

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEMec**

Renan Oscar de Oliveira

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA POSIÇÃO DE  
IMPRESSÃO E GEOMETRIA DA MATRIZ NO PROCESSO  
DE EXTRUSÃO POLIMÉRICA COM PELLETS VISANDO  
A MANUFATURA ADITIVA**



São Carlos  
2023

Renan Oscar de Oliveira

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA POSIÇÃO DE  
IMPRESSÃO E GEOMETRIA DA MATRIZ NO PROCESSO  
DE EXTRUSÃO POLIMÉRICA COM PELLETS VISANDO  
A MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos

2023

\*

Renan Oscar de Oliveira

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA POSIÇÃO DE IMPRESSÃO E GEOMETRIA DA MATRIZ NO PROCESSO DE EXTRUSÃO POLIMÉRICA COM PELLETS VISANDO A MANUFATURA ADITIVA. Renan Oscar de Oliveira. – São Carlos, 2023 – 67p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEMec, 2023.

1. Manufatura Aditiva. 2. Extrusão. 3. Polímeros *Pellets*. 4. Posição de Extrusão. 5. Matriz de Extrusão Customizada. 6. Geometria do Filamento.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Renan Oscar de Oliveira, realizada em 27/02/2023.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (UFSCar)

Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta (UFSCar)

Prof. Dr. Antonio Carlos Guastaldi (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que lutam diariamente para construir um mundo melhor.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esta dissertação às seguintes pessoas:

Minha família em primeiro lugar por dar o suporte e força durante todo este processo glorioso e de muita luta, possibilitando com que essa dissertação fosse concretizada mantendo todo o amor e harmonia que prezamos em família.

Meus orientadores Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa e Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki os quais sempre estiveram de prontidão, e com toda astúcia e parcimônia conduziram suas funções de líderes educadores, bem como todos outros docentes os quais fizeram meus momentos de aula, inesquecíveis e de grande valia para o saber.

Todos os colegas de graduação e pós-graduação que juntos somaram e contribuíram como um time, perfazendo mais uma vitória ao nosso histórico.

A UFSCar por me acolher e presentear com toda grandiosidade de suas instalações e funcionários.

Amigos e familiares que ficaram na torcida por mim.

E a Deus por sempre nos carregar em berço esplêndido e nos presentear em nossa caminhada com pessoas especiais, colocando cada coisa em seu mais perfeito lugar e em sua mais perfeita hora.

A FAPESP, pois este estudo é fruto de um grupo de pesquisa de maior amplitude, de projeto de pesquisa regular da FAPESP e que se faz necessário para que outros colaboradores, possam realizar também seus estudos, testes, validações e investigações levando-os para seu âmbito do estado da arte ou serem estudadas e aplicadas em um maior grau de profundidade, compartilhando isto com toda a academia e comunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Meu muito obrigado!

*"Para ir além de onde está, tem que se propor a fazer algo diferente do que faz.*

Autor

## RESUMO

A tendência da manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, vem ganhando destaque na indústria nos últimos anos, conseqüentemente, uma crescente frente de estudos vem sendo realizada para garantir a qualidade e produtividade. Notam-se diversos esforços em direções distintas para ampliar o conhecimento, rompendo barreiras na impressão 3D, especificamente na modelagem por deposição de material fundido (FDM-*Fused Deposition Modeling*), como é o caso da confecção de peças utilizando diretamente o *pellet* fundido (FPM-*Fused Pellet Modeling*) e o aumento da escala dimensional das peças impressas, na direção de produzir peças de médio e grande volume (LFAM-*Large-Format Additive Manufacturing*). Aproveitando das vantagens da impressão 3D utilizando diretamente o material *pellet* polimérico, este estudo utiliza ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*) como matéria-prima e uma extrusora mono-rosca de laboratório para investigar os efeitos da vazão na variação da posição de impressão e da geometria final do filamento extrudado em função da matriz de formato geométrico dedicado. Os padrões foram analisados a partir de uma série de 72 condições de extrusão. Pela coleta e análise dos dados de operação, confirmou-se a relação linear entre a rotação da rosca e a vazão mássica da extrusora, sendo possível levantar os valores característicos deste equipamento. A pressão interna na rosca é fortemente influenciada pela velocidade de rotação da rosca. Identificado uma variação da densidade do material extrudado em rotações menores que 20 rpm. Para rotações igual ou maiores de 20 rpm, nota-se uma estabilidade da densidade confirmando a faixa de rotação de 30-60 rpm sugerida pelo fabricante. Da geometria dos filamentos extrudados, ficou evidente a influência do efeito viscoelástico do material polimérico, inchamento do extrudado e comprovado sua relação de expansão normal diretamente relacionado com o formato da seção geométrica da matriz, alinhado com as simulações numéricas de estudos anteriores. Com a matriz de formato geométrico dedicado, foi possível extrudar filamentos com geometria final quadrática, que favorece na diminuição da densidade de vazios. O entendimento e controle destes fenômenos levam a avanços e descobertas em relação ao domínio dos processos de extrusão direta com polímeros *pellets* em posições distintas, geometria final do filamento extrudado, melhor adesão planar entre faces das faixas e camadas e menor tempo de extrusão em impressões 3D de médio e grande volume.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Extrusão (FDM); Polímeros Pellets (FPM); Posição de Extrusão; Matriz de Extrusão Customizada; Geometria do Filamento.

## ABSTRACT

The trend of additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, has been gaining prominence in the industry in recent years, consequently, a growing front of studies has been conducted to ensure quality and productivity. There are several efforts in different directions to expand knowledge, breaking barriers in 3D printing, specifically in Fused Deposition Modeling (FDM), such as the manufacture of parts using directly fused pellets (FPM) and the increase of the dimensional scale of the printed parts, towards the production of large volume parts (LFAM-Large-Format Additive Manufacturing). Exploiting the advantages of 3D printing using polymeric pellet material directly, this study uses ABS (acrylonitrile butadiene styrene) as a raw material and a laboratory single-screw extruder to investigate the effects of flow rate on varying the print position and final geometry of the extruded filament as a function of the dedicated nozzle geometric shape. The patterns were analyzed from a series of 72 extrusion conditions. By collecting and analyzing the operating data, the linear relationship between screw rotation and extruder mass flow rate was confirmed, and it was possible to get the characteristic values of this equipment. The internal pressure in the screw is strongly influenced by the screw rotation speed. A variation of the density of the extruded material was identified at rotations lower than 20 rpm. For rotations equal to or greater than 20 rpm, a stability of the density is noted, confirming the rotation range of 30 - 60 rpm suggested by the manufacturer. From the geometric shape of the extruded filaments, it was evident the influence of the viscoelastic effect of the polymeric material (Barus effect) and proved its normal expansion ratio directly related to the geometric section shape of the nozzle, in agreement with the numerical simulations in previous studies. With the dedicated geometric nozzle shape, it was possible to extrude filaments with final quadratic geometry, which favors in decreasing the void density. The understanding and control of these phenomena lead to advances and breakthroughs regarding the mastery of direct extrusion processes with polymer pellets in distinct printing positions, final extruded filament geometry, improved planar adhesion between strip and layer faces, and shorter extrusion time in medium and large format 3D printing.

**Keywords:** Additive Manufacturing; Fused Deposition Modeling; Fused Pellet Modeling; Extrusion Orientation; Custom Nozzle Shapes; Filament Shape.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral dos materiais na MA para a próxima era. . . . .	19
Figura 2 – Detalhe das sobreposições e densidade de vazios na deposição de filamentos. . . . .	22
Figura 3 – Geometria das secções das matrizes e dos filamentos extrudados. . . . .	23
Figura 4 – Detalhe da matéria-prima em <i>pellets</i> . . . . .	25
Figura 5 – Fotos das matrizes utilizadas e suas respectivas geometrias. . . . .	26
Figura 6 – Detalhe da matriz 330 e sua respectiva geometria usinada. . . . .	27
Figura 7 – Extrusora de laboratório montada no setup horizontal. . . . .	28
Figura 8 – Esquema geral dos componente da extrusora de laboratório. . . . .	30
Figura 9 – IHM da extrusora e tela para setar as temperaturas das zonas. . . . .	32
Figura 10 – Exemplos de amostras, filamentos e set. . . . .	33
Figura 11 – Pórtico e extrusora montados no setup vertical. . . . .	36
Figura 12 – Visão geral dos componentes utilizados no data logger. . . . .	37
Figura 13 – Divisão das zonas de aquecimento. . . . .	38
Figura 14 – Valores da vazão mássica por matriz na horizontal e vertical por rotação. . . . .	40
Figura 15 – Valores médios da vazão mássica horizontal e vertical por rotação. . . . .	41
Figura 16 – Valores da vazão volumétrica por matriz na horizontal e vertical por rotação. . . . .	42
Figura 17 – Valores médios da vazão volumétrica horizontal e vertical por rotação. . . . .	43
Figura 18 – Valores da pressão por matriz na horizontal e vertical por rotação. . . . .	45
Figura 19 – Valores médios da pressão na horizontal e vertical por rotação. . . . .	45
Figura 20 – Valores da densidade por matriz e rotação na horizontal e vertical. . . . .	46
Figura 21 – Valores médios da densidade por rotação na horizontal e vertical. . . . .	47
Figura 22 – Ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na horizontal e vertical. . . . .	49
Figura 23 – Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz 330 na horizontal. . . . .	50
Figura 24 – Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz 330 na vertical. . . . .	51
Figura 25 – Desenho 2D - Matriz 1,75mm. . . . .	56
Figura 26 – Desenho 2D - Matriz 3,00mm. . . . .	57
Figura 27 – Desenho 2D - Matriz 3,00mm - Côncavo. . . . .	58
Figura 28 – Dados do setup horizontal para as amostras. . . . .	61
Figura 29 – Dados do setup horizontal para os filamentos. . . . .	62
Figura 30 – Dados do setup vertical para as amostras. . . . .	63
Figura 31 – Dados do setup vertical para os filamentos. . . . .	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Matriz relacional de temas recentes em comparação a presente contribuição.	24
Tabela 2	– Valores da razão das áreas entre as matrizes. . . . .	26
Tabela 3	– Nomenclatura dos corpos de prova no setup horizontal. . . . .	34
Tabela 4	– Valores da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação na horizontal. . . . .	44
Tabela 5	– Valores da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação na vertical. . . . .	44
Tabela 6	– Valores médios da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação. . . . .	44
Tabela 7	– Valores do ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na horizontal. . . . .	48
Tabela 8	– Valores do ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na vertical.	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCDM	Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
CFD	Computational Fluid Dynamics
CP	Corpo de Prova
FDM	Fused Deposition Modelling
FPM	Fused Pellet Modeling
IHM	Interface Homem-Máquina
LEDC	Less Economically Developed Country
LFAM	Large-Format Additive Manufacturing
MA	Manufatura Aditiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PID	Proportional Integral Derivative Controller
PPGEMec	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SBC	Single-board Computer
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>MANUFATURA ADITIVA</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>DEPOSIÇÃO DE MATERIAL PELLET FUNDIDO</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>DENSIDADE DE VAZIOS</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>GEOMETRIAS DA MATRIZ E DO FILAMENTO</b>	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>MOTIVAÇÃO E ESTADO DA ARTE</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>25</b>
3.1.1	Polímero termoplástico	25
3.1.2	Matrizes de extrusão	25
<b>3.2</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>27</b>
3.2.1	Equipamentos e Instrumentos	27
3.2.2	Extrusora	28
3.2.3	Configuração dos Sets	32
3.2.4	Setup Horizontal	33
3.2.5	Setup Vertical	35
3.2.6	Metrologia	36
<b>3.3</b>	<b>AQUISIÇÃO DOS DADOS</b>	<b>37</b>
3.3.1	Data Logger	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>DADOS COLETADOS</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA EXTRUSORA</b>	<b>40</b>
4.2.1	Vazão Mássica	40
4.2.2	Vazão Volumétrica	42
4.2.3	Caracterização	43
4.2.4	Pressão	44
4.2.5	Densidade	46
<b>4.3</b>	<b>MATRIZ CUSTOMIZADA</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>52</b>

<b>5.1</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS EM RELAÇÃO A MA . . . . .</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A – DESENHO 2D - MATRIZ 1,75MM . . . . .</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHO 2D - MATRIZ 3,00MM . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE C – DESENHO 2D - MATRIZ 3,00MM - CÔNCAVO . . .</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE EM C DO DATA LOGGER . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE E – DADOS DO SETUP HORIZONTAL PARA AS AMOS- TRAS . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE F – DADOS DO SETUP HORIZONTAL PARA OS FILA- MENTOS . . . . .</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE G – DADOS DO SETUP VERTICAL PARA AS AMOS- TRAS . . . . .</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE H – DADOS DO SETUP VERTICAL PARA OS FILA- MENTOS . . . . .</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO A – PROPRIEDADES DO SABIC CYCOLAC MG94 ABS . .</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) vem sendo um dos processos de fabricação que mais tem se desenvolvido nas últimas décadas, devido ao surgimento e popularização das impressoras 3D, as quais utilizam um filamento polimérico como matéria-prima para imprimir peças de protótipo ou produtos finais pelo método de extrusão por camadas, o FDM que consiste na criação de peças pela deposição de material fundido, camada por camada, até sua total fabricação (VOLPATO, 2021). A MA chamada também de impressão 3D, proporcionou soluções para fabricações flexíveis, econômicas e personalizadas, porém com limitações das impressoras, dos processos e do volume do produto fabricado.

Com a evolução dos processos e métodos, foram desenvolvidos softwares e ferramentas computacionais para o auxílio e controle destes processos (modelos paramétricos 3D, fatiadores inteligentes, simuladores físico-mecânicos e/ou termo-fluídicos) e os mesmos vêm trazendo melhorias significativas para suportar cada uma das inúmeras aplicações e variações da manufatura aditiva, assim, os limites das peças prototipadas e a fronteira da ciência na impressão 3D, também são forçados e explorados.

As peças prototipadas ou produtos finais impressos tiveram seus formatos explorados e o volume de impressão das peças também foram levados à prova com o aumento de seu porte para médio e grande volume. Frentes de investigações e estudos no sentido da LFAM (*Large-Format Additive Manufacturing*) são propostos, exemplo do Shah et al. (2019) onde foi levantado e comparado modelos de impressoras 3D de médio e grande volume (impressoras caracterizadas por terem volume cúbico de impressão maiores do que  $1\text{m}^3$ ) e proposto um protótipo de impressora 3D para impressões em médio e grande volume. É preciso a continuação das investigações para compreender ao máximo, a relação dos parâmetros das impressoras frente ao tempo total da impressão, vazão mássica e volumétrica, propriedades mecânicas do filamento, integridade superficial, bem como adesão e densidade de vazios entre camadas e faixas. Segundo Liu et al. (2017) as pesquisas sobre LFAM estão obtendo sucesso, mas ainda existem problemas como a instabilidade e defasagem do fluxo de impressão, escolher um equipamento que tem o controle de pressão estabilizado e um controle acurado do fluxo de deposição pode ser o ponto chave para impressões de médios e grandes volumes. Em termos de pesquisa isso se justifica, pois em um volume maior as deformações e defeitos podem se tornarem mais críticos e aparentes.

Em relação à matéria-prima na impressão 3D, há um movimento investigativo frente ao uso dos grãos de polímeros termoplástico ao invés do uso de filamentos. Esse grãos poliméricos propiciam o uso de material virgem ou reciclado possibilitando menor custo da peça final, tornando uma vantagem perante a impressão convencional com filamento. Essa tendência, fez surgir impressoras 3D com cabeçote de impressão que derretem diretamente o polímero na forma de *pellets*. Essas máquinas empurram o material plastificado através de uma matriz de formato

definido depositando o filamento extrudado diretamente na camada. Isso possibilita reduzir uma etapa do processo reduzindo o custo final da impressão 3D, obtendo ganhos em termos de flexibilidade na adoção de materiais. A variedade de polímeros (diferentes tipos, *grades* ou até uma mistura entre eles) aumenta o range de opções na fabricação perante aos desafios da impressão 3D direta de médio e grande volume.

Durante a impressão 3D, existem parâmetros que podem ser variados e controlados para garantir um melhor resultado frente à densidade de vazios. Essa característica aparece devido à presença de lacunas vazias entre camadas e faixas, sendo um defeito inevitável na impressão 3D. Um dos itens dos quais podem ser variados para aumentar a densidade da impressão e diminuir os vazios, é a variação do formato geométrico da seção da matriz de extrusão (sem alterar os parâmetros da extrusora). Esta frente foi item de estudo e foram feitas simulações computacionais numéricas de análise fluídica (CFD<sup>1</sup>) por Wang et al. (2016).

Alterando a variação da geometria da matriz, mantendo todos os outros parâmetros de impressão fixos, pode-se contribuir para a diminuição dos vazios criados durante a deposição do material extrudado. Pois uma melhor aderência deve ser obtida se o arranjo da distribuição do material for melhor aplicado, na direção de cobrir as falhas dos interstícios, provendo uma maior área de contato entre camadas e faixas, comparados a impressão com matrizes de formato de seção circular.

Segundo Wang et al. (2016) durante a extrusão com matrizes de seção cilíndrica, o formato final tende-se a ovalizar (elipse), devido ao inchamento do extrudado e da deposição das camadas seguintes, gerando uma sobreposição no sentido vertical das camadas. Para obter uma menor área de vazios, que significa uma melhor qualidade de deposição, somente aumentar a sobreposição das faixas verticais diminuindo o passo e usar uma mesma configuração de intervalo de sobreposição no sentido horizontal das camadas, poderia sim, diminuir os vazios, mas por causa da seção cilíndrica do bico e do modo de aplicação, mais camadas de deposição serão necessárias, o que também resultaria um tempo de impressão de maior duração.

A fim de resolver estes vazios, pode-se assumir como características do polímero plastificado, alta viscosidade e com significativa elasticidade, material visco-elástico, caracterizado como fluido não-newtoniano. Fluido o qual não se comporta linearmente como os fluidos newtonianos, onde sua propriedade da tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. São fluidos visco-elásticos como espumas, adesivos bem como os polímeros plastificados (CHHABRA, 2010). Os fluidos não-newtonianos sofrem a ação de alguns efeitos como é o caso do efeito Barus, um fenômeno de expansão do fluido na saída de um orifício na direção normal, das margens para os cantos, devido as tensões normais existentes que se expandem rapidamente em espaços abertos (HORI; OKUBO, 1980). Neste contexto, podemos estudar uma geometria teórica mais eficiente para diminuir a presença dos vazios, aumentando

<sup>1</sup> Termo do inglês: *Computational Fluid Dynamics*. Processo computacional para analisar comportamento dos fluidos utilizando métodos numéricos.

a densidade de impressão sem que haja o aumento do tempo da impressão devido as maiores sobreposições verticais e horizontais das camadas e faixas respectivamente, avaliando os ganhos da operabilidade na impressão 3D.

Sabendo que o polímero *pellet* plastificado extrudado se comporta como um fluido não-newtoniano e durante sua passagem pelo orifício de saída da matriz é característico a presença do efeito Barus (inchamento do extrudado), foram escolhidos 3 (três) matrizes de extrusão, variando entre eles sua dimensão diametral cilíndrica e a geometria da seção com formato previamente estudado.

Diante desse contexto de pesquisa, o projeto em questão também visa aumentar o conhecimento de um equipamento de extrusão de filamento polimérico, para com o mesmo exercer atividades dedicadas na impressão 3D utilizando diretamente a alimentação com grãos poliméricos (*pellets*) e não o uso de filamento.

Buscando maior entendimento do equipamento, como seu controle operacional, suas limitações e até mesmo a caracterização da vazão mássica e volumétrica visando a manufatura aditiva, foram adotadas para execução do experimento científico, 2 (duas) posições de impressão (horizontal, vertical) chamadas de *setup*. Para cada uma das posições do *setup*, são utilizados 3 (três) matrizes. Duas com orifício de seção circular de 1,75 e 3,00 mm de diâmetro e a terceira matriz um formato de seção geométrica customizada quadrático côncavo incluso no círculo de 3 mm de diâmetro. As quais são detalhadas suas geometrias e dimensões no Capítulo 3 na Seção 3.1.2.

Na direta intenção de compreender o comportamento da vazão mássica e volumétrica da extrusora, é variado a velocidade de extrusão em diferentes valores (5, 10, 15, 20, 25 e 30 rpm) para cada uma das combinações de posição e matriz. Cada combinação adotada de posição, matriz e rpm é chamado de *set*. Resultando de cada combinação de *set*, dois tipos de corpos de prova (CP), uma amostra e um filamento. Na totalidade são analisados uma série de 72 condições de extrusão.

## **1.1 OBJETIVOS**

Realizar a instalação, parametrização e operação da extrusora de laboratório P2788 Miotto, utilizando polímeros pellets de ABS, bem como compreender e levantar os valores de vazão mássica e volumétrica da mesma.

Analisar o comportamento da vazão, pressão e densidade em duas posições de extrusão (horizontal e vertical) operando em 6 diferentes rotações de extrusão (5, 10, 15, 20, 25 e 30 rpm).

Compreender como os parâmetros da extrusora se relacionam entre si e quais seus efeitos nos filamentos produzidos com as matrizes.

Estudar o efeito do inchamento do extrudado com a utilização da matriz de seção geométrica customizada.

Analisar a diferença do formato final da seção do filamento extrudado em relação a seção geométrica da matriz utilizada, na direção de confeccionar filamentos quadráticos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

Para o referencial teórico desse trabalho, foram relacionados os aspectos técnicos da manufatura aditiva e sua importância crescente no cenário industrial, onde destacam-se as múltiplas possibilidades de aplicação das soluções desenvolvidas. Essa expansão de conhecimento é incentivada por um mercado movimentado tanto por grandes empresas, quanto por uma multidão de entusiastas amadores que exploram também o potencial criativo das técnicas de impressão. Para fins de pesquisa desse trabalho, o foco está essencialmente na técnica de extrusão com material granular polimérico (*pellets*), utilizando matrizes customizadas. Apesar dos avanços da MA, três grandes limitações existem, são elas:

- Tempo de fabricação (TUMBLESTON et al., 2015);
- Controle da qualidade e custo de matéria-prima (KIM; LIN; TSENG, 2018);
- Engenharia de materiais (PICARD; MOHANTY; MISRA, 2020).
- Dimensões máximas da peça a ser fabricada (SHAH et al., 2019).

Autores têm procurado formas de mitigar algumas dessas limitações da MA, na incorporação de extrusoras com grande capacidade de deposição de material (SHAH et al., 2019) ou no uso de material virgem ou reciclado na forma de *pellets* para baratear a matéria-prima (VOLPATO et al., 2015; KROGH, 2018). No entanto, essas soluções carecem de estudos detalhados a respeito da sua efetividade, bem como diretrizes claras a respeito de parâmetros e problemas inerentes à impressão de peças no contexto de médio e grande volume.

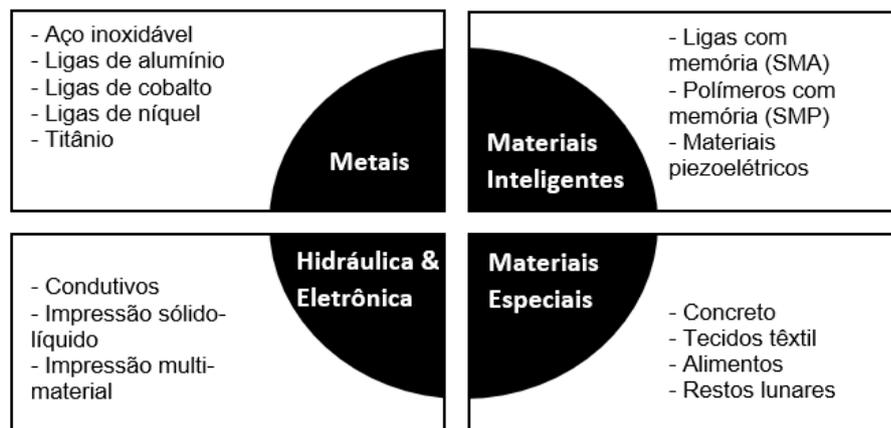
Na sua definição, a Manufatura Aditiva é um processo de fabricação por adição de material, método pelo qual um produto pode ser diretamente fabricado a partir de um modelo 3D computacional segundo Tang e Zhao (2016). O processo também pode e é referido por outros termos, tais como *Prototipagem Rápida e Impressão 3D* (EYERS; POTTER, 2015). Técnicas de fabricação por adição de material vêm sendo criadas e melhoradas nas últimas décadas, contribuindo para o desenvolvimento de novos produtos ao redor do mundo (GAO et al., 2015; LOVO, 2017). Analistas e pesquisadores estimam que o mercado global da manufatura aditiva ultrapasse a casa dos 21 bilhões de dólares em 2020 (THOMPSON et al., 2016).

Algumas vantagens importantes do processo de MA em relação às técnicas tradicionais de fabricação segundo Gao et al. (2015), Gibson, Rosen e Stucker (2014), Lovo (2017) são:

- Rápida fabricação de peças unitárias, protótipos e ferramental;
- Redução de desperdício de matéria-prima;
- Redução de etapas de fabricação e retrabalho;
- Possibilidade de fabricação de geometrias complexas;
- Facilidade na operação de máquinas de MA;
- Possibilidades de melhorias na logística de confecção e distribuição de produtos.

A manufatura aditiva surge como uma componente essencial na cadeia de produção da Indústria 4.0<sup>1</sup>. Neste processo de produção, é crescente a necessidade de soluções dedicadas, sejam elas direcionadas a suprir demandas dos clientes ou no processo de fabricação atuando entre outras, na prototipação de componentes usados internamente e/ou comercialmente. A possibilidade de aumentar a variedade de materiais disponíveis no mercado tem impulsionado as pesquisas na área da MA, na direção da busca por processos com baixo custo, ampla escala de produção e o aumento do volume das peças. Trabalhos recentes obtiveram resultados que comprovam que é possível modificar a estrutura dos materiais através da adição de componentes, antes impossíveis de serem miscigenados por meios de fabricações usuais. Nesse sentido, Dilberoglu et al. (2017) classifica os quatro tipos principais de aplicações de materiais atualmente pesquisados na manufatura aditiva voltados para a próxima era, na Figura 1.

Figura 1 – Visão geral dos materiais na MA para a próxima era.



Fonte: Traduzido do Dilberoglu et al. (2017)

<sup>1</sup> Segundo Silva e Webber (2020): a Indústria 4.0 é considerada o novo estágio industrial no qual uma série de tecnologias emergentes convergem para fornecer soluções digitais, e essas soluções digitais também demandam novos processos produtivos. Somado a isso, há outras ferramentas tecnológicas que fazem parte da indústria 4.0: Manufatura Baseada na Nuvem, *Big Data*, Aprendizado de Máquinas, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas, Sistemas de Segurança Cibernéticos, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva e Realidade Aumentada.

Usando a classificação da Figura 1, os materiais poliméricos se encaixam quanto à aplicação nas categorias de materiais inteligentes (*smart materials*) e eletrônicos e hidráulicos impressos (*printable hydraulics and electronics*). Pode-se observar que a gama de materiais pesquisados atualmente na MA é promissora.

## 2.2 DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO

Na FDM um material sólido, geralmente um polímero, é extrudado a uma temperatura controlada e depositado no estado plastificado sobre uma superfície, na maioria das vezes plana. Para realizar a deposição de material é necessário o auxílio de um mecanismo eletro-mecânico comandado por um software de controle de coordenadas. Essa matéria-prima pode ser alimentada na forma de filamentos ou de *pellets*. Uma das principais dificuldades desse processo é manter o acabamento do objeto fabricado quando este objeto ultrapassa a escala de pequeno volume. Liu et al. (2017) propuseram uma tecnologia para impressão 3D em larga escala usando FDM a partir de uma extrusora com rosca em dois estágios. No sistema proposto, uma plataforma móvel era usada para dar forma à peça, enquanto a extrusora era fixa. Os autores investigaram diferentes parâmetros de impressão como velocidade, espessura de camada e largura de filamento para um melhor entendimento do processo. Os autores apontaram a possibilidade de se fabricar peças de maior volume a partir deste processo, no entanto apontaram a necessidade de se efetuar mais pesquisas para o melhor entendimento.

Para resolver o problema de espaço e velocidade da impressão 3D baseada em filamentos, Wang et al. (2016) propuseram um sistema de extrusão com *pellets* e um parafuso de passo variável. No entanto, esse sistema requer a utilização de matrizes de extrusão com diâmetros maiores. O maior diâmetro da matriz somado à pressão e velocidade de deposição tornam crítico o efeito Barus sobre o filamento resultante no processo. Para controlar esse efeito o estudo também propôs uma mudança na geometria da matriz.

A densidade de vazios constitui uma outra variável a ser considerada na qualidade de acabamento das peças produzidas na MA. A conformação das camadas dos filamentos de formato elíptico, devido à sua geometria particular, não preenche todos os espaços. Além disso o ar presente entre o filamento e a superfície de deposição tende a "ficar preso" entre os filamentos já depositados. Uma vez que não é possível eliminar a presença do ar, a solução voltou-se para a possibilidade de alterar a geometria do filamento. Devido às espessuras de camadas usualmente empregadas pelas impressoras de extrusão mais comuns, em geral entre 0,1 mm e 0,3 mm de espessura, e as configurações construtivas das impressoras, os tempos para fabricação de uma dada peça podem ser excessivos e inviabilizar a fabricação de determinado produto (VOLPATO et al., 2015; TUMBLESTON et al., 2015).

### 2.3 DEPOSIÇÃO DE MATERIAL PELLET FUNDIDO

À medida que o volume da peça aumenta, eleva-se o tempo de produção e a deformação da peça torna-se um fator crítico. Atualmente, a maioria das impressoras 3D baseadas em filamentos são equipadas com bicos que variam de 0,3 a 0,8 mm de diâmetro e cuja velocidade de impressão estão entre 30 e 120 mm/s, mesmo contando com algumas impressoras que podem alcançar 200 mm/s, ainda assim o tempo necessário para construir uma peça de volume médio seria muito longo (WANG et al., 2016). Os autores Shaik, Schuster e Shaik (2021) apontam algumas das principais vantagens da impressão FPM<sup>2</sup>: baixo custo da matéria-prima em comparação com a empregada na maioria dos processos de impressão 3D, maior massa volumétrica que mantém o fluxo necessário para a produção de peças de grande porte, maior variedade de materiais disponíveis<sup>3</sup>, materiais reciclados podem ser aproveitados na alimentação, maior velocidade de impressão devido ao maior diâmetro das matrizes de extrusão.

Singamneni et al. (2021) apontaram que a extrusão direta usando *pellets* tem recebido menos atenção em comparação com as técnicas que utilizam filamentos. Dificuldades técnicas, tais como o controle de material depositado e a degradação de alguns polímeros extrudados quando submetido a altas temperaturas explicariam essa menor popularidade. Objetivando o uso de uma mini extrusora montada em um braço robótico industrial onde opera fundindo um material polímero granulado em um parafuso de passo variável, especialmente projetado para garantir maior velocidade e qualidade de extrusão, uma melhoria partiu da análise e simulação teórica computacional com o objetivo de otimizar a geometria da matriz e assim diminuir a presença de defeitos que ocorreriam no método tradicional utilizando filamentos e matrizes regulares (WANG et al., 2016).

Cada polímero que compõe os *pellets* exige uma temperatura ideal de extrusão. Na extrusão direta, que utiliza apenas um estágio, a fusão em faixas de 200 - 240 °C. A temperatura deve ser controlada para evitar deterioração das propriedades físico-químicas do filamento. Liu et al. (2017) construíram uma extrusora com dois estágios, o primeiro para fundir e o segundo para manter a temperatura constante de fornecer fluxo contínuo na deposição do material. Esse modelo contorna o fator da contrapressão em único parafuso extrusor, onde o material fundido retorna e empurra os *pellets* que estão sendo adicionados para mais longe da zona de derretimento ocasionando perda de eficiência.

A principal função do cilindro de extrusão é manter um fluxo contínuo de material fundido, além de controlar a temperatura adequada e velocidade de extrusão do material (PRUSI-NOWSKI; KACZYŃSKI, 2017). Outro fator que pode influenciar a velocidade de extrusão está relacionado à contrapressão exercida pelo fluxo de material do lado que volta, retornando do parafuso. Em casos que esse fator de contrapressão se torna crítico é necessário fazer uso de uma

<sup>2</sup> Termo em inglês: *Fused Pellet Modeling*.

<sup>3</sup> Principalmente devido à falta de necessidade de se produzir um filamento, um processo complexo e mesmo inviável para alguns materiais torna-se uma opção na FPM.

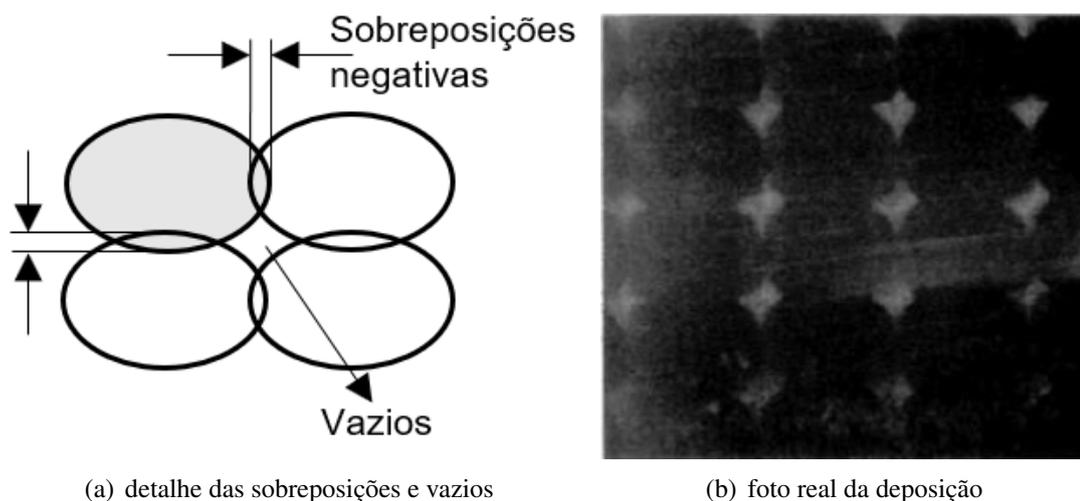
válvula de contrapressão. Os pesquisadores Volpato et al. (2015) estenderam os requisitos do cabeçote para a produção de filamentos contínuos, uniformes e capazes de aderir aos demais para garantir a integridade do material.

Prusinowski e Kaczyński (2017) simularam a adição de micropartículas de carbono que são misturadas aos polímeros fundidos no cabeçote, assim a condutividade térmica do aditivo manteria a temperatura constante e facilitaria a deposição e aderência nas camadas.

## 2.4 DENSIDADE DE VAZIOS

A densidade de vazios causada pela lacuna entre camadas e faixas de deposição é um defeito inevitável do filamento baseado em sistemas de extrusão, e pode ser vista em detalhe na Figura 2. Dois tipos distintos de sobreposição causam deformidades na estrutura do material impresso: o primeiro é positivo e caracterizado pela folga entre dois filamentos em uma camada. O segundo, e mais comum, é negativo e ocorre quando dois filamentos entram em contato e sobreposição. Isso também resultará em deformação da peça e falha de deposição. Considerando a densidade de vazios como um fator intrínseco, uma vez que “nenhum filamento tem uma superfície completamente em contato com seus vizinhos de camada, de superposição e sobreposição”, Li et al. (2002) propôs um método específico para calcular a rigidez efetiva das peças produzidas na FDM, ao mesmo tempo desenvolveu uma fórmula para a estimativa da densidade de vazios esperada. As fórmulas foram testadas em comparação a duas amostras. O resultado indicou uma correlação suficiente entre fórmulas e resultados.

Figura 2 – Detalhe das sobreposições e densidade de vazios na deposição de filamentos.



Fonte: (a) Elaborado pelo autor. (b)(WANG et al., 2016)

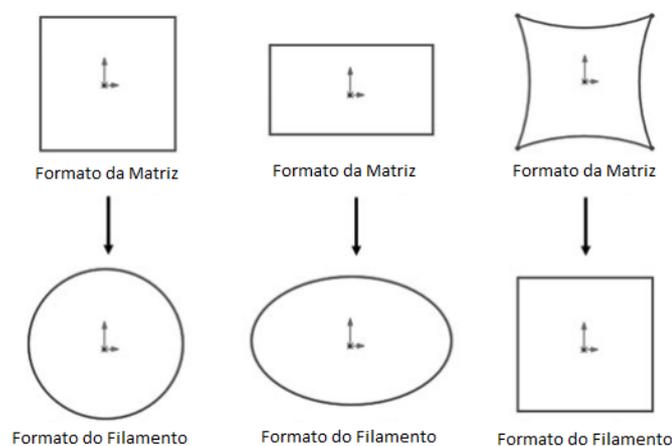
Também conhecido como bridge, essa lacuna causada pelo ar que "fica preso" entre os filamentos no momento da deposição já ocorre na impressão com uso de filamentos e se torna mais preocupante na impressão com matrizes de abertura diametral maiores, quais são empregados na LFAM.

## 2.5 GEOMETRIAS DA MATRIZ E DO FILAMENTO

As matrizes de extrusão (também denominadas como bocais) são fundamentais para o funcionamento da extrusora, são elas que geram a contra pressão responsável pela mistura do material e impõem a forma à massa polimérica empurrada pela rosca central. Ao sair pelo orifício da matriz, inicia-se o resfriamento do polímero, adquirindo o formato resultante da geometria da matriz.

O material polimérico apresenta três estados físicos diferentes, desde quando é alimentado no reservatório de matéria-prima até quando é extrudado através da matriz: o estado de vidro do *pellet*, o estado de alta elasticidade do material já aquecido e por fim um estado de fluxo viscoso do *pellet* plastificado. A alta viscosidade e elasticidade do polímero fundido fazem dele um tipo de material viscoelástico que apresenta propriedades de fluídos não newtonianos, e uma característica importante de um fluído não newtoniano é o efeito Barus. Nesse processo, o diâmetro do fluxo emergente pode ser várias vezes o diâmetro da matriz e a taxa de expansão varia das bordas para os cantos. Quanto maior for o comprimento da borda, mais significativa será a expansão. Isso resulta na forma de filamento do material extrudado sendo diferente da forma da matriz. Portanto, se o esperado formato do filamento é um quadrado, o formato da matriz deve ser semelhante ao terceiro formato da Figura 3.

Figura 3 – Geometria das secções das matrizes e dos filamentos extrudados.



Fonte: Wang et al. (2016)

Para contornar o efeito Barus, Wang et al. (2016) teorizou com a ajuda de softwares de simulação numérica, que uma mudança na geometria da matriz de extrusão deveria obter filamentos com um formato quadrático. Esse formato diminuiria substancialmente a densidade de vazios e aumentaria a adesão entre camadas das peças fabricadas, bem como um ganho na integridade superficial. Ao controlar os parâmetros do processo de extrusão, um filamento de geometria quadrática pode ser obtido para diminuir a densidade de vazios e melhorar a qualidade da deposição do material (WANG et al., 2016).

A busca por soluções que diminuam os gargalos na impressão de peças na LFAM tem se diversificado. A mudança na geometria da matriz para produzir um filamento de formato quadrático, mais uniforme e com menor densidade de vazios, é uma inovação teórica à qual esse trabalho reproduziu em laboratório, analisando a factibilidade do método e seus resultados esperados. A partir desse experimento, tem-se novos dados e características à disposição para outras pesquisas complementares.

## 2.6 MOTIVAÇÃO E ESTADO DA ARTE

Esta seção contempla alguns trabalhos recentes (estado da arte) relacionados ao estudo presente deste experimento, buscando o aumento do conhecimento dos efeitos da posição de impressão e da geometria da matriz no processo de extrusão polimérica com *pellets* visando a manufatura aditiva. A Tabela 1 foi elaborada com o desejo de saber o que tem sido pesquisado em relação aos temas propostos e posicionar o presente trabalho frente as linhas de pesquisas. Vemos que cada artigo dedicou-se para cada tema específico e este trabalho buscou preencher a lacuna existente abrangendo todos os tópicos citados.

Tabela 1 – Matriz relacional de temas recentes em comparação a presente contribuição.

ARTIGO	EXTRUSÃO PELLETS (FDM)	EXTRUSÃO PELLETS (FPM)	POSIÇÃO MATRIZ	MATRIZ CUSTOM.
(VOLPATO et al., 2015)	X	X		
(ISHAK; FISHER; LA-ROCHELLE, 2016)	X		X	
(WANG et al., 2016)		Simulação		X
(ZHANG et al., 2016)	X		X	
(BROOKS et al., 2017)	X	X		
(DILBEROGLU et al., 2017)	X			
(LIU et al., 2017)	X	X		
(KROGH, 2018)	X	X		
(SHAH et al., 2019)	X	X		X
<b>Este trabalho</b>	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor.

Se faz necessário enfatizar que esta pesquisa integra disciplinas relacionadas ao conhecimento da MA, extrusão polimérica com *pellets*, matrizes de extrusão no contexto da criação de filamentos customizados para peças de médio e grande volume em posições distintas, apresentando um trabalho inédito dentro do campo.

### 3 METODOLOGIA

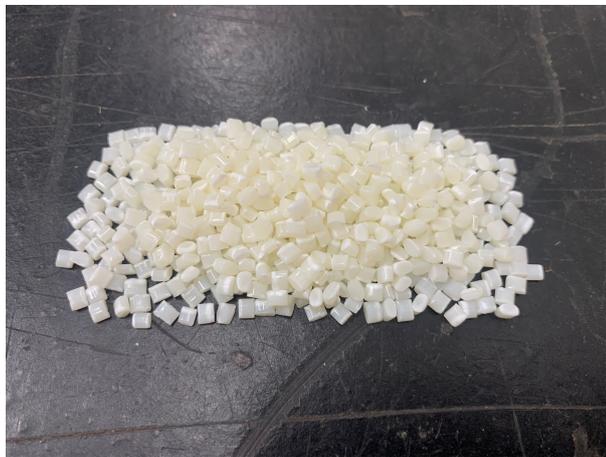
Para investigações futuras e até mesmo para a continuidade deste tema e de outros correlacionados com este trabalho na impressão 3D de peças de médio e grande volume, este capítulo mostra os materiais e métodos aplicados, denominação e classificação dos corpos de provas bem como as posições finais da extrusora em sua totalidade física, para que próximos estudos possam dar continuidade utilizando-se das características e parâmetros aqui levantados.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Polímero termoplástico

Foi utilizado nos experimentos o material polimérico em grãos (*pellets*) de ABS (acrilonitrila butadieno estireno) do fabricante SABIC denominado Resina Cypolac MG94 (SABIC, 2022), que possui uma temperatura de fusão de 205-245°C e uma densidade específica de 1,04 g/cm<sup>3</sup>. Imagem do polímero em pellets é visto na Figura 4 e maiores informações sobre suas propriedades mecânicas são encontradas no anexo A.

Figura 4 – Detalhe da matéria-prima em *pellets*.

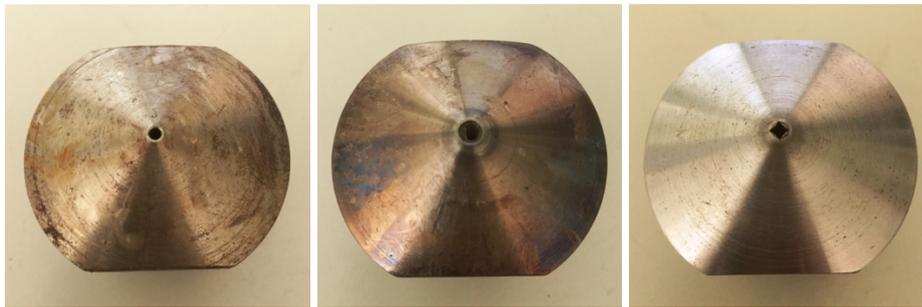


Fonte: Elaborado pelo autor.

##### 3.1.2 Matrizes de extrusão

São utilizados três matrizes com geometria da seção de extrusão distintas: circular de 1,75 mm de diâmetro, circular de 3 mm de diâmetro e quadrático côncavo incluso em um círculo de 3 mm de diâmetro para extrudar os filamentos a as amostras e extrair os dados. As matrizes, no presente estudo, são denominados respectivamente como 175, 300 e 330, e são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Fotos das matrizes utilizadas e suas respectivas geometrias.



(a) circular de 1,75mm (175) (b) circular de 3mm (300) (c) quadrático côncavo incluso de 3mm (330)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O desenho técnico mecânico de cada matriz pode ser encontrado nos Apêndices A, B e C respectivamente. As matrizes foram desenhados e fabricados para estes fins.

As matrizes foram usinadas a partir do aço SAE 1020 e o formato geométrico da seção de extrusão foi concebida pelo processo de eletroerosão a fio. As matrizes não possuem tratamento térmico e nem superficial em sua superfície de extrusão.

Em relação a área da seção transversal das matrizes de extrusão, para fim de comparação foi definido como matriz base, a matriz de 1,75 mm de diâmetro (175), sendo esse a de menor área. Com isso, podemos ver a relação direta da medida entre as geometrias. Os valores da razão da diferença de áreas da seção transversal das matrizes adotadas podem ser encontrados na Tabela 2.

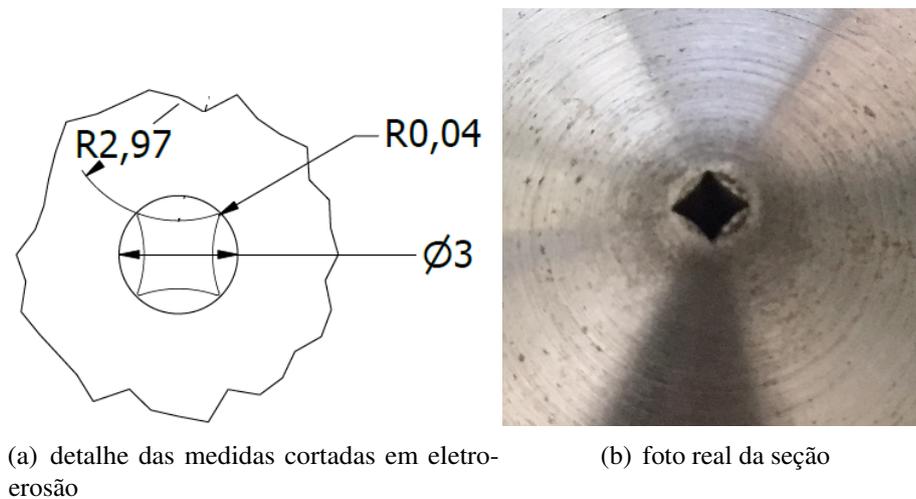
Tabela 2 – Valores da razão das áreas entre as matrizes.

Matriz	Área da Seção (mm <sup>2</sup> )	Porcentagem
Circular 175	2,40	100%
Incluso 330	3,37	140%
Circular 300	7,06	294%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6 é possível identificar o formato da seção transversal em detalhe da matriz customizada, que tem a mesma geometria, em sua devida proporção inclusa ao círculo de 3 mm, do qual foi caracterizada no trabalho de Wang et al. (2016).

Figura 6 – Detalhe da matriz 330 e sua respectiva geometria usinada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Equipamentos e Instrumentos

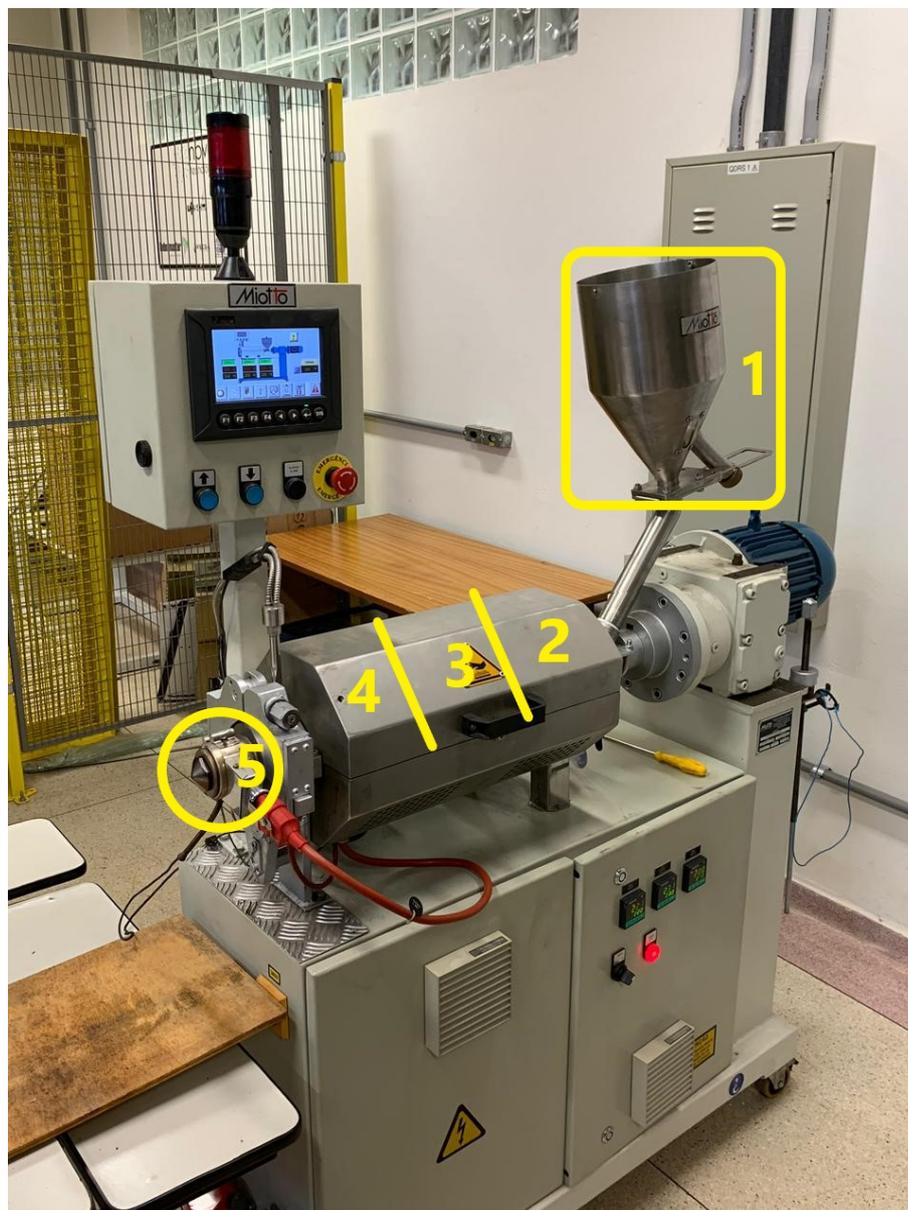
Para execução do trabalho, foram utilizados diversos equipamentos e instrumentos encontrados no próprio DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica e no DEMa - Departamento de Engenharia de Materiais, ambos da UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Todos os equipamentos e instrumentos estão descritos a seguir:

- Extrusora mono rosca, modelo P2788 de laboratório marca Miotto;
- Paquímetro digital MTX 316119;
- Régua metálica de 50cm;
- Balança Mettler Toledo Modelo PB8001-S;
- Proveta Deltex 500ml e 1000 ml;
- Câmera fotográfica do celular;
- Cronômetro digital;
- Ferramentas de corte manuais;
- Microscópio óptico Olympus CX31 Lente 4x;
- Arduino MEGA;
- Data Logger Shield.

### 3.2.2 Extrusora

A extrusora utilizada neste experimento investigativo tem seu funcionamento descrito a seguir e pode ser vista na posição horizontal na Figura 7. A matéria-prima (*pellets*) é alimentada através de um funil de alimentação, dotado de um bloqueador manual tipo gaveta, e com um sistema tubular de descarga rápida de material anexado em sua lateral<sup>1</sup> para retirada de amostras. O bloqueador deve estar aberto para possibilitar a passagem do material para o módulo de alimentação, no momento da partida.

Figura 7 – Extrusora de laboratório montada no setup horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

<sup>1</sup> Orifício tubular lateral utilizado para retirar amostras da matéria-prima em tempo de execução da própria extrusora, sem a necessidade de pausar ou interromper o regime de funcionamento.

As etapas do transporte do material da alimentação até sua extrusão pela matriz são listados a seguir:

1. Funil de alimentação;
2. Zona de transporte dos sólidos;
3. Zona de plastificação;
4. Zona de dosagem ou bombeamento; e
5. Matriz de extrusão.

Uma rosca sem fim com geometria e tratamento superficial dimensionados para o porte da extrusora de laboratório, conduz o polímero pelo interior do cilindro, em função das rotações providas pelo motorreductor. Este cilindro é equipado com um sistema de aquecimento através de resistências elétricas alojadas em cerâmica, divididas em zonas de controle. Seu resfriamento é feito por intermédio de ventiladores (zonas 2, 3 e 4) e circulação de água (apenas na zona 2). O sistema de controle de aquecimento e resfriamento é realizado através de controladores de temperatura PID e relés de estado sólido.

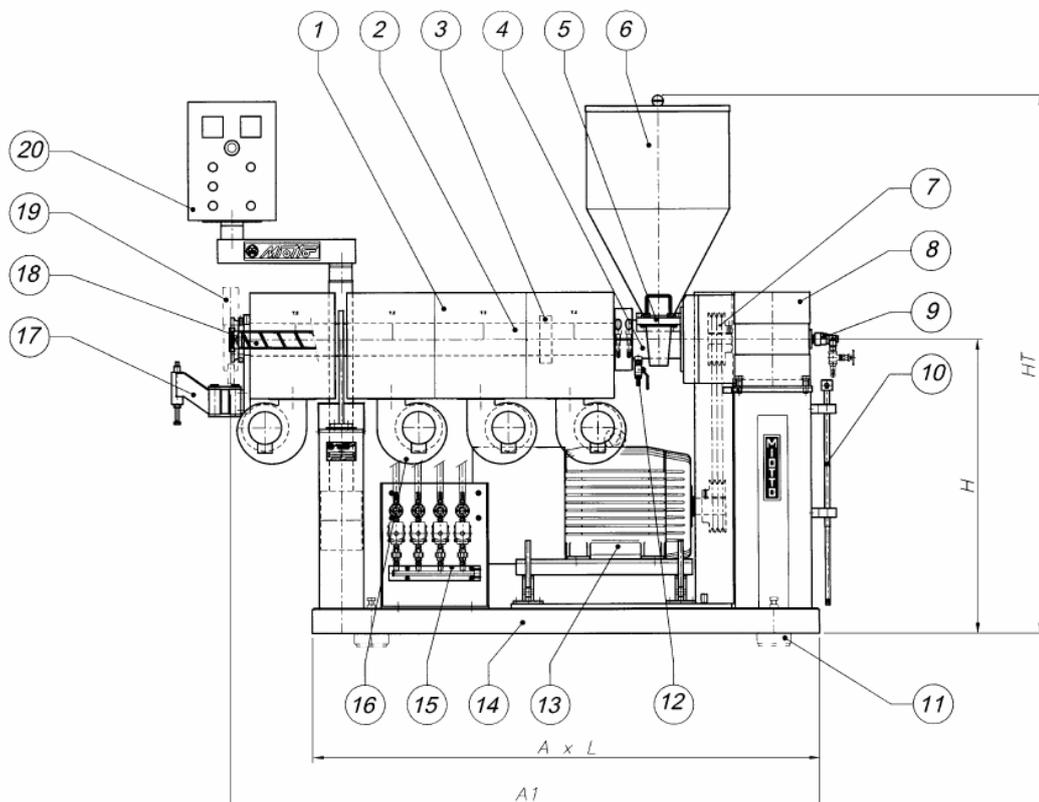
O cilindro tem seu aquecimento dividido por zonas, permitindo que a matéria-prima plastifique uniformemente conforme ela é conduzida pela rosca em direção à saída, onde o polímero plastificado passa por uma matriz que irá conformar o filamento extrudado. A rosca é acoplada à um redutor de engrenagens cilíndricas, que é acionado pelo motor elétrico trifásico principal. As funções da extrusora são controladas através de um painel de comando, montado na estrutura do equipamento, em posição variável.

Segundo o fabricante, os principais componentes da extrusora são definidos na Figura 8 e listados abaixo:

1. Carenagem do sistema de aquecimento;
2. Cilindro;
3. Resistências de aquecimento;
4. Módulo de alimentação;
5. Bloqueador tipo gaveta;
6. Funil de alimentação;
7. Transmissão por polias e correias;
8. Redutor de engrenagens;

9. União rotativa (refrigeração da rosca);
10. Extrator de rosca;
11. Coxim antivibração;
12. Refrigeração do módulo de alimentação;
13. Motor de acionamento;
14. Estrutura da extrusora;
15. Sistema de refrigeração a água;
16. Ventilador de refrigeração (resfriamento a ar);
17. Suporte articulado para cabeçote;
18. Rosca e matriz;
19. Abraçadeira bipartida;
20. Painel de comando (IHM).

Figura 8 – Esquema geral dos componente da extrusora de laboratório.



Fonte: Manual de operação da extrusora modelo P2788 Miotto.

Como orientação do fabricante, antes de iniciar a produção de filamentos ou de amostras, o seguinte passo a passo o qual garante o bom funcionamento e vida do maquinário é seguido e descrito a seguir:

1. Energizar o painel;
2. Ligar todas as zonas de aquecimento uma hora antes da partida da máquina;
3. Programar as temperaturas desejadas em cada zona, de acordo com o perfil de temperatura do material escolhido;
4. Verificar se a água está circulando no módulo de alimentação do cilindro;
5. Verificar se o bloqueador tipo gaveta do funil de alimentação está fechado;
6. Despejar o material dentro do funil de alimentação;
7. Após atingir a temperatura programada em todas as zonas, certifica-se que todo o conjunto (cilindro, rosca, cabeçote, ferramentas e etc.) estejam com suas temperaturas estabilizadas, no mínimo por 5 minutos;
8. Zerar todas as velocidades;
9. Ligar o motor da extrusora;
10. Girar a rosca de 10% a 15% de sua velocidade;
11. Abrir aproximadamente 50% do bloqueador do funil;
12. Verificar a corrente do motor (a mesma nunca deve ultrapassar o valor nominal);
13. Abrir totalmente o bloqueador do funil;
14. Aguardar até que o material comece a sair no cabeçote;
15. Aumentar até 30% a velocidade da rosca;
16. Observar o estado do material e o funcionamento da extrusora;
17. Estando o material fluindo pela matriz, monitorar a corrente do motor principal, aumentar a velocidade da rosca, conforme a necessidade do processo, monitorando sempre o sistema de aquecimento através dos controladores de temperatura.

Após garantir que todos os passos descritos acima foram executados, inicia-se a extrusão de cada um dos *sets*.

### 3.2.3 Configuração dos Sets

Para cada *set*, adotamos uma posição de extrusão (*setup*) e uma matriz, com isso é variada a velocidade de extrusão nos diferentes valores (5, 10, 15, 20, 25 e 30 rpm) da menor para a maior. Cada combinação de *setup*, matriz e rpm é chamado de *set*.

A variação de velocidade e temperatura são setadas diretamente na IHM do painel de controle da extrusora, Figura 9. Ao rodar cada *set* de extrusão em sua respectiva rotação, adotamos os seguintes respectivos valores<sup>2</sup>:

- Temperatura da Zona 1 - 200°C;
- Temperatura da Zona 2 - 210°C;
- Temperatura da Zona 3 - 200°C.

Figura 9 – IHM da extrusora e tela para setar as temperaturas das zonas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

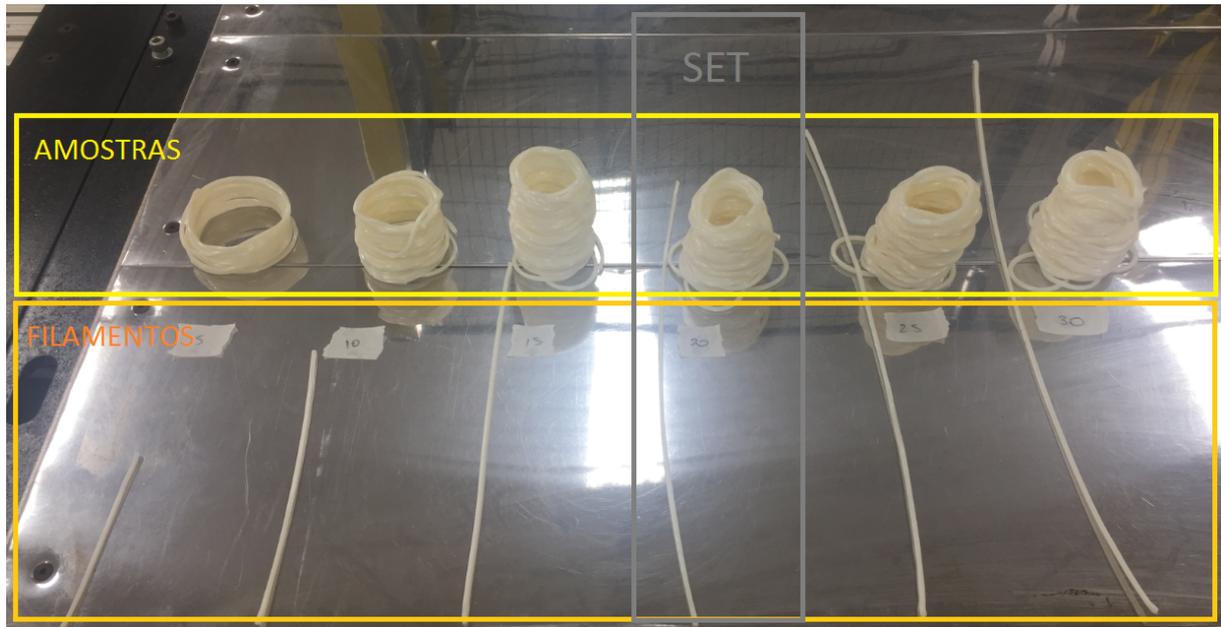
Para cada *set*, são gerados dois materiais para análise do experimento (corpos de prova), Figura 10, sendo um filamento (F), e uma amostra (A).

O filamento (F) é caracterizado por ser um corpo de prova de formato longilíneo e com seção geométrica variável proveniente do resultado da extrusão pela matriz, a medida de seu comprimento aumenta diretamente proporcional com a velocidade da rosca.

A amostra (A) é um corpo de prova criado por camadas de filamentos em forma de espiral proveniente da deposição livre do extrudado sob uma superfície plana. Sua altura também varia diretamente proporcional com a velocidade da rosca.

<sup>2</sup> A temperatura de fusão do polímero pode ser encontrada no *datasheet* do Anexo A.

Figura 10 – Exemplos de amostras, filamentos e set.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para nomear cada um dos corpos de prova, foi utilizado a nomenclatura apresentada na Tabela 3 com a denominação descrita a seguir:

#### S\_MMM\_RPM\_T

- **S** » Setup de posição [H=Horizontal / V=Vertical];
- **MMM** » Matriz de extrusão [175=circular de 1,75mm / 300=circular de 3mm / 330=quadrático côncavo incluso de 3mm] como apresentados na Figura 5;
- **RPM** » Velocidade da rotação da rosca [5, 10, 15, 20, 25 e 30 rpm];
- **T** » Tipo do corpo de prova (CP) [A=Amostra / F=Filamento].

Analogamente a nomenclatura da Tabela 3, tem-se também as nomenclaturas para o *setup* na vertical trocando-se as letras de "H" por "V".

#### 3.2.4 Setup Horizontal

Este experimento tem sua realização em duas partes distintas de posição de extrusão, sendo a primeira parte realizada com um *setup* na posição de extrusão horizontal (Figura 7) e na segunda parte, um *setup* na posição vertical (Figura 11) de extrusão, tomando como referência o sentido axial da rosca da respectiva extrusora.

Tabela 3 – Nomenclatura dos corpos de prova no setup horizontal.

SETUP	MATRIZ	RPM	TIPO	CP
H	175	5	A	H_175_5_A
H	175	10	A	H_175_10_A
H	175	15	A	H_175_15_A
H	175	20	A	H_175_20_A
H	175	25	A	H_175_25_A
H	175	30	A	H_175_30_A
H	300	5	A	H_300_5_A
H	300	10	A	H_300_10_A
H	300	15	A	H_300_15_A
H	300	20	A	H_300_20_A
H	300	25	A	H_300_25_A
H	300	30	A	H_300_30_A
H	330	5	A	H_330_5_A
H	330	10	A	H_330_10_A
H	330	15	A	H_330_15_A
H	330	20	A	H_330_20_A
H	330	25	A	H_330_25_A
H	330	30	A	H_330_30_A
H	175	5	F	H_175_5_F
H	175	10	F	H_175_10_F
H	175	15	F	H_175_15_F
H	175	20	F	H_175_20_F
H	175	25	F	H_175_25_F
H	175	30	F	H_175_30_F
H	300	5	F	H_300_5_F
H	300	10	F	H_300_10_F
H	300	15	F	H_300_15_F
H	300	20	F	H_300_20_F
H	300	25	F	H_300_25_F
H	300	30	F	H_300_30_F
H	330	5	F	H_330_5_F
H	330	10	F	H_330_10_F
H	330	15	F	H_330_15_F
H	330	20	F	H_330_20_F
H	330	25	F	H_330_25_F
H	330	30	F	H_330_30_F

Fonte: Elaborado pelo autor.

Originalmente usa-se neste experimento uma extrusora de laboratório, que possui posicionamento horizontal, integrado os conjuntos de motorização, alimentação, extrusão e painel de controle. Este *setup* é bem-vindo quando deseja-se extrudar com a finalidade de formar fios contínuos, mais conhecidos como filamentos, que são bobinados em carreteis. Neste caso em questão, a disposição horizontal será mantida para a produção das amostras e dos filamentos.

Após seguir os passos recomendados pelo fabricante para alimentação da matéria-prima e energização do equipamento, se faz a configuração da rotação e temperatura diretamente na IHM da extrusora.

É necessário remover a primeira leva de material extrudado de cada *set* antes do início da produção dos filamentos e amostras, de maneira a se obter uma estabilização tanto da pressão interna quanto da vazão da extrusora, certificando-se que se está operando em regime permanente.

Quando estabilizado o fluxo, é extrudado um filamento durante um período de 5 segundos<sup>3</sup> sobre uma base plana móvel de madeira, obtendo a geometria demonstrada na Figura 10.

Após o resfriamento do filamento, tomam-se as medidas de massa, comprimento, diâmetro e geometria do extrudado, possibilitando assim encontrar a variação geométrica final do extrudado.

Além do filamento extrudado, há também a produção das amostras durante 120 segundos<sup>4</sup> de extrusão. Esse corpo de prova passa por uma avaliação, onde teremos sua massa e volume medidos. Foram coletados esses dados para os cálculos de vazão mássica, vazão volumétrica e a análise da pressão interna da extrusora, durante o procedimento. Exemplos de filamentos e amostras extrudadas podem ser encontradas na Figura 10.

### 3.2.5 Setup Vertical

Para que seja possível atingir o objetivo de imprimir peças de médio e grande volume, onde em sua maior totalidade são utilizadas impressoras 3D que imprimem com cabeçote na vertical, tem-se a necessidade de fazer o desmembramento do conjunto e as devidas tratativas de realocação dos itens mecânicos e eletroeletrônicos para a posição vertical.

O desmembramento do painel de controle de extrusão bem como sua movimentação e montagem no pórtico estrutural vertical, foi feita pelo autor, com o auxílio da equipe técnica do departamento. A Figura 11 mostra a montagem no pórtico já completa.

As etapas executadas no *setup* vertical, são as mesmas descritas no *setup* horizontal na produção das amostras e dos filamentos. Com isso não serão repetidas nesta seção.

<sup>3</sup> Tempo alvo de extrusão dos filamentos: 5 segundos. Tempo definido pelo autor devido ao limite de comprimento do corpo de prova.

<sup>4</sup> Tempo alvo de extrusão das amostras: 120 segundos. Tempo definido pelo autor devido aos limite de massa do corpo de prova.

Figura 11 – Pórtico e extrusora montados no setup vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.6 Metrologia

Após a extrusão dos corpos de prova, é necessário aguardar pelo resfriamento natural, para em seguida iniciar as medições.

No caso dos filamentos (F), as medições de comprimento (L) foram feitas com uma régua metálica com graduação milimétrica, o diâmetro (D) foi analisado com o auxílio de um paquímetro digital e o tempo de extrusão foi marcado com um cronômetro digital.

A medição da seção transversal dos filamentos foi realizada com o auxílio de microscópio óptico. As amostras foram enviadas para o laboratório CCDM<sup>5</sup> onde passaram pelo processo de criogenização e foram fraturadas sob cisalhamento, preservando sua seção. Com o auxílio da microscopia são retiradas imagens digitais com medidas das distâncias das arestas do filamento as quais são calculado a área do filamento extrudado.

No caso das amostras (A), similar ao procedimento dos filamentos, o tempo de extrusão também é determinado com o auxílio de um cronômetro digital. Após a peça atingir a temperatura ambiente, há a pesagem individual do produto de cada uma das amostras com uso de uma balança de laboratório.

<sup>5</sup> Sigla para o laboratório Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - CCDM localizado nas dependências da UFSCar. Site: <<http://www.ccdm.ufscar.br/>>.

Na sequência é feita a medição do volume, com o auxílio das provetas Deltex de 1000 mL ou de 500 mL, dependendo das dimensões de cada um dos corpos de prova. Onde temos o estado inicial de volume na proveta e faz-se a diferença com a amostra inserida em seu interior, evidenciando a alteração do volume total.

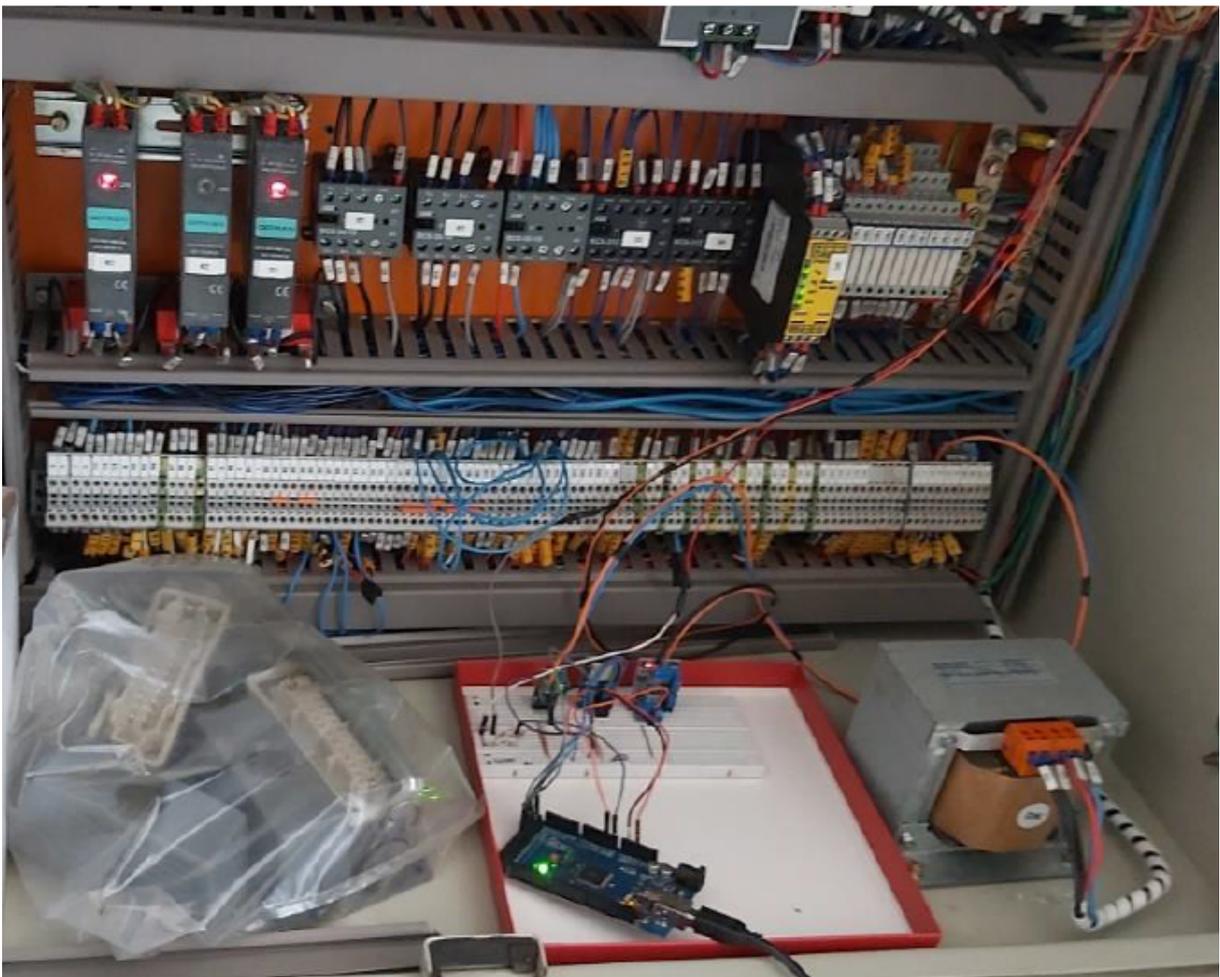
### 3.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS

#### 3.3.1 Data Logger

Para coletar os dados operacionais da extrusora o autor desenvolveu um aparato de leitura e armazenamento para realizar o sensoriamento em tempo real dos valores e guardá-los para uma posterior análise.

É possível observar na parte inferior da Figura 12 o dispositivo montado e acoplado no painel elétrico da extrusora para leitura dos sinais elétricos.

Figura 12 – Visão geral dos componentes utilizados no data logger.

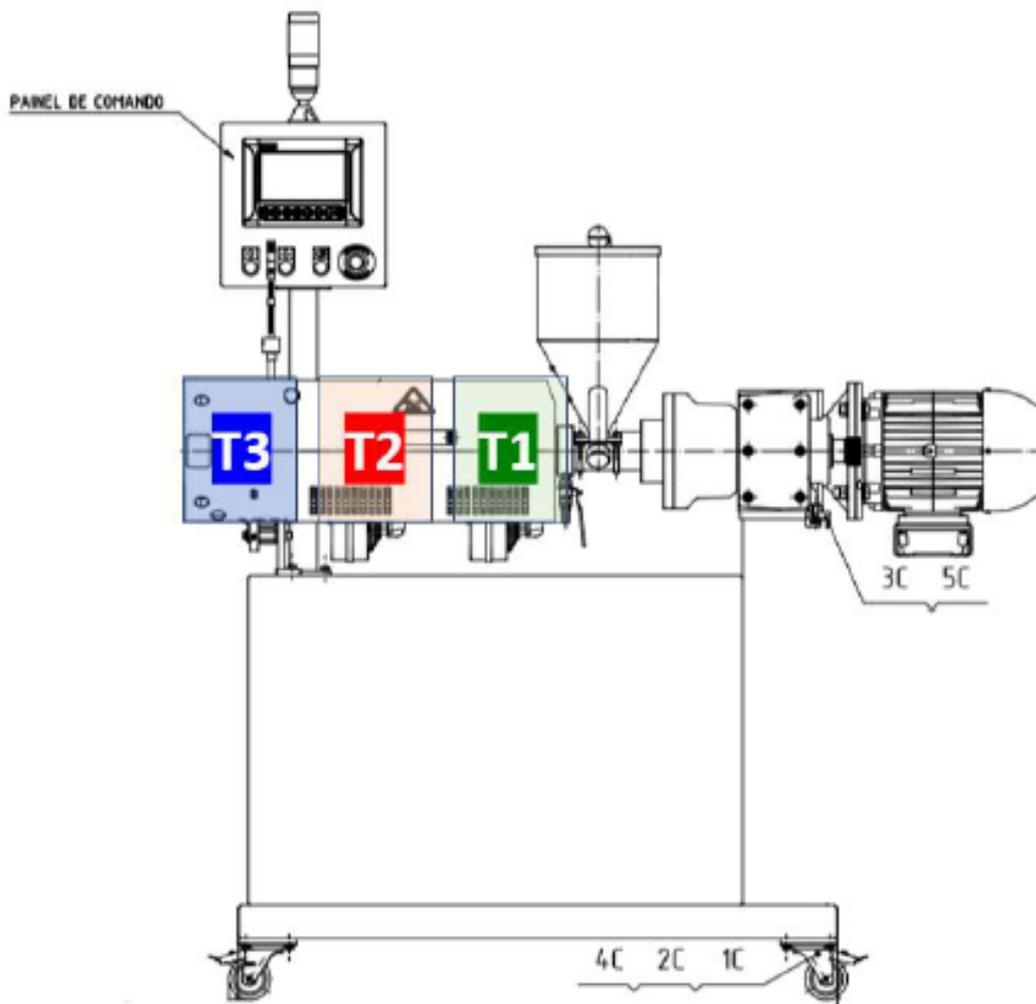


Foi utilizado uma placa Arduino Mega e seus respectivos *shields* para leitura dos sinais de pressão, temperatura e rotação e um cartão micro SD foi utilizado para armazenar os valores lidos. A frequência de amostragem adotada foi de 1Hz.

Rotação é uma variável do processo e é setada na IHM da extrusora de acordo com o *set* adotado. A rotação mínima da máquina é 5 rpm e máxima é de 60 rpm. O experimento contemplou rotações de 5 à 30 rpm, variando de 5 em 5 rpm, da menor para maior rotação.

Da leitura de temperatura, a extrusora possui 3 zonas distintas de aquecimento, pois estes são parâmetros que devem ser definidos antes do início dos experimentos. A Figura 13 traz um desenho esquemático da região de cada uma dessas zonas de aquecimento. Termopares utilizados para a leitura são componentes da própria extrusora.

Figura 13 – Divisão das zonas de aquecimento.



Fonte: Manual de operação da extrusora modelo P2788 Miotto.

A pressão interna durante o experimento possui uma variação de valor intrínseca do próprio maquinário, Para realizar a medição deste parâmetro, há conectado um pressostato na região final da rosca, na matriz extrusora.

Os dados foram coletados simultaneamente aos experimentos e armazenados em um arquivo de texto.

O código carregado no Arduino, para realização desta leitura e gravação, encontra-se por completo no Apêndice D.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DADOS COLETADOS

Após os experimentos e medições das amostras e filamentos, os dados em sua forma integral são apresentados nos apêndices deste trabalho. Para o *setup* horizontal, o Apêndice E mostra os valores para os experimentos das amostras, e o Apêndice F mostra os valores para os experimentos dos filamentos. De forma análoga, para o *setup* vertical nos Apêndices G e H respectivamente. As análises e resultados aqui apresentados, foram interpretados a partir dos valores presente nos mesmos.

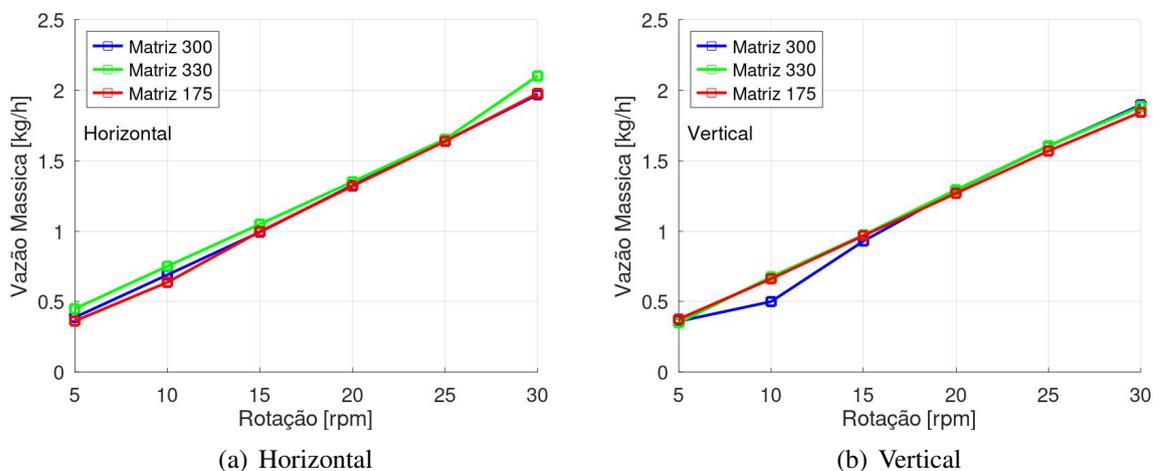
### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA EXTRUSORA

A extrusora, como um equipamento eletromecânico, teve suas características de extrusão de filamentos e amostras investigadas e levantadas. Os primeiros parâmetros analisados foram os valores médios da vazão mássica e volumétrica, para cada respectiva rotação, matriz e *setup* de posição. Os valores são apresentados nas respectivas Seções 4.2.1 e 4.2.2.

#### 4.2.1 Vazão Mássica

Na Figura 14 são apresentados os valores de vazão mássica por matriz, para cada rotação nos *setups* de posição.

Figura 14 – Valores da vazão mássica por matriz na horizontal e vertical por rotação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

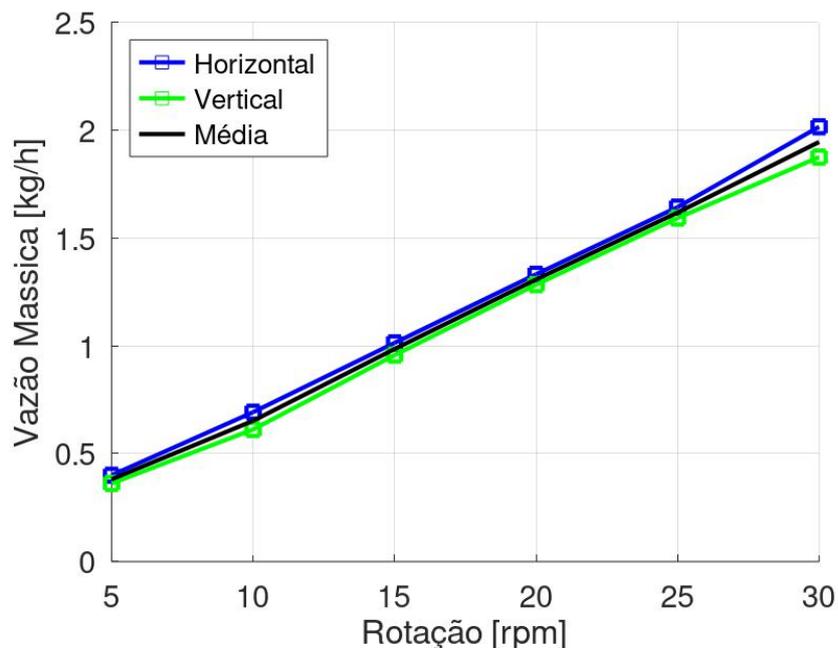
Pode-se observar que independente da diferença de área e geometria de cada matriz, a extrusora mantém a vazão mássica proporcional com a rotação escolhida. Esse fenômeno acontece devido à grande dependência da vazão total com a componente do fluxo de arraste, ocasionando o aumento da pressão interna do sistema no cilindro de extrusão, para cada valor de rotação adotado. O aumento da pressão interna no cilindro de extrusão é detalhado na Seção 4.2.4.

Foi encontrado um padrão linear da relação da velocidade de rotação da rosca com a vazão mássica de extrusão, independente da área e do formato da seção da matriz.

Ao comparar na Figura 15, as vazões mássicas em função da posição dos *setups*, pode-se verificar que a proporcionalidade também prevalece em função da rotação nas diferentes posições. Os valores médios levantados e apresentados, são encontrados na Tabela 6.

Como a diferença entre as vazões mássicas para cada rotação é pequena, comparando as duas posições de impressão horizontal e vertical, verifica-se que a extrusora não evidencia impedimento em trabalhar nas duas posições de extrusão na análise da vazão. Essa informação é particularmente importante ao utilizar-se este tipo de máquina para construção de impressoras 3D com mais de 3 eixos.

Figura 15 – Valores médios da vazão mássica horizontal e vertical por rotação.



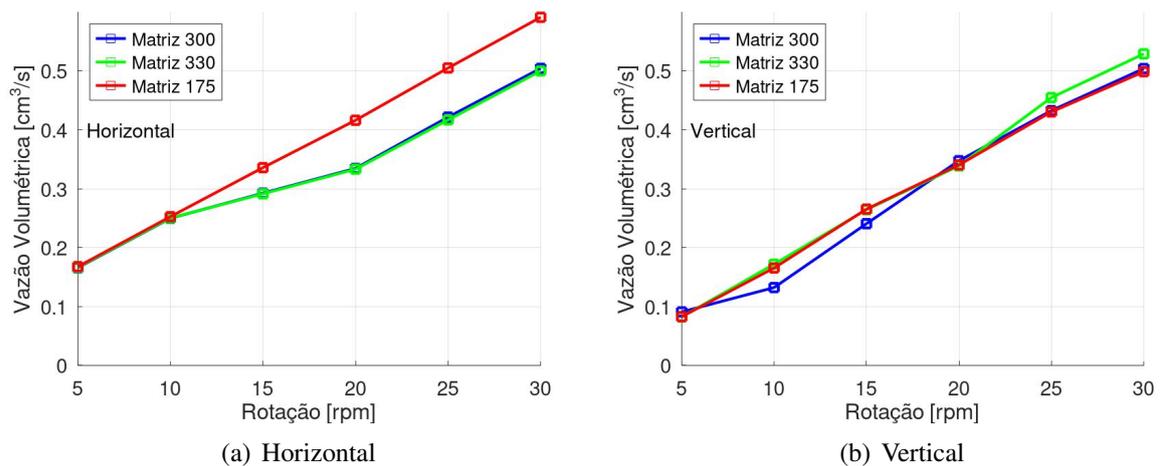
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.2 Vazão Volumétrica

De forma análoga ao apresentado na Seção 4.2.1, os valores para as vazões volumétricas encontradas neste experimento são discorridos a seguir.

Compartilhando do mesmo padrão, notamos que a variação da vazão volumétrica também é diretamente proporcional com a rotação da rosca. No *setup* horizontal, as matrizes 300 e 330 tiveram um comportamento da vazão volumétrica mais próximas, se comparado com a matriz 175, a qual obteve um perfil de vazão volumétrica bem retilíneo, mostrando que para este *set* de configuração houve um fluxo contínuo sem grandes desvios. No *setup* vertical, as variações foram maiores para a matriz 300 em rotações mais baixas e na matriz 330 pequenas variações nas rotações mais altas. Os perfis de vazão volumétrica por matriz e rotação nos dois *setups* são vistos na Figura 16.

Figura 16 – Valores da vazão volumétrica por matriz na horizontal e vertical por rotação.

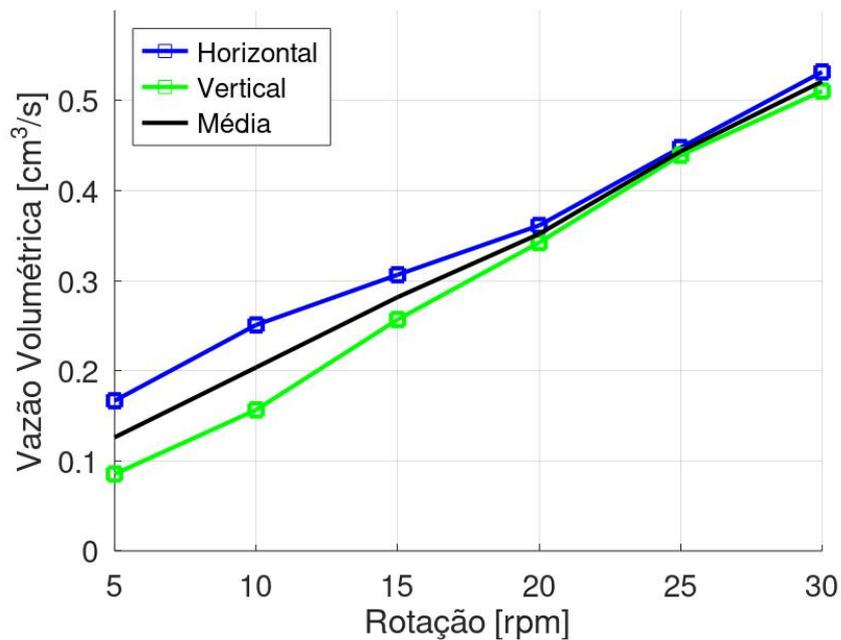


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar na Figura 17, as vazões volumétricas em função da posição dos *setups*, pode-se verificar que a proporcionalidade também prevalece em função da rotação nas diferentes posições. Em rotações mais baixas, menores que 20 rpm, foi onde tivemos as maiores variações de vazão volumétrica entre os *setups* de posição. Em valores absolutos de vazão volumétrica, constatamos um range na operação de 0,09 até um valor de 0,53 cm³/s. Os valores médios levantados e apresentados, são encontrados na Tabela 6.

Foi encontrado um padrão linear e diretamente proporcional da relação da velocidade de rotação da rosca com a vazão volumétrica de extrusão, independente da área e do formato da seção da matriz.

Figura 17 – Valores médios da vazão volumétrica horizontal e vertical por rotação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.3 Caracterização

Com os valores aqui apresentados, podemos caracterizar as vazões da extrusora deste trabalho como um dos subprodutos desta investigação. Os valores das vazões mássicas e volumétricas definem em quais faixas de vazão do material poderemos trabalhar em laboratório com este equipamento.

A Figura 15 com os valores médios da vazão mássica horizontal e vertical por rotação, e na Figura 17 com os valores médios da vazão volumétrica horizontal e vertical por rotação. Constatamos pelos valores tabulados nas Tabelas 4 e 5, que este experimento compreendeu valores de vazões mássicas de 0,36 até um valor de 2,01 kg/h durante sua operação e valores de vazão volumétrica de 0,09 até um valor de 0,53 cm<sup>3</sup>/s. Na comparação absoluta dos valores, encontramos uma leve redução da vazão mássica para a operação na posição vertical.

Na Tabela 6 são caracterizadas as vazões médias da extrusora de laboratório para cada rotação de operação.

Esses valores de vazões podem ser utilizados para configurar corretamente os parâmetros de impressão em futuros aparatos para impressão 3D na MA. Diferente das impressoras FDM alimentadas diretamente a partir de filamentos, é importante sintonizar de forma adequada a rotação da máquina com as propriedades desejáveis no produto a ser fabricado e com a vazão de operação do material a ser processado.

Tabela 4 – Valores da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação na horizontal.

<b>RPM</b>	<b>Vaz. Mássica (kg/h)</b>	<b>Vaz. Volumétrica (cm<sup>3</sup>/s)</b>
5	0,40	0,17
10	0,69	0,25
15	1,01	0,31
20	1,33	0,36
25	1,64	0,45
30	2,01	0,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Valores da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação na vertical.

<b>RPM</b>	<b>Vaz. Mássica (kg/h)</b>	<b>Vaz. Volumétrica (cm<sup>3</sup>/s)</b>
5	0,36	0,09
10	0,61	0,16
15	0,96	0,26
20	1,28	0,34
25	1,59	0,44
30	1,87	0,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Valores médios da vazão mássica e volumétrica da extrusora por faixa de rotação.

<b>RPM</b>	<b>Vaz. Mássica (kg/h)</b>	<b>Vaz. Volumétrica (cm<sup>3</sup>/s)</b>
5	0,38	0,13
10	0,65	0,20
15	0,98	0,28
20	1,31	0,35
25	1,62	0,44
30	1,94	0,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.4 Pressão

Analogamente, foram capturados os valores de pressão interna no cilindro de extrusão.

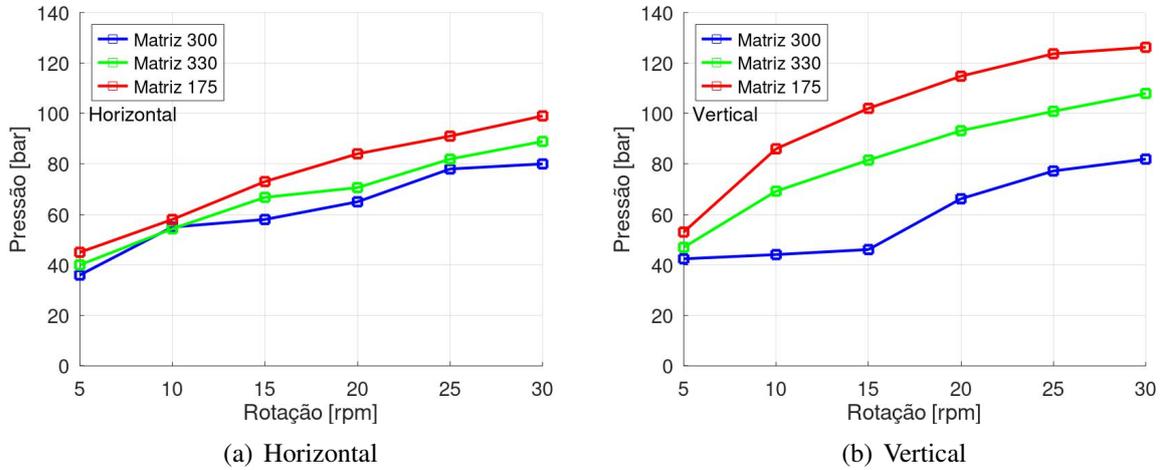
Durante a extrusão, o movimento do fluxo de arraste é impedido pela matriz de extrusão, gerando um fluxo de contrapressão. As matrizes utilizadas foram apresentadas na Seção 3.1.2.

A Figura 18 demonstra o gradiente de pressão para cada matriz e rotação nos *setups* horizontal e vertical.

Constatou-se o aumento da pressão interna do cilindro diretamente proporcional com o aumento da rotação da rosca. Variações da pressão entre as matrizes foram vistas e em função da operação e robustez do equipamento, podem ser lidas como indiferentes para o processo final de

impressão nesta extrusora.

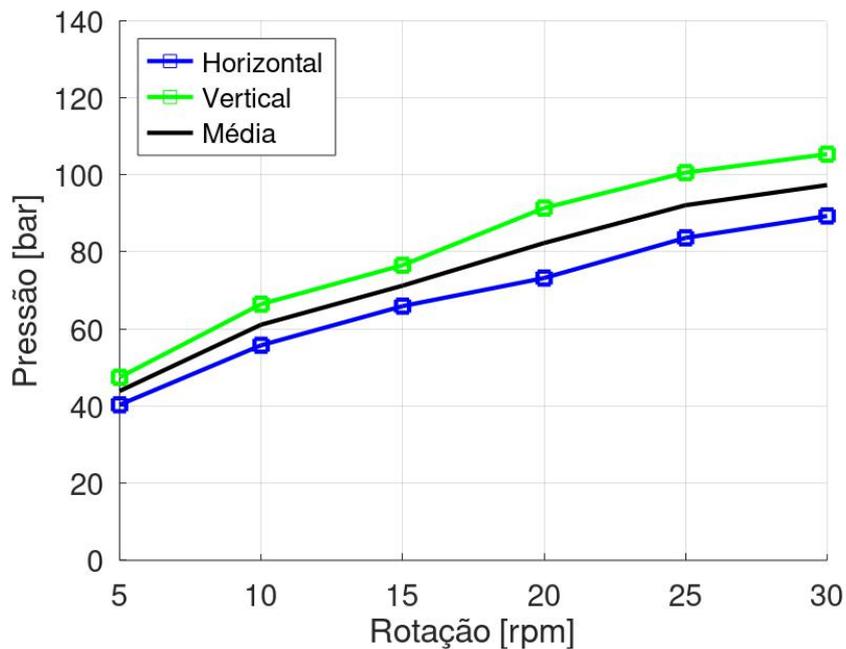
Figura 18 – Valores da pressão por matriz na horizontal e vertical por rotação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação as pressões médias, a Figura 19 apresenta os valores médios da pressão na horizontal e vertical para cada rotação. Com isso, também caracterizarmos as pressões de operação da extrusora de laboratório em função da rotação de operação. Nota-se um valor médio levemente maior na disposição vertical, causada pelo própria massa do material sendo processado ao longo dos estágios da extrusora, sofrendo a ação da gravidade.

Figura 19 – Valores médios da pressão na horizontal e vertical por rotação.

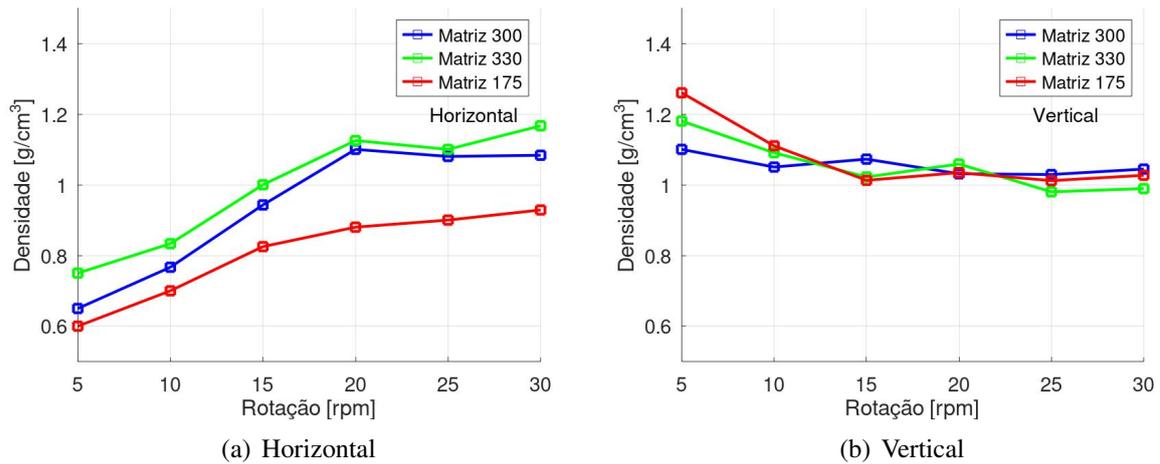


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.5 Densidade

A Figura 20 demonstra o gradiente de densidade para cada matriz e rotação nos *setups* horizontal e vertical. Mas, foi na análise da Figura 21, que um fenômeno pôde ser encontrado nas rotações mais baixas (5, 10 e 15 rpm).

Figura 20 – Valores da densidade por matriz e rotação na horizontal e vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

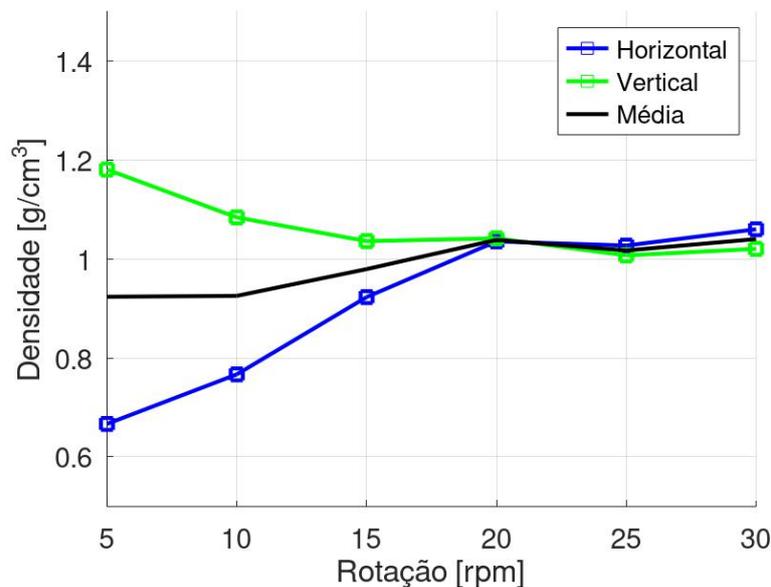
Analisando as densidades encontradas nos dois *setups*, ficou evidente que o material sofreu alterações relevantes. Essas alterações foram sensíveis para alterar o valor de densidade<sup>1</sup> para valores fora do apontado no *datasheet* do fabricante, apresentado no Anexo A. Para velocidades próximas e maiores que 20 rpm, nota-se uma estabilidade da densidade, confirmando a faixa de rotação de 30 - 60 rpm sugerida para este material no *datasheet* do fabricante.

Na operação com *setup* horizontal pôde-se observar na faixa das três rotações menores, a presença de bolhas, as quais contribuíram para que a densidade divergisse para valores abaixo do especificado pelo fabricante. Outro fator relevante observado, foi que na operação com *setup* vertical, a própria massa do filamento causou o esticamento do extrudado proveniente da ação da gravidade puxar o material para baixo, refletindo na alteração da densidade para maior nas mesmas faixas das menores rotações (5, 10 e 15 rpm). Quando na operação de impressão 3D sobre-cabeça, esse efeito será minimizado uma vez que o filamento é suportado pela mesa ou pela camada inferior.

Em função dessa variação da densidade em rotações mais baixas, estes *setups* resultaram em filamentos com maior degradação do material alterando sua densidade, podendo levar com que a peça final possua maiores defeitos, menor aderência entre camadas e maior densidade de vazios.

<sup>1</sup> Resina Cyclic MG94 possui densidade específica de 1,04 g/cm³. Fabricante SABIC.

Figura 21 – Valores médios da densidade por rotação na horizontal e vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Extrusões com as rotações de 5, 10 e 15 rpm que são equivalentes a velocidades lineares de extrusão de 1,85 até 5,38 cm/s, e devem ser evitadas na impressão não-planar, para que possamos manter a densidade do material de acordo com as propriedades originais do ABS.

Segundo os valores da Figura 21 observa-se um padrão na estabilidade do valor da densidade nas rotações mais altas, sugerindo que os valores de temperatura e rotação são adequados e minimizam a presença de bolhas no material. O valor teórico da densidade para o ABS, de acordo com o fabricante é de 1,04 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 MATRIZ CUSTOMIZADA

Esta seção tem por finalidade mostrar os resultados comparativos da variação da área da seção transversal da matriz em relação a área da seção transversal do filamento extrudado sob o efeito do inchamento do extrudado, utilizando a matriz de geometria customizada denominada 330. O valor para a área da seção geométrica da matriz usinada é de 3,37mm<sup>2</sup>.

Além de comparar a variação da área, tem-se também como finalidade analisar o formato geométrico final do filamento após a extrusão com a matriz customizada nas diferentes posições e rotações.

A Tabela 7 mostra um aumento de área do extrudado em relação a matriz base. Conforme elevamos a velocidade de extrusão, nas devidas rotações analisadas, a área do filamento extrudado tende a aumentar diretamente proporcional com a rotação, obtendo um ganho da área de até os 250% (2,5 vezes maior) na velocidade mais alta dos experimentos, no *setup* horizontal.

Tabela 7 – Valores do ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na horizontal.

Filamento	Área da Seção do Filamento (mm <sup>2</sup> )	Porcentagem
H_330_05_F	5,45	162%
H_330_10_F	6,10	181%
H_330_15_F	6,73	200%
H_330_20_F	6,47	192%
H_330_25_F	7,65	227%
H_330_30_F	8,42	250%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 também define os valores dos ganhos em porcentagem entre a matriz utilizada e a área do filamento resultante da extrusão na vertical. Além do efeito do ganho da área de até 154% na velocidade mais alta dos experimentos, o *setup* vertical apresentou uma tendência de ganho diferente em cada rotação. Esta diferença fica clara, quando analisada a Figura 22.

Tabela 8 – Valores do ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na vertical.

Filamento	Área da Seção do Filamento (mm <sup>2</sup> )	Porcentagem
V_330_05_F	4,83	143%
V_330_10_F	4,96	147%
V_330_15_F	4,97	148%
V_330_20_F	5,13	152%
V_330_25_F	4,84	144%
V_330_30_F	5,20	154%

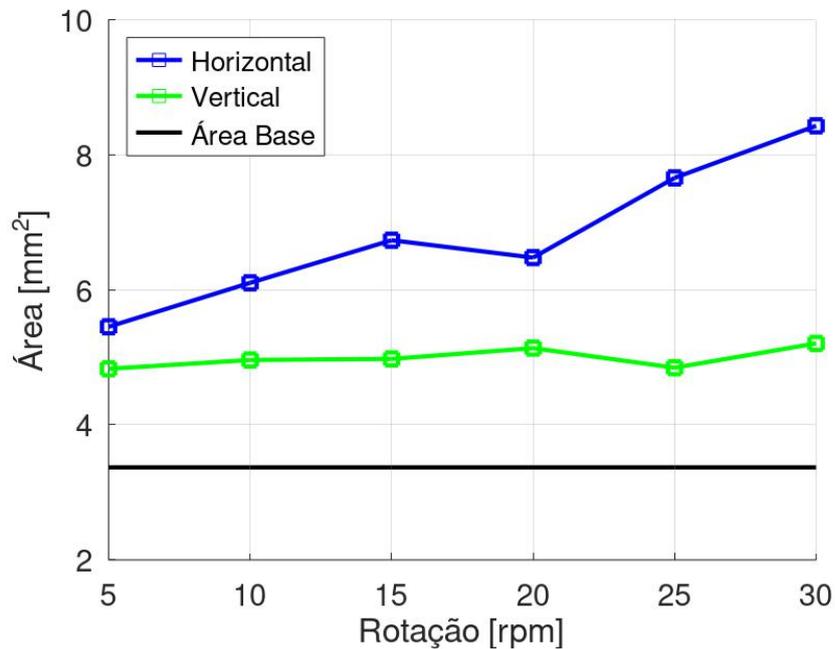
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao compararmos os ganhos dos extrudados nas posições horizontal e vertical na Figura 22, além do ganho ter sido proporcionalmente menor, a tendência de ganho da posição vertical foi mais próximo para cada rotação, traçando um perfil mais paralelo com a a área base da matriz. No *setup* horizontal o ganho foi proporcionalmente maior, e o perfil de ganho teve uma tendência diretamente maior para cada rotação, provendo uma inclinação positiva na tendência do inchamento do extrudado em relação a rotação.

Em uma aplicação de impressão robótica não-planar fica evidente que é importante levar em consideração o inchamento do extrudado para fins de acabamento superficial e dimensional final do modelo. O ganho de área para cada rotação e posição varia conforme a posição da extrusora, assim uma correção dos parâmetros da impressão deve ser introduzidos na programação e resposta do controlador.

Além do inchamento do extrudado, a variação de pressão que ocorre das arestas para as quinas e cantos durante a expansão normal do fluido polimérico também se provou verdadeira (efeito Barus). Nesta direção foi possível observar a alteração da seção geométrica do filamento para um formato final quadrático com quinas levemente arredondadas.

Figura 22 – Ganho de área dos filamentos extrudados com matriz 330 na horizontal e vertical.



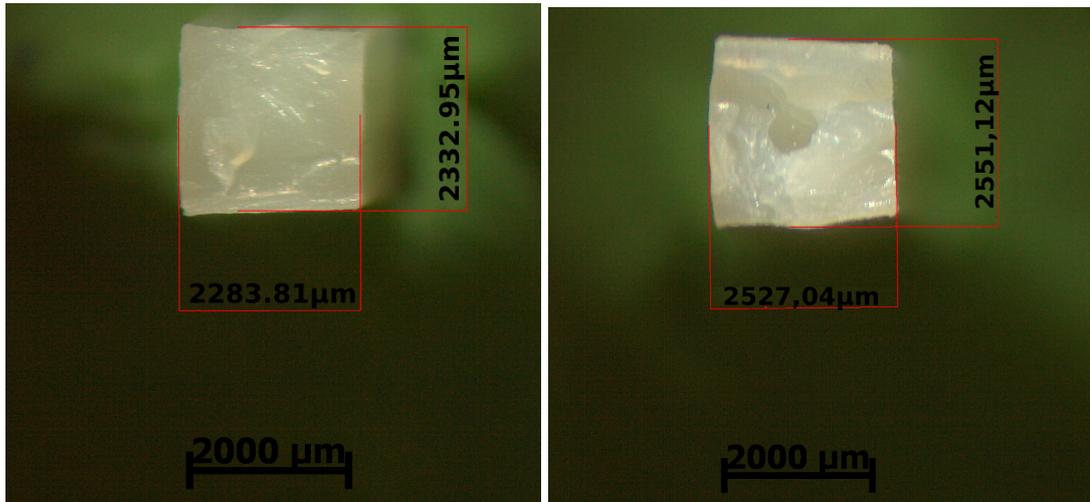
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os formatos finais da seção geométrica dos filamentos para o *setup* horizontal são encontrados na Figura 23 e para *setup* vertical são encontrados na Figura 24.

O filamento com formato da seção geométrica quadrática formada foi comprovada neste experimento prático, onde a matriz de 3 mm incluso côncavo mostrou que é possível ter uma seção mais próxima do formato geométrico quadrático proveniente da alteração prévia da geometria da matriz, para sustentar o uso de matrizes customizadas/dedicadas.

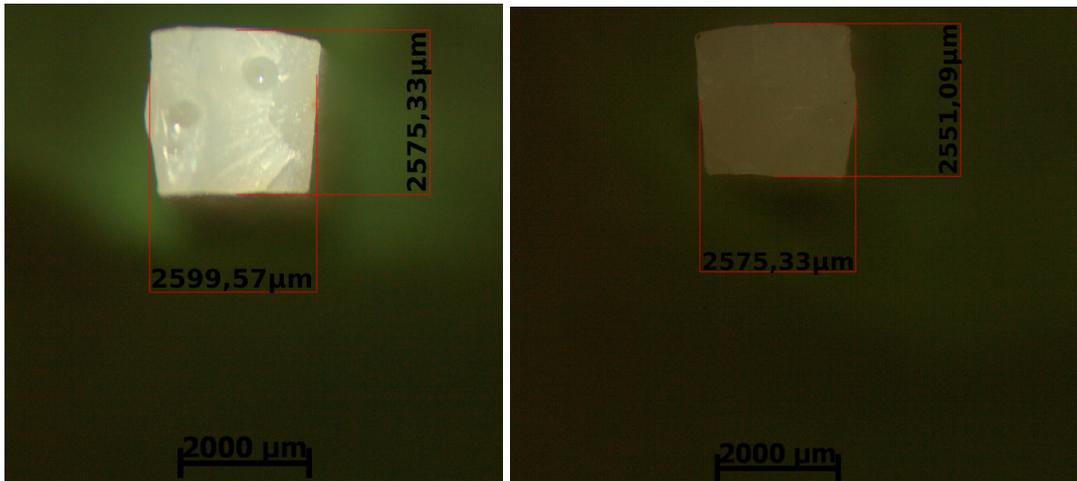
Essa alteração obtida no formato do filamento extrudado é onde proverá os maiores ganhos para impressão 3D não-planar. Com a diminuição da densidade de vazios devido a criação de um filamento quadrático, fica evidente que podemos obter menos espaços vazios entre as faixas e camadas e melhor adesão superficial entre camadas devido a planicidade do contato entre as faces.

Figura 23 – Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz 330 na horizontal.



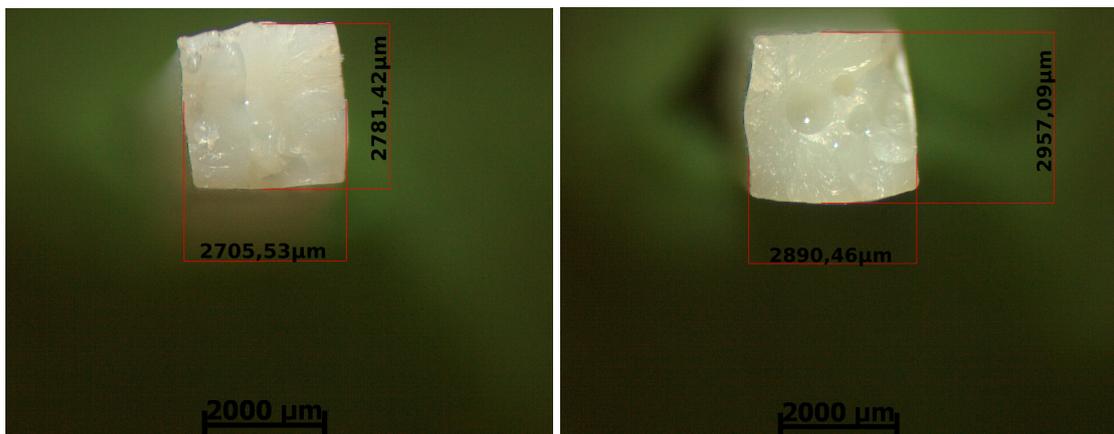
(a) H\_330\_5\_F

(b) H\_330\_10\_F



(c) H\_330\_15\_F

(d) H\_330\_20\_F

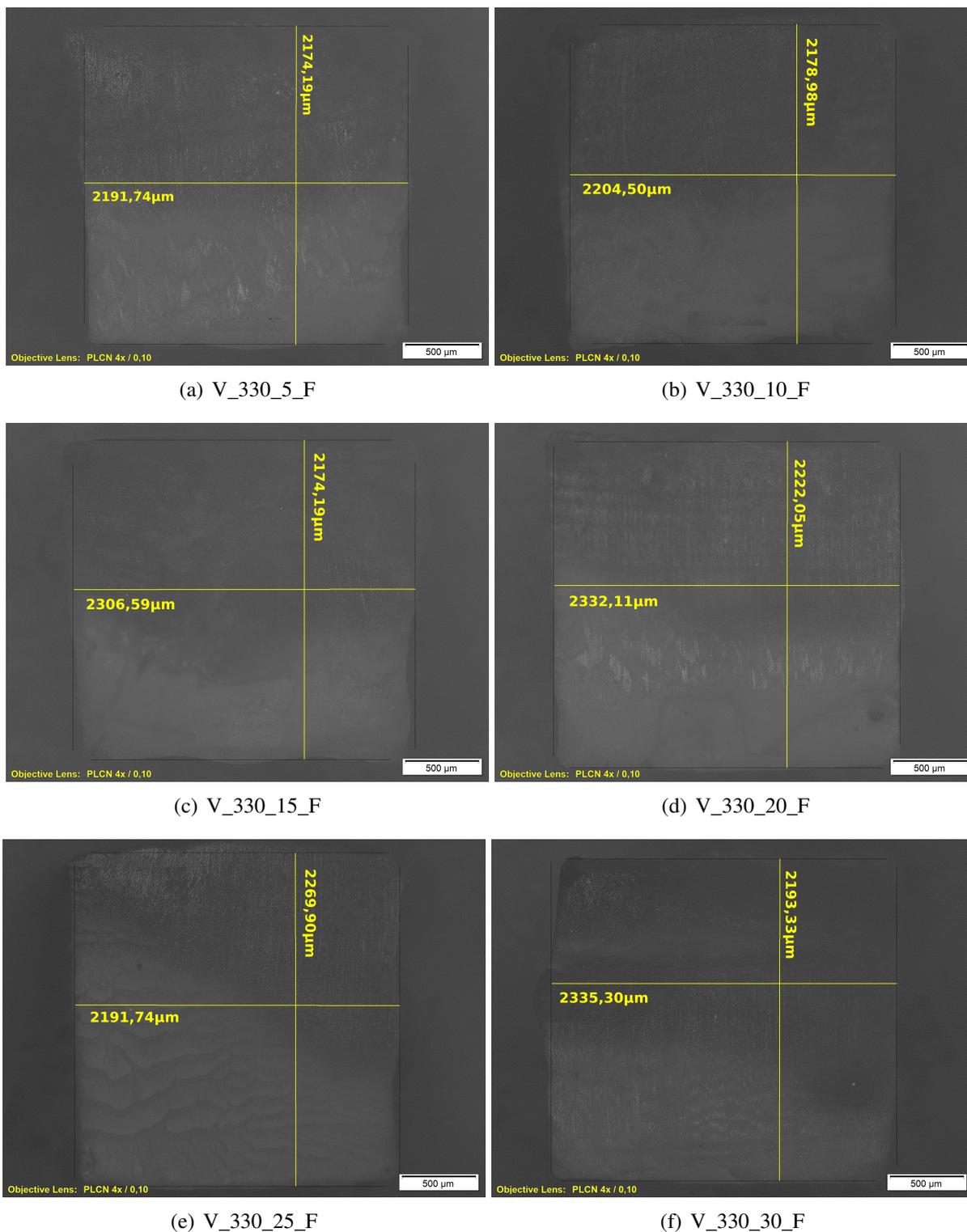


(e) H\_330\_25\_F

(f) H\_330\_30\_F

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz 330 na vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

Primeiramente fica evidente que é factível o uso de material polimérico em formato de *pellet* na extrusão com matrizes customizadas, uma vez que foi possível realizar todas as extrusões com sucesso, mesmo tendo como alimentador um sistema de funil com alimentação manual. Sistemas externos automáticos de alimentação de matéria-prima são bem vindos em futuros estudos.

A extrusora adotada foi posta à prova em duas posições de impressão distintas simulando a impressão 3D não-planar robotizada e operou com sucesso na frente das definições das vazões com uso de *pellets*. Encontramos um padrão linear da relação da velocidade de rotação da rosca com a vazão mássica e volumétrica de extrusão, independente da área e do formato da seção da matriz.

Identificado uma variação da densidade do material extrudado em corpos de prova com rotações menores ou igual a 20 rpm. Ficou evidente que a velocidade de rotação da rosca deve ser respeitada conforme citada no *datasheet* do polímero utilizado. Nesta extrusora de laboratório, rotações abaixo de 20 rpm com este polímero devem ser evitadas.

Constatou-se que a presença do efeito Barus é válida na extrusão dos filamentos e que há o inchamento do extrudado em todas as suas direções normais, resultando filamentos com seções maiores que o dimensionado na matriz base. Observou-se também que o ganho do inchamento do extrudado pode variar com a rotação adotada na rosca bem como em função da posição de extrusão .

Além do inchamento do extrudado que ocorre após a saída pelo orifício da matriz, estudos anteriores mostraram que o filamento também tende a seguir um gradiente de pressão das arestas para as quinas em relação a geometria adotada da matriz. Esse gradiente de pressão foi visto nos resultados ao gerarmos um filamento final com a geometria diferente da proveniente da matriz customizada. O resultando foi um filamento com formato final quadrático e de cantos levemente arredondados, que neste presente trabalho idealizou a condição experimental prática do mesmo simulada anteriormente.

Fazendo a correlação com a deposição do material, impressões 3D com matrizes customizadas podem atingir um contato entre superfícies mais planar entre camadas e faixas, já que a parede externa do filamento impresso tende a ter uma face mais plana. Nesta direção, a existência de vazios nas quinas e cantos também são reduzidos, causando uma menor densidade de vazios.

Olhando pela vertente de eficiência de impressão, o uso de matrizes customizadas pode favorecer o tempo total de impressão, uma vez que utilizando a matriz customizada teremos uma maior altura de camadas e faixas, fazendo-se possível a impressão de um mesmo volume da peça utilizando-se um tempo menor, ganhando em produtividade.

Pensando na evolução tecnológica, é possível visualizar em um futuro próximo, geometria de matrizes customizadas para cada tipo de peças na produção em larga escala, onde uma pequena adaptação na matriz, obtém-se um grande retorno de ganho de tempo de impressão e redução da matéria-prima bem como ganhos de qualidade de peças impressas.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS EM RELAÇÃO A MA

Na engenharia de materiais, com o tratamento superficial interno dos orifícios de extrusão poderemos diminuir a deterioração da matriz e melhorar a fluidez do extrudado com a aplicação de materiais voltados à proteção superficial da matriz, performando uma extrusão de fluxo laminar, favorecendo a qualidade do acabamento superficial da peça e estabilidade no inchamento do extrudado.

Na vertente da tecnologia adaptativa ou até mesmo da nanotecnologia, além das matrizes serem customizadas/dedicadas, podemos vislumbrar matrizes que são capazes de alterar sua geometria de seção de acordo com trajetória de impressão em tempo real, estendendo ao limite a customização e otimização da impressão 3D para melhor integridade superficial, adesão entre faixas e camadas no mesmo ou menor tempo de impressão.

Explorar o comportamento da posição de impressão e geometria de matriz com materiais inteligentes como os polímeros com memória.

Olhando para o trabalho base deste experimento investigativo do Wang et al. (2016), sugere-se uma abordagem para as novas simulações numéricas, as quais devem levar em consideração no ambiente da simulação, a orientação da extrusão das matrizes customizadas em relação a força da gravidade.

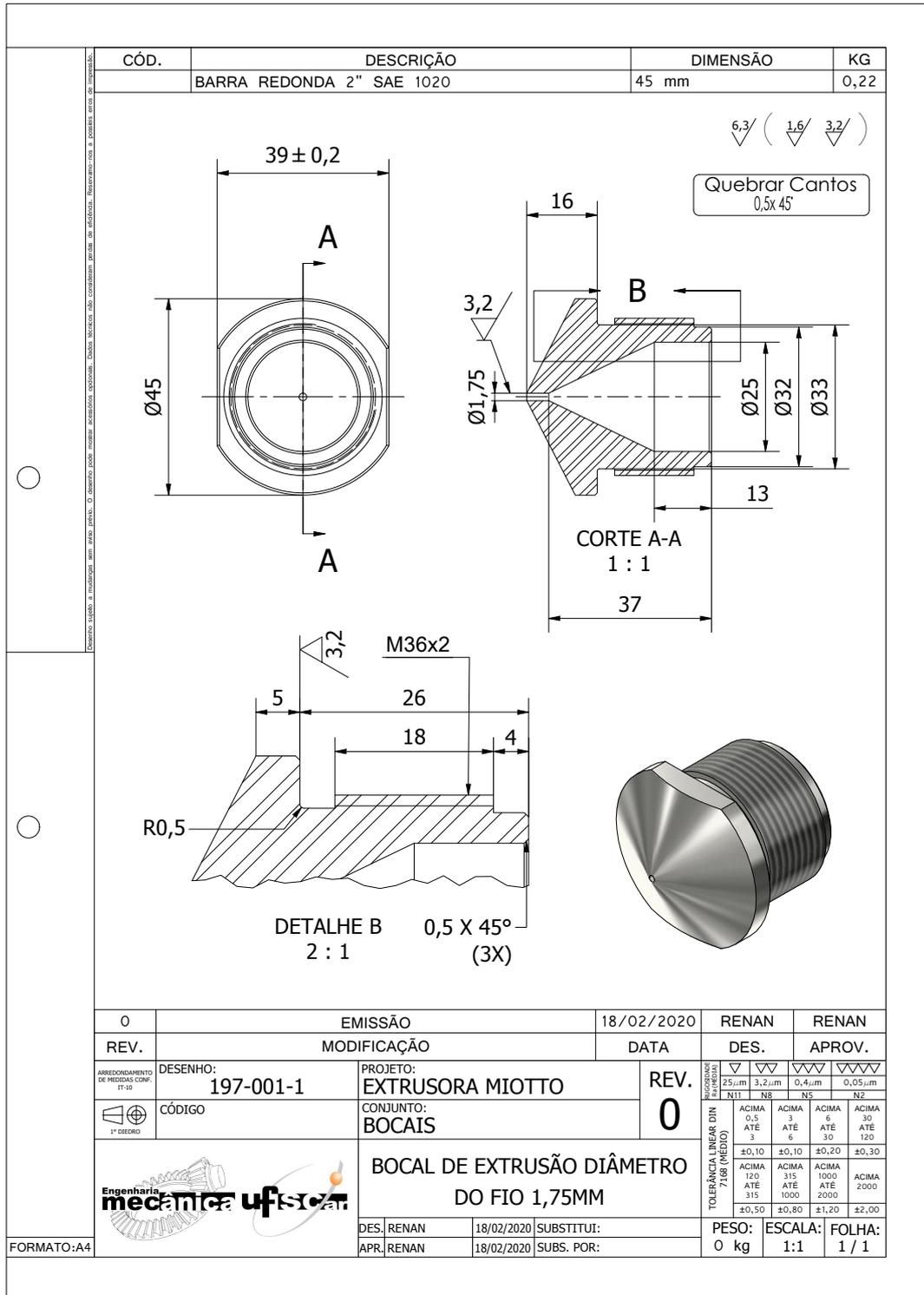
## REFERÊNCIAS

- BROOKS, B. J. et al. Robot-assisted 3d printing of biopolymer thin shells. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 89, p. 957–968, 2017. Citado na página 24.
- CHHABRA, R. P. Non-newtonian fluids: an introduction. In: *Rheology of complex fluids*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 3–34. Citado na página 15.
- DILBEROGLU, U. M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 545–554, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- EYERS, D. R.; POTTER, A. T. E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Emerald Group Publishing Limited, 2015. Citado na página 18.
- GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 69, p. 65–89, 2015. Citado na página 18.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing, 498 springer. *New York*, 2014. Citado na página 18.
- HORI, Y.; OKUBO, S. On the normal stress effect and the barus effect of polymer melts. *Journal of Rheology*, The Society of Rheology, v. 24, n. 1, p. 39–53, 1980. Citado na página 15.
- ISHAK, I. B.; FISHER, J.; LAROCHELLE, P. Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane toolpaths. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. [S.l.], 2016. v. 50152, p. V05AT07A063. Citado na página 24.
- KIM, H.; LIN, Y.; TSENG, T.-L. B. A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Publishing Limited, 2018. Citado na página 18.
- KROGH, P. von. Direct pellet extruder developed for ledc-3d print with recycled materials. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.
- LI, L. et al. Composite modeling and analysis for fabrication of fdm prototypes with locally controlled properties. *Journal of manufacturing processes*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 129–141, 2002. Citado na página 22.
- LIU, X. et al. A large-scale double-stage-screw 3 d printer for fused deposition of plastic pellets. *Journal of Applied Polymer Science*, Wiley Online Library, v. 134, n. 31, p. 45147, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 14, 20, 21 e 24.
- LOVO, J. F. P. *Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017. Citado na página 18.
- PICARD, M.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Recent advances in additive manufacturing of engineering thermoplastics: challenges and opportunities. *RSC Advances*, Royal Society of Chemistry, v. 10, n. 59, p. 36058–36089, 2020. Citado na página 18.

- PRUSINOWSKI, A.; KACZYŃSKI, R. Simulation of processes occurring in the extrusion head used in additive manufacturing technology. *acta mechanica et automatica*, v. 11, n. 4, p. 317–321, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- SABIC. *CYCOLAC RESIN MG94*. 2022. TYPICAL PROPERTY VALUES. Disponível em: <[https://www.sabic.com/en/products/documents/cycolac-resin\\_mg94\\_americas\\_technical\\_data\\_sheet/en](https://www.sabic.com/en/products/documents/cycolac-resin_mg94_americas_technical_data_sheet/en)>. Acesso em: 10/01/2023. Citado na página 25.
- SHAH, J. et al. Large-scale 3d printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 104, n. 9-12, p. 3679–3693, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18 e 24.
- SHAIK, Y. P.; SCHUSTER, J.; SHAIK, A. A scientific review on various pellet extruders used in 3d printing fdm processes. *Open Access Library Journal*, Scientific Research Publishing, v. 8, n. 8, p. 1–19, 2021. Citado na página 21.
- SILVA, M. H. da; WEBBER, C. G. Análise comparativa entre plataformas para o desenvolvimento da indústria 4.0. *Scientia cum Industria*, v. 8, n. 2, p. 115–122, 2020. Citado na página 19.
- SINGAMNENI, S. et al. Direct extrusion 3d printing for a softer pla-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 15, p. 936–949, 2021. Citado na página 21.
- TANG, Y.; ZHAO, Y. F. A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, 2016. Citado na página 18.
- THOMPSON, M. K. et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016. Citado na página 18.
- TUMBLESTON, J. R. et al. Continuous liquid interface production of 3d objects. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 347, n. 6228, p. 1349–1352, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. Citado na página 14.
- VOLPATO, N. et al. Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Verlag, v. 81, n. 1519, p. 12, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 18, 20, 22 e 24.
- WANG, Z. et al. Large-scale deposition system by an industrial robot (i): design of fused pellet modeling system and extrusion process analysis. *3D printing and additive manufacturing*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 3, n. 1, p. 39–47, 2016. Citado 8 vezes nas páginas 15, 20, 21, 22, 23, 24, 26 e 53.
- ZHANG, G. Q. et al. Robotic additive manufacturing process simulation-towards design and analysis with building parameter in consideration. In: IEEE. *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. [S.l.], 2016. p. 609–613. Citado na página 24.

APÊNDICE A – DESENHO 2D - MATRIZ 1,75MM

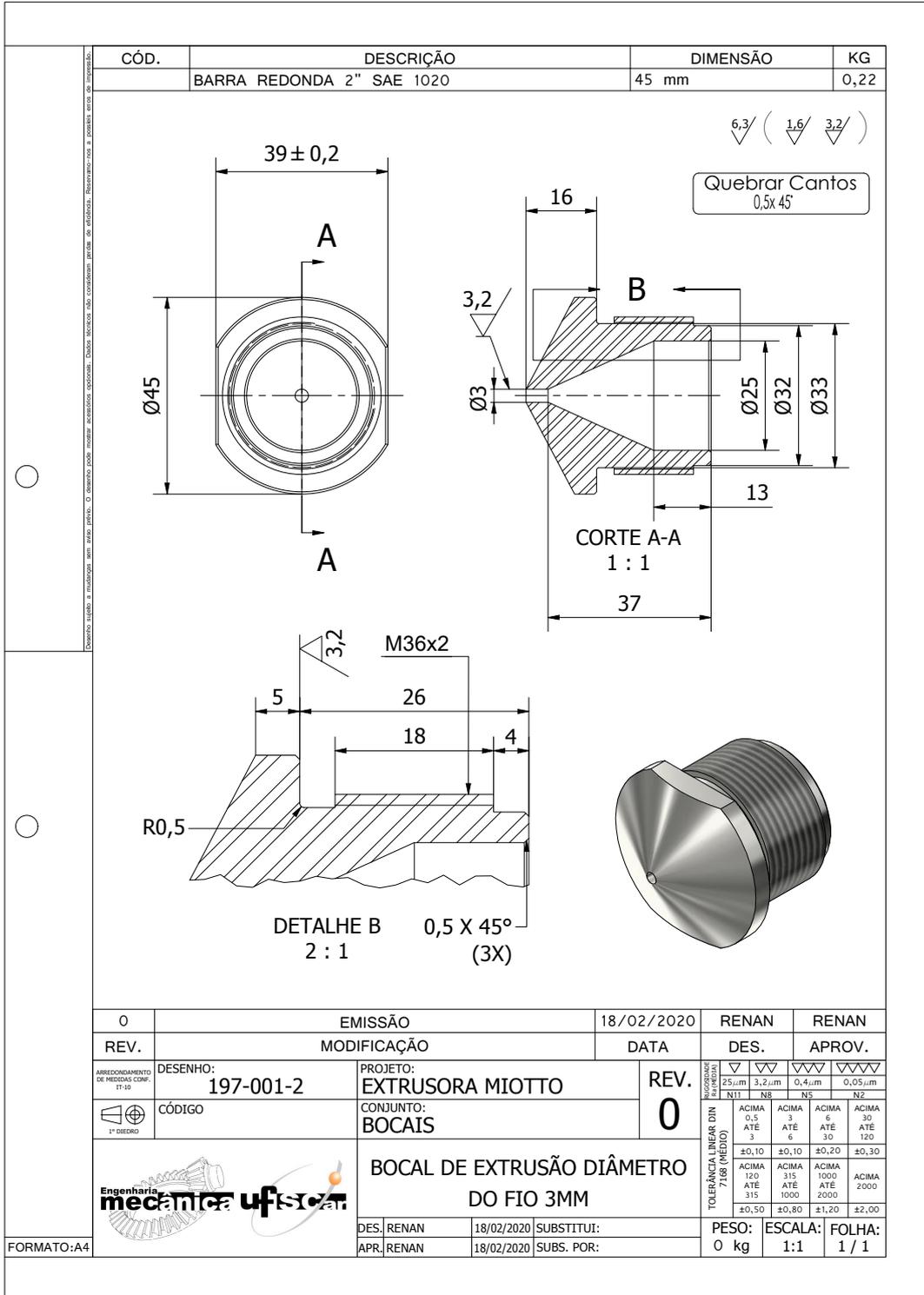
Figura 25 – Desenho 2D - Matriz 1,75mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – DESENHO 2D - MATRIZ 3,00MM

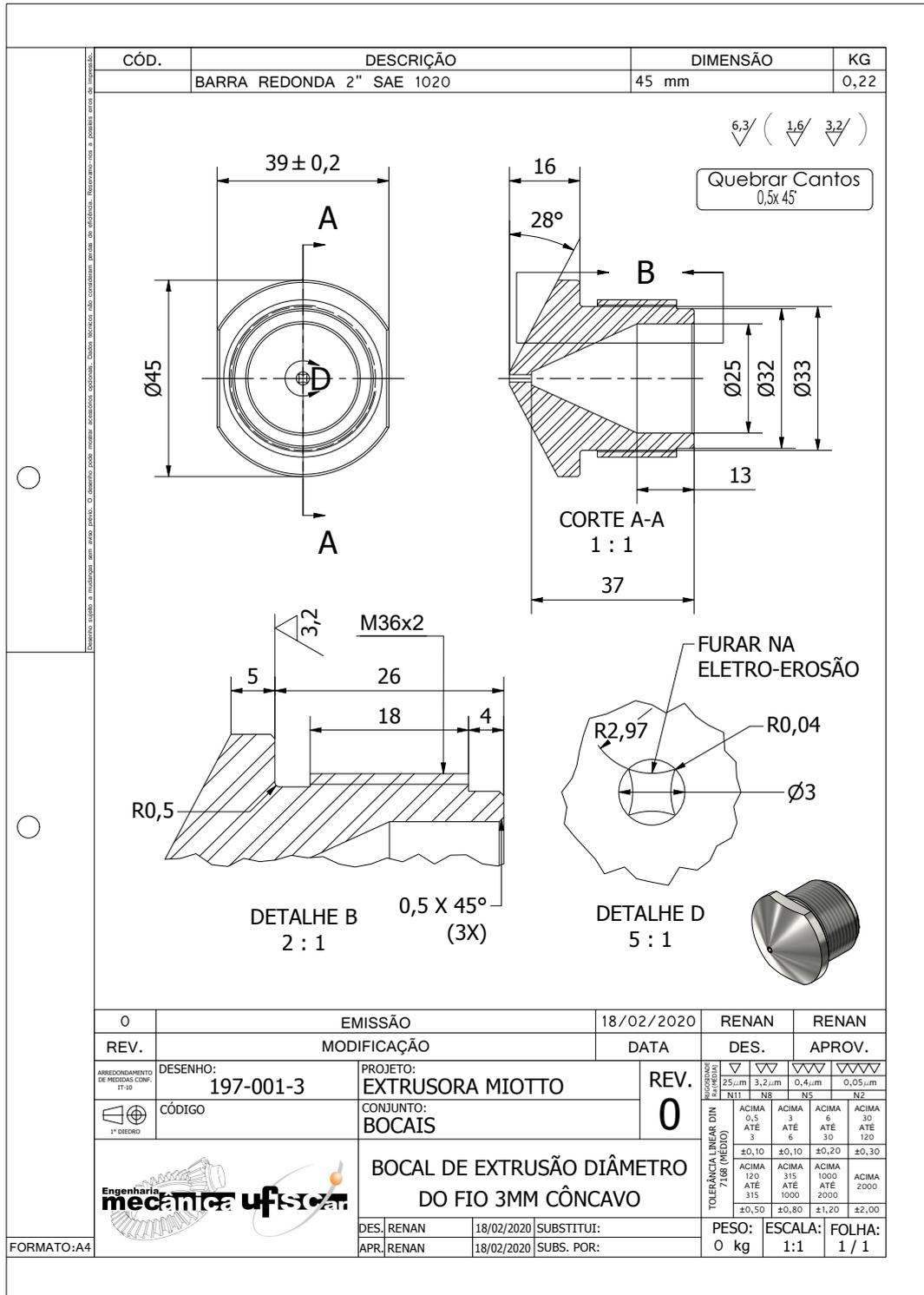
Figura 26 – Desenho 2D - Matriz 3,00mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – DESENHO 2D - MATRIZ 3,00MM - CÔNCAVO

Figura 27 – Desenho 2D - Matriz 3,00mm - Côncavo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE EM C DO DATA LOGGER

```

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "max6675.h"

//Pinos Termopar
const int thermoDO = 50;
const int thermoCLK = 52;
const int thermoCS = 43;

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

//Pinos Datalogger
const int dataloggerCS = 47 ;

const int pinoRpm = A0; //RPM Sinal Externo 0-24Vc.
const int pinoPressao = A2; //PRESSAO Sinal Externo 0-5Vc.

int sensorRpm = 0;
int valorRpm = 0;
int sensorPressao = 0;
int valorPressao = 0;
int valorTemp = 0;

void setup() {
    pinMode(dataloggerCS, OUTPUT);
    pinMode(thermoCS, OUTPUT);
    pinMode(pinoPressao, INPUT);

    //Abrir Serial.
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
        ; //Aguardar serial conectar.
    }
}

```

```
void loop() {

    sensorRpm = analogRead(pinoRpm);
    valorRpm = map(sensorRpm, 0, 1023, 0, 255);
    sensorPressao = analogRead(pinoPressao);
    valorPressao = map(sensorPressao, 0, 1023, 0, 100);

    digitalWrite(thermoCS, LOW);
    String dataString = "";
    valorTemp = thermocouple.readCelsius();
    dataString = String(valorRpm)+";" + thermocouple.readCelsius()
    + ";" + String(valorPressao);
    digitalWrite(thermoCS, HIGH);

    Serial.println(dataString);

    SD.begin(dataloggerCS);
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

    if (dataFile) {
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.close();
        // print to the serial port too:
        // Serial.println(dataString);
        digitalWrite(dataloggerCS, HIGH);
        SPI.end();
    }

    else {
        Serial.println("Erro_ao_abrir_datalog.txt");
    }

    delay(1000);
}
```

## APÊNDICE E – DADOS DO SETUP HORIZONTAL PARA AS AMOSTRAS

Figura 28 – Dados do setup horizontal para as amostras.

UNIDADES	mm	mm <sup>2</sup>	°C			rpm	Bar	g	mL (cm <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>	s	kg/h	cm <sup>3</sup> /s		
	Diam Ref	Area Seccao Bocal	Material	Temp T1	Temp T2	Temp T3	Rotação Rosca	Pressão	Massa Amostra	Volume Amostra	Densidade Amostra	Tempo Amostra	Vazão Mássica Amostra	Vazão Volum Amostra	
S E T U P	H_300_5_A	3	7,06	ABS	200	210	200	5	36	13	20	0,650	120,62	0,39	0,17
	H_300_10_A	3	7,06	ABS	200	210	200	10	55	23	30	0,767	120,12	0,69	0,25
	H_300_15_A	3	7,06	ABS	200	210	200	15	58	33	35	0,943	119,71	0,99	0,29
	H_300_20_A	3	7,06	ABS	200	210	200	20	65	44	40	1,100	119,61	1,32	0,33
	H_300_25_A	3	7,06	ABS	200	210	200	25	78	54	50	1,080	118,63	1,64	0,42
	H_300_30_A	3	7,06	ABS	200	210	200	30	80	65	60	1,083	119,01	1,97	0,50
	H_330_5_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	5	40,0	15	20	0,750	120,10	0,45	0,17
	H_330_10_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	10	54,3	25	30	0,833	119,92	0,75	0,25
	H_330_15_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	15	66,8	35	35	1,000	120,14	1,05	0,29
	H_330_20_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	20	70,6	45	40	1,125	120,09	1,35	0,33
	H_330_25_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	25	81,9	55	50	1,100	119,99	1,65	0,42
	H_330_30_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	30	88,9	70	60	1,167	120,06	2,10	0,50
	H_175_5_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	5	45	12	20	0,600	119,23	0,36	0,17
	H_175_10_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	10	58	21	30	0,700	118,81	0,64	0,25
	H_175_15_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	15	73	33	40	0,825	119,15	1,00	0,34
	H_175_20_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	20	84	44	50	0,880	120,16	1,32	0,42
	H_175_25_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	25	91	54	60	0,900	118,85	1,64	0,50
	H_175_30_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	30	99	65	70	0,929	118,47	1,98	0,59
	SETUP HORIZONTAL									DADOS DAS AMOSTRAS [A]					

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE F – DADOS DO SETUP HORIZONTAL PARA OS FILAMENTOS

Figura 29 – Dados do setup horizontal para os filamentos.

UNIDADES	mm	mm <sup>2</sup>	°C	°C	°C	rpm	Bar	g	cm	s	cm/s	cm (5seg)	kg/h	mm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /s	g/cm <sup>3</sup>	
																		Area
Codigo Ensaio	Ref	Bocal	Material	T1	T2	T3	Rosca	Pressão	Massa	Comp	Tempo	Linear	Corrigido	Mássica	Seção	Volume	Volum	Densidade
H_300_5_F	3	7,06	ABS	200	210	200	5	36										
H_300_10_F	3	7,06	ABS	200	210	200	10	55										
H_300_15_F	3	7,06	ABS	200	210	200	15	58										
H_300_20_F	3	7,06	ABS	200	210	200	20	65										
H_300_25_F	3	7,06	ABS	200	210	200	25	78										
H_300_30_F	3	7,06	ABS	200	210	200	30	80										
H_330_5_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	5	40,0	0,4	10,3	4,93	2,09	10,45	0,32	5,45	0,56	0,11	0,78
H_330_10_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	10	54,3	0,8	17,4	4,97	3,50	17,51	0,60	6,10	1,06	0,21	0,78
H_330_15_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	15	66,8	1,4	24,7	5,22	4,73	23,66	0,97	6,73	1,66	0,32	0,84
H_330_20_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	20	70,6	1,6	32,5	5,10	6,37	31,86	1,15	6,47	2,10	0,41	0,77
H_330_25_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	25	81,9	2,1	37,1	5,08	7,30	36,52	1,51	7,65	2,84	0,56	0,75
H_330_30_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	30	88,9	2,4	45,7	5,33	8,57	42,87	1,63	8,42	3,85	0,72	0,63
H_175_5_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	5	45										
H_175_10_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	10	58										
H_175_15_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	15	73										
H_175_20_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	20	84										
H_175_25_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	25	91										
H_175_30_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	30	99										
SETUP HORIZONTAL									DADOS DOS FILAMENTOS [F]									

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE G – DADOS DO SETUP VERTICAL PARA AS AMOSTRAS

Figura 30 – Dados do setup vertical para as amostras.

UNIDADES	mm	mm <sup>2</sup>		°C	°C	°C	rpm	Bar	g	mL (cm <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>	s	kg/h	cm <sup>3</sup> /s
Codigo Ensaio	Diam Ref	Area		Temp T1	Temp T2	Temp T3	Rotação Rosca	Pressão	Massa Amostra	Volume Amostra	Densidade Amostra	Tempo Amostra	Vazão	
		Seção Matriz	Material										Vazão Mássica Amostra	Vazão Volum Amostra
V_300_5_A	3	7,06	ABS	200	210	200	5	42,4	12,1	11	1,100	120,93	0,36	0,09
V_300_10_A	3	7,06	ABS	200	210	200	10	44,1	16,8	16	1,050	120,99	0,50	0,13
V_300_15_A	3	7,06	ABS	200	210	200	15	46,1	31,1	29	1,072	120,51	0,93	0,24
V_300_20_A	3	7,06	ABS	200	210	200	20	66,2	43,3	42	1,031	120,88	1,29	0,35
V_300_25_A	3	7,06	ABS	200	210	200	25	77,2	53,5	52	1,029	120,24	1,60	0,43
V_300_30_A	3	7,06	ABS	200	210	200	30	81,9	63,7	61	1,044	121,07	1,89	0,50
V_330_5_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	5	47,0	11,8	10	1,180	121,22	0,35	0,08
V_330_10_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	10	69,2	22,9	21	1,090	122,18	0,67	0,17
V_330_15_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	15	81,5	32,7	32	1,022	121,04	0,97	0,26
V_330_20_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	20	93,2	43,4	41	1,059	121,01	1,29	0,34
V_330_25_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	25	100,8	53,9	55	0,980	120,99	1,60	0,45
V_330_30_A	3,3	3,37	ABS	200	210	200	30	107,9	63,3	64	0,989	121,02	1,88	0,53
V_175_5_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	5	53,0	12,6	10	1,260	120,75	0,38	0,08
V_175_10_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	10	86,0	22,2	20	1,110	120,85	0,66	0,17
V_175_15_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	15	102,0	32,4	32	1,013	120,59	0,97	0,27
V_175_20_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	20	114,7	42,4	41	1,034	120,46	1,27	0,34
V_175_25_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	25	123,6	52,6	52	1,012	120,86	1,57	0,43
V_175_30_A	1,75	2,40	ABS	200	210	200	30	126,2	61,6	60	1,027	120,37	1,84	0,50
SETUP VERTICAL									DADOS DAS AMOSTRAS [A]					

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE H – DADOS DO SETUP VERTICAL PARA OS FILAMENTOS

Figura 31 – Dados do setup vertical para os filamentos.

UNIDADES	mm	mm <sup>2</sup>	°C	°C	°C	rpm	Bar	g	cm	s	cm/s	cm (5seg)	kg/h	mm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /s	g/cm <sup>3</sup>	
																		Area
Codigo Ensaio	Ref	Matriz	Material	T1	T2	T3	Rosca	Pressão	Massa	Comp	Tempo	Veloc	Comp	Vazão	Área	Volume	Vazão	Densidade
V_300_5_F	3	7,06	ABS	200	210	200	5	42,4										
V_300_10_F	3	7,06	ABS	200	210	200	10	44,1										
V_300_15_F	3	7,06	ABS	200	210	200	15	46,1										
V_300_20_F	3	7,06	ABS	200	210	200	20	66,2										
V_300_25_F	3	7,06	ABS	200	210	200	25	77,2										
V_300_30_F	3	7,06	ABS	200	210	200	30	81,9										
V_330_5_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	5	47,0	0,6	9,6	5,19	1,85	9,25	0,42	4,83	0,46	0,09	1,29
V_330_10_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	10	69,2	1,1	17,7	5,17	3,42	17,12	0,77	4,96	0,88	0,17	1,25
V_330_15_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	15	81,5	1,6	28,1	5,22	5,38	26,92	1,10	4,97	1,40	0,27	1,14
V_330_20_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	20	93,2	2,1	38,7	5,53	7,00	34,99	1,37	5,13	1,99	0,36	1,06
V_330_25_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	25	100,8	2,6	47,2	5,2	9,08	45,38	1,80	4,84	2,29	0,44	1,14
V_330_30_F	3,3	3,37	ABS	200	210	200	30	107,9	3,1	56,6	5,23	10,82	54,11	2,13	5,20	2,95	0,56	1,05
V_175_5_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	5	53,0										
V_175_10_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	10	86,0										
V_175_15_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	15	102,0										
V_175_20_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	20	114,7										
V_175_25_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	25	123,6										
V_175_30_F	1,75	2,40	ABS	200	210	200	30	126,2										
SETUP VERTICAL									DADOS DOS FILAMENTOS [F]									

Fonte: Elaborado pelo autor.

**ANEXO A – PROPRIEDADES DO SABIC CYCOLAC MG94 ABS**

# CYCOLACT™ RESIN MG94

REGION AMERICAS

## DESCRIPTION

Superior flow, injection molding ABS. Good impact. For thin-wall applications.

## TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20190814

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
<b>MECHANICAL</b>			
Tensile Stress, yld, Type I, 5 mm/min	46	MPa	ASTM D638
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min	35	MPa	ASTM D638
Tensile Strain, yld, Type I, 5 mm/min	2	%	ASTM D638
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min	18	%	ASTM D638
Tensile Modulus, 5 mm/min	2480	MPa	ASTM D638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	79	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	2620	MPa	ASTM D790
Hardness, Rockwell R	113	-	ASTM D785
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	46	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	35	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	2.3	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	40	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2450	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	70	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2500	MPa	ISO 178
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched, 23°C	240	J/m	ASTM D256
Izod Impact, notched, -30°C	80	J/m	ASTM D256
Instrumented Dart Impact Total Energy, 23°C	21	J	ASTM D3763
Instrumented Dart Impact Total Energy, -30°C	5	J	ASTM D3763
Izod Impact, notched 80*10*4 +23°C	17	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80*10*4 -30°C	7	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80*10*4 sp=62mm	18	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
<b>THERMAL</b>			
Vicat Softening Temp, Rate B/50	99	°C	ASTM D1525
HDT, 0.45 MPa, 3.2 mm, unannealed	95	°C	ASTM D648
HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed	82	°C	ASTM D648
CTE, -40°C to 40°C, flow	8.82E-05	1/°C	ASTM E831
CTE, -40°C to 40°C, xflow	8.46E-05	1/°C	ASTM E831
CTE, -40°C to 40°C, flow	8.82E-05	1/°C	ISO 11359-2
CTE, -40°C to 40°C, xflow	8.46E-05	1/°C	ISO 11359-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	98	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	100	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120*10*4 sp=100mm	91	°C	ISO 75/Be
HDT/Ae, 1.8 MPa Edgew 120*10*4 sp=100mm	76	°C	ISO 75/Ae

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Relative Temp Index, Elec	60	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	60	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	60	°C	UL 746B
<b>PHYSICAL</b>			
Specific Gravity	1.04	-	ASTM D792
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm	0.5 – 0.8	%	SABIC method
Melt Flow Rate, 230°C/3.8 kg	11.7	g/10 min	ASTM D1238
Melt Viscosity, 240°C, 1000 sec-1	1720	Poise	ASTM D3825
Density	1.04	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Flow Rate, 220°C/5.0 kg	12	g/10 min	ISO 1133
Melt Flow Rate, 220°C/10.0 kg	42	g/10 min	ISO 1133
<b>FLAME CHARACTERISTICS</b>			
UL Yellow Card Link	<a href="#">E121562-220727</a>	-	-
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating	1.52	mm	UL 94
<b>INJECTION MOLDING</b>			
Drying Temperature	80 – 90	°C	
Drying Time	2 – 4	Hrs	
Drying Time (Cumulative)	8	Hrs	
Maximum Moisture Content	0.1	%	
Melt Temperature	205 – 245	°C	
Nozzle Temperature	205 – 245	°C	
Front - Zone 3 Temperature	205 – 225	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	200 – 210	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	190 – 200	°C	
Mold Temperature	50 – 70	°C	
Back Pressure	0.3 – 0.7	MPa	
Screw Speed	30 – 60	rpm	
Shot to Cylinder Size	50 – 70	%	
Vent Depth	0.038 – 0.051	mm	

## DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.