivo utilizado.

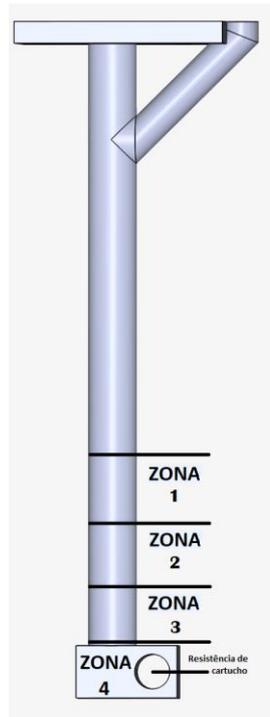


Figura 15. Zonas de resistores estimadas para o projeto.

As zonas possuem controle independente de temperatura e são responsáveis pela transmissão do calor por condução. A fórmula que define o fluxo de calor por condução é a Lei de Fourier, descrita por Incropera (2007, p. 38), como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Onde:

k = Condutividade térmica

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura

Os gradientes de temperatura variam ao longo do comprimento do barril para cada uma das zonas de aquecimento, por isso é necessário um estudo em software de como esta condução de calor se comporta durante o regime permanente, visto que faz parte das principais formas de aquecimento da extrusora, juntamente com o atrito.

As temperaturas precisam ser testadas e avaliadas. Para os primeiros testes foram definidas as seguintes temperaturas para as zonas por experiência do autor:

Zona 1	220°C
Zona 2	200°C
Zona 3	180°C
Zona 4	160°C

Tabela 6 – Temperatura por zona.

Para construção do protótipo e a realização das simulações, foi importado o modelo tridimensional do barril modelado no Solidworks para um software de simulação de transferência de calor para análise térmica. O software de computação em nuvem Simscale foi escolhido para a realização destes cálculos devido a sua interface interativa e amigável e o uso de supermáquinas remotas. Isto permitiu agilidade e melhor uso computacional. Do contrário, simulações deste porte poderiam demorar horas ou dias, dependendo do equipamento disponível.

A análise levou em consideração o aquecimento de um barril de aço genérico, com as seguintes propriedades:

Densidade	7807 kg/m ³
Condutividade	Isotrópica
Condutividade Térmica	60W/(m.K)
Calor Específico	480 J/(kg.K)
Temperatura inicial e ambiente	20°C

Tabela 7 – Propriedades da simulação.

A Figura 16 abaixo, apresenta uma simulação realizada em regime permanente após 800 segundos.

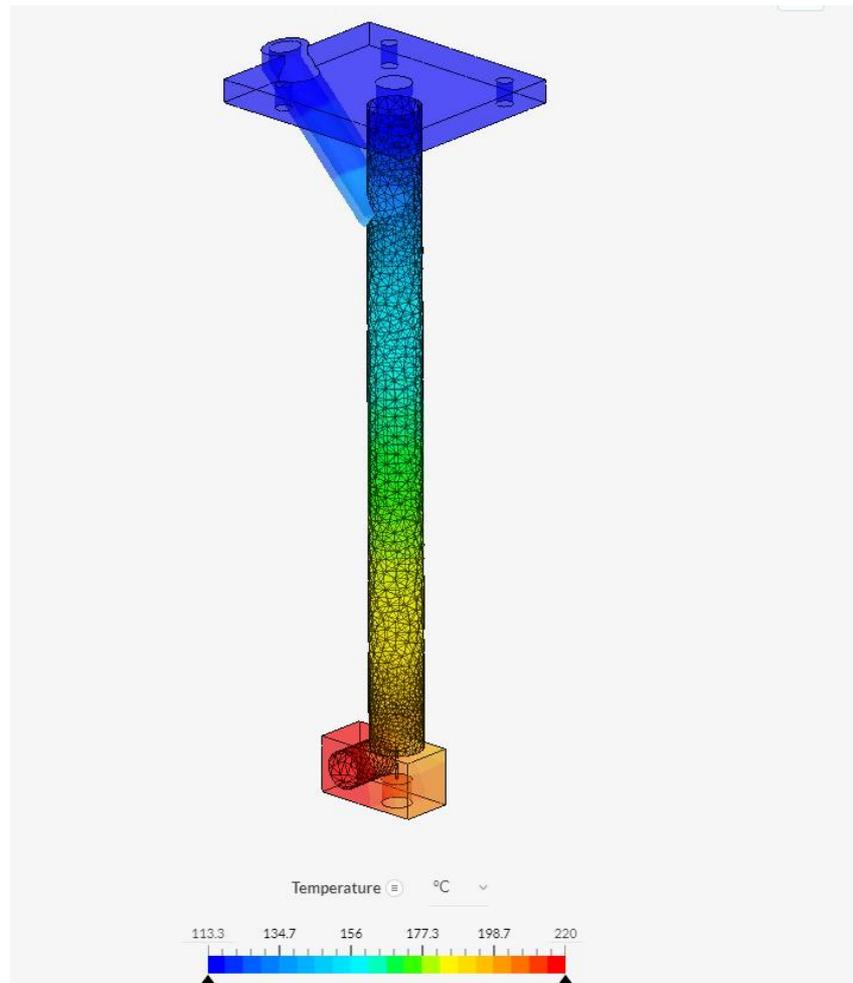


Figura 16. Análise térmica do conjunto no Simscale.

A Figura 16 permite a avaliação detalhada da temperatura em regime permanente dos pontos de aquecimento. O resistor de cartucho com temperatura na faixa de 220°C consegue manter a parte do bico na proximidade de 200°C, ideal para o poli(acido l'latico) como mostram as zonas em laranja na ponta. Nos pontos de transição do verde para amarelo observa-se a zona de compressão, onde ocorre aquecimento por atrito no material, o que eleva a temperatura a um valor aceitável, sem necessidade de mais aquecimento. A distribuição dos resistores ao longo do barril, na Fig. 15, atende de forma satisfatória as necessidades de projeto deste quesito.

2.5. Conjunto rosca e canhão usinado

Se o conjunto barril/rosca fosse confeccionado especificamente para este trabalho as dimensões a serem usadas para usinagem deveriam ser as das Figs. 8 e 11.

Várias empresas que prestam serviços de usinagem de precisão por comando numérico foram procurados. Em todas, houve dificuldade para a execução. A objeção principal alegada pelos prestadores de serviço foi a fixação num

centro de usinagem. A geometria da rosca exige um dispositivo especial para esta tarefa. O custo deste fixador torna proibitiva sua aquisição para uma produção unitária. Além disso, ainda que fosse possível se adquirir o acessório a um valor razoável, a usinagem em si também se tornaria proibitiva. Tudo isso por conta do diâmetro variável da parte interna da rosca. Por isso, não foi possível encontrar na região uma empresa interessada na execução da peça.

Além dessas situações citadas, podemos ainda acrescentar que a pandemia de COVID-19 afetou a disponibilidade de máquinas e peças de reposição para as mesmas, o que acarretou por tornar ainda mais difícil achar outra alternativa de confecção da rosca.

Dado o exposto, ficou claro que só faria sentido usinar a rosca em escala industrial, visto que o custo e as dificuldades de se produzir uma única peça se mostraram proibitivos. Uma alternativa foi encontrada de modo a tentar validar este projeto: comprar um conjunto de rosca e canhão proveniente de um fornecedor chinês. Assim, foi possível viabilizar a construção do protótipo e dar continuidade ao trabalho.



Figura 17. Foto do conjunto adquirido.

A Figura 17 mostra o conjunto adquirido da empresa chinesa ZanYaptr (2020). A rosca é usinada em aço inoxidável 304 e canhão em aço não especificado com tratamento térmico. O acabamento do produto é excelente e com custo/benefício muito bom. O valor total dispendido na época (julho/2020) foi de R\$ 190,00 (o equivalente a aproximadamente US\$ 33,00). A Figura 18 apresenta o desenho técnico do produto fornecido pelo vendedor, com as dimensões das peças em milímetros.

As Figuras 18 e 19 abaixo referem-se às peças adquiridas.

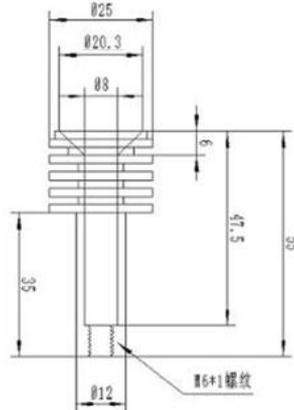


Figura 18. Desenho técnico do canhão (Fonte: ZanYaptr, 2020).

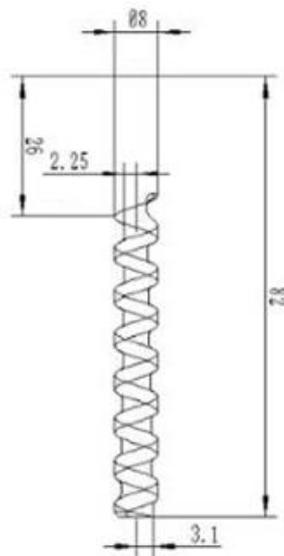


Figura 19. Desenho técnico da rosca. (Fonte: ZanYaptr, 2020).

A impressora selecionada para ter este conjunto acoplado, é a HE3D I3 (2014), de propriedade do autor. Trata-se de uma impressora 3D de extrusão de filamento. Possui estrutura em aço, guias e rolamentos lineares para movimentação dos eixos.

A estrutura é robusta, capaz de suportar o peso do conjunto de extrusão direta acoplado ao cabeçote de impressão. Foi utilizado o sistema original de aquecimento da impressora 3D, juntamente com um bico de extrusão de 0.4mm roscada (M6) ao canhão. O próprio motor de passo da impressora que controlava o avanço do filete foi utilizado para acionar a rosca da extrusora. Para tanto, o firmware Marlin (2011) foi recalibrado para esta nova função.

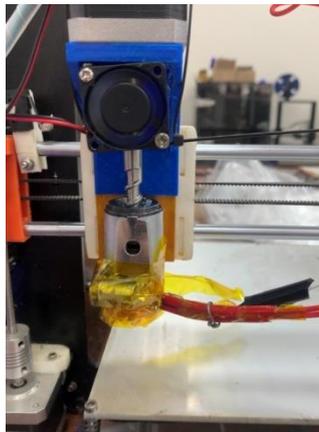


Figura 20. Acoplamento a impressora 3D.

O cartucho de aquecimento original da impressora 3D de 40 watts foi acoplado ao conjunto, mantendo total funcionalidade do sistema de aquecimento padrão da máquina. O material escolhido para o teste nesta rosca é o PLA. Ele foi escolhido por ser um polímero amplamente utilizado por sua fácil impressão em temperaturas não tão altas, na faixa de 180-200 graus celsius.

Durante o teste do conjunto, foram constatadas dificuldades de impressão como entupimentos constantes e dificuldade de extrusão. O polímero não fluía até a saída do barril de forma satisfatória e não passava para o bico de extrusão do conjunto. A Figura 21 abaixo mostra o barril obstruído pelo material de extrusão.



Figura 21. Entupimento e dificuldade de escoamento.

Os motivos principais destes defeitos são dois: folga excessiva do conjunto e pequeno comprimento da rosca. As questões geométricas relatadas implicaram na dificuldade do conjunto impor a pressão necessária ao material para que pudesse ser extrudado. Outro fator que implicou nesta falta de pressão foi que a ponta da rosca era plana, não completando a dosagem de forma adequada. O pouco calor gerado pelo atrito, devido ao pequeno comprimento do conjunto e folga dimensional, acabou por afetar o desempenho com PLA.

Com intuito de se entender o motivo deste mau funcionamento, o fornecedor deste conjunto rosca/barril foi novamente contatado. Neste momento, o referido vendedor informou que as peças em questão eram destinadas a extrusão de materiais cerâmicos. Inclusive, após o contato, o material publicitário que ofertava estes componentes foi alterado. Agora, o sitio eletrônico alerta para o tipo de material a ser extrudado pelo conjunto. Em certo sentido, este episódio foi útil, porque ressalta a importância de se ter um conjunto de dimensões adequadas para o propósito do trabalho. Por isso, apesar de não ter efeito prático do ponto de vista de impressão de polímeros, este incidente foi aqui registrado com a intenção de alertar os leitores. Restou claro que pequenas variações no projeto podem modificar significativamente os resultados.

No geral, este conjunto foi de suma importância para se constatar que a adaptação de um sistema de extrusão direta de polímeros ou cerâmicos é totalmente factível, podendo ser acoplado sem maiores modificações no maquinário e software, o que abre um precedente para a continuação deste trabalho com testes e desenvolvimento do conjunto de extrusão para polímeros. Fica documentado que este conjunto importado da República Popular da China pode ser utilizado na impressão de cerâmicos de forma eficaz.

Comparando as peças adquiridas e os cálculos efetuados acima, pode-se tirar conclusões ricas. De acordo com Rauwendaal (2013, p. 70), a folga no conjunto deve estar entre 0,013mm e 0,05mm. Por outro lado, o conjunto adquirido apresenta uma de 0,15mm. A rosca deve ter o L/D , razão em comprimento e diâmetro entre 20 – 30, pois a assim ficam melhor definidas as regiões de alimentação, que deve receber o material; compressão, que realiza o atrito e calor fundindo parcialmente o material e a seção de dosagem, onde ele se encontra no ponto de fusão e pronto para a extrusão contínua de um filete de impressão. A falha em qualquer uma dessas características ou parte do conjunto fará com que o sistema funcione de forma inadequada, não havendo a extrusão contínua e prejudicando ou impedindo o funcionamento.

3. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi feito, em primeiro lugar, o dimensionamento completo de um conjunto extrusor para ser acoplado em uma impressora 3D.

A usinagem da rosca deste conjunto mostrou-se proibitiva. A alternativa encontrada foi se adquirir por importação um conjunto pronto. Ocorre que no momento da compra, não se sabia que o produto adquirido se destinava à extrusão de materiais cerâmicos. As principais diferenças dimensionais para extrusão de polímeros e materiais cerâmicos são a folga rosca/barril e o comprimento da rosca. Pode-se perceber que as dimensões sugeridas pelos cálculos nestas duas variáveis são bastante diferentes das peças importadas.

Em vista disso, não foi possível a impressão em polímero e os testes práticos do equipamento construído.

Resta lembrar que os cálculos de dimensionamento efetuados podem ser aproveitados para a continuidade em novos trabalhos, bastando para tal, fabricar um novo conjunto rosca/barril conforme valores calculados.

Outra possibilidade para continuidade deste trabalho é testar o equipamento construído com materiais cerâmicos, tendo em vista que o conjunto extrusor adquirido foi construído para este propósito.

A continuidade deste trabalho, viabilizando o equipamento aqui proposto, permitirá aos futuros usuários uma alternativa ao uso de filamentos pré-fabricados. Isto implicaria em uma diminuição de custos na impressão 3D, pela possibilidade de utilização de sucata e/ou maior liberdade na escolha do material de adição.

No que se refere a sucata, a única providência a ser tomada é a moagem do material, o que permite a utilização de plásticos provenientes de peças impressas, seja por defeito ou suportes impressos junto com o produto final e posteriormente descartados. Além disso, se poderá optar pelo uso de outras fontes de sucata reciclada.

Já na opção do material a ser impresso, o usuário teria uma ampla gama de combinações de diferentes polímeros, podendo variar custos e características do produto final impresso.

Tanto o uso de sucata como a liberdade de combinação de polímeros não é possível quando se faz uso de filamentos pré-fabricados disponíveis no mercado. Além disso, materiais de baixa resistência a tração não podem ser impressos numa impressora FDM, o que não tem empecilho na extrusão direta.

O equipamento fica junto ao acervo pessoal de impressoras 3D do autor e à disposição da comunidade acadêmica do campus Farroupilha para futuras avaliações ou intervenções.

4. REFERÊNCIAS

- Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, “Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica”, 8ª ed, Ed AMGH, Porto Alegre, RS, 2011, 1088 p.
- Carrança, Thais. Pandemia gera escassez de matéria-prima e faz preços subirem no Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-55048624>>. Acesso em: 10/12/2020.
- F3DBR. Filamentos para impressão. 2020. Disponível em: <<https://www.filamentos3dbrasil.com.br>>. Acesso em: 20/05/2020.
- Repetier-Host. Hot-World GMBH & CO. 2013. Disponível em: <<https://www.repetier.com>>. Acesso em: 23/05/2020.
- Hoyi Sunway Limited. HE3D Printer. 2014. Disponível em: <<http://www.reprap.cn>>. Acesso em: 15/01/2020.
- Incropera, F., 2008, “Fundamentos de transferência de calor e de massa”, 6ª ed, Ed LTC, Rio de Janeiro, 2008, 643 p.
- Inforçatti Neto, P. Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão com rosca para impressoras tridimensionais portáteis. 2013. 127p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- Mahor XYZ. Pellet Extruder V3. 2019. Disponível em: <<https://mahorxyz.wordpress.com>>. Acesso em: 25/07/2020.
- Manrich, S., 2005, “Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes”, 1ª ed, Ed Artliber, São Paulo, 2005, 431 p.
- Marlin. Marlin Firmware. 2011. Disponível em: <<https://marlinfw.org>>. Acesso em: 10/09/2020.
- Moon’s. Nema 17 Standard Hybrid Stepper Motors. Disponível em: <<https://www.moonsindustries.com/series/nema-17-standard-hybrid-stepper-motors-b020105>>. Acesso em: 10/04/2021.
- Polygno. Flow rate calculator. 2018. Disponível em: <https://polygno.com/flow_rate_calculator>. Acesso em: 23/03/2020.
- Provatti, Roberta. Brasil recicla mecanicamente 21% dos plásticos. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/images/releases/Release_091_Reciclagem_Plasticos_.pdf>. Acesso em: 20/12/2020.
- Rauwendaal, C., 2013, “Polymer Extrusion”, 5ª ed, Ed. Munich, Hanser, 2013, 934 p.
- Shenzen Creality 3D Technology CO LTD. 2017. Ender-3 3D Printer. Disponível em: <<https://www.creality.com/goods-detail/ender-3-3d-printer>>. Acesso em: 20/12/2020.
- Stoshy de Freitas, M. Análise paramétrica e validação experimental de um cabeçote de extrusão baseado em rosca, para uma impressão 3-D. 2015. 113p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- Ultimaker BV. Ultimaker Cura. 2015. Disponível em: <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>>. Acesso em: 13/10/2020.
- ZanYaptr supplier. 2021. Disponível em: <<https://www.aliexpress.com/store/1944681>>. Acesso em: 20/10/2020.

DIRECT EXTRUSION APPLIED TO 3D PRINTING

Ronaldo Augusto Maggioni, eusouronald@hotmail.com¹

Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95184-274, Farroupilha – RS.

Abstract: *This work objective is to present a 3D printer with direct extrusion, which allows the use of polymeric granules as material. The project demonstrates calculations for building a prototype. The calculations used are of global and semi-empirical formulation. It has drawings and models of the extrusion set and numerical simulation of heating. A barrel and screw assembly for extrusion is shown.*

Keywords: *3D printer, extrusion, polymer, granule, tridimensional parts.*