

GIANNINI BARCELLOS DE OLIVEIRA

**MANUFATURA ADITIVA DE PLA EXTRUDADO
ASSOCIADA À MANUFATURA SUBTRATIVA
OBJETIVANDO TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS E
GEOMÉTRICAS MAIS ESTREITAS: UMA
ABORDAGEM HÍBRIDA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2020

GIANNINI BARCELLOS DE OLIVEIRA

**MANUFATURA ADITIVA DE PLA EXTRUDADO ASSOCIADA À
MANUFATURA SUBTRATIVA OBJETIVANDO TOLERÂNCIAS
DIMENSIONAIS E GEOMÉTRICAS MAIS ESTREITAS: UMA
ABORDAGEM HÍBRIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

Uberlândia – MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48m
2020 Oliveira, Giannini Barcellos de, 1995-
 Manufatura aditiva de Pla extrudado associada à manufatura
 subtrativa objetivando tolerâncias dimensionais e geométricas mais
 estreitas [recurso eletrônico] : uma abordagem híbrida / Giannini
 Barcellos de Oliveira. - 2020.

Orientador: Arthur Alves Fiocchi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.5615>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Fiocchi, Arthur Alves, 1981-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Glória Aparecida
Bibliotecária - CRB-6/2047

DEDICATÓRIA

*À minha família que sempre acompanha
minha caminhada e com quem posso
sempre contar*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre guiar meus passos e me dar o discernimento e habilidades necessárias para fazer tudo o que preciso.

Agradeço a minha família por acompanhar de perto minha caminhada e estar sempre disposta a dar o suporte que está ao seu alcance. Em especial aos meus pais Verdi Antônio de Oliveira e Ana Lucia Barcellos de Oliveira e meu irmão Paganini Barcellos de Oliveira que não mediram esforços pra me ajudar nas dificuldades enfrentadas.

Agradeço ao meu orientador Arthur Alves Fiocchi pela ajuda fornecida na realização das atividades.

Agradeço ao meu amigo Igor Cesar de Carlos Rosa pelo suporte e companheirismo do início ao final do trabalho.

Agradeço aos técnicos Diego Augusto Costa Alves e Jonas Profeta Borges pelo suporte técnico durante toda a realização do trabalho.

Agradeço aos alunos do LEPU que sempre estiveram sempre de prontidão para ajudar em qualquer atividade. Em especial o Walter dos Santos Motta Neto que sempre me auxiliou de forma mais direta no trabalho e discussões feitas.

Agradeço a minha amiga Maria Paula Buevas Padilha por sempre me auxiliar quando precisei e de algum modo seguir motivando no decorrer do trabalho.

Agradeço a minha amiga Thaise Alonso por estar sempre me colocando pra frente e incentivando a trabalhar mais e melhor.

Agradeço a todos os laboratórios e seus membros que de algum modo contribuíram para a realização das atividades. Em especial ao LPM e LTM que sem a infraestrutura cedida não seria possível a realização deste trabalho.

Aos professores da FEMEC que contribuíram na realização do trabalho

Agradeço aos meus amigos que direta ou indiretamente ajudaram o meu projeto.

Agradeço a CAPES pela bolsa concedida durante todo o tempo de realização do trabalho.

Agradeço à FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DE MINAS GERAIS (FAPEMIG) por meio do Projeto de Pesquisa APQ-01759-17.

Agradeço também a Digital Surf por disponibilizar a utilização do software MountainsLab Premium 8.1 durante toda a pesquisa de forma gratuita e completa, dando todo o suporte durante a utilização do software.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram na realização do trabalho direta ou indiretamente.

OLIVEIRA, G. B. **Manufatura aditiva de PLA extrudado associada à manufatura subtrativa objetivando tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas: uma abordagem híbrida**. 2020, 135 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

A manufatura avançada empregando processos aditivos e subtrativos vem ganhando destaque na fabricação de componentes funcionais otimizados. Mesmo sendo uma área embrionária, a associação das manufaturas no contexto dos processos híbridos, principalmente nas indústrias aeroespacial e médica empregando ligas metálicas, tem fomentado avanços tecnológicos importantes por conciliar complexidade geométrica multiescala, novos materiais e desempenho mecânico e físico-químico. Entretanto, pesquisas, tecnologias, normas regulamentadoras e aplicações industriais de processos híbridos voltados à materiais poliméricos e compósitos são ainda mais incipientes. Nesse contexto, a presente pesquisa visa a manufatura aditiva por Fabricação por Filamento Fundido (FFF) associada à manufatura subtrativa objetivando tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas como uma abordagem híbrida. Foram escolhidos parâmetros de FFF do termoplástico PLA com foco no desempenho mecânico. Para o torneamento cilíndrico externo variou-se a geometria de ferramenta de corte, velocidade (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (ap). Foram analisadas dimensão, rugosidade, perfilometria, circularidade, cilindridade, força de corte (F_c), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica. Os resultados apontam melhora significativa nas tolerâncias dimensionais e geométricas. Os valores de incerteza dimensional foram reduzidos de 0,06 mm para em 0,02 mm. A redução média do parâmetro de rugosidade R_a foi de 89,6 % para a ferramenta DCGX 070204 AL, a qual apresentou os melhores resultados. Os desvios médios de circularidade e cilindridade foram reduzidos em 91 % e 81 %, respectivamente. Os desvios de forma e rugosidade foram afetados pela adesão de material na peça. Os parâmetros mais influentes na rugosidade foram f e ap . A F_c aumentou com a redução do ângulo de saída da ferramenta de corte, sendo mais influenciada pelo f e ap . No contexto híbrido, os processos associados alcançaram resultados exclusivos que não poderiam ser encontrados separadamente, apontando caminhos para o desenvolvimento de máquinas, processos de fabricação e softwares integrados dentro da célula de manufatura avançada em total sinergia com o projeto da peça.

Palavras Chave: manufatura aditiva, manufatura subtrativa, manufatura híbrida, PLA, tolerâncias dimensionais.

OLIVEIRA, G. B. **Additive manufacturing of extruded PLA associated with subtractive manufacturing aiming at narrower dimensional and geometric tolerances: a hybrid approach**. 2020, 135 p. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia - MG.

Abstract

Advanced manufacturing employing additive and subtractive processes has been gaining prominence in the manufacturing of optimized functional components. Even though it is an embryonic area, the association of manufacturing in the context of hybrid processes, especially in the aerospace and medical industries using metallic alloys, has fostered important technological advances by reconciling multi-scale geometric complexity, new materials and mechanical and physicochemical performance. However, research, technologies, regulatory standards, and industrial applications of hybrid processes focused on polymeric and composite materials are still incipient. In this context, this research aims at additive manufacturing by Fused Filament Fabrication (FFF) associated with subtractive manufacturing pursuing tighter dimensional and geometric tolerances as a hybrid approach. FFF parameters of the PLA thermoplastic were chosen with a focus on mechanical performance. For external cylindrical turning, cutting tool geometry, speed (v_c), feed rate (f) and depth of cut (a_p) were varied. Dimension, roughness, profilometry, roundness, cylindricity, cutting force (F_c), scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy were analyzed. The results show significant improvement in dimensional and geometric tolerances. The dimensional uncertainty values were reduced from 0.06 mm to 0.02 mm. The average reduction of the roughness parameter R_a was 89.6% for the DCGX 070204 AL tool, which presented the best results. The average roundness and cylindricity deviations were reduced by 91 % and 81 %, respectively. The shape and roughness deviations were affected by the material adhesion on the workpiece. The most influential parameters on the roughness were f and a_p . F_c increased with reducing the rake angle of the cutting tool, and was most influenced by f and a_p . In the hybrid context, the associated processes achieved unique results that could not be found separately, pointing at paths to the development of machines, manufacturing processes and software integrated within the advanced manufacturing cell in full synergy with the part design.

Keywords: Additive manufacturing, subtractive manufacturing, hybrid manufacturing, PLA, dimensional tolerances.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo esquemático do processo SLA (Adaptado de Dizon <i>et al.</i> , 2018).	25
Figura 2.2 – Comparação entre processo DLP e SLA (DIZON <i>et al.</i> , 2018).....	26
Figura 2.3 – Sistema de produção com interface líquida contínua (CLIP) de manufatura aditiva (Adaptado de Tumbleston <i>et al.</i> , 2015).	27
Figura 2.4 – Exemplo esquemático da Sinterização Seletiva a Laser (SLM) (Adaptado de Stansbury e Idacavage, 2016).	28
Figura 2.5 – Exemplo esquemático da FFF/FDM® (Adaptado de Stansbury e Idacavage, 2016).	29
Figura 2.6 – Evolução do desgaste do bocal de extrusão (a) antes, (b) após imprimir 15 cm de PBT + grafeno e (c) após imprimir 1,5 m de PBT + nano tubo de carbono (Adaptado de Gnanasekaran <i>et al.</i> , 2017).....	31
Figura 2.7 – Representação do efeito escada de acordo com a diminuição da espessura de camada depositada (Adaptado de Harun <i>et al.</i> , 2018).	32
Figura 2.8 – Variação de ângulo de saída e formação de cavaco (Adaptado de Carr e Feger, 1993).	34
Figura 2.9 – Comportamento das forças de corte F_c (paralela à direção de corte) e F_n (normal perpendicular à direção de corte) para diferentes ângulos de saída da ferramenta (Alauddin <i>et al.</i> , 1995).....	35
Figura 2.10 – Variação da topografia da peça de POM torneada para duas condições de ap de (a) 0,08 mm/volta e (b) 0,24 mm/volta e vc de 440 m/min (Adaptado de Chabbi <i>et al.</i> , 2017).	36
Figura 2.11 – Divisão de conceitos de hibridismo (Adaptado de Sealy <i>et al.</i> , 2018).....	38
Figura 2.12 – Sistema híbrido entre manufatura aditiva e manufatura subtrativa (Adaptado de Hur <i>et al.</i> , 2002).	38
Figura 2.13 – Comparação entre superfícies impressas com (a) 3 e (b) 6 graus de liberdade (Li, Haghghi e Yang, 2018).	39
Figura 2.14 – Peças feitas por (a) FFF e (b) após usinagem (Adaptado de Lee, Wei e Chung, 2014).	42
Figura 2.15 – Peças fabricadas por Fabricação de Filamento Fundido (FFF) com diferentes ângulos de inclinação de deposição (BOSCHETO, BOTTINI E VENIALI, 2016).....	43
Figura 2.16 – Pá de turbina pelton de ABS fabricada por manufatura híbrida (Fabricação de Filamento Fundido – FFF à esquerda, e após o fresamento, à direita) (Adaptado de Boscheto, Bottini e Veniali, 2016).	43
Figura 2.17 – Peça fabricada e tempos de fabricação associados (Adaptado de Yamazaki, 2016).	45

Figura 2.18 – Exemplo de orientação de impressão e condições de temperatura (Adaptado de Popescu <i>et al.</i> , 2018).	46
Figura 2.19 – Resultados de (a) tensão de tração durante a falha para todas as condições testadas e (b) curva tensão deformação para a orientação de deposição de $\pm 45^\circ$ (Adaptado de Grasso <i>et al.</i> , 2018).	50
Figura 2.20 – Impressão de PLA na (a) orientação X, (b) orientação Y e (c) orientação 45° (Adaptado de Afrose <i>et al.</i> , 2016).	52
Figura 2.21 – Falha apresentada entre a parte externa e interna da peça (Adaptado de Letcher e Waytashek, 2014).	53
Figura 2.22 – Tensão de flexão máxima dos corpos de prova com preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD) (Adaptado de Rosa, 2019).	53
Figura 3.1 – Ajuste de altura da mesa de impressão.	56
Figura 3.2 – Geometria do corpo de prova de torneamento cilíndrico externo.	57
Figura 3.3 – (a) Mandril de fixação do CP para usinagem e medições e (b) bucha de fixação.	58
Figura 3.4 – Montagem do sistema de ensaios de torneamento cilíndrico externo.	59
Figura 3.5 – Minitorno CNC para os ensaios de torneamento cilíndrico externo.	59
Figura 3.6 – Desenho esquemático da montagem dos sensores de final de curso para movimentos (a) transversal e (b) longitudinal.	60
Figura 3.7 – Representação das regiões medidas nos CPs para avaliar o batimento radial.	62
Figura 3.8 – Pastilha intercambiável de metal duro DCGX 0702 04 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN) (SANDVIK COROMANT®, 2017).	63
Figura 3.9 – Pastilha intercambiável de metal duro DCMT 0702 02 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN + TiN) (ISCAR®, 2020).	63
Figura 3.10 – Suporte de ferramenta SDACR 1212K 07-S e ferramenta de metal duro DCGX 0702 04 AL 1105.	64
Figura 3.11 – Defeito causado pela trajetória do bico extrusor durante a impressão pela vista (a) superior e (b) lateral ampliada.	65
Figura 3.12 – Montagem do mandril e CP para medição de circularidade e cilíndricidade na máquina de medir desvios de forma.	66
Figura 3.13 – corpos de prova montados no suporte sobre a mesa para medições de rugosidade e perfilometria.	69
Figura 3.14 – Regiões de medição de rugosidade e perfilometria nos CPs.	70
Figura 3.15 – Montagem do sistema de medição de força durante a calibração.	71

Figura 3.16 – Curva de calibração da célula de carga.	73
Figura 3.17 – Desenho esquemático do (a) suporte de ferramenta projetado e da (b) montagem do conjunto de fixação da célula de carga no castelo porta-ferramentas.	74
Figura 4.1 – Resultado de medição dos CPs anterior à usinagem do 1° lote.	78
Figura 4.2 – Resultado de medição dos CPs anterior à usinagem do 2° lote.	78
Figura 4.3 – Representação da vista superior do projeto em (a) CAD e (b) CP impresso. ...	79
Figura 4.4 – Resultados de circularidade dos CPs anterior ao processo de manufatura subtrativa.	80
Figura 4.5 – Resultados de cilindridade para os CPs das duas ferramentas anterior ao processo de manufatura subtrativa.	80
Figura 4.6 – Imagem de microscopia óptica dos CPs.	81
Figura 4.7 – Evolução do batimento radial (μm) do conjunto peça e mandril em relação ao eixo-árvore do minitorno CNC com a redução do diâmetro da peça torneada. As regiões do CP referem-se as partes da peça durante a manufatura aditiva, sendo a inferior a parte que estava em contato com a mesa da impressora.	83
Figura 4.8 – Representação da área máxima removida por meio de usinagem nos ensaios de batimento radial considerando o deslocamento de 0,35 mm do centro do CP.	83
Figura 4.9 – Resultado do torneamento cilíndrico externo nas condições (a) $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,08$ mm e $f = 0,05$ mm/volta e (b) $v_c = 70$ m/min, $a_p = 0,02$ mm e $f = 0,15$ mm/volta para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).	84
Figura 4.10 – Aderência de material nas condições de corte (a) $v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm e (b) $v_c = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm usinadas pela DCMT 0702 02 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN+TiN).	85
Figura 4.11 – Variação de incertezas de medição (mm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).	86
Figura 4.12 – Variação de incertezas de medição (mm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm,	

- ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN) 87
- Figura 4.13 – Circularidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN)..... 89
- Figura 4.14 – Circularidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, e revestimento AlTiN+TiN). 89
- Figura 4.15 – Cilindricidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN)..... 91
- Figura 4.16 – Cilindricidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN). 91
- Figura 4.17 – (a) Topografia de referência de uma área de 1 mm² e (b) microscopia óptica do corpo de prova impresso com PLA azul, temperatura de extrusão 185 °C, temperatura da mesa 50 °C, número de camadas externas 3, quantidade de camadas de base e topo 2, padrão de preenchimento hexagonal, porcentagem de preenchimento 30 % e altura da camada 0,19 mm. 92
- Figura 4.18 – Topografia do corpo de prova para torneamento usinado com parâmetros $v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm pela ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN) na (a) vista superior e (b) em 3D). 93
- Figura 4.19 – Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN)..... 94
- Figura 4.20 – Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta

DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55° e revestimento AlTiN+TiN).	94
Figura 4.21 – Topografia e microscopia óptica do corpo de prova para torneamento usinado com parâmetros $vc = 20$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm pela ferramenta (a) e (c) DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN) e (b) e (d) DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).	96
Figura 4.22 – Cavacos gerados na usinagem pela ferramenta DCGX 070204 AL 1105 e DCMT 070202 nas condições de (a) $vc = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta , $ap = 0,45$ mm, (b) $vc = 20$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm, (c) $vc = 20$ m/ min, $f = 0,15$ mm/volta, $ap = 0,05$ mm, (d) $vc = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm.....	99
Figura 4.23 – Gráfico de forças de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).	100
Figura 4.24 – Gráfico de forças de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN +TiN).	100
Figura 4.25 – MEV das superfícies, (a) e (c), de saída e , (b) e (d), principal de folga da ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN) antes e depois da usinagem.	104
Figura 4.26 – MEV das superfícies, (a) e (c), de saída e , (b) e (d), principal de folga da ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN) antes e depois da usinagem.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo de custo das tecnologias SLA e FDM® ou FFF.....	26
Tabela 2.2 – Comparação entre processo de manufatura aditiva (Sinterização Seletiva a Laser – SLS) e manufatura híbrida.	42
Tabela 2.3 – Rugosidade Ra (μm) para as zonas demarcadas na Figura 2.16.....	44
Tabela 2.4 – Normas ASTM e ISO para ensaios de polímeros.	47
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas, térmicas e de processamento médias do PLA.....	51
Tabela 3.1 – Parâmetros de impressão utilizados na fabricação dos CPs.	57
Tabela 3.2 – Parâmetros de corte para o torneamento cilíndrico externo do PLA.....	62
Tabela 3.3 – Principais características dos insertos de metal duro utilizados na pesquisa. .	64
Tabela 3.4 – Fatores de influência na incerteza de medição de cada CP e suas características.	68
Tabela 3.5 – Tabela de massas e incrementos para o sistema de calibração.....	72
Tabela 3.6 – Parâmetros de Entrada e Variáveis de Saída.....	76
Tabela 4.1 – Valores médios para os resultados de circularidade e cilíndricidade.	81
Tabela 4.2 – Valores médios dos parâmetros de rugosidade para a peça de 45 mm.	81
Tabela 4.3 – Análise de Variância da Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55° e revestimento TiAlN).	97
Tabela 4.4 – Análise de Variância da Força de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).	102
Tabela 4.5 – Análise de Variância da Força de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de	

posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN)..... 102

Tabela 4.6 – Tabela de resumo do modelo gerado para a força de corte para DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN)... 103

Tabela 4.7 – Tabela de resumo do modelo gerado para a força de corte para DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN)..... 103

Tabela 4.8 – Tabela comparativa da redução percentual média de valores de rugosidade entre os ensaios deste trabalho com a literatura..... 106

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ANOVA	Análise de variância
ap	Profundidade de corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho assistido por computador
CLIP	Produção com interface líquida contínua
CNC	Comando numérico computadorizado
CP	Corpo de prova
ΔCP	Incerteza de medição do instrumento para medições externas
DED	Deposição com energia direcionada
DLP	Projeção digital de luz
DMLS	Sinterização direta de metal à laser
DRX	Difração de raios x
DSC	Escaneamento calorimétrico diferencial
EBM	Fusão por feixe de elétrons
f	Avanço
F _c	Força de corte
FDM®	Modelagem por deposição fundida
FFF	Fabricação por filamento fundido
GDL	Grau de liberdade
GUM	Guia de expressão de incerteza de medição
ISO	<i>International Organization for standardization</i>
k	Fator de abrangência
LOM	Manufatura de objeto laminado
MA	Manufatura aditiva
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MH	Manufatura híbrida
MS	Manufatura subtrativa
n	Rotação do eixo árvore
NR	Norma Regulamentadora

$\Delta P\alpha$	Incerteza associada ao paralelismo das faces de medição
PD	Preenchimento diagonal
PDMS	Polidimetilsiloxano
PEEK	Polieteretercetona
PEI	Polieterimida
PETG	Polietileno tereftalato glicol
PH	Preenchimento hexagonal
PLA	Ácido polilático
POM	Polióxido de Metileno
PPSU	Polifenilsulfona
PVA	Álcool polivinílico
ΔR	Resolução finita do sistema de medição
Ra	Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade
rpm	Rotações por minuto
Rq	Desvio médio RMS do perfil de rugosidade
Rt	Altura total do perfil de rugosidade
Rz	Altura máxima do perfil de rugosidade
Sa	Desvio médio aritmético da superfície
SHS	Sinterização seletiva ao calor
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização seletiva a laser
Sp	Altura máxima de pico da superfície
Sq	Altura quadrática média da superfície
Sz	Altura máxima da superfície
TDM	Taxa de deposição de material
Tg	Temperatura de transição vítrea
u_c	Incerteza expandida
vc	Velocidade de corte
WAAM	Fabricação por aditivo de arco de arame
\bar{X}	Variabilidade associada à média das medições
De	Diâmetro externo do CP
u	Incerteza padrão

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações iniciais e justificativa	19
1.2 Objetivos.....	21
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Manufatura aditiva	23
2.2 Manufatura aditiva de Polímeros.....	24
2.2.1 Estereolitografia (SLA)	24
2.2.2 Projeção digital de luz (DLP).....	26
2.2.3 Produção com interface líquida contínua (CLIP).....	27
2.2.4 Fusão seletiva a laser (SLM)	27
2.2.5 Modelamento por deposição de fundido (FDM®) ou Fabricação por filamento fundido (FFF)	29
2.3 Usinagem de Polímeros.....	32
2.4 Processos híbridos de manufatura.....	37
2.5 Caracterização de polímeros submetidos a processo de impressão	45
2.6 Propriedades mecânicas do PLA	49
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	55
3.1 Fabricação dos corpos de prova e do mandril de fixação.....	55
3.1.1 Nivelamento da mesa e preparação da impressora	55
3.1.2 Corpos de prova de torneamento e mandril de fixação	56
3.2 Minitorno CNC	59
3.3 Torneamento cilíndrico externo.....	61
3.4 Ferramentas de corte.....	62
3.5 Circularidade e cilíndricidade	65
3.6 Dimensional	66
3.7 Cavacos.....	68
3.8 Rugosidade e perfilometria	68
3.9 Força de corte.....	70
3.9.1 Calibração da célula de carga.....	71
3.9.2 Força de corte no torneamento	73
3.10 Microscópio óptico	74
3.11 Microscópio eletrônico de varredura	75
3.12 Tabela resumo dos processos aditivo e subtrativo.....	75

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1 Manufatura aditiva	77
4.1.1 Dimensões do CP	77
4.1.2 Circularidade e cilindricidade	79
4.1.3 Microscopia óptica	81
4.1.4 Rugosidade.....	81
4.2 Manufatura subtrativa	82
4.2.1 Preparação de CPs e ensaios preliminares	82
4.2.2 Ensaios finais.....	84
4.2.2.1 Dimensões dos CPs.....	85
4.2.2.2 Circularidade e cilindricidade.	88
4.2.2.3 Rugosidade e perfilometria	92
4.2.2.4 Cavacos.....	98
4.2.2.5 Força de corte.....	99
4.2.2.6 Desgaste da ferramenta.....	103
4.3 Manufatura Híbrida	105
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXO 1 – TABELA DE FATOR DE ABRANGÊNCIA PARA O CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	123
ANEXO 2 – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL	124
ANEXO 3 – TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIAS ISO 286-1 (2010).....	126
APÊNDICE 1 – MONTAGEM DO SISTEMA DE MANÍPULO ATUALIZADO	127
APÊNDICE 2 – PEÇA MINITORNO.....	128
APÊNDICE 3 – ANEL GRADUADO.....	129
APÊNDICE 4 – ANEL DE PROTEÇÃO DO SENSOR	130
APÊNDICE 5 – HASTE DO MANIPULO	131
APÊNDICE 6 – HASTE DO MANÍPULO 2.....	132
APÊNDICE 7 – BASE DO MANÍPULO	133
APÊNDICE 8 – CHAPA DE FIXAÇÃO DO SENSOR DE MOVIMENTO NA DIREÇÃO Z..	134
APÊNDICE 9 – SUPORTE DE FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DE FORÇA.....	135

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais e justificativa

A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, e suas operações aditivas de material camada a camada, antes considerada sinônimo de grande inovação e longe da aplicação industrial, vem conquistando não somente a indústria, mas também o mercado doméstico com significativas contribuições, principalmente nos últimos 30 anos. O desenvolvimento do mercado doméstico é resultado da popularização da tecnologia devido à redução do custo e sua capacidade de fabricar objetos tridimensionais de geometria complexa. Porém, por se tratar de uma técnica disseminada mais recentemente em relação aos tradicionais processos de manufatura subtrativa (MS) bem consolidados, ainda existem muitas dúvidas e incertezas sobre o tema MA e sua associação à MS.

Dentre as técnicas de MA existentes, a de Modelagem por Deposição Fundida (FDM[®]), criada e patenteada pela empresa Stratasys, baseada na extrusão de termoplásticos, é a mais difundida no universo de impressão 3D. Sua primeira patente foi depositada no ano de 1988, tornando-se comercial apenas em 1991. Após o término da patente de invenção em 2009, a impressão 3D por extrusão se disseminou, principalmente pelo menor custo relativo e menor complexidade dentre as tecnologias aditivas em desenvolvimento.

Por questões legais, demais fabricantes, pesquisadores e entusiastas de impressão 3D propuseram um sinônimo para a tecnologia desenvolvida pela Stratasys. O nome *Fused Filament Fabrication* (FFF), livremente traduzido como Fabricação por Filamento Fundido, diz respeito, portanto, ao mesmo processo, uma vez que a Stratasys registrou o nome FDM[®] para sua aplicação.

Por ter se popularizado após o ano de 2010, o uso de FDM[®] ou FFF na produção de protótipos e peças finais está associado à sua não padronização ou normatização, aja vista constante desenvolvimento de máquinas, materiais, acessórios e tecnologias auxiliares nas áreas industrial e doméstica.

Embora alguns digam que a tecnologia se encontra madura, há aqueles que apontam que ainda existem grandes possibilidades de desenvolvimento e aplicação. Algumas das

limitações tecnológicas englobam temas como falta de Normas Regulamentadoras (NR) para ensaios mecânicos, a dispersão dos resultados de resistência das peças impressas, resistência mecânica dos termoplásticos e as tolerâncias dimensional e geométrica insuficientes para atender às demandas atuais de fabricação, principalmente em micropeças. As NR que visam padronizar os ensaios para determinar as propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas dos materiais fabricados camada a camada estão em desenvolvimento e não são consenso entre pesquisadores. Outro aspecto importante está relacionado a não homogeneidade das propriedades mecânicas das peças fabricadas por MA. Nesse sentido, as tolerâncias geométricas e dimensionais são inferiores as alcançadas pelas tradicionais técnicas subtrativas que fazem uso da remoção de cavaco (usinagem).

O uso de equipamentos específicos e a associação de processos de fabricação aditivo e subtrativo, ou hibridismo, pode ser uma forma de obter melhores resultados na manufatura, utilizando os pontos de maior qualidade de cada uma das técnicas de maneira conjunta. Atualmente, existe a demanda por aumento da produtividade, confiabilidade e redução dos resíduos dos processos de fabricação. A literatura é escassa e os estudos incipientes quanto à associação de diferentes processos de MA e MS e quais as influências dos parâmetros de impressão nas propriedades finais da peça posteriormente usinadas. Estudos encontrados na literatura a respeito da hibridização de MA e MS apresentam maior foco no procedimento e no projeto de equipamento (impressoras e máquinas-ferramentas) gerando, assim, resultados, em sua grande maioria, qualitativos.

O domínio da influência dos parâmetros de processo no produto final, seja ele híbrido ou não, é fundamental para a obtenção de melhores resultados. Estas escolhas tornam-se ainda mais complexas quando há a concatenação de mais de uma técnica de manufatura, dessa forma aumentando as variáveis de processos e as formas de se combiná-las entre si. Deste modo, análises estatísticas podem auxiliar na caracterização das influências dos parâmetros dos processos nas propriedades finais do componente sem a necessidade de realizar um volume elevado de experimentos.

Aspectos de desenvolvimento sustentável são pontos que devem fazer parte de quaisquer processos de manufatura. Eles devem ser atrelados às possíveis análises de otimização da produção, já que podem ser originados do consumo de matéria prima e energia assim como o ciclo de vida das máquinas e peças impressas. Deste modo, além de garantia da qualidade, o consumo da matéria prima também será mais controlado.

Dentre os diversos polímeros que vem sendo utilizados em MA, o ácido polilático (PLA) de origem vegetal tem despertado interesse por apresentar menor temperatura média de extrusão e menor coeficiente de expansão térmica frente outros polímeros comerciais como o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polietileno tereftalato glicol (PETG) e poliamidas

(Nylon®). Além disso, o PLA é biocompatível e biodegradável, desde que descartado adequadamente.

A partir do que fora apresentado e considerando o potencial e o desafio do encadeamento de processos avançados de manufatura, um estudo científico e tecnológico detalhado se faz necessário para alicerçar o desenvolvimento da associação das manufaturas aditiva e subtrativa. Embora não seja consenso, alguns denominam o uso concatenado da MA e MS de manufatura híbrida (MH), quando realizados na mesma máquina.

Poucos são os trabalhos encontrados na literatura que abordam o hibridismo. Para a indústria de componentes de elevado desempenho mecânico que fazem uso de ligas metálicas caras e de difícil usinagem, já se encontram disponíveis máquinas-ferramentas híbridas capazes de realizarem a deposição de material de forma seletiva e a subsequente usinagem. Os setores aeroespacial, óleo e gás, mineração e automotivo são exemplos da aplicação da tecnologia com destaque para indústria Alemã, Japonesa e Norte americana.

Ainda no contexto da manufatura híbrida envolvendo componentes poliméricos e compósitos a literatura também é embrionária. Um exemplo interessante para desenvolvimento reside no encadeamento da extrusão seletiva do PLA e sua posterior usinagem visando alcançar propriedades mecânicas melhoradas, as tolerâncias geométricas e dimensionais mais estreitas, consequentemente ampliando a aplicação da manufatura avançada com vistas na redução do custo de fabricação e qualidades dos produtos. Exemplos de produtos poliméricos que demandam tolerâncias mais estreitas são as microengrenagens, microreatores e microcanais. Além disso, a melhora do acabamento por processos mecânicos é interessante para o PLA, visto que o ataque químico é dificultado.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo geral a MA de PLA extrudado associada à MS para alcançar tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas por meio do estudo das influências dos parâmetros dos processos aditivo e subtrativo, e a utilização híbrida dos dois processos. Os objetivos específicos são:

- a) Determinar os parâmetros de torneamento cilíndrico externo de PLA impresso por FFF que favoreçam a melhora das tolerâncias dimensionais e geométricas;
- b) Caracterização das peças empregando medições quantitativas de rugosidade, circularidade, cilíndricidade e dimensional, qualitativas, de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e topografia por perfilometria 3D;

- c) Determinar as forças de corte do torneamento cilíndrico externo PLA extrudado para auxiliar no projeto de máquinas híbridas, processos de usinagem e ferramentas de corte e
- d) Apontar pontos de hibridização entre os processos de manufatura aditiva por FFF e torneamento cilíndrico externo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, o estado da arte da literatura acerca dos principais pontos que envolvem a presente dissertação de mestrado será apresentado, a saber: no item 2.1 manufatura aditiva, 2.2 manufatura aditiva de polímeros, 2.3 usinagem de polímeros, 2.4 processos híbridos de manufatura, 2.5 caracterização de polímeros submetidos à processo de impressão e 2.6 propriedades mecânicas do PLA.

2.1 Manufatura aditiva

O processo de manufatura aditiva (MA), comumente conhecido como impressão 3D, consiste em um processo de deposição de material, camada por camada, para a obtenção de uma peça tridimensional a partir de um modelo de desenho assistido por computador (CAD) (PRAKASHA; NANCHARAIH; RAO, 2018; ASTM F2792, 2010). Inicialmente criada como forma de obter apenas protótipos muito personalizados de maneira ágil recebendo a denominação de prototipagem rápida, a MA passou a ter um papel mais abrangente sendo conduzida à criação de peças e partes funcionais finais de produtos e equipamentos. Todo o desenvolvimento de tecnologia pôde ser percebido com maior apelo comercial nos últimos 30 anos (EYERS; POTTER, 2017).

Considerada como o processo oposto à manufatura subtrativa (MS), a MA produz menores perdas de material (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016) e permite a criação de geometrias mais complexas, que apresentariam diversas restrições ou seriam impossíveis de serem produzidas de forma convencional (GAO *et al.*, 2015). Por outro lado, a MA ainda apresenta algumas restrições para o seu rápido crescimento como tempo de produção de grandes lotes, custo de equipamentos e insumos, mão de obra e regulações através de normas e leis (PRAKASHA; NANCHARAIH; RAO, 2018; ATTARAN, 2017)

Os tempos de produção da MA são mais elevados em comparação aos processos convencionais e de produção em massa (ATTARAN, 2017). Isso pode ser justificado pela diferença da taxa de operação, dada em quantidade de massa processada por hora, entre eles. Baumers *et al.* (2016) estudaram dois tipos de MA (sinterização direta de metal à laser

– DMLS; e fusão por feixe de elétrons - EBM), os quais apresentaram valores entre 37 g/h e 70 g/h, respectivamente. Por outro lado, conforme Gutowski *et al.* (2009), a MS apresenta valores médios de cerca de 100 kg/h. Essa deficiência dos processos aditivos é outro motivo que influencia a capacidade de produzir grandes lotes de forma rápida em comparação à MS. Além disso, o custo associado a tecnologias de MA pode ser elevado mesmo sem levar em consideração os acessórios e insumos (PRAKASHA, NANCHARAIH e RAO, 2018).

A matéria prima usada na MA deve apresentar características compatíveis com o processo utilizado, podendo ser encontrada em forma de pós, lâminas, filamentos, arames, líquidos, divididos entre materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos (BOURELL *et al.*, 2017; GUO e LEU, 2013).

2.2 Manufatura aditiva de Polímeros

De acordo com Stansbury e Idacavage (2016), a utilização de polímeros na MA é encontrada de forma mais ampla nos seguintes processos: estereolitografia (SLA), projeção digital de luz (DLP), produção com interface líquida contínua (CLIP), sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização seletiva ao calor (SHS), fabricação por filamento fundido ou modelagem por deposição fundida (FFF ou FDM[®]) e manufatura de objeto laminado (LOM).

Cada um desses processos é classificado de acordo com o princípio de funcionamento e material utilizado, conforme descrito pela norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) F2792 (2010) de MA que classifica os processos de MA.

O desenvolvimento de todos estes processos foi realizado de forma progressiva desde meados da década de 1980, com o surgimento dos processos pioneiros de impressão 3D, e seguem sendo aprimorados. Dentre os processos já criados, aquele baseado na técnica FDM[®] ou FFF é o mais difundido, inclusive para uso doméstico (BALLETTI; BALLARIN; GUERRA, 2017). Uma descrição dos processos aditivos de polímeros mais utilizados é apresentada a seguir.

2.2.1 Estereolitografia (SLA)

A SLA tem como princípio de funcionamento a fotopolimerização de uma resina líquida, pela exposição desta a uma luz de comprimento de onda eletromagnética específica (tipicamente ultravioleta, mas não exclusivamente) que é projetada na geometria de cada camada para a geração da peça desejada. A luz pode ser projetada na parte superior ou inferior da cuba. A plataforma se move conforme cada camada é solidificada (EYERS e POTTER, 2017). Um desenho esquemático pode ser visto na Figura 2.1. A resolução de

impressão pode ser de 25 μm para o posicionamento dos eixos X e Y, conforme apontado por Dizon *et al.* (2018), nos equipamentos da fabricante FormLabs[®]. Valores de 50 μm de espessura de camada depositada foram utilizados por Hundley *et al.* (2017) para a confecção de peças cerâmicas.

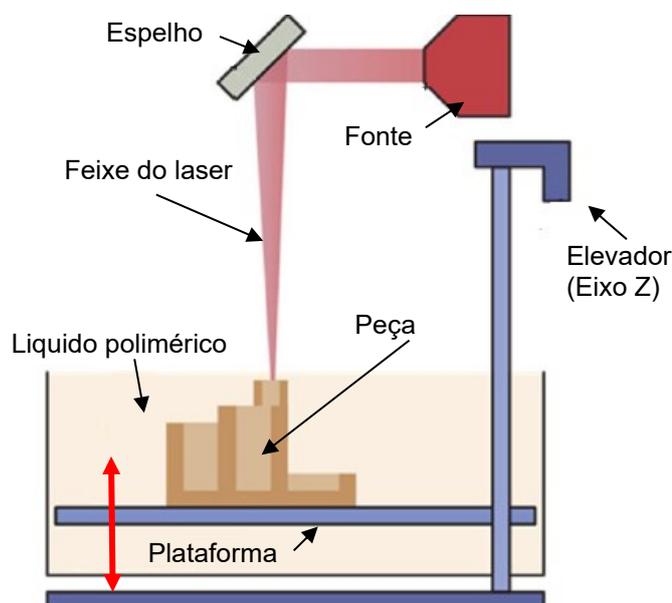


Figura 2.1 – Exemplo esquemático do processo SLA (Adaptado de Dizon *et al.*, 2018).

A técnica tem uma vantagem atrelada ao não uso de bocais de extrusão, típicos de FDM[®]/FFF, que podem apresentar entupimento e desgaste durante o trabalho. Entretanto é ainda um tipo de processo com custo mais elevado (DIZON *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2017).

Embora algumas impressoras SLA tenham valor de mercado próximo ao das FDM[®] ou FFF, a maior diferença encontra-se no custo da resina, porém os volumes de impressão são consideravelmente menores da SLA nessas situações. Enquanto o custo médio de filamentos termoplásticos é de R\$ 150,00/kg, resinas fotopolimerizáveis são comercializadas por mais de R\$ 600,00/kg. Além disso, é necessário pós-processamento para remover a resina não curada e exposição a luz para finalização da cura da peça impressa. Uma vantagem da SLA é a qualidade de impressão, pois a luz é focalizada em regiões pequenas permitindo maiores detalhes durante a impressão. A Tabela 2.1 foi elaborada a partir de uma pesquisa de mercado de alguns modelos de impressoras e insumos. É possível estabelecer uma comparação de valores de alguns modelos de impressoras nacionais e suas respectivas matéria primas.

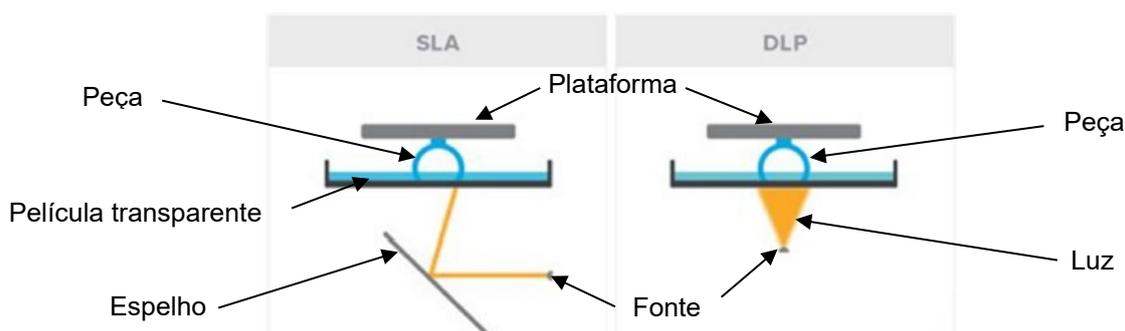
Tabela 2.1 – Comparativo de custo das tecnologias SLA e FDM® ou FFF.

Impressora	Marca	Tecnologia empregada	Valor da impressora	Matéria-prima	Preço médio da matéria-prima/ kg
Cliever CL2 PRO	Cliever®	FDM® ou FFF	R\$ 10 998,90	PLA, ABS, PETG, Flex	R\$ 150,00
Sethi3D S3X	Sethi3D®	FDM® ou FFF	R\$ 8 928,00	ABS, PLA, PETG, Flex	
Impressora 3d sla (resina)	GTMAX3D®	SLA	R\$ 13 660,00	Resina	R\$ 650,00
Sethi3D S3X	Sethi3D®	SLA	R\$ 23 200,00	Resina	

2.2.2 Projeção digital de luz (DLP)

A projeção digital de luz é um processo bem similar ao SLA, exceto pelo fato de usar uma máscara digital projetada para criar a camada simultaneamente ao invés de utilizar um feixe de laser, conforme mostrado na Figura 2.2. Uma vantagem reside na maior velocidade de produção em comparação a SLA. Enquanto um feixe laser tem que varrer toda a área da seção transversal de uma camada na SLA, na DLP a imagem de toda a seção é projetada de uma única vez.

No DLP, assim como na SLA com laser no fundo da cuba, é necessário o uso de uma película de polidimetilsiloxano (PDMS) responsável por impedir que o líquido não solidificado se prenda ao fundo do reservatório durante o processo de impressão (WU *et al.* 2016).

Figura 2.2 – Comparação entre processo DLP e SLA (DIZON *et al.*, 2018).

2.2.3 Produção com interface líquida contínua (CLIP)

O processo CLIP possui um modo de funcionamento semelhante ao da DLP, no qual um laser ou luz ultravioleta realiza a cura de cada camada de resina líquida e a criação de camadas é ininterrupta. Isso só é possível devido a janela permeável ao oxigênio permitir a criação de cada camada da peça sem a possibilidade de solidificação de resina no fundo do reservatório (TUMBLESTON *et al.*, 2015) devido ao retardo da polimerização. A distância entre a janela permeável e o material já fabricado é conhecida como “zona morta”, conforme apresentado na Figura 2.3.

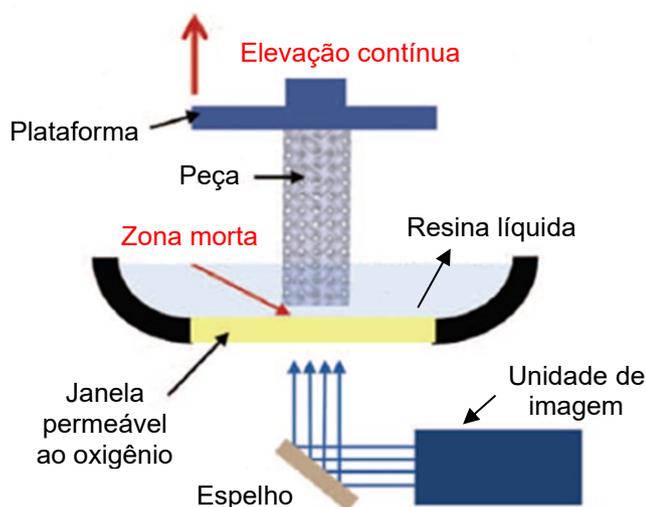


Figura 2.3 – Sistema de produção com interface líquida contínua (CLIP) de manufatura aditiva (Adaptado de Tumbleston *et al.*, 2015).

Uma vantagem do CLIP é que ele pode ser de 25 a 100 vezes mais rápido do que os outros sistemas de MA (LEE *et al.*, 2016), possibilitando que peças produzidas em horas sejam feitas em minutos (TUMBLESTON *et al.*, 2015). A resolução de trabalho da CLIP pode chegar a 1 micrometro, porém o seu valor está intimamente ligado a velocidade e a espessura da zona morta. Quanto mais rápido for o processo menor será a resolução como demonstrado por Tumbleston *et al.* (2015).

2.2.4 Fusão seletiva a laser (SLM)

A SLM é um processo que utiliza da sinterização (mais corretamente fusão total ou parcial, uma vez que não a tempo suficiente para sinterização) de pós poliméricos por meio

do uso de um feixe laser de CO₂ direcionado de forma controlada de forma a aquecer e fundir cada camada na superfície conhecida como cama de pó, conforme mostrado na Figura 2.4 (STANSBURYA E IDACAVAGE, 2016).

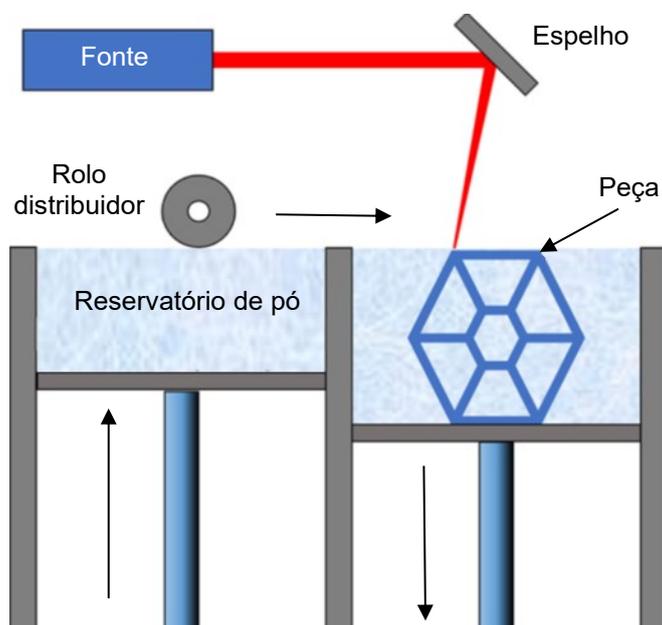


Figura 2.4 – Exemplo esquemático da Sinterização Seletiva a Laser (SLM) (Adaptado de Stansburya e Idacavage, 2016).

Dentre os materiais poliméricos empregados destacam-se a policaprolactona (PCL) e a poliamida (PA) (EYERS; POTTER, 2017).

A técnica possui como vantagem a variedade de materiais que podem ser utilizados na impressão. Outra vantagem é a possibilidade de reutilizar pós não fundidos no processo de impressão (PRAKASHA; NANCHARAIH; RAO, 2018).

Como desvantagens, destacam-se a exatidão do processo, que depende do tamanho da partícula dos pós, a necessidade de uso de atmosfera com gás de proteção que impeça a oxidação das partículas e manter a temperatura constante próxima ao ponto de fusão do pó (PRAKASHA; NANCHARAIH; RAO, 2018). A desvantagem também reside na degradação dos pós não fundidos devido ao aquecimento por longos períodos, o que diminui a quantidade de material que pode ser reutilizado (DOTCHEV e YOSOFF, 2009). Tipicamente, a matéria prima nova pode ser misturada com pós não fundidos na proporção de 30 % a 70 % sendo os valores indicados pelo fabricante (DOTCHEV e YOSOFF, 2009).

As características mecânicas de fadiga de peças obtidas por SLM são pouco estudadas na literatura. Hooreweder e Kruth (2014) analisaram peças obtidas por SLM, produzidas em duas direções de construção diferentes, e uma peça obtida por injeção de

Nylon 12. A diferença de orientação não implicou em resultados de fadiga diferentes dos corpos de prova fabricados nos dois processos. Entretanto a relação de alongamento até a fratura dos corpos de prova variou entre 4 % e 7 %, para as peças feitas por SLS, e foi de 97 % para as peças produzidas por injeção.

2.2.5 Modelamento por deposição de fundido (FDM[®]) ou Fabricação por filamento fundido (FFF)

O processo FDM ou FFF[®] tem tecnologia baseada na extrusão de termoplásticos para efetuar a deposição das camadas (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016). Em processos por extrusão de material, a matéria prima é comercializada principalmente na forma de filamentos de 1,75 mm e 3 mm de diâmetro, sendo os termoplásticos mais comuns o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o ácido polilático (PLA) (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016; CHACÓN *et al.* 2017; EYERS; POTTER, 2017). Um exemplo esquemático da FFF pode ser visto na Figura 2.5.

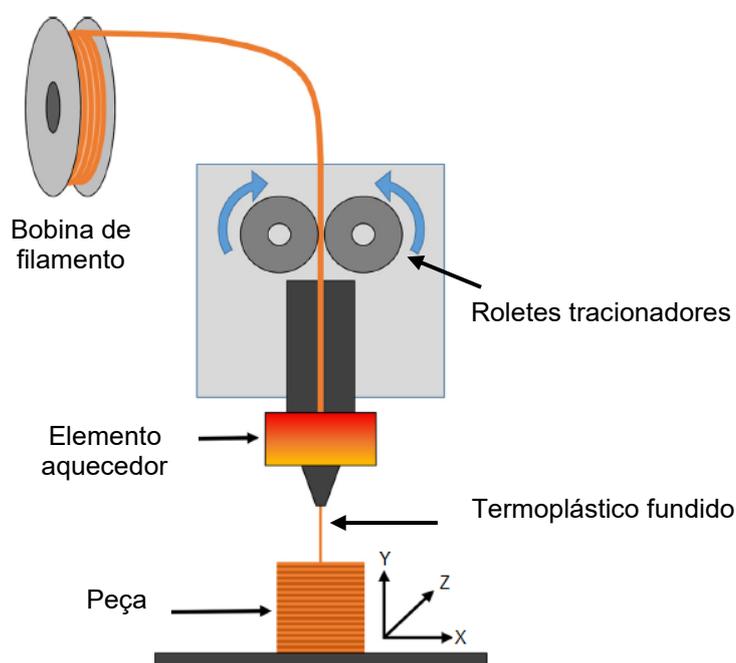


Figura 2.5 – Exemplo esquemático da FFF/FDM[®] (Adaptado de Stansbury e Idacavage, 2016).

O funcionamento deste tipo de impressora se dá através da alimentação do filamento com o uso de motores que acionam os roletes tracionadores, responsáveis por empurrar o material em direção ao cabeçote quente do equipamento, que por sua vez funde o material polimérico e o direciona através do bico de extrusão (TURNER, STRONG e GOLD, 2014). A movimentação do cabeçote depende da geometria escolhida de cada peça e a deposição do

material fundido segue a programação obtida via software de impressão que fatia a peça em camadas e cria as rotas do cabeçote de impressão durante o processo de fabricação.

Muitos outros termoplásticos estão sendo aplicados com destaque aos polímeros de engenharia de maiores pontos de fusão que também apresentam propriedades mecânicas de resistência à temperatura superiores ao PLA e ABS. Destacam-se a polieterimida (PEI), também conhecida como Ultem, a polifenilsulfona (PPSU) e o polieteretercetona (PEEK).

Materiais de resistência à temperatura utilizados no contexto de impressão 3D foram desenvolvidos ao longo do tempo. Um exemplo criado pela empresa Stratasys foi o PPSU, com temperatura de trabalho superior a 200 °C, além da resistência à produtos químicos superior a maioria dos polímeros usados na FFF e resistência a produtos químicos. A empresa também foi responsável por desenvolver o Ultem que apresenta características mecânicas superiores ao PPSU, sendo aprovado em testes rigorosos de segurança em aplicações aeronáuticas (STRATASYS, 2011).

Wu *et al.* (2015) avaliaram as propriedades mecânicas de PEEK e ABS obtidos a partir de FFF e verificaram a superioridade do PEEK na resistência a tração, compressão e flexão quando comparados com o ABS. Além disso, segundo Wu *et al.* (2014) o PEEK ainda apresenta características de alto desempenho em temperaturas de operação entre 250 °C à 300 °C e com ponto de fusão de 334 °C, apresentando ainda boas características de biocompatibilidade.

Mesmo se tratando de um processo amplamente discutido pela literatura, a FFF apresenta diversas linhas de pesquisa nas quais os autores tentam investigar variáveis de processo, variações do equipamento e diferentes materiais. Estas investigações tentam elucidar os diferentes resultados obtidos por este tipo de tecnologia. Alguns exemplos do que já foi abordado sobre FFF, objeto de estudo desta pesquisa, são destacados a seguir.

Os diâmetros dos bocais variam tipicamente na faixa de 0,10 mm a 5,00 mm e, dentre esses, destacam-se os bocais com diâmetros variando entre 0,2 mm e 0,5 mm (TURNER, STRONG E GOLD, 2014). O diâmetro bocal está intimamente ligado ao nível de detalhe da peça e acabamento. Quando menor o diâmetro, mais suave a transição entre as camadas. Entretanto, menores diâmetros implicam em menores taxas de deposição de material (TDM) e, por consequência, maiores tempos de impressão.

Sukindar e Ariffin (2016), Ramanath *et al.* (2008) e Liang e Ness (1997) avaliaram a relação entre o ângulo interno e seu impacto na extrusão do polímero. Foi identificada a tendência de menor queda de pressão interna à medida que se aumentava o ângulo interno da saída do bocal.

Sukindar *et al.* (2016) avaliaram o mesmo efeito com foco na variação de diâmetro (de 0,2 mm à 0,4 mm) do bocal. Percebeu-se que o aumento do seu valor proporciona uma melhor

fluidez de material extrudado, no qual 0,3 mm foi sugerido como o diâmetro ótimo do bocal na impressão de PLA. Isso também foi apontado no estudo conduzido por Balani *et al.* (2019), no qual a diferença de diâmetros do bocal de extrusão modifica a forma como o polímero fundido se comporta na impressão.

Estudos relacionados ao desgaste de bocais extrusores podem ser encontrados na literatura como em Pitayachaval e Masnok (2017) que avaliaram a evolução do desgaste de bocal de extrusão para impressão de PLA.

Outro estudo conduzido por Gnanasekaran *et al.* (2017) avaliou a impressão de um polímero nano compósito (*polybutylene terephthalate* - PBT) com tecnologia FFF. Por se tratar de material abrasivo, devido à inserção de grafeno e nano tubos de carbono, foi notada a rápida degradação pelo desgaste do bocal de extrusão, fabricado de latão, apresentado na Figura 2.6 para diferentes comprimentos de filamentos impressos.

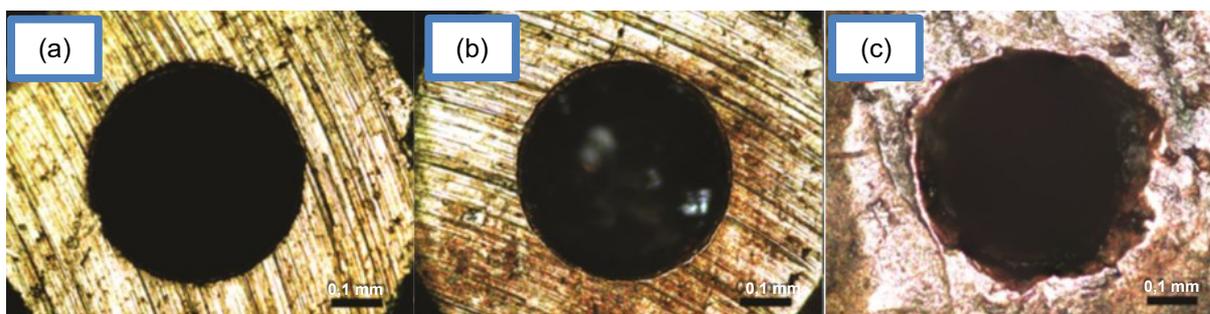


Figura 2.6 – Evolução do desgaste do bocal de extrusão (a) antes, (b) após imprimir 15 cm de PBT + grafeno e (c) após imprimir 1,5 m de PBT + nano tubo de carbono (Adaptado de Gnanasekaran *et al.*, 2017).

O desgaste do bocal de latão utilizado é acelerado visto que para uma quantidade de 1,5 m de filamento o desgaste é notado comparado a condição inicial do bocal.

Mesmo que existam trabalhos voltados à investigação de desgaste em bocais de extrusão ainda é necessário o maior desenvolvimento de estudos no aspecto de predição de desgaste atrelado a materiais não poliméricos, para otimizar sua aplicação, conforme apontado por Vyavahare *et al.* (2020).

Quanto ao uso de materiais para suporte, para formas complexas ou que tenham regiões em balanço, projetando-se para regiões sem material de construção abaixo, faz-se necessário o seu uso para ancorar temporariamente a deposição. A função do suporte é aumentar a rigidez da construção para suportar a extrusão e evitar a distorção mecânica devido aos gradientes térmicos. Cabe ao projetista adaptar o projeto mecânico da peça (*design for additive manufacturing*) a fim de minimizar ou até eliminar o uso do suporte sempre que possível, pois o mesmo aumenta o tempo de fabricação e demanda a realização de uma

etapa subsequente para remoção do suporte e acabamento da peça (THOMPSON *et al.*, 2016). Por se tratar de consumo de material e tempo de produção, o estudo da redução do uso de materiais de suporte pode contribuir para maior eficiência do processo.

A FFF permite empregar diversos materiais em uma mesma impressão, seja para a peça ou para o suporte. No caso do suporte, pode-se usar o próprio material do componente a ser fabricado para a sua geração ou algum outro material como o álcool polivinílico (PVA), que se dissolve na água, sendo mais facilmente removido (DURAN *et al.*, 2015). Entretanto, conforme estudado por Duran *et al.* (2015), a utilização do PVA apresenta restrições associadas à absorção de humidade promovendo falhas durante a extrusão.

O processo FFF ainda tem como característica marcante o chamado efeito escada (*Staircase effect*) que também é percebido nas peças fabricadas por diversos tipos de processos de manufatura aditiva, apresentando diferenças entre projeto e peça (HARUN *et al.* 2018). O efeito desse defeito pode ser diminuído com a redução da espessura de camada depositada, porém não é completamente removido conforme mostrado na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Representação do efeito escada de acordo com a diminuição da espessura de camada depositada (Adaptado de Harun *et al.*, 2018).

Dentre as vantagens do processo FFF, destacam-se o baixo custo, relativa velocidade de fabricação, simplicidade e permitir a deposição de materiais diferentes com a utilização de múltiplos bocais proporcionando peças que tenham composições escolhidas para o uso (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016; EYERS; POTTER, 2017).

2.3 Usinagem de Polímeros

Os processos de fabricação podem ser divididos entre dois grandes grupos: com ou sem remoção de cavaco. Aqueles que removem são ainda subdivididos entre usinagem convencional e não convencional, conforme mostrado por Machado, Coelho e Abrão (2009).

Dentro do contexto de MA, a usinagem pode ser uma etapa de pós-processamento como forma de melhorar as tolerâncias dimensionais e as tolerâncias macro e micro geométricas, assim como remover defeitos superficiais como porosidade e modificações microestruturais (BOURELL *et al.*, 2017).

De forma similar aos metais, a usinagem de componentes poliméricos pode ser dividida em três categorias de fatores de influência: variáveis da máquina e do meio ambiente, geometria da ferramenta, bem como condições de usinagem e propriedades químicas e físicas do material (XIAO; ZHANG, 2002). Cada polímero apresenta comportamento diferente durante a usinagem dependendo de suas propriedades térmicas, mecânicas, reológicas (ALAUDDIN *et al.*, 1995) e sua classificação (termoplásticos, termofixos, elastômeros e polímeros naturais) (ASHBY; JONES 2006).

A usinagem de termoplásticos pode apresentar algumas dificuldades devido as suas características como baixo módulo de elasticidade, absorção de umidade e coeficiente de expansão térmica (CHABBI *et al.*, 2017). A escolha de parâmetros de corte inadequados pode levar ao superaquecimento da peça visto que a condutividade térmica dos polímeros tende a ser menor que a ferramenta concentrando calor durante a usinagem (CABRAL *et al.*, 2018).

Conforme apontado por Patel (2008), a usinagem de polímeros acima de sua temperatura de transição vítrea (T_g) pode proporcionar melhores resultados superficiais já que, acima desse ponto, o material terá comportamento dúctil devido ao aumento da temperatura.

De acordo com Salles e Gonçalves (2003) é interessante que sejam aplicados parâmetros de usinagem que proporcionem cavacos em forma de fita para melhora do aspecto superficial, não deixando de lado a possível influência negativa da projeção de cavacos na peça e na ferramenta.

Dentre as características geométricas das ferramentas, o ângulo de saída da ferramenta desempenha um papel fundamental devido ao modo no qual as forças envolvidas no processo são aplicadas (CARR e FEGGER, 1993). A Figura 2.8 representa as formas de interação do cavaco com a ferramenta proposta pelos autores. À medida que foi modificado o ângulo de saída a interação é diferente, podendo implicar no resultado final da superfície ao final da Usinagem

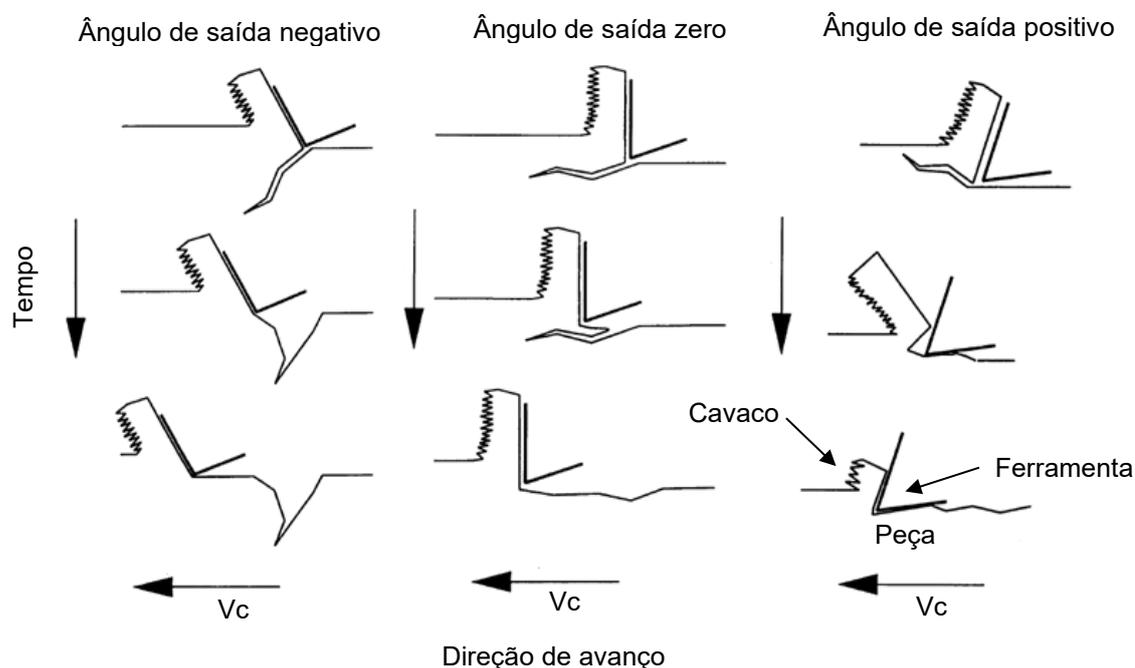


Figura 2.8 – Variação de ângulo de saída e formação de cavaco (Adaptado de Carr e Feger, 1993).

De acordo com Chabbi *et al.* (2017) a usinagem de polímeros não apresenta mesmo comportamento. Além disso, estudos comparativos aplicados na usinagem de polímeros termoplásticos são escassos, tendo sido realizados por apenas alguns pesquisadores, por exemplo:

Salles e Gonçalves (2003) estudaram os efeitos dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a e na integridade da superfície do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) utilizando um inserto de metal duro não revestido, com código DCGX070204 AL de geometria positiva, aplicada tipicamente na usinagem de materiais não ferrosos. Foi notado que a variação do avanço, entre 0,025 mm/volta a 0,3 mm/volta, foi o principal fator de influência no aumento da rugosidade e, diferente do que era esperado, a velocidade de corte, com variação entre 160 m/min e 400 m/min não teve influência significativa.

Erenkov *et al.* (2008), por sua vez, analisaram a influência das condições de usinagem na dureza superficial de 3 polímeros diferentes (caprolon, fluoro-plástico-4 e textolite). Como resultados os autores perceberam que houve acréscimo de dureza superficial após a usinagem de caprolon e fluoro-plástico-4. Outro ponto notado foi que nas condições de corte usadas a recuperação elástica das peças não teve influência na dureza.

Alauddin *et al.* (1995) realizaram uma revisão dos processos de usinagem de polímeros. Para o torneamento de poliéster fundido, por exemplo, foi mostrado que a mudança do ângulo de saída da ferramenta, de negativo à positivo, diminui a força de corte para

velocidade de corte de 0,2 m/min e profundidade de corte de 0,008 mm, conforme mostrado na Figura 2.9a. Para o torneamento de policarbonato foi notada a redução da força de corte para velocidade de corte de 15 m/min, conforme ilustrado pela Figura 2.9b para variações de ângulos de saída da ferramenta.

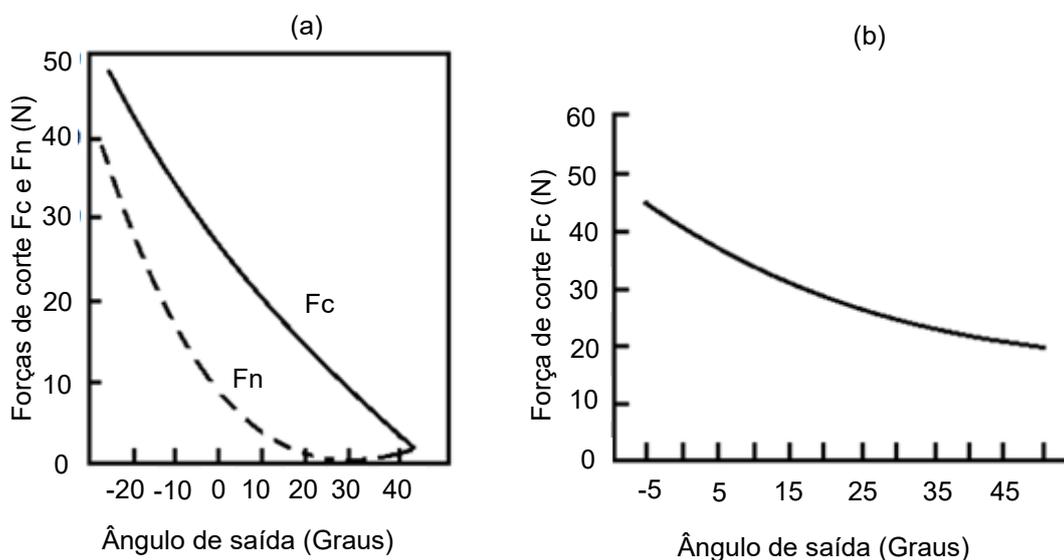


Figura 2.9 – Comportamento das forças de corte F_c (paralela à direção de corte) e F_n (normal perpendicular à direção de corte) para diferentes ângulos de saída da ferramenta (Alauddin *et al.*, 1995).

Erenkov, Kalita e Mazin (2011) avaliaram inicialmente a rugosidade R_a do caprolon e do textolite variando os parâmetros profundidade de corte (0,25 mm a 1,5 mm), avanço (0,08 mm/volta a 0,16 mm/volta, e a aplicação de diferentes condições de pressão de deformação superficial anterior à usinagem, 1 MPa a 4 MPa. Foi verificado que para 1 MPa foram obtidos os melhores resultados de rugosidade dentre todos os testes.

Vanat e Braghin (2014) avaliaram o uso de ferramentas de metal duro para usinagem de nylon®, adotando como critério de análise o tipo e forma do cavaco gerado. Dois resultados são destacados: a utilização da ferramenta TNMG 160408-PF, usada para acabamento de aços, gerou cavacos que não se enrolavam, na peça ou máquina, para velocidade de corte de 450 m/min, profundidade de corte 2 mm e avanço de 0,35 mm/volta. Já a ferramenta CCGT120408-BAL, utilizada para acabamento de alumínio, conseguiu cisalhar completamente os cavacos para velocidades de corte de 600 m/min e 750 m/min, profundidade de corte de 2 mm e avanço de 0,35 mm/volta. O restante dos testes gerou cavacos similares, longos e emaranhados. Além disso, foi estudada a influência dos fluidos de corte na formação do cavaco. Notou-se que o fluido de corte (emulsão de base vegetal) promove melhora na forma, evitando a fita longa, indesejada na usinagem por colocar em

risco o operador, máquina-ferramenta e danificar a superfície recém usinada. Entretanto, não foram fornecidos pelo estudo maiores detalhes quanto ao tipo e método de aplicação do fluido de corte utilizado.

Chabbi *et al.* (2017) avaliaram o torneamento do polímero Poliacetal (Polióxido de Metileno (POM)) para diferentes condições de usinagem considerando as respostas da rugosidade e da força de corte. A influência na rugosidade R_a do avanço (f) e profundidade de corte (a_p) foram predominantes tanto para a rugosidade quanto para a força de corte. A combinação de parâmetros velocidade de corte (v_c) = 628 m/min (valor máximo) , f = 0,08 mm/volta (valor mínimo) e a_p = 1 mm (valor mínimo) obteve os melhores valores de rugosidade. Além disso, influência do valor de avanço na rugosidade pode ser verificada pelas imagens de topografia 3D das condições testadas, conforme mostrado na Figura 2.10. Tal influencia é marcada pelo aumento da rugosidade de acordo com o aumento do a_p .

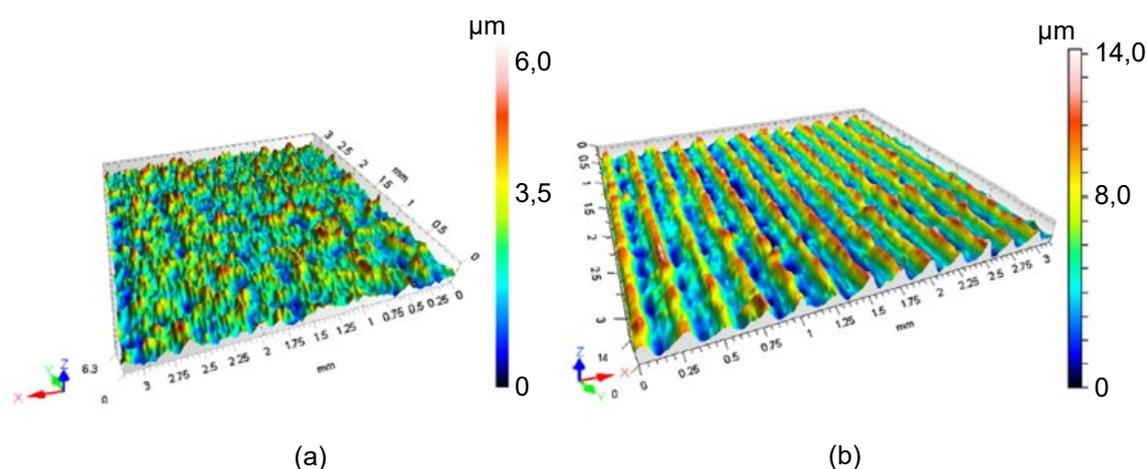


Figura 2.10 – Variação da topografia da peça de POM torneada para duas condições de a_p de (a) 0,08 mm/volta e (b) 0,24 mm/volta e v_c de 440 m/min (Adaptado de Chabbi *et al.*, 2017).

Cabral *et al.* (2018) avaliaram o comportamento do POM no torneamento variando v_c (500 m/min, 700 m/min e 900 m/min), f (0,05 mm/volta, 0,10 mm/volta e 0,15 mm/volta) e a_p (0,25 mm, 0,375 mm e 0,5 mm) sendo o resultado da rugosidade R_a avaliado como resposta do sistema. O avanço foi o parâmetro determinado como predominante dentre os testado sendo mais apropriado em níveis mais baixos. A profundidade de corte apresentou um comportamento que implicou na diminuição da rugosidade, conforme seu valor era incrementado.

Resultados de usinagem de PLA, objeto de estudo deste trabalho, não foram encontrados na literatura, o que pode justificar e motivar o estudo para avaliar o torneamento cilíndrico externo deste material e identificar o comportamento de PLA quando submetido ao

processo de usinagem. Além disso, é uma forma de verificar uma outra forma de melhorar as características dimensionais e geométricas de peças produzidas por MA.

2.4 Processos híbridos de manufatura

A classificação dos processos tradicionais de manufatura auxilia na compreensão das diferentes tecnologias empregadas e permite que sejam avaliadas possíveis hibridismos entre eles. Segundo Nassehi *et al.* (2011) pode-se distinguir 5 tipos de tecnologias de manufatura, são elas: junção, divisão, subtração, transformação e adição, cada qual com suas particularidades. Entretanto, segundo Zhu *et al.* (2013) a definição de processo híbrido não apresenta um consenso, sendo abordado por estes autores como a combinação de duas ou mais operações de manufatura que utilizem tecnologias diferentes e de forma simultânea em uma mesma estação de trabalho.

Os processos de manufatura híbrida (MH) na MA, por sua vez, foram definidos por Sealy *et al.* (2018) como a utilização de um processo de MA com uma ou mais fontes de energia e processos, ambos secundários, os quais são completamente acoplados entre si e trabalham de forma sinérgica afetando a qualidade da peça fabricada, sua funcionalidade e/ou a desempenho do processo.

É interessante se ter clareza na diferenciação entre processos híbridos e máquinas e/ou equipamentos híbridos. Máquinas híbridas são definidas por apresentarem vários processos de manufatura em um equipamento único, não necessariamente configurando um processo híbrido (SEALY *et al.* 2018). Conforme mostrado na Figura 2.11, é possível dividir o conceito de hibridismo em 3 partes: máquinas, processos e materiais, as quais são estudadas pela literatura.

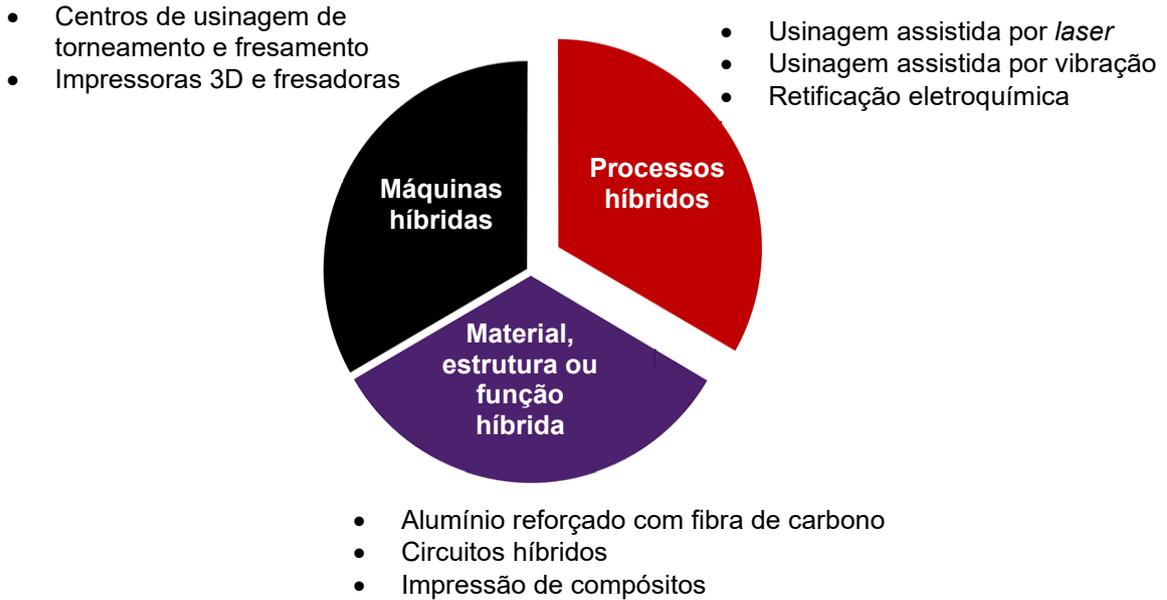


Figura 2.11 – Divisão de conceitos de hibridismo (Adaptado de Sealy *et al.*, 2018).

Hur *et al.* (2002) apontaram que o uso combinado de MA e MS é dependente de um ponto chave: como é feita a combinação dos mesmos. Os autores compararam em seu estudo as características um sistema de MA convencional com um modelo híbrido de manufatura para a produção de peças de geometrias complexas, conforme apresentado na Figura 2.12.

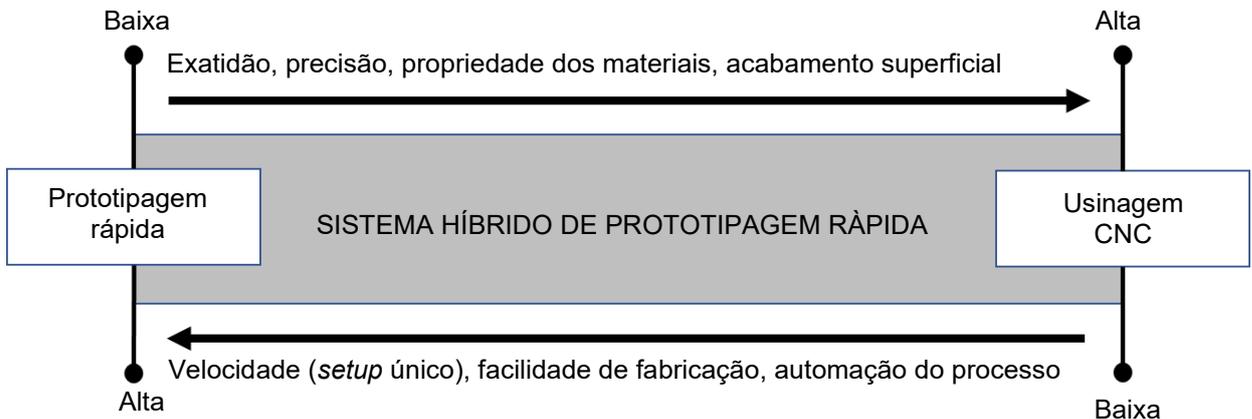


Figura 2.12 – Sistema híbrido entre manufatura aditiva e manufatura subtrativa (Adaptado de Hur *et al.*, 2002).

De acordo com os autores a ideia criada para o hibridismo apontada na Figura 2.12 é justamente de tentar utilizar as melhores características dos processos de MA e MS, pontos “alto”, e permitir que sejam minimizados os itens considerados como desvantagens ou falhas inerentes dos processos de manufatura estudados, pontos “baixo”.

Dentre os tipos de máquinas e equipamentos híbridos, são mais populares aqueles que utilizam MA e fresamento em uma mesma máquina ou estação de trabalho, de acordo com Li, Haghghi e Yang (2018). Os autores apontaram que os processos híbridos podem apresentar algumas capacidades adicionais para casos de máquinas dotadas de 6 graus de liberdade (GDL) de movimentação dos eixos durante a operação, dentre elas:

- Redução de tempo de produção e perda de material pela combinação de ambos os processos subtrativos e aditivos em uma mesma estação de trabalho;
- Melhora na qualidade superficial reduzindo o efeito escada;
- Redução do uso de estruturas de suporte já que existe maior flexibilidade de deposição e usinagem;
- Diminuição da ocorrência de problemas de colisão entre as partes mecânicas da máquina e as peças que estão sendo fabricadas devido a maior quantidade de graus de liberdade.

As correções de trajetória durante o processo aditivo, promovida pela adição de GDL, resultam em diferenças nítidas de acabamento na MA, podendo ser verificadas na Figura 2.13.

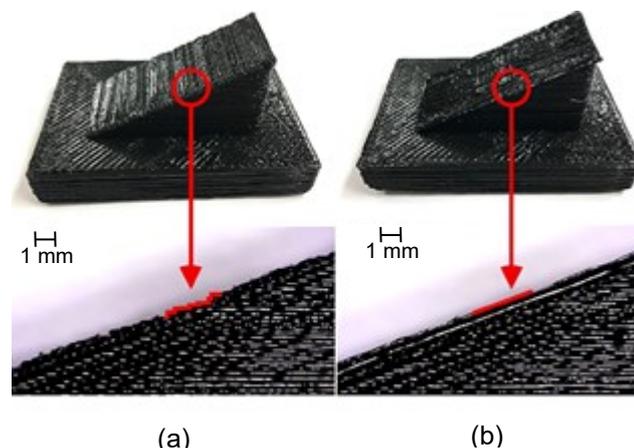


Figura 2.13 – Comparação entre superfícies impressas com (a) 3 e (b) 6 graus de liberdade (Li, Haghghi e Yang, 2018).

A deposição convencional de material durante o processo FFF leva a superfícies, como mostradas no exemplo da Figura 2.13a que gera o efeito escada. O aumento de graus de liberdade da impressora proposta pelos autores permitiu que o acabamento da superfície

depositada fosse realizado seguindo o ângulo de inclinação da própria peça, como representado na Figura 2.13b.

Os processos híbridos de manufatura apresentam, segundo Cortina *et al.* (2018), grandes vantagens e pontos positivos para a produção de peças complexas:

- Não há necessidade de referenciar a máquina para trabalhar a peça entre técnicas utilizadas devido a utilização de todas elas no mesmo equipamento: reduz os erros de posicionamento e por consequência melhoram a exatidão alcançada.
- Redução de movimentação de materiais na linha de produção: a utilização de máquinas híbridas permite que fases intermediárias sejam realizadas na mesma máquina sem a necessidade de movimentações ao longo do processo produtivo. Essa característica ajuda na maior produtividade e permite que sejam melhor utilizados os espaços físicos de produção.
- Produção de peças com geometrias complexas: o fato de poder alternar processos aditivos e subtrativos ao longo da produção de peças permite que haja maior liberdade geométrica com tolerâncias adequadas.
- Baixas razões *Buy to fly*: a possibilidade de obtenção de peças com geometrias próximas das projetadas e mínima remoção de material faz com que a combinação de processos permita que a eficiência de material seja de até 97 %. Entretanto, conforme mostrado por Lockett *et al.* (2017) é necessário um planejamento detalhado para que sejam obtidos valores mais favoráveis dessa razão.
- Diminuição de custos de produção e de equipamentos: mesmo que as máquinas híbridas tenham custo inicial mais elevado do que máquinas de MA e MS separadas, o investimento de compra ainda continua menor para estações de trabalho híbridas.

Entretanto, os processos híbridos ainda apresentam desafios técnicos e de processo, segundo Cortina *et al.* (2018). São eles:

- Influência dos fluidos de corte na manufatura: a utilização de fluidos de corte pode implicar diretamente no processo aditivo já que pode existir a possibilidade de absorção de umidade pela peça, mas pode ser necessário para que defeitos sejam minimizados na usinagem.
- Problemas de abrasão nos sistemas de guias e movimentação da máquina: há a necessidade de selagem completa dos sistemas internos da máquina, uma vez que, pós abrasivos utilizados na MA podem prejudicar o funcionamento quando em contato com os sistemas mecânicos da máquina.

- Necessidade de tratamentos térmicos após a fabricação das peças: utilizar uma segunda etapa de processamento da peça diminui a relevância da maior vantagem de produzir peças completas em uma única estação de trabalho dos processos híbridos.
- Treinamento de operadores: como a combinação dos processos pode agregar complexidade dos equipamentos, é necessário um treinamento mais específico para quem for operar o equipamento.
- Proteções das máquinas: além das proteções internas da máquina devem ser desenvolvidas proteções que mantenham o operador em condições de trabalhar sem riscos de acidentes durante a operação das máquinas.

Por se tratar de uma área que engloba grande número de variáveis de processo, bem como alta complexidade, estudos já realizados sobre processos híbridos e suas aplicações permitem observar a sua relevância. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

Akula e Karunakaran (2006) estudaram o processo de MH utilizando processo de manufatura aditiva com arco elétrico e arame (WAAM – *Wire and Arc Addictive Manufacturing*) e o fresamento. A metodologia proposta pelos autores foi baseada na aplicação de uma sequência de trabalho na qual cada camada depositada foi usinada para correção dimensional, sem retirada excessiva de material, visando melhorar as condições de deposição da camada subsequente. Foi necessário um conhecimento prévio dos parâmetros de deposição, bem como dos de usinagem, para melhor acoplamento dos processos. Os autores compararam características do processo híbrido estudado com os processos de sinterização seletiva a laser (SLS), conforme mostrado na Tabela 2.1, demonstrando as vantagens da sua utilização.

Lee, Wei e Chung (2014) desenvolveram um processo híbrido de FFF e fresamento CNC em uma máquina de 5 eixos. Inicialmente foram utilizadas espessuras de camada maiores para a geração de uma geometria de peça com camada extra (*off-set*) (Figura 2.14a) que, devido a hibridização com o processo de usinagem, foi removida para obtenção da geometria final da peça (Figura 2.14b), reduzindo o tempo de produção. A MH permitiu a redução de mais de 40 % no tempo de produção das peças apenas fabricadas por MA com espessura de camada suficiente para obter os mesmos desvios dimensionais e de forma do processo híbrido.

Tabela 2.2 – Comparação entre processo de manufatura aditiva (Sinterização Seletiva a Laser – SLS) e manufatura híbrida.

Característica	SLS	MH
Princípio	Sinterização a laser	WAAM e fresamento
Densidade	Peça porosa (sem compactação)	Em condições estáveis de operação a densidade é mais próxima de 100 %.
Pós processamento	Necessário pós processamento para melhora da densidade	Sem pós processamento para melhora de densidade
Exatidão	Limitada pelo tamanho da partícula e camada	Semelhante a usinagem CNC
Tipo de fatiamento	Fatiamento uniforme	Fatiamento adaptativo e visível
Tempo total do ciclo	Mais lento do que MH	Mais rápido do que processos SLS e 3DP.
Segurança	Existem riscos associados ao uso de <i>laser</i>	Sem riscos
Disponível como	Máquinas completas de valor elevado.	<i>Retrofit</i> ou máquinas completas

Fonte: Adaptado de Akula e Karunakaran, 2006.

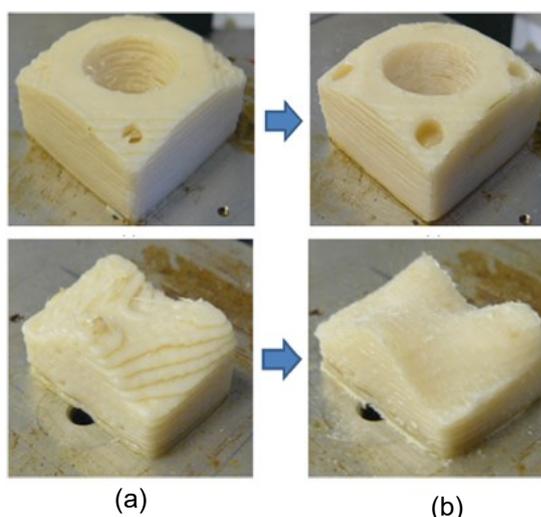


Figura 2.14 – Peças feitas por (a) FFF e (b) após usinagem (Adaptado de Lee, Wei e Chung, 2014).

O trabalho desenvolvido por Boscheto, Bottini e Veniali (2016) permitiu identificar a profundidade de corte apropriada para o fresamento de peças produzidas por FFF associada ao ângulo de deposição do processo de MA. Os diferentes ângulos de deposição neste estudo foram associados ao ângulo no qual a peça é construída, como mostrados na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Peças fabricadas por Fabricação de Filamento Fundido (FFF) com diferentes ângulos de inclinação de deposição (BOSCHETO, BOTTINI E VENIALI, 2016).

A metodologia criada pelos autores baseou-se na deposição de excesso controlado de material na superfície externa da peça, calculada de acordo com o ângulo de deposição para então, ao final do processo, a usinagem ocorrer de forma a garantir qualidade dimensional e de acabamento superficial por meio da remoção do sobrematerial. Um estudo de caso foi realizado como forma a validar os testes desenvolvidos para uma pá de turbina do tipo pelton e os resultados são mostrados na Figura 2.16.

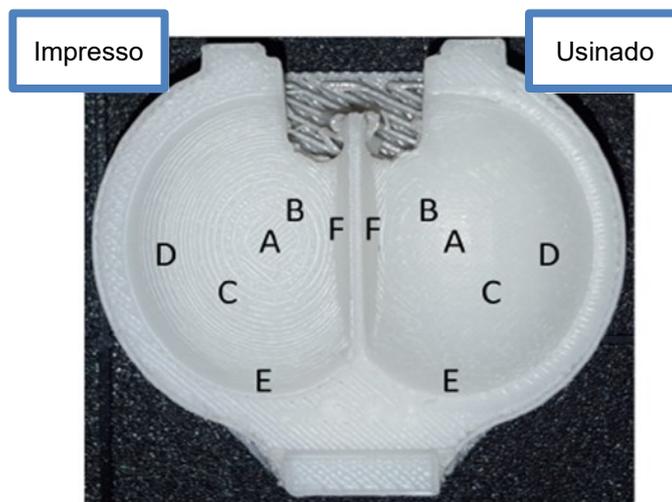


Figura 2.16 – Pá de turbina pelton de ABS fabricada por manufatura híbrida (Fabricação de Filamento Fundido – FFF à esquerda, e após o fresamento, à direita) (Adaptado de Boscheto, Bottini e Veniali, 2016).

Os resultados de melhora de acabamento superficial após aplicação do processo de usinagem são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Rugosidade Ra (μm) para as zonas demarcadas na Figura 2.16.

Zona	Ângulo de deposição ($^{\circ}$)	Ra peça impressa (μm)	Ra peça usinada (μm)
A	0	22,64	1,83
B	14	50,61	1,91
C	25	38,62	1,90
D	42	25,42	1,66
E	67	16,97	1,98
F	78	16,53	1,52

Fonte: BOSCHETO; BOTTINI; VENIALI (2016).

O processo *direct energy deposition* (DED), também chamado por Volpato *et al.* (2017) de deposição com energia direcionada, foi combinado com o processo de torneamento e fresamento em um mesmo equipamento e estudado por Yamazaki (2016). Com o uso de materiais diferentes de substrato (aço inoxidável 316S31) e depositado (Inconel 718) foi possível a fabricação da peça mostrada na Figura 2.17, na qual cada parte em amarelo apresenta seu tempo de produção associado. Na busca de validar os materiais utilizados, foram confeccionados corpos de prova em duas condições: combinação dos dois materiais e apenas de Inconel 718. Ensaios de tração foram realizados nestes corpos de prova e os resultados entre as duas condições apontam a viabilidade técnica do uso de processo híbrido de manufatura, já que os valores de resistência mecânica encontrados no uso do processo híbrido são similares aos obtidos por meio da fabricação convencional puramente por usinagem com remoção de cavaco.

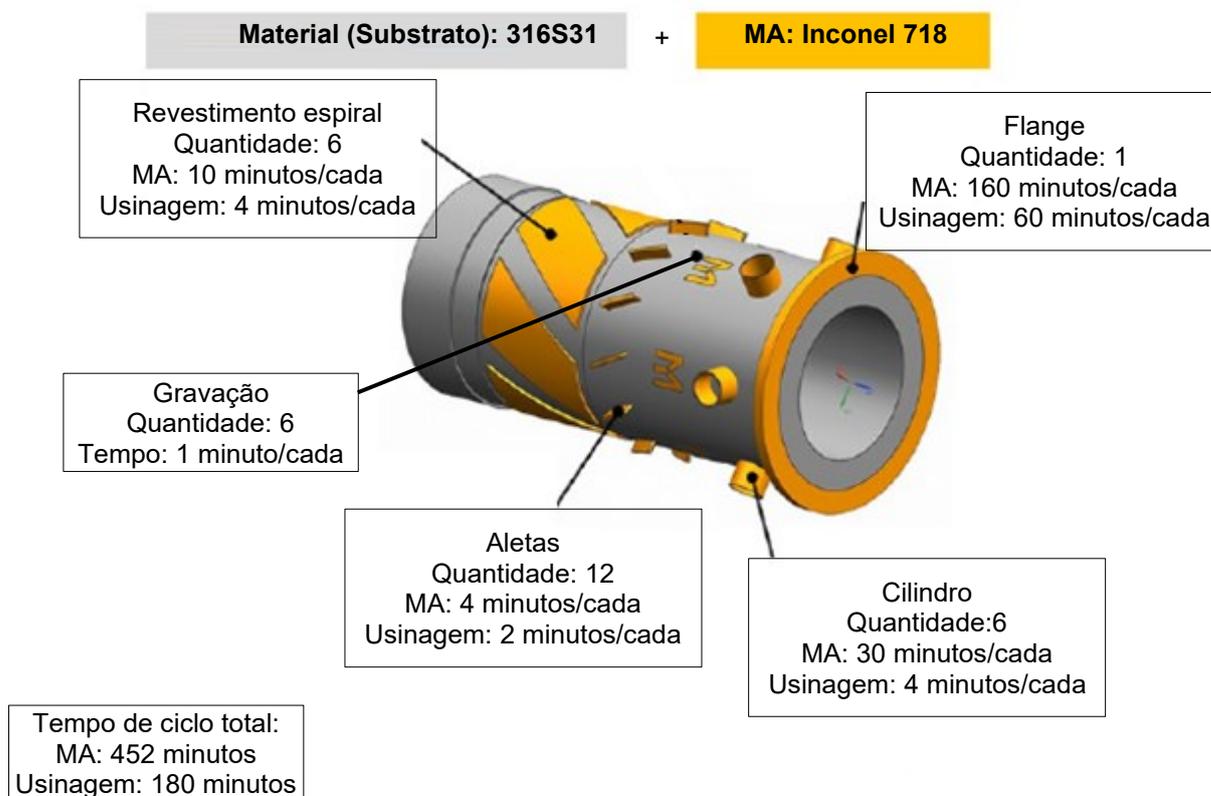


Figura 2.17 – Peça fabricada e tempos de fabricação associados (Adaptado de Yamazaki, 2016).

Os processos híbridos precisam ser avaliados para a sua viabilidade econômica de implantação de acordo com Sealy *et al.* (2018). Entretanto, conforme apontado por Manogharan, Wysk e Harrysson (2015) é necessário se levar em consideração fatores como tamanho do lote produzido, usinabilidade, custos de material, geometria da peça e tolerâncias requeridas pelos processos aditivo e subtrativo. Segundo estes autores a combinação desses fatores pode levar a validade da aplicação de processos híbridos dificultando a padronização de modelos de custos associados a este tipo de tecnologia.

2.5 Caracterização de polímeros submetidos a processo de impressão

A realização de ensaios e testes que permitam a descrição, bem como previsão do comportamento mecânico de peças impressas de acordo com as solicitações as quais elas serão submetidas é importante para se entender melhor os resultados práticos de componentes fabricados por MA (POPESCU *et al.*, 2018).

A influência dos parâmetros de impressão implica na resposta mecânica do material em sua aplicação, conforme tem sido apontado na literatura. De acordo com Popescu *et al.*

(2018), para o processo de FDM[®]/FFF, esses parâmetros podem ser divididos em 3 grandes grupos, podendo ser estudados de forma isolada ou conjunta. São eles os parâmetros de fatiamento, orientação de construção e condições de temperatura.

Os parâmetros de fatiamento são: espessura ou altura da camada, diâmetro do bocal, velocidade de deposição, porcentagem de preenchimento, orientação ou ângulo de deposição, padrão de preenchimento, espaçamento de ar (*air gap*), número de contornos, quantidade de camadas inferiores e superiores (VYAVAHARE *et al.*, 2020).

A orientação de construção é geralmente caracterizada por construção na vertical, horizontal e lateral não limitando outras orientações de serem utilizadas, conforme apresentado na Figura 2.18.

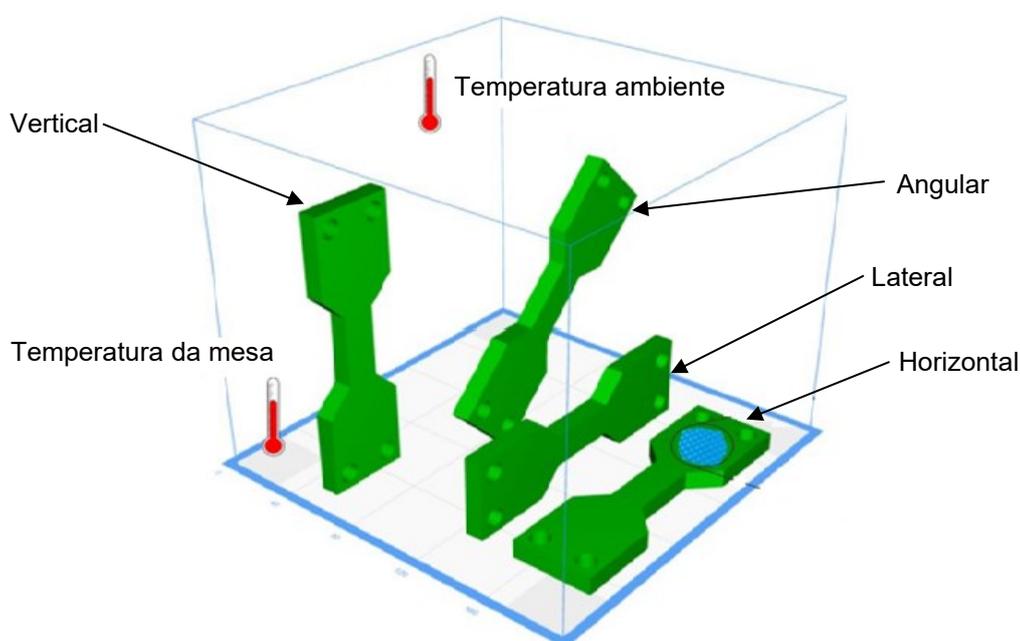


Figura 2.18 – Exemplo de orientação de impressão e condições de temperatura (Adaptado de Popescu *et al.*, 2018).

As condições de temperatura mostradas na Figura 2.18 dizem respeito a temperatura ambiente, temperatura da plataforma ou mesa de impressão e a temperatura de extrusão do polímero.

Os parâmetros de impressão, bem como as propriedades físicas do polímero podem implicar de forma combinada no resultado final de produção de polímeros impressos. A caracterização mecânica deve levar em conta esse tipo de combinação, conforme apontado por Balani *et al.* (2019).

Além da escolha dos parâmetros de impressão, é necessária a seleção de um procedimento que caracterize mecanicamente o material de estudo. O uso de normas ASTM

e ISO (*International Organization for Standardization*), por exemplo, permitem que os testes sejam conduzidos com critérios pré-estabelecidos para cada análise. Dizon *et al.* (2018) mostraram em seu estudo que algumas destas normas são aplicáveis a testes mecânicos de polímeros, como forma de validar os resultados obtidos em processos de fabricação aditivo, entretanto os autores não citaram alguma aplicação específica de cada norma. A listagem das normas bem como a aplicação é mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Normas ASTM e ISO para ensaios de polímeros.

Aplicação	Norma	
	ASTM	ISO
Ensaio de tração	D638, D412, D882, D3039	527, 37
Ensaio de flexão	D790	178
Ensaio de rasgo	D1938	34-2:2015, 34-1:2010
Ensaio de compressão	D695	604
Ensaio de impacto	D6110, D256	-
Testes de dureza	E384, D2240, D785	2030-1, 2039-2
Ensaio de fluência	D2990	-
Ensaio de fadiga	D7791, D3479, D7774	-
Propriedades de materiais poliméricos	D5592	-
Tolerâncias dimensionais	-	286-1:2010
Técnicas de laboratório	E691	-

Fonte: (DIZON *et al.*, 2018)

A utilização de normas nem sempre é possível de forma adequada dentro do contexto de MA. As normas em geral são aplicáveis a corpos de prova completamente densos e maciços independente do material testado. A falta de normas de ensaios mecânicos que levam em consideração as especificidades de objetos fabricados por técnicas aditivas ainda é um ponto a ser tratado pela literatura que carece de informações conforme apontado por Moroni, Petrò e Shao (2020).

O estudo realizado por Rosa, Oliveira e Fiocchi (2019) investigou a resistência a flexão de peças produzidas com PLA no processo FFF. Entretanto, a aplicação direta da ASTM D790 não se mostrou completamente apropriada às variações de preenchimento interno dos corpos de prova produzidos. Os vazios internos não controlados, inseridos como forma de compensar

a quantidade de material utilizado, foram variados e sua influência nos resultados permitiu perceber que existem condições nas quais é possível melhorar a relação entre massa e resistência mecânica. Deste modo os autores propuseram uma metodologia, análise da geometria da seção transversal real da peça impressa, que considerasse as variações de vazios internos dos corpos de prova indicando o seu real comportamento quando submetidos aos esforços de flexão.

Moroni, Petró e Shao (2020) observaram, por sua vez, que caracterização geométrica e dimensional de componentes produzidos por MA ainda não apresentam normas e padrões estabelecidos pela ISO e ASTM. Desta forma, estudos nesse tema se tornam ainda mais relevantes para fomentar a necessidade de criação de padrões específicos no contexto de MA.

Outras técnicas como a difração de raios x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) podem ser usadas para análises de cristalinidade e visuais, respectivamente, para polímeros conforme mostrado por Wittbrodt e Pearce (2015). Além destas, a técnica de escaneamento calorimétrico diferencial (DSC) permite uma análise térmica do material poliméricos, da sua temperatura de transição vítrea, cristalinidade e ponto de fusão e foi utilizada por Song *et al.* (2017) como parte de suas análises.

O aspecto superficial de peças produzidas por MA é importante não apenas como forma de melhorar a funcionalidade e aparência delas, sendo também considerada sua influência na redução do tempo e necessidade de realizar correções por outros processos de manufatura (ALSOUFI e ELSAYED, 2018). Desta forma, o papel da caracterização pode ser desempenhado pela medição de rugosidade e perfilometria.

O processo de medição da superfície de uma peça através da rugosidade pode apresentar fontes de erros de medição. Dentre elas a deformação da peça devido a força de medição pode ser influente na medição de materiais dúcteis (DOBES *et al.*, 2017), podendo justificar a utilização de equipamentos sem contato de medição. Entretanto, conforme pode ser verificado na literatura, não há padronização quanto ao tipo de equipamento utilizado e, em grande maioria, são utilizados equipamentos de contato.

Outro ponto abordado no estudo de Alsoufi e Elsayed (2017) acerca da medição de rugosidade de peças impressas é a direção na qual a medição será realizada e a sua influência nos resultados. A análise da variação dos resultados das superfícies internas e externas apontou valores superiores para as medidas tomadas na parte interna em todos os testes. Isso pode ser justificado pela concentração de calor e insuficiência de ventilação na parte interna dos corpos de provas impressos pelos autores.

A medição de desvios de forma, tais como a circularidade e cilindridade, para peças produzidas por MA ainda não apresentam normas ISO ou ASMT mesmo que o aumento do

uso de MA pela indústria tenha crescido (VITOLLO *et al.* 2018). Porém, de acordo com Vitolo *et al.* (2018) há fatores que influenciam nos resultados de medições tais como: resolução da máquina, distorções térmicas e parâmetros de processo. É interessante ressaltar que estes autores perceberam que o aumento de dimensões das peças aumentou também as tolerâncias de desvios de forma, o que é um ponto a ser considerado na produção de peças.

2.6 Propriedades mecânicas do PLA

O Ácido polilático (PLA) pode ser considerado o mais utilizado e pesquisado material dentre os polímeros biodegradáveis e renováveis de acordo com um estudo recente realizado por Moetazedian *et al.* (2020). É um termoplástico que pode ser processado por equipamentos de manufatura de plástico, para obter peças moldadas, em forma de filmes, o que torna sua utilização abrangente na indústria. (FARAH, ANDERSON e LANGER, 2016). É um potencial substituto aos materiais poliméricos a base de fontes não renováveis tanto para aplicações industriais como biomédicas. Entretanto, ainda difícil tal substituição devido à fatores ambientais e econômicos (FARAH, ANDERSON e LANGER, 2016).

Isso pode ser explicado já que, os polímeros a base de fontes não renováveis, como petróleo, mesmo apresentando vantagens como menor custo e produção rápida, desempenho mecânico elevado dentre outras, suas desvantagens associadas aos custos de reciclagem, consumo elevado de fontes não renováveis e contaminação do meio ambiente fazem com que seja mais devagar a utilização de polímeros biodegradáveis como o PLA, por exemplo (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

O PLA mesmo apresentando diversas formas de fabricação, nenhuma delas é simples de ser realizada. O controle de condições de processamento, como temperatura, pressão e pH, o uso de catálise e grandes tempos de polimerização implicam no grande consumo de energia no processo (LOPES, JARDINI e FILHO, 2012; LASPRILLA *et al.*, 2012).

De acordo com Henton *et al.* (2005) e Jamshidian *et al.* (2010) a produção do PLA pode apresentar outra grande vantagem associada à emissão negativa de CO₂ na atmosfera proporcionada pelo seu processo de produção. Isso pode ser explicado pelo fato de o PLA ser obtido a partir de fontes renováveis, como biomassa por exemplo, e ao longo da sua cadeia produtiva pode consumir mais CO₂ do que emitido em sua produção (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

Outro ponto importante a ser avaliado no PLA é seu comportamento conforme há o aumento da temperatura e humidade durante a sua aplicação. O PLA é um material hidrofóbico podendo ter suas características alteradas pela absorção de água ao longo do

tempo (FARAH, ANDERSON e LANGER, 2016). Moetazedian *et al.* (2020) avaliaram a mudança de comportamento sob temperatura e umidade controlados em aplicações biomédicas. Foram avaliados de forma comparativa a resistência a tração de corpos de prova variando apenas as condições ambiente (temperaturas de 37 °C e condições de submersão em solução de água por 48 horas). Foi verificada queda de cerca de 50 % na resistência mecânica e 20 % no módulo de elasticidade permitindo maior deformação.

A queda de resistência mecânica também foi verificada por Grasso *et al.* (2018) que avaliaram o comportamento do PLA para a variação de temperaturas entre 20 °C e 60 °C e diferentes orientações de deposição. Foi percebido que ao longo do acréscimo de temperatura o material sofreu quedas de resistência com diferenças mais discrepantes nas temperaturas de 50 °C e 60 °C devido a sua proximidade com a T_g do PLA. Além disso, a queda do módulo de elasticidade levou ao aumento da quantidade de deformação das peças durante os testes. Estes resultados são mostrados na Figura 2.19.

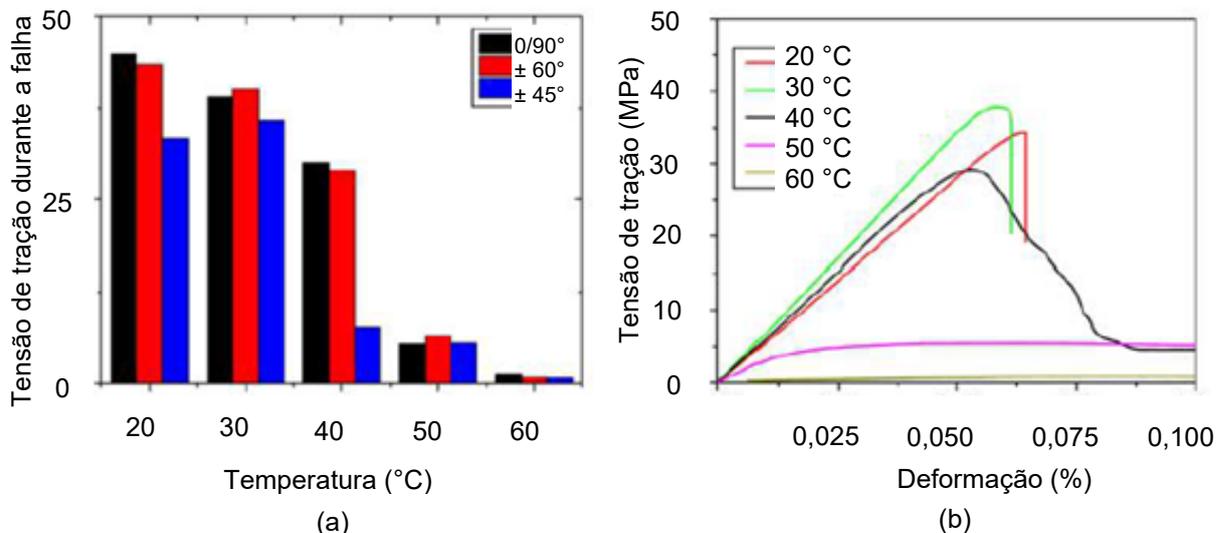


Figura 2.19 – Resultados de (a) tensão de tração durante a falha para todas as condições testadas e (b) curva tensão deformação para a orientação de deposição de $\pm 45^\circ$ (Adaptado de Grasso *et al.*, 2018).

O aquecimento da mesa de impressão em 60 °C para a deposição da primeira camada permite que aumente a aderência do material e melhora as tolerâncias dimensionais e geométricas do impresso. Um estudo feito por Spoerk *et al.* (2018) demonstrou essa relação entre a adesão da peça à mesa e a temperatura da mesa onde valores próximos a temperatura de transição vítrea do PLA (cerca de 60 °C) proporcionam a adesão ideal para a impressão.

A temperatura da atmosfera da câmara também tem forte influência na qualidade da peça impressa. Conforme mostrado por Lee e Liu (2019), temperaturas estabilizadas em faixas próximas da Tg são desejáveis em situações onde a qualidade dimensional é essencial. Por se tratar de processo de deposição com fonte térmica, contração e distorções durante o resfriamento heterogêneo interferem na qualidade e, portanto, o controle da atmosfera de impressão deve ser usado para alcançar tolerâncias mais estreitas. Por outro lado, mantendo-se estas temperaturas controladas em níveis mais baixos pode resultar na diminuição da resistência mecânica, como mostrado pelos autores, que criaram um sistema de ventilação forçado para controlar a temperatura interna da impressora em funcionamento.

O PLA apresenta desvantagens que podem limitar sua aplicação. A menor tenacidade, com deformação máxima de ruptura em torno de 10 %, o faz ser tratado como um material frágil diminuindo sua faixa de aplicações onde sejam necessárias maiores deformações elásticas ou plásticas tempo (FARAH, ANDERSON e LANGER, 2016).

Algumas propriedades mecânicas e térmicas e de processamento do PLA, que são importantes na definição de suas aplicações de engenharia e parte delas, são mostradas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas, térmicas e de processamento médias do PLA.

Propriedade	Valor
Resistência a tração máxima	51 MPa
Módulo de tração	2 315 MPa
Alongamento na Tração	3,31 %
Resistência ao impacto	118 J/m
Resistência a flexão	159 MPa
Módulo de flexão	13,8 GPa
Temperatura de fusão (Tm)	165 °C a 180°C
Temp. transição vítrea (Tg)	55 °C a 60 °C
Temperatura de distorção ao calor	80 °C a 90 °C
Temperatura de extrusão	190 °C a 230 °C
Temperatura da mesa	50 °C a 70 °C

Fonte: (NATUREWORKS, 2020; MATWEB, 2020)

As propriedades mecânicas do PLA após FFF/FDM® podem apresentar diferentes resultados em relação aos já apresentados para combinações de parâmetros diferentes.

Alguns estudos acerca das propriedades mecânicas do PLA pós MA são apresentados a seguir.

Afrose *et al.* (2016) estudaram a influência da orientação de impressão do PLA em ensaios de tração e fadiga. três condições de orientação foram testadas, as quais são demonstradas na Figura 2.20. Dentre elas a orientação (a) apresentou os melhores resultados de tração (38,7 MPa) e no sentido apontado em (c) o melhor resultado para a fadiga suportando o maior número de ciclos durante os testes.

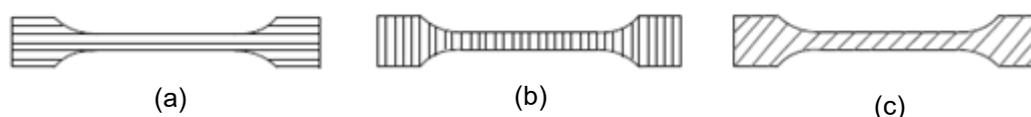


Figura 2.20 – Impressão de PLA na (a) orientação X, (b) orientação Y e (c) orientação 45° (Adaptado de Afrose *et al.*, 2016).

Letcher e Waytashek (2014) avaliaram condições de parâmetros semelhantes aos mostradas anteriormente, porém os resultados de resistência à tração foram bem diferentes. A orientação (c) neste estudo foi superior nos testes de tração com valores máximos de 64,03 MPa. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que na condição de orientação (a) a peça apresentou falhas de impressão no encontro das linhas de preenchimento com as bordas conforme mostrado na Figura 2.21, destacados nos círculos vermelhos. Já para os testes de fadiga, os resultados foram semelhantes já que a orientação 45° apresentou o melhor desempenho mesmo em condições de testes diferentes. Outra observação importante do estudo foi a similaridade entre os valores de resistência mecânica do filamento e da peça impressa, o que segundo os autores permite que este material seja reciclado e extrudado novamente sem a perda de propriedades mecânicas. Nos testes de flexão o melhor desempenho foi obtido na orientação (a) (102,2 MPa)



Figura 2.21 – Falha apresentada entre a parte externa e interna da peça (Adaptado de Letcher e Waytashek, 2014).

Rosa (2019) avaliou a resistência mecânica à flexão do PLA através da mudança de parâmetros de impressão e utilizando três tipos de método: software, aparente e real. O método do software levou em consideração apenas os resultados obtidos segundo a norma ASTM D790. O aparente considerou as medidas externas dos corpos de prova mensuradas após sua fabricação e interior completamente preenchido. O real levou em consideração as medidas externas mensuradas dos corpos de prova bem como os vazios internos controlados. A resistência mecânica dos corpos de prova avaliados de forma real não apresentou incremento de valor conforme aumentavam-se os valores de preenchimento interno, diagonal (PD) e horizontal (PH) de impressão, característica essa verificada para os outros dois modos de avaliação conforme mostrado na Figura 2.22.

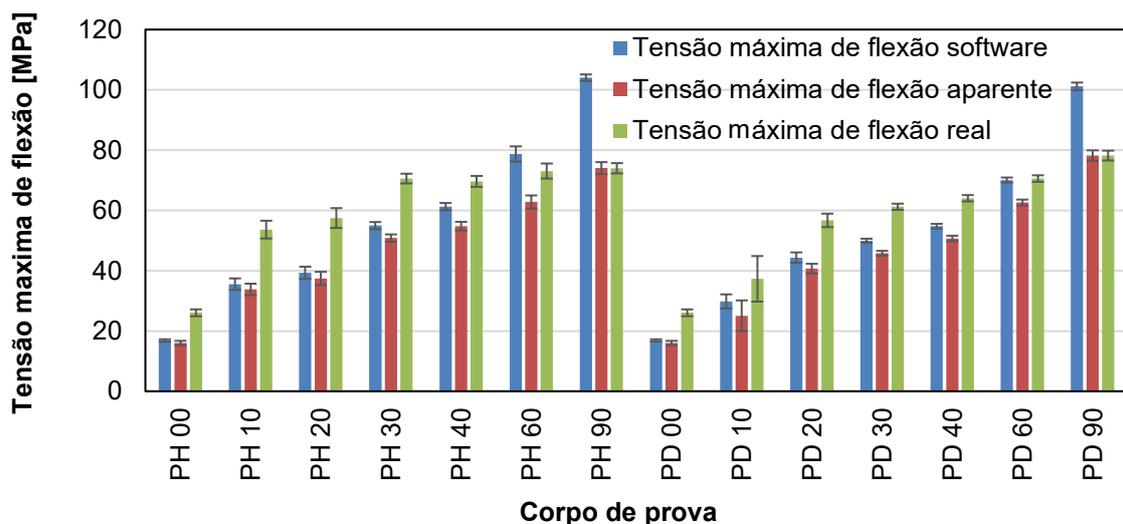


Figura 2.22 – Tensão de flexão máxima dos corpos de prova com preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD) (Adaptado de Rosa, 2019).

Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) avaliaram o impacto da variação dos parâmetros de impressão espessura de camada e orientação de deposição nas características de tração do PLA e ABS. Foram encontrados valores médios de 28,5 MPa para o ABS e 56,6 MPa para o PLA nos ensaios de tração. O objetivo deste estudo foi verificar as propriedades mecânicas de peças produzidas por impressoras de baixo custo de código aberto e, segundo os autores, os valores encontrados foram de acordo com os alcançados por impressoras industriais de elevado custo.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas do procedimento experimental para manufatura aditiva e subtrativa do PLA divididos nos seguintes itens: 3.1 fabricação dos corpos de prova e mandril de fixação, 3.2 mini torno CNC, 3.3 torneamento cilíndrico externo, 3.4 ferramentas de corte, 3.5 circularidade e cilindridade, 3.6 dimensional, 3.7 cavacos, 3.8 rugosidade e perfilometria, 3.9 força de corte, 3.10 microscopia ótica, 3.11 microscopia eletrônica de varredura, 3.12 abela de resumo dos ensaios

3.1 Fabricação dos corpos de prova e do mandril de fixação

Baseado na premissa de obter peças leves e resistentes mecanicamente, ou elevada relação resistência por massa, o planejamento experimental desta dissertação envolveu primeiramente a escolha de parâmetros de impressão associados às propriedades mecânicas das peças. Os parâmetros de FFF com o melhor desempenho mecânico foram adotados para fabricar os corpos de prova que foram torneados. A seleção destes parâmetros foi baseada no estudo de Rosa (2019), realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), que caracterizou mecanicamente o material PLA azul utilizado nesta dissertação. Para reduzir possíveis diferenças oriundas de influências térmicas, físicas ou químicas precedentes à MA da matéria prima, foram utilizados dois rolos de filamentos de PLA do mesmo lote de produção. A escolha da cor azul se deve as características do pigmento que favorecem a observação da superfície e seus detalhes em microscópio óptico frente às demais cores previamente testadas.

3.1.1 Nivelamento da mesa e preparação da impressora

Foi utilizada a máquina de extrusão polimérica de três eixos cartesianos CL2 Pro+® com enclausuramento, mesa aquecida e filamentos com 1,75 mm de diâmetro na cor azul fornecidos pela Cliever®.

Anterior à fabricação dos corpos de prova (CP) foi necessário realizar o nivelamento da impressora e ajustar seu funcionamento para garantir a deposição adequada da primeira

camada de cada CP. Conforme apresentado na Figura 3.1 são indicadas três condições possíveis de se obter durante o processo de nivelamento da altura da camada de acordo com a altura da mesa em relação ao bico extrusor. O ajuste de nivelamento foi feito a partir de três parafusos localizados na parte inferior da mesa de impressão usando um gabarito de 0,3 mm de espessura entre a mesa e o bocal de impressão.

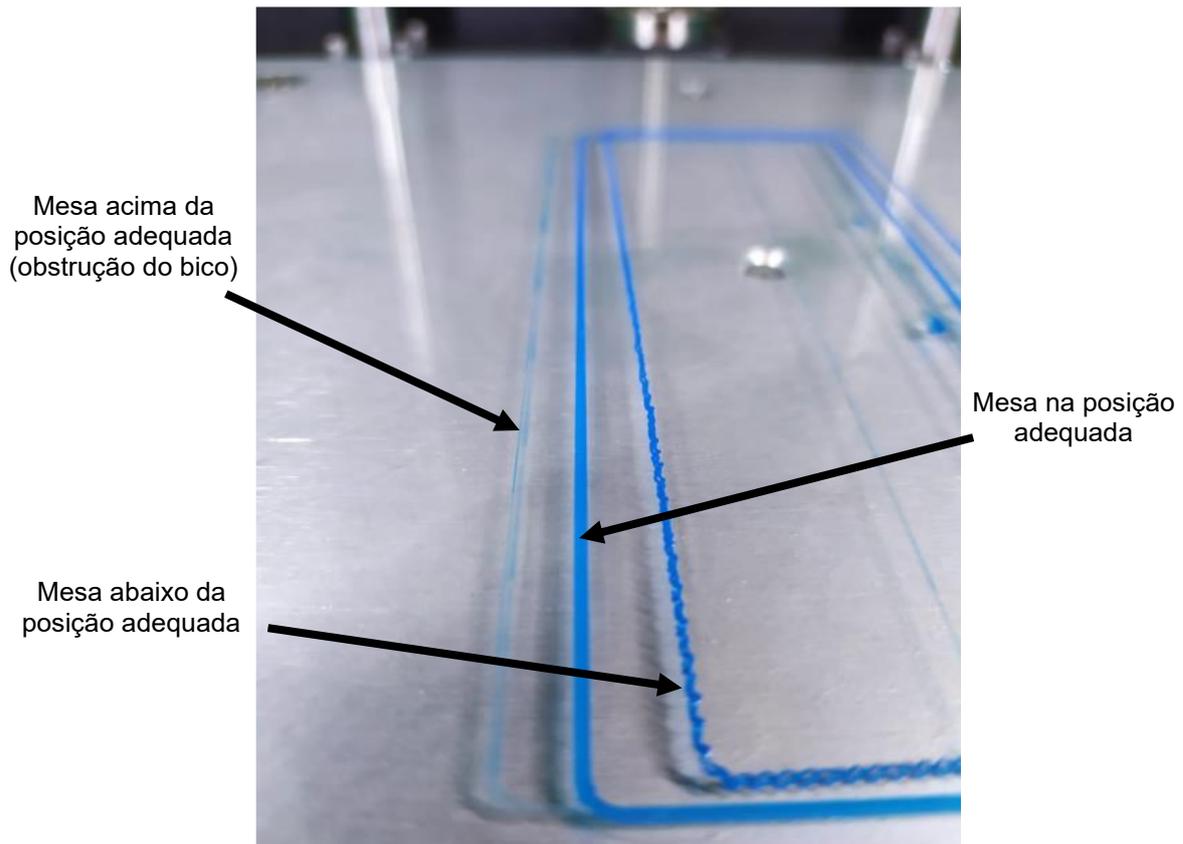


Figura 3.1 – Ajuste de altura da mesa de impressão.

O spray adesivo Cliever foi aplicado sobre a superfície da mesa de impressão para aumentar a adesão da peça visto que, devido a contração de solidificação, a peça tende a se soltar da mesa. A retirada de cada peça foi realizada com o auxílio de uma espátula após o resfriamento da mesa.

3.1.2 Corpos de prova de torneamento e mandril de fixação

A geometria e dimensões dos CPs foram escolhidas com o objetivo de minimizar o volume de PLA necessário para os ensaios de torneamento cilíndrico externo visto que a quantidade de material disponível para os ensaios foi limitada. Desde modo foram adotada geometria tubular com comprimento de 15,00 mm, diâmetro externo de 15,00 mm e diâmetro

interno de 6,00 mm, conforme desenho técnico apresentado na Figura 3.2. Foram impressos também corpos de prova com comprimento de 45,00 mm com o intuito de caracterizar a superfície inicial das peças produzidas para usinagem. Ensaios iniciais apontaram a necessidade de um comprimento de amostragem maior para a medição de rugosidade. Deste modo as medições de rugosidade das peças de 45,00 mm de comprimento foram utilizadas como referência para todos os CPs.

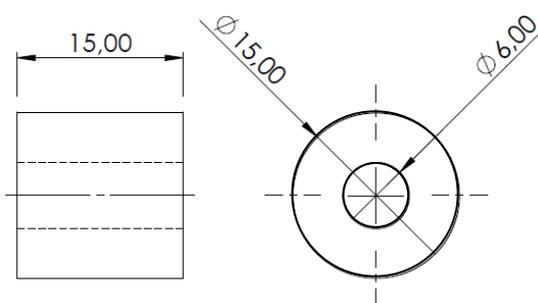


Figura 3.2 – Geometria do corpo de prova de torneamento cilíndrico externo.

Os parâmetros de impressão utilizados são listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de impressão utilizados na fabricação dos CPs.

Parâmetros	Valor
Material	Pla Azul
Porcentagem de preenchimento	30 %
Forma de preenchimento	Hexagonal (PH)
Orientação de deposição	Z
Espessura ou quantidade de camadas externas	3
Espessura ou quantidade de camadas de base e topo	2
Temperatura de extrusão do bocal	185 °C
Temperatura da mesa	50 °C/40 °C
Altura das camadas depositadas	0,19 mm
Comprimento das peças	15 mm e 45 mm

Foi necessário o desenvolvimento de um mandril intercambiável para fixar os CPs no minitorno, afastando o CP da placa de três castanhas e do contraponto e, também, permitir a entrada e saída da ferramenta no torneamento cilíndrico externo. O mesmo mandril também foi empregado para avaliar os CPs na máquina de medir desvios de forma (MMDF). O mandril foi fabricado em aço carbono ABNT 1045.

O CP foi fixado ao mandril por meio do aperto de uma porca que comprime uma bucha metálica (Figura 3.3b) que por sua vez aperta o CP no mandril axialmente. O desenho técnico

do mandril é apresentado na Figura 3.3 e o local onde o CP foi fixado está destacado na cor vermelha.

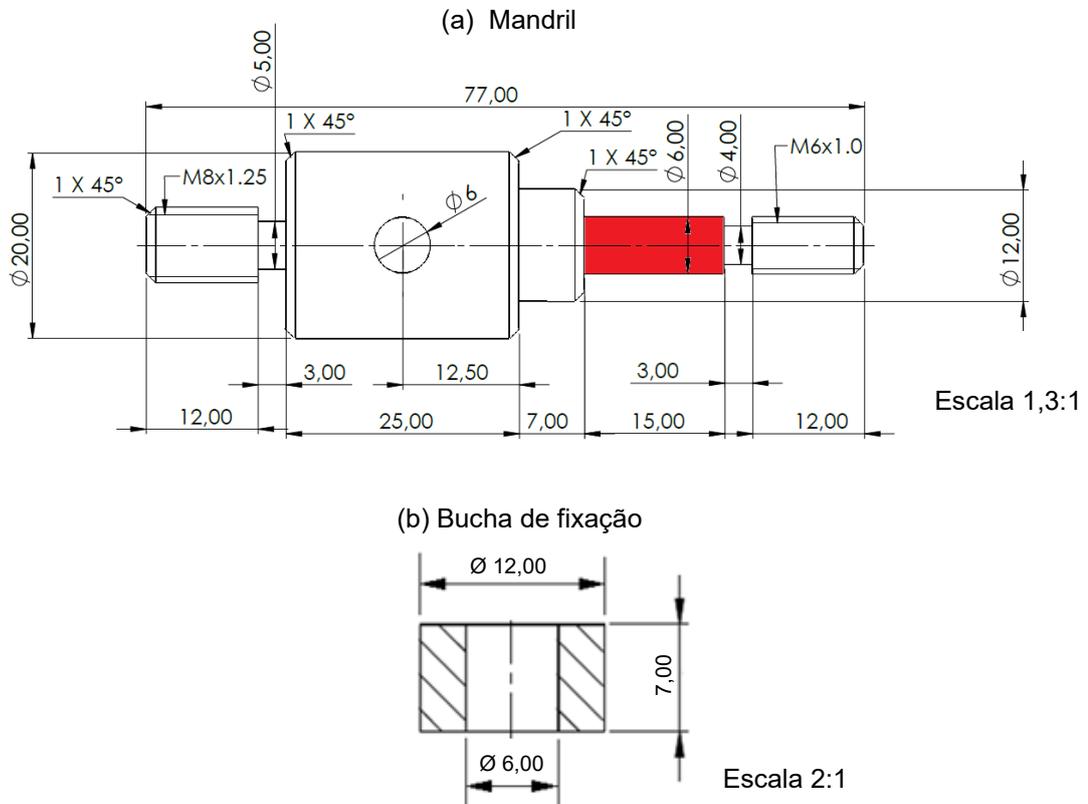


Figura 3.3 – (a) Mandril de fixação do CP para usinagem e medições e (b) bucha de fixação.

O ajuste folgado da peça (furo passante) no eixo do mandril permitiu minimizar o batimento radial da peça em relação ao eixo do mini torno ajustando o CP coaxial mente no eixo do mandril. Na Figura 3.8 é apresentada a etapa de fixação da peça no mandril e a correção do batimento com o auxílio de um relógio comparador da marca Mitutoyo, modelo 2046S com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 10 mm.

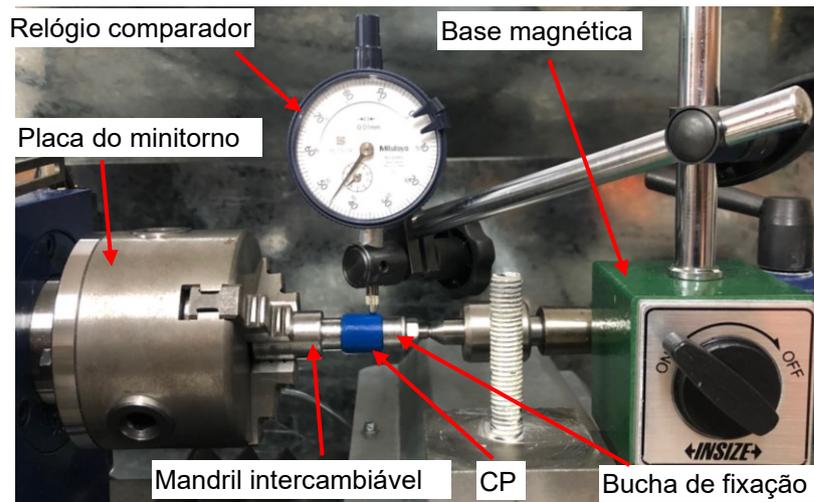


Figura 3.4 – Montagem do sistema de ensaios de torneamento cilíndrico externo.

3.2 Minitorno CNC

A máquina utilizada nos ensaios foi o minitorno mecânico de bancada modelo MR-300 fabricada pela Manrod® e atualizada com comando numérico computadorizado (CNC) por Silva *et al.* (2017). A imagem do minitorno CNC é mostrada na Figura 3.4.

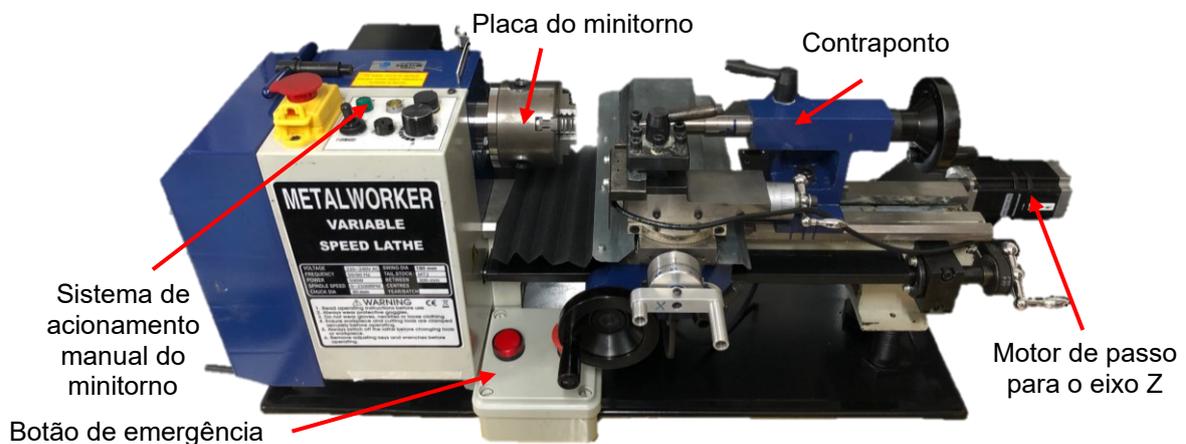


Figura 3.5 – Minitorno CNC para os ensaios de torneamento cilíndrico externo.

O programa de comando de código fonte livre LinuxCNC foi utilizado para controlar os movimentos longitudinal e transversal do minitorno. A máquina-ferramenta possui rotação do eixo árvore máxima de 2 500 rpm, placa de três castanhas de 80 mm de diâmetro, distância entre pontas de 300 mm, motor principal de 250 W monofásico, tensão de alimentação de 220 VAC, dois eixos lineares (X e Z) com resolução de posicionamento de 0,014 mm, e uma velocidade de avanço máxima de 900 mm/min.

Durante a realização deste trabalho foi realizada uma atualização no minitorno com a implementação de sensores de fim de curso nos carros principal e superior, responsáveis pela movimentação dos eixos Z e X, respectivamente, no sistema de coordenadas do CNC. A principal função desta atualização foi a possibilidade utilizar a mesma referência de posicionamento durante os ensaios tornando o processo mais ágil e padronizado. Para isto foram projetados suportes nos quais os sensores foram fixados.

O sensor associado ao movimento longitudinal do carro principal foi fixado ao suporte, projetado para este fim, em aço ABNT 1045 fixado na parte inferior da estrutura do contraponto. Já para o sensor de movimento transversal do carro superior foi necessário a idealização de um novo sistema de manípulo, bem como fabricação de um anel graduado ambos em alumínio, visto que o minitorno, após a atualização, ainda poderá ser operado manualmente. Este novo anel graduado foi projetado para, também, proteger o sensor fim de curso contra projeção de cavacos durante a usinagem. O desenho esquemático da montagem destes dois conjuntos de sensores e o posicionamento deles no minitorno é apresentado na Figura 3.6. Os desenhos técnicos das peças projetadas são mostrados nos APÊNDICES 1 a 8.

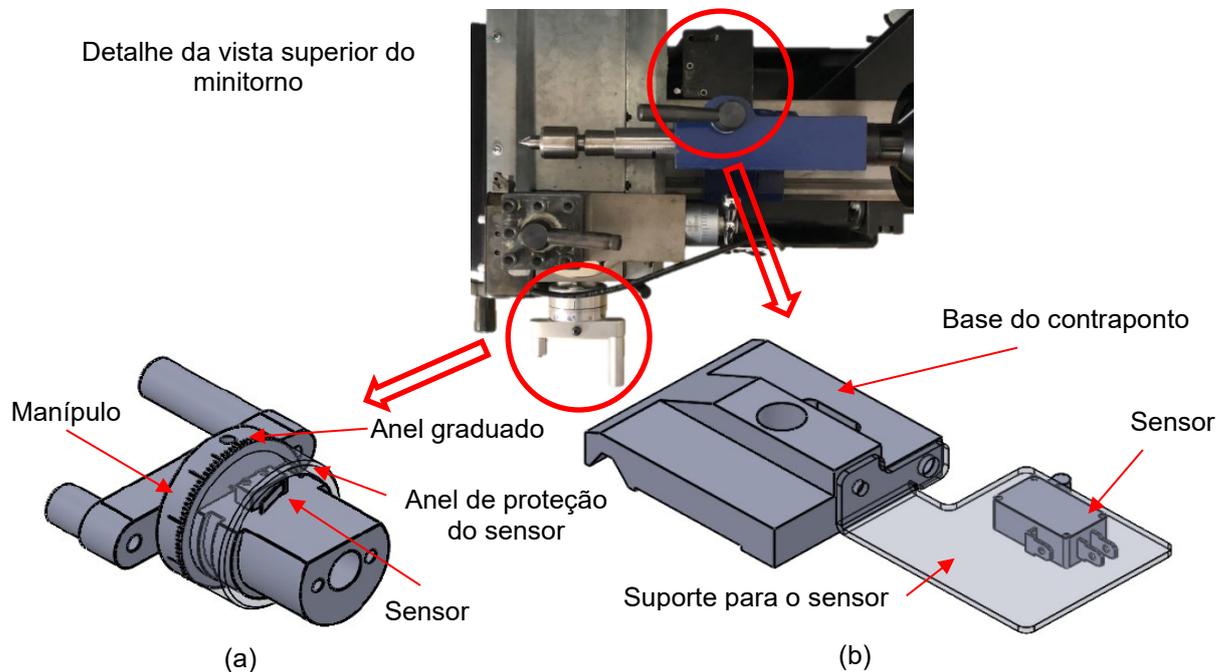


Figura 3.6 – Desenho esquemático da montagem dos sensores de final de curso para movimentos (a) transversal e (b) longitudinal.

3.3 Torneamento cilíndrico externo

Foram encontrados apenas poucas publicações sobre a MS posterior a MA. Desses estudos nenhum relacionado à usinagem do PLA por torneamento. Foram realizados, conseqüentemente, ensaios preliminares em busca de parâmetros de torneamento que produzissem os menores valores de rugosidade e que também proporcionassem uma menor quantidade de material aderido à peça. Após cada teste a ferramenta foi levada ao MEV para caracterização de mecanismos de desgaste e avarias.

Anterior a usinagem foi necessário realizar o referenciamento da ferramenta de corte utilizada. O procedimento baseou-se na usinagem preliminar de peças impressas e posterior medição dos diâmetros das mesmas. A partir dos valores encontrados nas medições foi possível associá-los as coordenadas inseridas no software de comando do minitorno. Deste modo foi possível padronizar os ensaios e profundidades de corte utilizados. Este procedimento foi realizado somente quando as ferramentas foram trocadas durante os ensaios.

Os parâmetros de corte que foram estudados foram a velocidade de corte (vc), avanço (f), e profundidade de corte (ap). As faixas de velocidades de corte que foram utilizadas estavam associadas ao diâmetro dos CPs de 15 mm e a rotação do eixo máxima de 2 500 rpm do minitorno. Por meio do cálculo da vc pela Equação 1 encontrou-se o valor máximo de vc limitado a 117,8 m/min.

$$vc = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

vc = velocidade de corte (m/min)

n = rotação do eixo árvore (rpm)

d = diâmetro da peça (mm)

O ap foi selecionado de forma a remover a menor quantidade de material considerando o batimento radial da peça e a remoção da menor quantidade de camadas externas de perímetro da peça oriundos da MA. Visto que no processo de MA o resultado da fabricação da peça proporciona erros de forma, foi necessário estabelecer um valor mínimo de ap que compensasse o batimento radial existente e removendo material ao longo de toda a superfície da peça. Para tal verificação foi elaborado um teste que consistiu em aplicar passes sucessivos de torneamento cilíndrico externo com incrementos de 0,05 mm verificando a diminuição do batimento com auxílio do relógio comparador. Foram coletadas 3 medições por

passa, sendo realizadas na região da base, central e topo da peça, conforme ilustrado na Figura 3.7. Foi considerada como a base da peça a parte mais próxima da plataforma de impressão. Além disso, o valor de a_p máximo utilizado foi limitado pela quantidade de camadas externas utilizadas na impressão das peças visto que a geometria de projeto dos CPs não permitia quantidade de contorno superior a três, sendo a largura teórica de contorno de 0,4 mm.

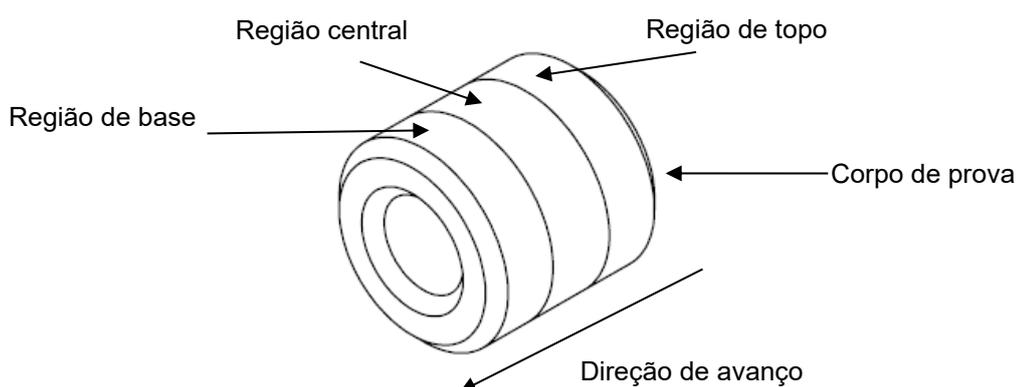


Figura 3.7 – Representação das regiões medidas nos CPs para avaliar o batimento radial.

Os parâmetros de torneamento identificados após a fase inicial de pré-testes são apresentados na Tabela 3.2. Os valores de avanço escolhidos foram relacionados aos valores fornecidos pelo fabricante das ferramentas de corte utilizadas no trabalho. A combinação destes parâmetros gerou 27 condições de corte distintas, as quais foram repetidas para cada ferramenta de corte estudada. A utilização de um planejamento experimental fatorial de três fatores e três níveis (fatorial 3k) foi escolhida.

Tabela 3.2 – Parâmetros de corte para o torneamento cilíndrico externo do PLA.

Níveis	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/volta)	Profundidade de corte (mm)
Mínimo	20	0,05	0,35
Intermediário	35	0,10	0,45
Máximo	70	0,15	0,60

3.4 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte escolhidas para os ensaios foram pastilhas intercambiáveis de metal duro. Foram empregadas duas geometrias de ferramentas.

A DCGX 0702 04 AL 1105 da Sandvik® aplicada na usinagem de metais e polímeros, com raio de ponta de 0,4 mm, comprimento efetivo da aresta de corte (LE) de 7,352 mm,

ângulo de saída de 20° , ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° e revestimento TiAlN. A geometria detalhada é ilustrada na Figura 3.8. De acordo com o fabricante esta ferramenta possui geometria de quebra cavaco, mas seus detalhes dimensionais não foram fornecidos.

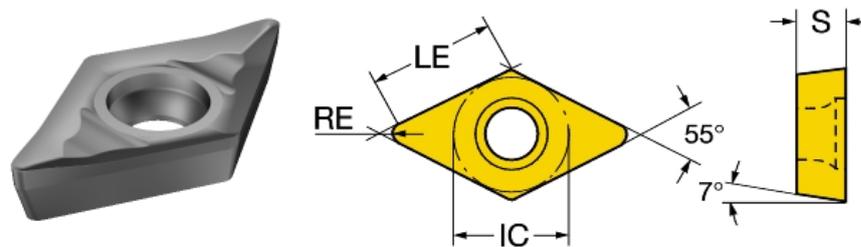


Figura 3.8 – Pastilha intercambiável de metal duro DCGX 0702 04 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN) (SANDVIK COROMANT®, 2017).

Outro modelo a DCMT 0702 02 da Iscar® também aplicada na usinagem de metais foi testada. Esta ferramenta apresenta raio de ponta de 0,2 mm, comprimento efetivo da aresta de corte (LE) de 7,352 mm e ângulo de saída de 8° , ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN + TiN. De acordo com o fabricante este modelo não apresenta quebra cavaco em sua geometria com a presença de apenas um defletor com ângulo de saída de 8° . Na Figura 3.9 são mostrados os principais aspectos da geometria da ferramenta.

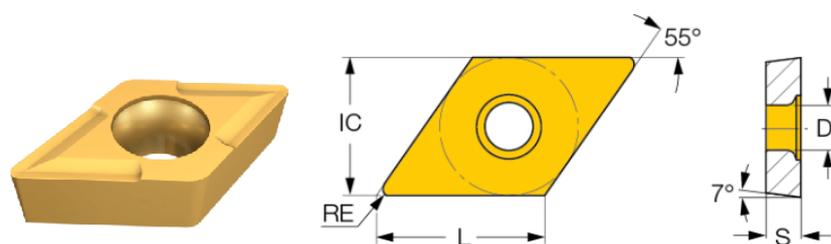


Figura 3.9 – Pastilha intercambiável de metal duro DCMT 0702 02 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN + TiN) (ISCAR®, 2020).

As características de cada inserto podem ser comparadas na Tabela 3.3 e as demais características geométricas são similares entre os dois insertos utilizados.

Tabela 3.3 – Principais características dos insertos de metal duro utilizados na pesquisa.

Característica	DCMT 0702 02	DCGX 0702 04 AL 1105
Raio de ponta (mm)	0,2 mm	0,4 mm
Ângulo de saída (°)	20°	8°
Revestimento	Nitreto de alumínio titânio + nitreto de titânio (AlTiN+TiN)	Nitreto de alumínio titânio (TiAlN)
Geometria de Quebra cavaco	Sem	Com
Ângulo de folga (°)	7°	7°
Ângulo de ponta	55°	55°

O suporte da ferramenta utilizado foi o SDACR 1212K 07-S da marca Sandvik® e suas medidas principais são mostradas na Figura 3.10. Este suporte apresenta perfil quadrado de 12 mm x 12 mm (B x H), comprimento funcional de 125 mm (LF), ângulo de posição principal da aresta de corte da ferramenta de 90° (KAPR) e balanço máximo de operação de 15 mm (OHX). É importante salientar que o suporte teve sua face inferior usinada para ajustar a altura da ferramenta no minitorno utilizado, sendo diminuído o valor de H em 2 mm.

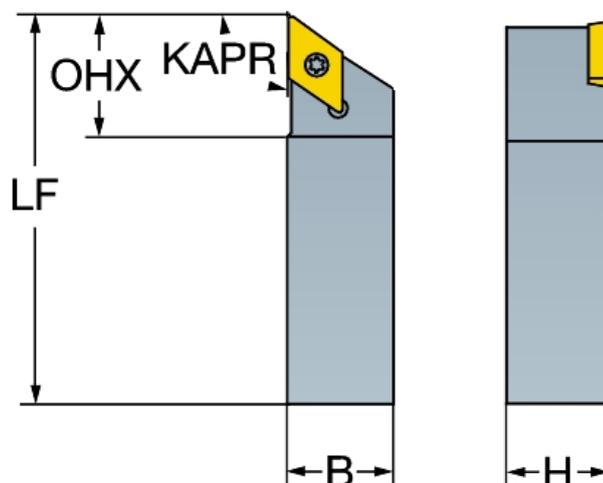


Figura 3.10 – Suporte de ferramenta SDACR 1212K 07-S e ferramenta de metal duro DCGX 0702 04 AL 1105.

O MEV, da marca Hitachi modelo TM-3000 com ampliação máxima de 30 000 vezes, foi utilizado para avaliar as superfícies de saída e superfícies principais de folga das ferramentas de corte visando identificar mecanismos de desgaste e avarias. Estas foram analisadas novas e após a usinagem do PLA.

3.5 Circularidade e cilindridade

Os desvios de forma dos CPs de PLA foram mensurados por meio do Talyrond 131 da Taylor Hobson® e do programa Taylor Hobson Ultra. A resolução deste equipamento é de 0,03 μm e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura.

As medições foram realizadas nos CPs após a MA (condição inicial) e após a usinagem (condição final) com a peça ainda presa no mandril para manter a coaxialidade peça-mandril. A temperatura durante todas as medições foi mantida constante em 20 °C \pm 1°C e foi necessário manter cada CP pelo menos 2 horas em climatização para realização das medições.

Foi utilizado um apalpador com ponta de rubi de 2 mm de diâmetro, visto que em testes iniciais o uso de apalpador com diâmetro menor impediu que a medição fosse conduzida já que esta ponta ficava presa na superfície da peça durante a medição nas cavidades formadas pelo processo de impressão. Estas cavidades foram um defeito na superfície ocorrido devido ao software de fatiamento, que realizava os incrementos de altura de todas as camadas depositadas na mesma região da circunferência e o resultado deste efeito é mostrado na Figura 3.11. Para cada CP foi realizada uma medida de circularidade e cilindridade e a montagem do conjunto na MMDF é mostrada na Figura 3.12.

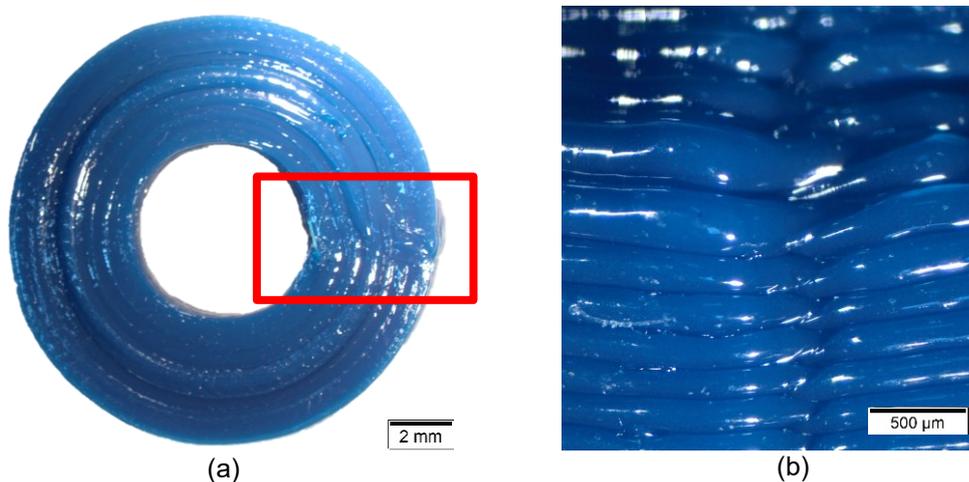


Figura 3.11 – Defeito causado pela trajetória do bico extrusor durante a impressão pela vista (a) superior e (b) lateral ampliada.

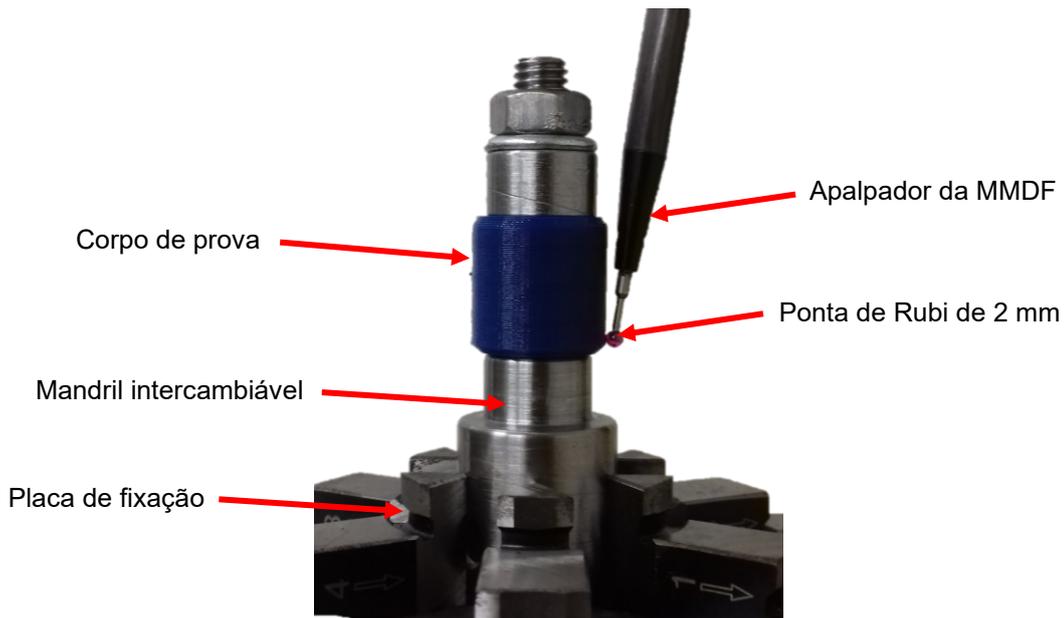


Figura 3.12 – Montagem do mandril e CP para medição de circularidade e cilindridade na máquina de medir desvios de forma.

3.6 Dimensional

A avaliação dimensional dos CPs foi realizada nas peças impressas e após a usinagem. Empregou-se paquímetro quadrimensional digital da marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm. As medições foram tomadas próximas a escala principal para minimizar o Erro de Abbé.

Foram coletadas quinze leituras diametrais por CP; cinco na região de base, cinco na região central e cinco na região de topo para verificar os desvios dimensionais ao longo da peça. As medições foram realizadas em ambiente com temperatura controlada de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

As incertezas de medição foram calculadas de acordo com a metodologia proposta pelo guia de expressão de incerteza de medição (GUM). Esta metodologia consiste na elaboração de um modelo matemático que descreve e leva à obtenção do resultado e da incerteza de medição. Todas as medições realizadas nos CPs foram acerca do diâmetro externo. Deste modo o modelo matemático apresenta as variáveis associadas a algum fator que pode interferir na incerteza conforme apresentado na Equação 2.

$$De = \bar{X} + \Delta R + \Delta CP + \Delta Pa \quad (2)$$

Onde:

De = diâmetro externo do CP

\bar{X} = variabilidade associada à média das medições

ΔR = resolução finita do sistema de medição

ΔCP = incerteza de medição do instrumento para medições externas

ΔPa = incerteza associada ao paralelismo das faces de medição

A aplicação da lei de propagação de incertezas no modelo da Equação 2 resultou no que é apresentado na Equação 3.

$$u_c^2(De) = \left(\frac{\partial De}{\partial \bar{X}}\right)^2 * u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta R}\right)^2 * u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta CP}\right)^2 * u^2(\Delta CP) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta Pa}\right)^2 * u^2(\Delta Pa) \quad (3)$$

Onde:

u = incerteza padrão

u_c = incerteza expandida

Cada fator de influência associado à incerteza de medição apresenta características associadas ao tipo de avaliação (A ou B), tipo de distribuição estatística e quantidade de graus de liberdade as quais indicam a forma na qual será calculada a incerteza.

A listagem das variáveis de influência na incerteza de medição, bem como suas respectivas características foram estudadas conforme apresentado na Tabela 3.4. Essa Tabela representou os valores utilizados no cálculo da incerteza de medição de cada CP. A Tabela de fatores de abrangência (k) utilizada para os cálculos mostrados na Tabela 3.4 é apresentada no ANEXO 1. O certificado de calibração do paquímetro, necessário para os cálculos de incerteza de medição, é mostrado no ANEXO 2.

Tabela 3.4 – Fatores de influência na incerteza de medição de cada CP e suas características.

Variável	Cálculo	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade
\bar{X}	$\frac{s(\bar{X})}{\sqrt{n}}$	A	T de <i>student</i>	14
ΔR	$\frac{R}{2\sqrt{3}}$	B	Retangular	∞
ΔCP	$\frac{u(CP)}{k}$	B	T de <i>student</i>	∞
ΔPa	$\frac{u(Pa)}{k}$	B	T de <i>student</i>	∞

A contribuição de cada variável dentro do cálculo de incerteza foi essencial para avaliar os resultados obtidos durante as medições. Deste modo a Equação 4 foi utilizada para cada variável estudada.

$$cont(variável) = \frac{u^2(variável) * 100 \%}{u_c^2(De)} \quad (4)$$

Onde:

variável = variável de influência na incerteza de medição

u = incerteza padrão

u_c = incerteza padrão combinada

De = diâmetro externo do CP

3.7 Cavacos

Os cavacos foram coletados e armazenados em sacos plásticos fechados. Imagens de microscopia óptica, através do microscópio óptico marca Olympus modelo SZ61 com características de ampliação máxima de 45 vezes, com diferentes ampliações foram realizadas para caracterizá-los ao final da MS.

3.8 Rugosidade e perfilometria

A rugosidade do PLA impresso e usinado foi medida por técnica sem contato mecânico, uma vez que testes com rugosímetro e perfilômetro de contato provocaram deformação plástica da superfície dos CPs. As medições, então, foram realizadas no interferômetro laser UBM atualizado, com o objetivo foi comparar as rugosidades dos processos aditivo e subtrativo. As principais características do perfilômetro utilizado são o uso de sensor confocal

modelo KF3 à laser com resolução de 20 nm, faixa de medição de 1 000 μm , sistema de movimentação com repetibilidade unidirecional de 0,5 μm , máxima velocidade de translação de 30 mm/min e deslocamento máximo dos eixos x e y de 100 mm;

Foi projetado um suporte responsável por nivelar um conjunto de peças para serem medidas em sequência, minimizando o tempo de medição. O suporte foi idealizado para ser fabricado por MA de PLA, porém na opção cinza, na mesma impressora Cliever®. O objetivo foi fixar simultaneamente vários CPs com a possibilidade de ajuste de inclinação dos eixos e nivelamento do topo das peças de modo que os CPs permanecessem dentro da faixa de medição e uma rotina automatizada de medição fosse implementada, haja vista a perfilometria levou 25 minutos por peça. Um conjunto de 15 CPs no suporte fixado à mesa do interferômetro é mostrado como exemplo de medição na Figura 3.13.

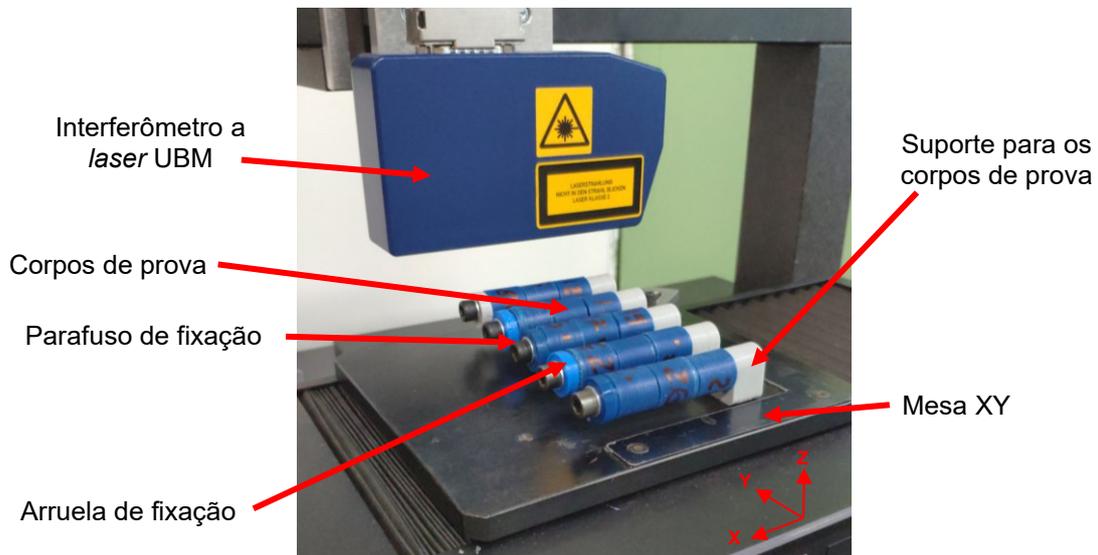


Figura 3.13 – corpos de prova montados no suporte sobre a mesa para medições de rugosidade e perfilometria.

A medição da rugosidade foi realizada nos CPs antes e após a usinagem com a aquisição de 3 leituras bidimensionais para avaliar o perfil da peça e uma perfilometria em uma área de 1 mm por 1 mm para caracterizar a superfície/topografia. Todas as medidas foram feitas perpendicularmente as marcas de avanço e deposição de material, conforme ilustrado na Figura 3.14.

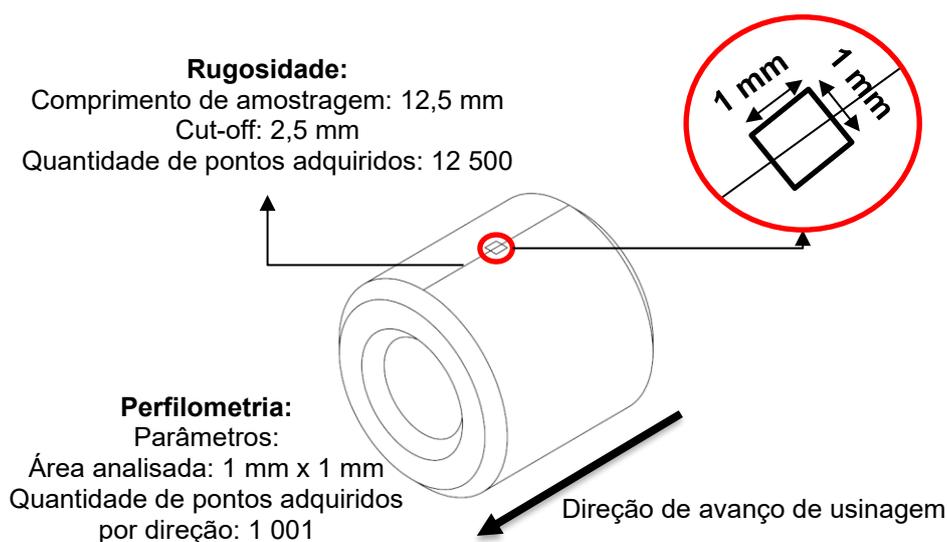


Figura 3.14 – Regiões de medição de rugosidade e perfilometria nos CPs.

Foram medidos os parâmetros de rugosidade, segundo a Norma ISO 4287, R_a , R_q , R_t e R_z de todos os CPs impressos e posteriormente torneados. Para CPs de 15 mm de comprimento foi empregado o *cut-off* de 2,5 mm e para os CPs de 45 mm *cut-off* de 8 mm. O filtro foi o gaussiano para todas as medições. Os valores de *cut-off* foram definidos com base na norma ISO 4288 e medições iterativas de rugosidade,

As análises topográficas das superfícies atenderam a Norma ISO 25178, extraindo-se os seguintes parâmetros: S_q , S_p , S_z e S_a .

A análise dos dados coletados no interferômetro foi realizada com o auxílio do software MountainsMap para plotagem dos gráficos perfilométricos e cálculos dos valores dos parâmetros de rugosidade e superfície.

3.9 Força de corte

O minitorno CNC empregado neste trabalho não permite a fixação da plataforma dinamométrica Klister de três componentes disponível no LEPU para medir a Força de Usinagem (F_u). As dimensões reduzidas da minimáquina e as dimensões da plataforma são incompatíveis. Sendo a Força de Corte (F_c) a componente mais significativa para avaliar a influência das alterações das condições de usinagem, foi adotado uma célula de carga de apenas uma componente para medir F_c . A seguir são apresentadas as etapas de calibração da célula de carga e a medição da F_c no torneamento cilíndrico externo do PLA.

3.9.1 Calibração da célula de carga

As F_c foram medidas por meio de uma célula de carga modelo MB da marca R&S® com faixa nominal de 200 N e sensibilidade de 2 mV/V. A F_c foi medida em apenas no sentido positivo. Para a aquisição dos dados foi utilizado o software Labview SignalExpress 3.0 e o tratamento dos dados foi realizado no Excel.

A célula de carga foi calibrada estaticamente por toda a sua faixa nominal. Foram utilizadas 21 massas-padrão para calibração no sentido crescente e decrescente da força. A taxa de aquisição foi de 1 000 pontos/segundo e cada massa foi avaliada por 5 segundos, totalizando 5 000 pontos por massa. Findados os ensaios foram calculados os valores médios aritméticos, desvios padrão amostral, sensibilidade e a curva de calibração.

Os valores das massas, bem como a ordem dos incrementos seguem listados na Tabela 3.5, na Figura 3.15, por sua vez, é apresentado um esquema da montagem do sistema de calibração.

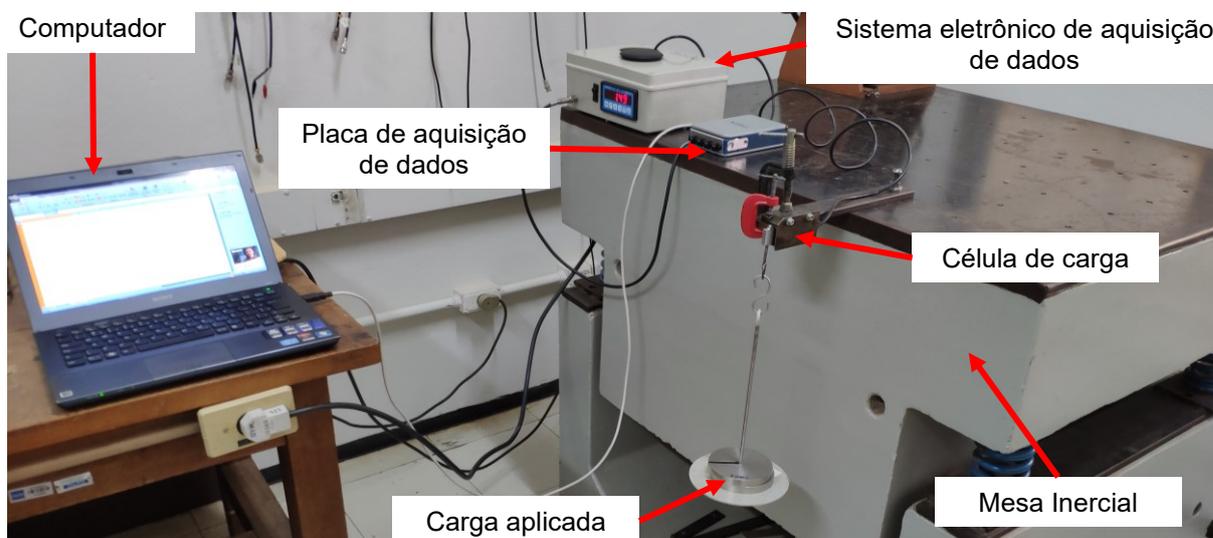


Figura 3.15 – Montagem do sistema de medição de força durante a calibração.

O procedimento de calibração fez uso da célula de carga, suporte de fixação da célula de carga, condicionador de sinal com mostrador, cabo blindado com conector BNC, microcomputador, placa de aquisição de sinais, massas conhecidas, suporte de massas e balança analítica. A célula de carga foi fixada sobre uma mesa inercial com frequência natural de 2,5 Hz no sentido de aplicação das cargas para evitar influências externas.

A curva de calibração calculada por regressão polinomial de grau um (regressão linear) é apresentada na Figura 3.16 para os valores de massa (g) e tensão elétrica (V). Para a sua

obtenção foi realizada a média aritmética dos valores de tensão obtidos no sentido crescente (adição de massas) e decrescente (retirada de massas). A partir da equação da reta encontrada na calibração foi possível encontrar também a sensibilidade do sistema de medição de força com valor de 1 997,51g/V.

Realizada a calibração a equação resultante foi inserida no software de aquisição de dados de forma a fornecer valores de força durante os ensaios. Porém, para que os valores de força, inicialmente calibrados em gramas, fossem apresentados em Newtons foi necessária à sua conversão multiplicando-se pela aceleração da gravidade, com valor de aproximadamente 9,81 m/s². Desta forma a equação de calibração inserida no software de aquisição passou a ser representada conforme a Equação 5, na qual V é o valor de tensão obtidos pelo sensor durante os ensaios e f(V) é o valor de força final.

Tabela 3.5 – Tabela de massas e incrementos para o sistema de calibração.

Etapa	Massa da etapa (gramas)	Massa incrementada (gramas)
1	0,00	0,00
2	20,00	20,00
3	29,59	49,59
4	59,49	109,08
5	59,76	168,84
6	59,90	228,74
7	60,00	288,74
8	70,78	359,52
9	40,69	400,21
10	404,00	404,00
11	259,30	933,30
12	529,40	1 462,70
13	533,00	1 995,70
14	533,20	2 528,90
15	536,80	3 065,70
16	543,10	3 608,80
17	984,00	4 592,80
18	1 980,00	6 572,80
19	2 518,00	9 090,80
20	4 970,00	14 060,80
21	5 050,00	19 110,80

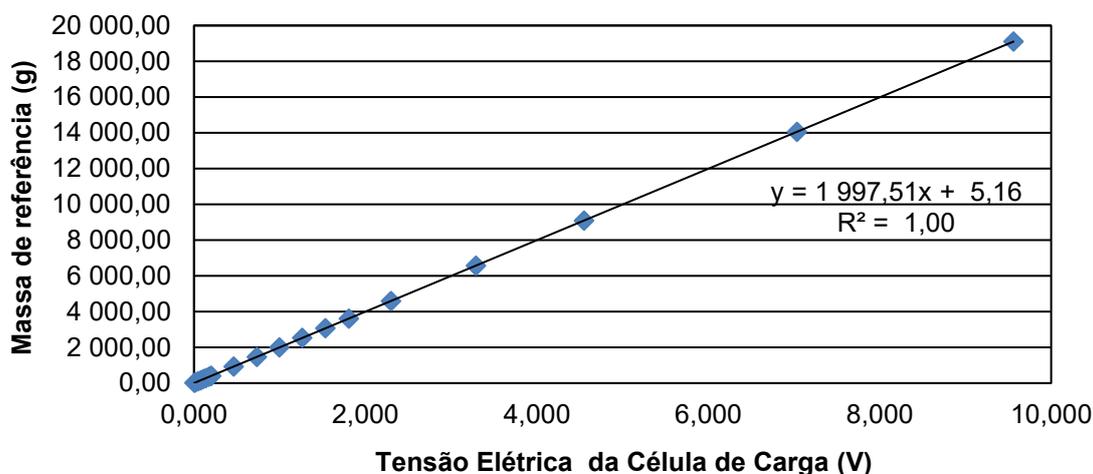


Figura 3.16 – Curva de calibração da célula de carga.

$$f(V) = 19\,595,57V + 50,62 (N) \quad (5)$$

3.9.2 Força de corte no torneamento

Após os procedimentos de calibração da célula de carga foi possível iniciar o procedimento de aquisição de forças de corte para a usinagem. Entretanto, algumas etapas de preparação e montagem do sistema foram necessárias, anteriores as medições.

Foi necessário o desenvolvimento de um suporte de ferramentas para a fixação dos insertos de metal duro utilizados na usinagem, já que o suporte de ferramenta SDACR 1212K 07-S não pôde ser fixado diretamente na célula de carga. Este suporte foi fabricado em aço carbono ABNT 1045 e as medidas deste componente foram escolhidas de forma a garantir o posicionamento da ponta da ferramenta no centro da peça. Foi projetada também um suporte responsável por fixar a célula de carga no castelo porta ferramentas do minitorno, sendo em aço carbono ABNT 1050. O desenho do suporte de ferramentas, bem como a montagem esquemática deste conjunto é apresentado na Figura 3.17 e o desenho técnico completo do suporte é mostrado no APÊNDICE 9. Para que a célula de carga não sofresse danos durante o processo de usinagem foi instalada em sua lateral uma placa de proteção, feita em aço ABNT 1045.

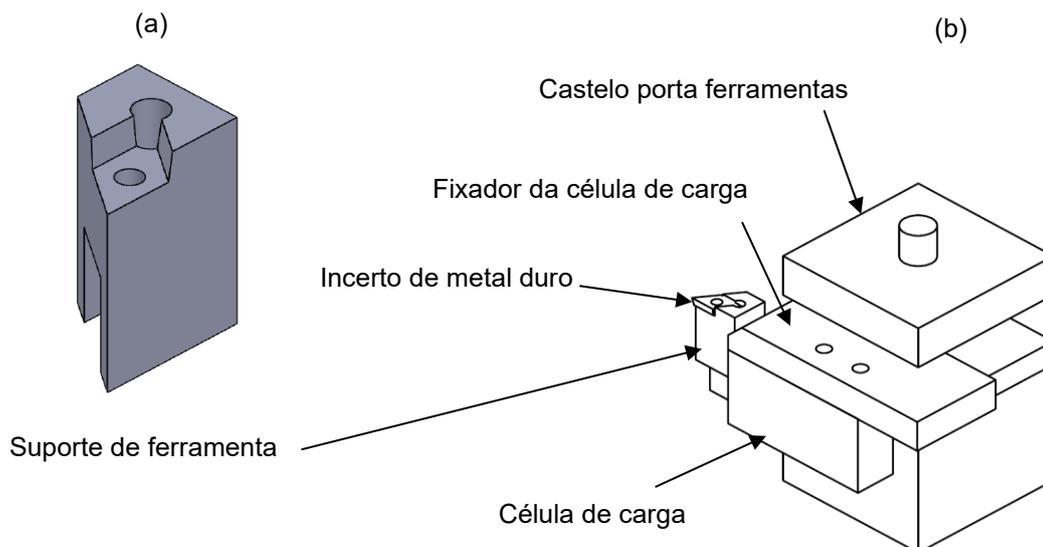


Figura 3.17 – Desenho esquemático do (a) suporte de ferramenta projetado e da (b) montagem do conjunto de fixação da célula de carga no castelo porta-ferramentas.

A montagem completa do sistema de aquisição de força de corte segue o mesmo modelo apresentado na Figura 3.15, com exceção as massas utilizadas para calibração.

Anterior ao processo de aquisição de dados foi necessário que o sistema eletrônico permanecesse ligado por cerca de 20 minutos em estabilização para então se realizar o início da coleta dos dados. Além disso, antes de cada coleta foi pressionado o botão de tara do sistema para evitar erros sistemáticos nas medições.

O tempo de aquisição nos ensaios foi de 2 segundos com aquisição de 2 000 pontos. Esta escolha foi baseada na condição de usinagem que apresentou o menor tempo de torneamento. Deste modo todas as aquisições foram realizadas com os mesmos parâmetros de aquisição. Além disso, o início da coleta dos dados se deu após a ferramenta estar completamente engajada no corpo de prova no processo de torneamento em regime permanente.

A análise dos dados foi realizada com o auxílio do Excel considerando a média aritmética dos valores de força para cada condição de corte analisada.

3.10 Microscópio óptico

O estereoscópio da marca Olympus modelo SZ61 com características de ampliação máxima de 45 vezes foi utilizado para a verificação do aspecto superficial dos CPs e das ferramentas utilizadas durante a realização deste trabalho. Para a captura de imagens foi utilizada a câmera digital para microscópio da marca Olympus modelo LC30 com saída USB 2.0 para conexão em computadores e o programa Olympus *Stream Start*.

As capturas foram realizadas nos CPs nas condições inicial e final em várias ampliações.

3.11 Microscópio eletrônico de varredura

O MEV da marca Hitachi modelo TM-3000 com ampliação máxima de 30 000 vezes foi utilizado para a verificação dos mecanismos de desgaste das ferramentas ocasionados pela usinagem dos CPs. As análises foram realizadas em ambiente com temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Foram obtidas imagens após cada passe de usinagem realizado.

É importante ressaltar as análises dos CPs por meio deste tipo de equipamento não foram possíveis de serem capturadas já que o material PLA, por se tratar de um polímero, não poderia ser observado devido a sua característica de baixa condução elétrica, característica essencial para a o uso do MEV.

3.12 Tabela resumo dos processos aditivo e subtrativo

Na Tabela 3.6 estão resumidos os parâmetros de processos de entrada e as variáveis de saída do planejamento experimental deste trabalho agrupados em manufatura aditiva e manufatura subtrativa. Para cada ferramenta, DCGX 070204 AL 1105 e DCMT 070202, foram realizados os mesmos ensaios.

Tabela 3.6 – Parâmetros de Entrada e Variáveis de Saída.

	Variáveis de entrada	Variáveis de saída
Manufatura aditiva	<p>Material: PLA azul</p> <p>Porcentagem de preenchimento: 30 %</p> <p>Forma de preenchimento: hexagonal (H)</p> <p>Orientação de deposição: Z</p> <p>Espessura ou quantidade de camadas externas: 3</p> <p>Espessura ou quantidade de camadas de base e topo: 2</p> <p>Temperatura de extrusão do bocal: 185 °C</p> <p>Temperatura da mesa: 50 °C / 40 °C</p> <p>Altura das camadas depositadas: 0,19 mm</p> <p>Tamanho dos corpos de prova: 15 mm e 45 mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões dos CPs - Circularidade e Cilindricidade - Microscopia óptica - Rugosidade e perfilometria
Manufatura subtrativa	<p>Velocidade de corte (vc) 20,0 m/min, 35,0 m/min e 70,0 m/min</p> <p>Avanço (f) 0,05 mm/volta, 0,10 mm/volta e 0,15 mm/volta</p> <p>Profundidade de corte (ap) 0,35 mm, 0,45 mm e 0,60 mm</p> <p>Ferramentas de corte DCGX 0702 04 AL 1105 e DCMT 0702 02</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões dos CPs - Circularidade e Cilindricidade - Rugosidade e perfilometria - Cavacos - Força de corte - Desgaste da ferramenta de corte

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contém os resultados obtidos de acordo com o planejamento experimental proposto no Capítulo III. Os resultados foram divididos em 3 itens principais, são eles: 4.1 manufatura aditiva, 4.2 manufatura subtrativa e 4.3 manufatura híbrida.

4.1 Manufatura aditiva

Para melhor compreensão, este item foi subdividido em 4.1.1 dimensões dos CPs, 4.1.2 circularidade e cilindricidade, 4.1.3 microscopia óptica e 4.1.4 rugosidade.

4.1.1 Dimensões do CP

A avaliação dimensional dos CPs logo após a MA demonstrou que houve variação de dimensões de todas as peças fabricadas mesmo que as dimensões de projeto e parâmetros de impressão fossem idênticas. A partir da realização do cálculo das incertezas de medição de diâmetro externo foi verificado que a variabilidade associada à média dos resultados influenciou de forma majoritária na incerteza de medição. Tal influência pode ser associada a quantidade de medidas realizadas por CP que pode ter sido insuficiente para mitigar tal influência. Além disso foi percebido que a repetibilidade do processo de impressão pode ser difícil de controlar, levando aos resultados e variações encontrados.

As medições foram divididas em dois lotes, já que para cada ferramenta de corte utilizada foram fabricados 27 CPs. Deste modo, são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 os resultados de medição de cada um desses lotes identificados pelo nome da ferramenta correspondente da MS.

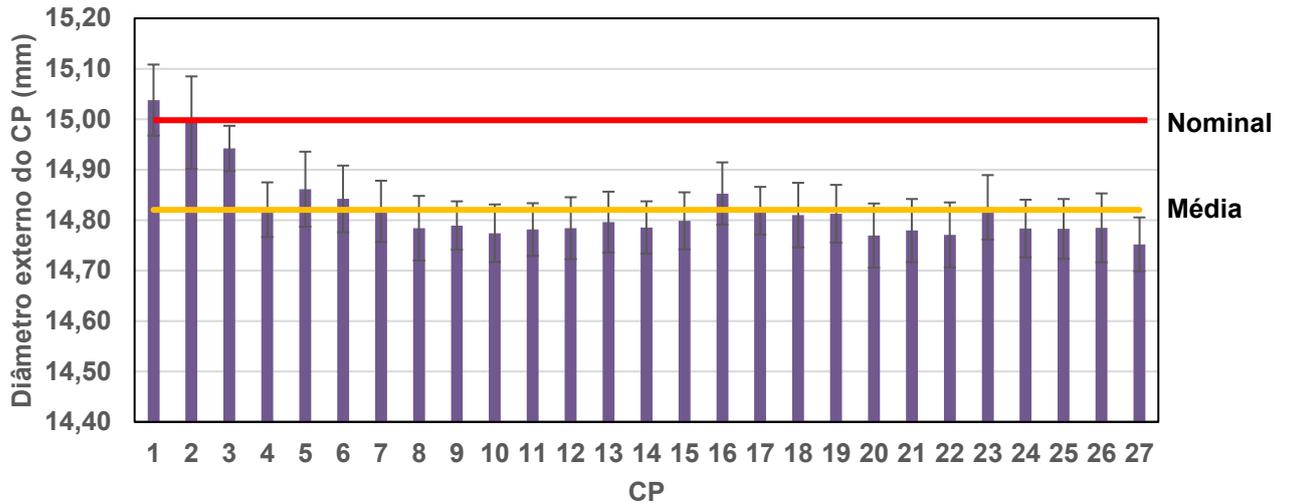


Figura 4.1 – Resultado de medição dos CPs anterior à usinagem do 1° lote.

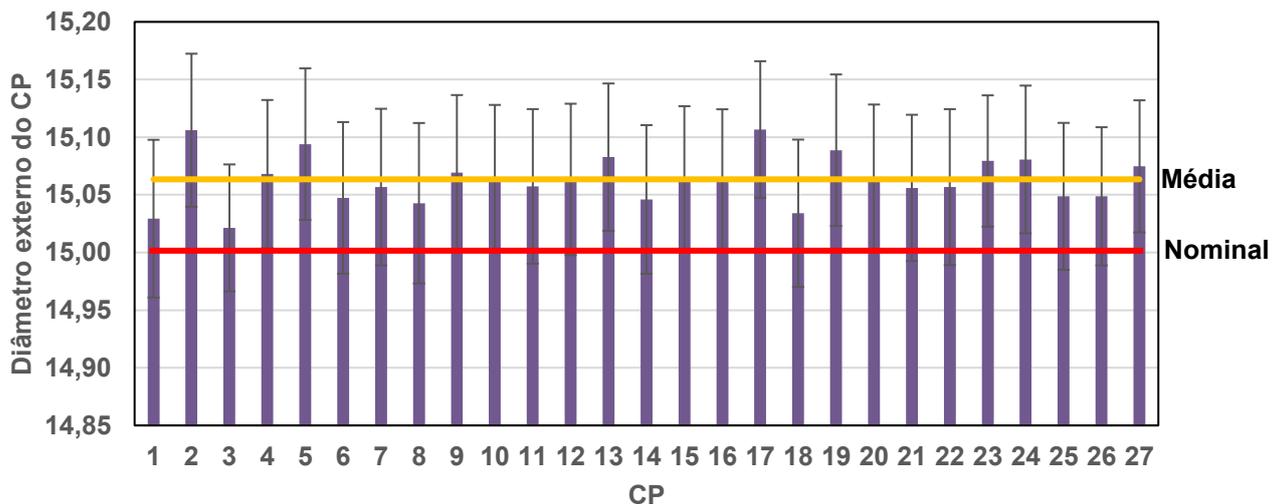


Figura 4.2 – Resultado de medição dos CPs anterior à usinagem do 2° lote.

Os valores de incertezas de medição observados após a MA dos CPs podem ser associados as classes de tolerâncias propostas pela ISO 286-1 (2010) variando entre as classes IT 9 à IT 11 para todos os 54 CPs impressos. Essa classificação está de acordo com os resultados obtidos por Rosa (2019) e por Lieneke *et al.* (2015), onde as faixas de tolerâncias encontradas são semelhantes. Entretanto, por se tratar de geometrias, parâmetros de impressão e equipamentos diferentes, a comparação de resultados das tolerâncias encontradas podem apresentar diferenças. A Tabela de classificação de tolerâncias utilizada é apresentada no ANEXO 3.

As diferenças de medidas de projeto e dos CPs fabricados puderam ser confirmadas pela comparação das imagens obtidas por microscopia óptica e o desenho em CAD. As camadas externas que inicialmente deveriam apresentar a dimensão de 0,4 mm do diâmetro, igual ao do bocal de extrusão, apresentaram valores diferentes. As dimensões dos vazios controlados, previstos pelos parâmetros de impressão, utilizados apresentaram variações, as qual podem ser verificadas na Figura 4.3.

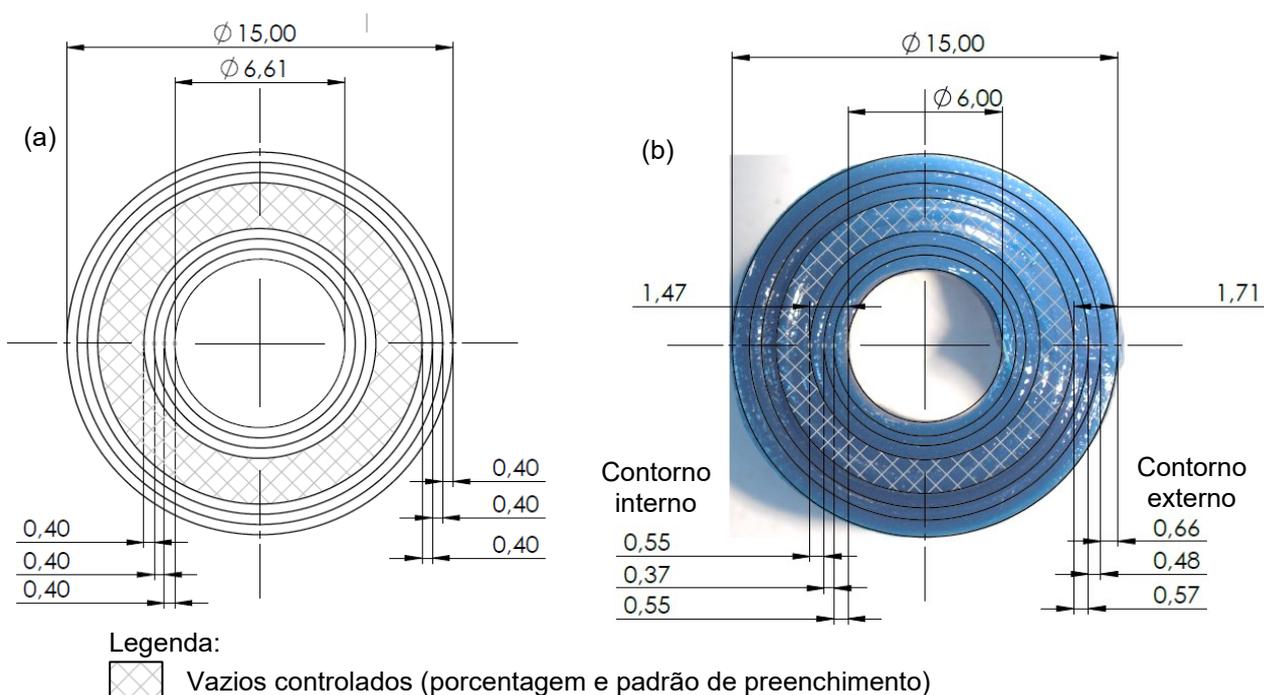


Figura 4.3 – Representação da vista superior do projeto em (a) CAD e (b) CP impresso.

4.1.2 Circularidade e cilindridade

Os resultados de circularidade e cilindridade observados para os CPs após a MA demonstraram que estes desvios de forma apresentaram valores entre 142,48 μm à 389,34 μm para a circularidade e 151,01 μm à 517,14 μm para a cilindridade. Os valores encontrados nas medições de cada um dos 54 CPs são apresentados nas Figura 4.4 e 4.5. Os resultados apontados por Vitolo *et al.* (2018) sugeriram que as peças de maior dimensão apresentam desvios de forma superiores. Já os resultados obtidos nessa pesquisa sugerem que as peças impressas com 45 mm de comprimento apresentaram valores médios similares aos resultados encontrados para os CPs de 15 mm, conforme apresentado na Tabela 4.1.

As diferenças entre os resultados entre os CPs a serem usinados por diferentes ferramentas pode ser atribuída ao fato de que as peças foram fabricadas sequencialmente,

porém as condições do filamento não foram verificadas após a abertura do mesmo, podendo ter sofrido alguma influência externa durante a fabricação dos CPs, por exemplo absorção de umidade.

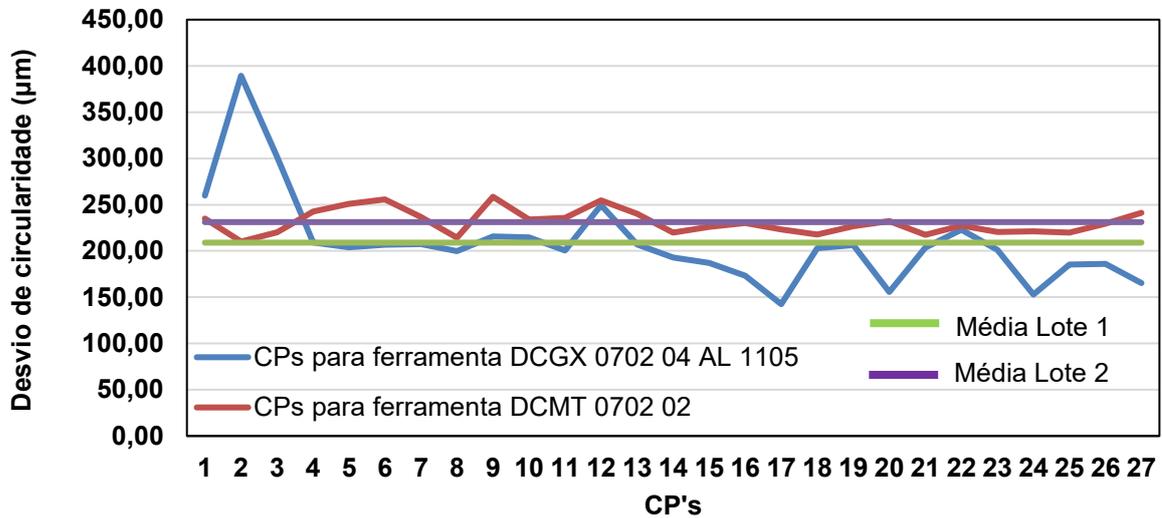


Figura 4.4 – Resultados de circularidade dos CPs anterior ao processo de manufatura subtrativa.

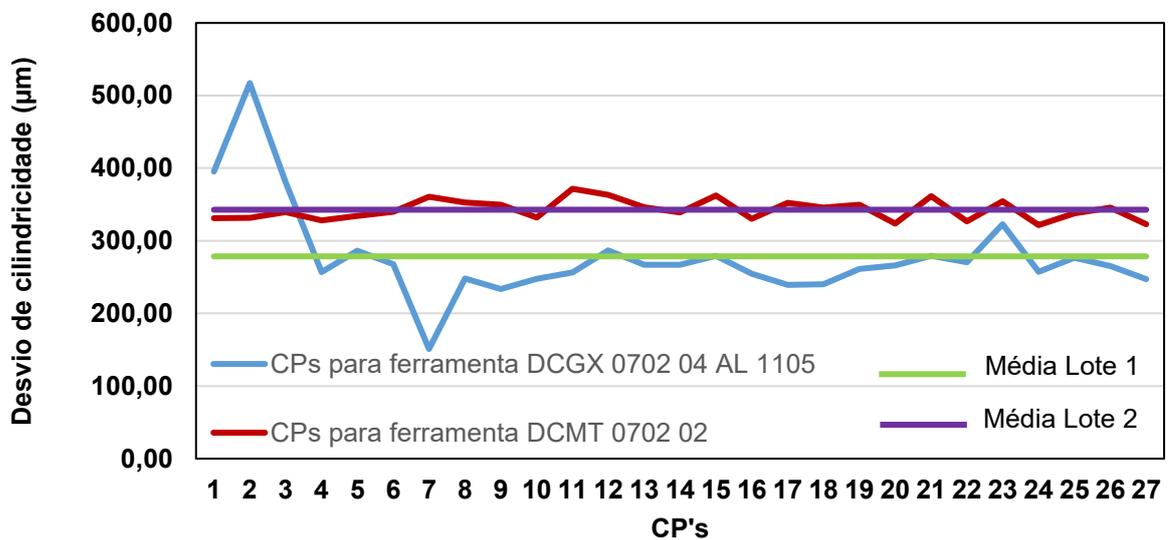


Figura 4.5 – Resultados de cilindridade para os CPs das duas ferramentas anterior ao processo de manufatura subtrativa.

Tabela 4.1 – Valores médios para os resultados de circularidade e cilindridade.

Diâmetro do CP	Circularidade média	Desvio padrão circularidade	Cilindridade média	Desvio padrão cilindridade
15 mm	220,07 μm	48,56 μm	310,66 μm	65,16 μm
45 mm	226,62 μm	25,22 μm	296,19 μm	41,04 μm

4.1.3 Microscopia óptica

Os resultados de microscopia óptica nesta etapa do trabalho tiveram seu papel associado a análise superficial da peça e verificação das possíveis causas dos desvios de forma e dimensionais já mensurados. O defeito causado nos CPs pela sobreposição da trajetória de deposição na mesma região do contorno do CP foi identificado em todos os CPs, sem exceção. As ondulações apresentadas na superfície, característica marcante de peças fabricadas por FFF, contribuíram também nos resultados de medição e podem ser observadas na Figura 4.6.

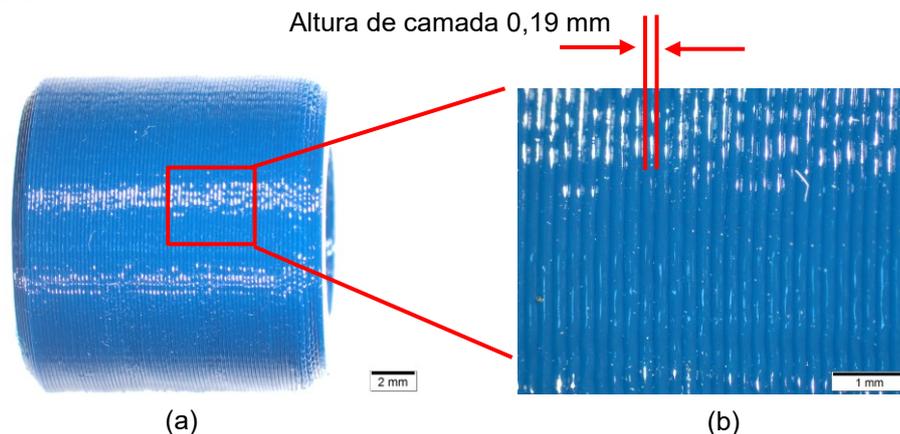


Figura 4.6 – Imagem de microscopia óptica dos CPs.

4.1.4 Rugosidade

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores médios dos parâmetros de rugosidade para a peça de 45 mm.

Ra	Rq	Rt	Rz
29,83 μm	36,18 μm	227,60 μm	186,83 μm

Os valores de Ra encontrados estão próximos aos encontrados por Alsoufi e Elsayed (2017) que avaliaram a rugosidade de PLA para parâmetros de impressão (altura de camada 0,1 mm, porcentagem de preenchimento 100 %, diâmetro do bocal extrusor 0,3 mm) e sentido de impressão similares aos utilizados neste estudo.

4.2 Manufatura subtrativa

Este item foi subdividido nos subitens: 4.2.1 preparação de CPs e ensaios preliminares e 4.2.2 ensaios finais de torneamento cilíndrico externo do PLA.

4.2.1 Preparação de CPs e ensaios preliminares

Baseado nos resultados de Rosa (2019) e Rosa *et al.* (2019) foram impressos os 54 CPs com os parâmetros de impressão apresentados na Tabela 3.1.

As diferenças dimensionais verificadas nos CPs impressos, em média 200 μm , e o fato deles apresentarem também desvios de forma na ordem de 250 μm , fizeram com que fossem escolhidas 3 camadas de perímetro externas para a fabricação dos corpos de prova como sobrematerial para usinagem. Devido as dimensões de projeto, a quantidade de camadas externas permitiu que toda camada externa fosse removida sem expor o núcleo e padrão de preenchimento da peça.

Foi necessário a realização de testes de usinagem para a definição de uma profundidade de corte mínima que removesse completamente este batimento e removesse material em toda a superfície da peça durante os ensaios. O resultado deste teste segue apresentado na Figura 4.7, no qual foi possível perceber que, a partir de 0,35 mm, o batimento foi completamente removido da peça. A partir desta seleção de profundidade de corte houve o deslocamento do centro de rotação da peça em 0,35 mm, representado pela Figura 4.8, implicando na área de usinagem destacada em vermelho.

Os testes para o batimento radial dos CPs foram realizados até a profundidade máxima de 1,15 mm, visto que devido as dimensões do mandril de fixação não seria possível usinagens com profundidades maiores.

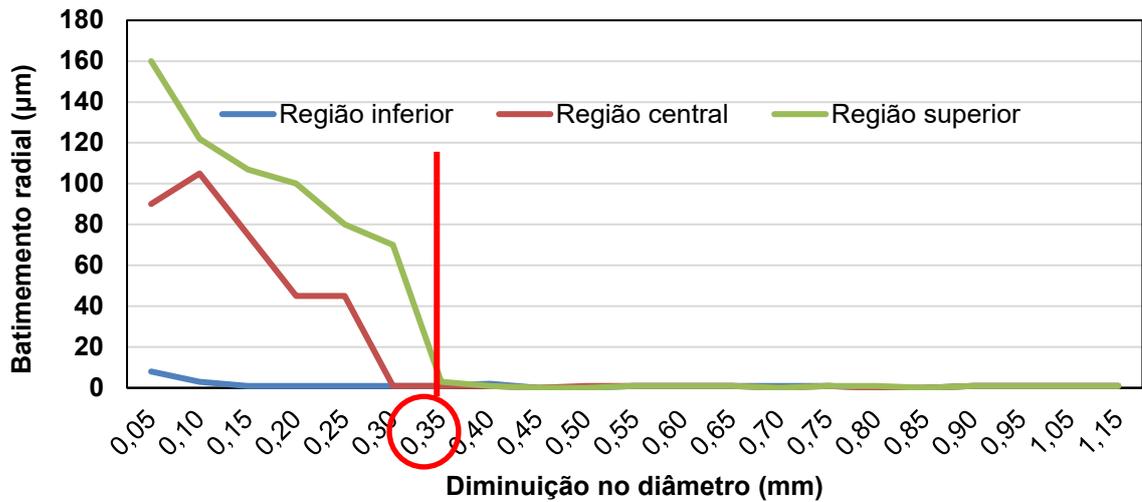


Figura 4.7 – Evolução do batimento radial (μm) do conjunto peça e mandril em relação ao eixo-árvore do minitorno CNC com a redução do diâmetro da peça torneada. As regiões do CP referem-se as partes da peça durante a manufatura aditiva, sendo a inferior a parte que estava em contato com a mesa da impressora.

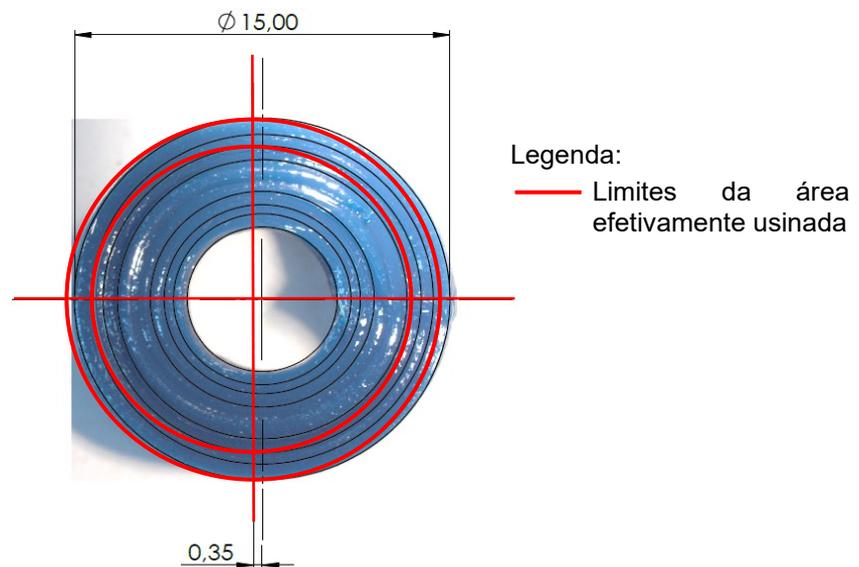


Figura 4.8 – Representação da área máxima removida por meio de usinagem nos ensaios de batimento radial considerando o deslocamento de 0,35 mm do centro do CP.

Reduzido o batimento radial para valores abaixo de 0,01 mm, resolução do relógio comparador, foram conduzidos ensaios preliminares de torneamento cilíndrico externo utilizando valores de velocidade de corte nas faixas de 20 m/min à 100 m/min e de profundidades de corte de até 1,15 mm.

Como o objetivo da usinagem foi proporcionar a melhora do acabamento superficial, condições nas quais foi percebida a aderência de material na peça foram descartadas para os ensaios finais. Este critério de avaliação ajudou na identificação das faixas de valores de velocidade de corte.

Foi notado que para valores acima de 70 m/min houve aderência de material em todo o comprimento usinado. Este tipo de aderência impediu que as análises dimensionais e de forma fossem realizadas já que, o material aderido não poderia ser removido sem algum tipo de ação mecânica ou uma segunda etapa de usinagem. Deste modo o valor máximo de v_c foi fixado em 70 m/min para os ensaios. Um exemplo deste tipo de superfície é apresentado na Figura 4.9a a qual foi comparada com uma peça usinada em condições que não proporcionassem aderência de material durante o torneamento, Figura 4.9b. Tal aderência foi atribuída à temperatura de corte que promoveu a fusão e solidificação do cavaco na superfície da peça.

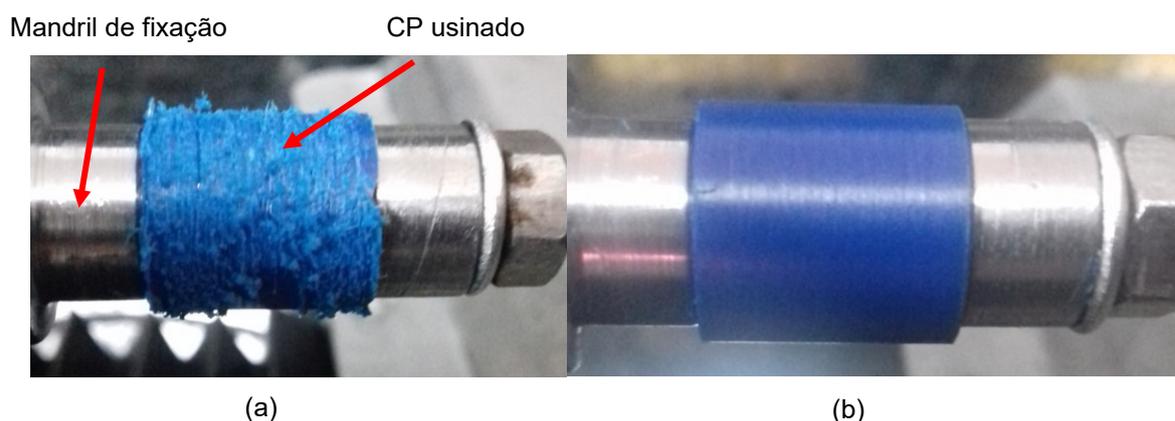


Figura 4.9 – Resultado do torneamento cilíndrico externo nas condições (a) $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,08$ mm e $f = 0,05$ mm/volta e (b) $v_c 70$ m/min, $a_p = 0,02$ mm e $f = 0,15$ mm/volta para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).

4.2.2 Ensaios finais

Este item foi subdividido nos subitens: 4.2.2.1 dimensões dos CPs, 4.2.2.2 circularidade e cilindridade, 4.2.2.3 rugosidade e perfilometria, 4.2.2.4 cavacos, 4.2.2.5 força de corte e 4.2.2.6 desgaste da ferramenta de corte.

4.2.2.1 Dimensões dos CPs

O cálculo das incertezas de medição do diâmetro externo também foi realizado após a MS. A variação das incertezas de medição para os CPs antes e depois da usinagem é mostrada em forma de gráficos nas Figuras 4.11 e 4.12 para as duas ferramentas. As variações das incertezas dimensionais das peças assumiram valores próximos de 0,02 mm, excetuando os CPs nas condições de $v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm e de $v_c = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm realizadas pela ferramenta DCMT 070202. O valor de incerteza foi igual para os CPs devido à resolução do paquímetro de 0,01 mm.

Os CPs nos quais o resultado não seguiu o apresentado tiveram seu valor de incerteza associado à aderência parcial de material durante a MS. Estes dois CPs são apresentados na Figura 4.10 e o material aderido está presente ao longo de toda a superfície do CP com destaque nas regiões demarcadas em vermelho onde a aderência foi mais acentuada.

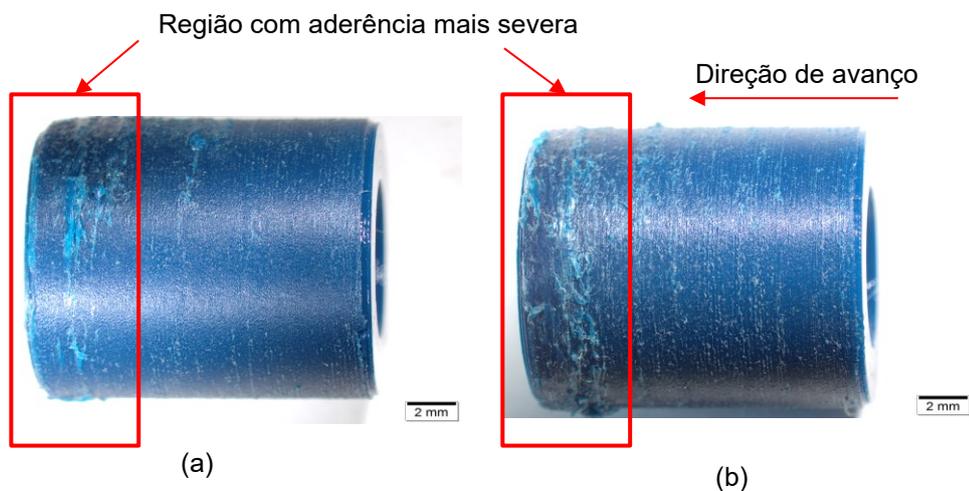


Figura 4.10 – Aderência de material nas condições de corte (a) $v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm e (b) $v_c = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm usinadas pela DCMT 0702 02 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN+TiN).

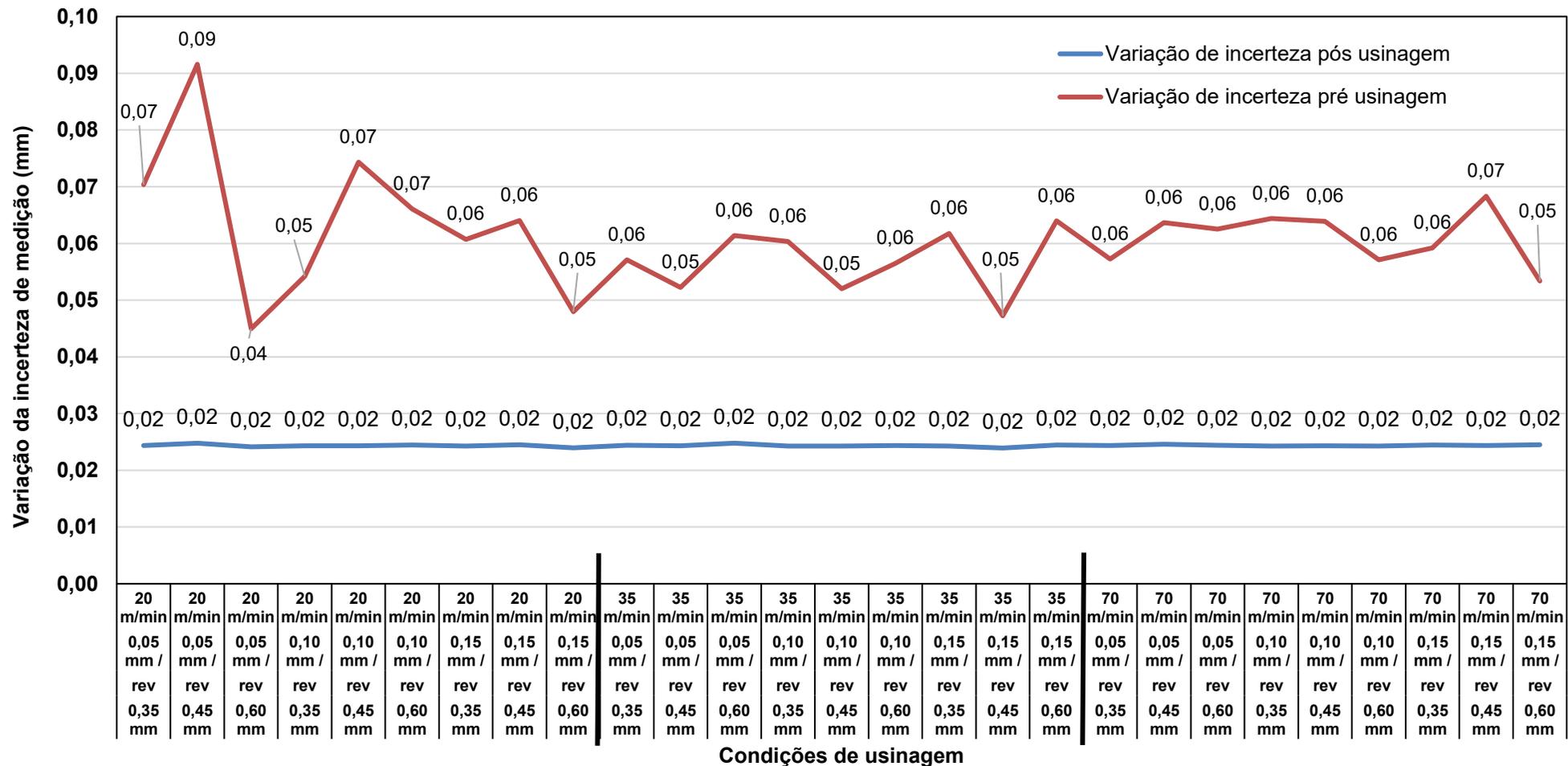


Figura 4.11 – Variação de incertezas de medição (mm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).

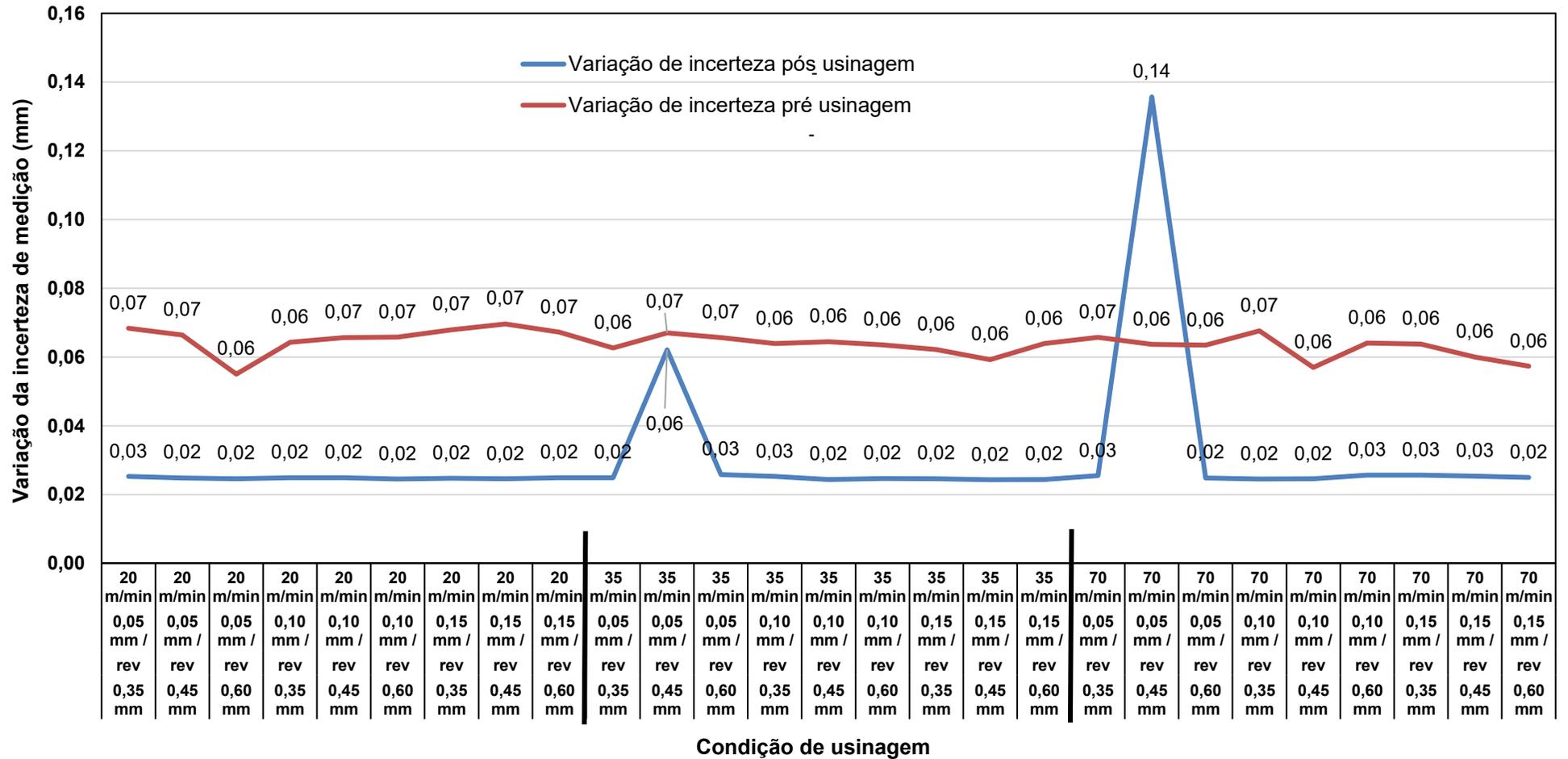


Figura 4.12 – Variação de incertezas de medição (mm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN) .

4.2.2.2 Circularidade e cilindricidade.

O resultado da medição de circularidade e cilindricidade apresentou um comportamento de redução em todas condições de corte avaliadas, com exceção de duas condições, resultando na diminuição dos valores medidos após a MS. Houve uma diminuição média de 93,53 % e 88,64 % nos valores de circularidade para as ferramentas DCGX 070204 AL 1105 e DCMT 070202, respectivamente. Já para a cilindricidade os valores da redução média foram de 89,95 % e 73,56 % para DCGX 070204 AL 1105 e DCMT 070202, respectivamente.

Os gráficos de valores de circularidade após a MS para as duas ferramentas estudadas foram plotados como apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14. A partir dos dados mostrados é possível notar que dentre os parâmetros de corte o avanço se mostrou mais influente para ambas as ferramentas, seguido da profundidade de corte e da velocidade de corte. O aumento do valor do f levou a uma tendência de diminuição da circularidade, o que pode ser explicado pelo menor tempo de contato entre a ferramenta e a peça, reduzindo a energia térmica e por consequência a fusão, solidificação e adesão de material durante a usinagem. O calor transformado durante o processo, quando acima da temperatura de transição vítrea do material termoplástico pode levar a piora do aspecto superficial como verificado por Davim *et al.* (2009).

A utilização da ferramenta DCGX 070204 AL 1105 promoveu resultados de circularidade inferiores aos valores encontrados na maioria das condições de corte estudadas quando comparadas ao uso da ferramenta DCMT 070202, o que pode estar associado ao fato de que aquela proporcionava a melhor saída do cavaco, diminuindo a possibilidade de aderência de material durante o processo de usinagem.

Os menores valores de circularidade foram encontrados nas condições de menor vc (20 m/min) para as duas ferramentas, o que sugere que esta faixa de vc possa ser mais apropriada no quesito de desvios desta natureza para futuros ensaios ou réplicas dos ensaios já conduzidos. A condição que apresentou menor valor de circularidade dentre os 27 ensaios foi $vc = 20$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm para DCGX 070204 AL 1105 e $vc = 20$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $ap = 0,60$ para DCMT 070202. Por se tratarem de condições similares, maior atenção ao estudo acerca destas faixas de valores pode ser interessante em pesquisas futuras.

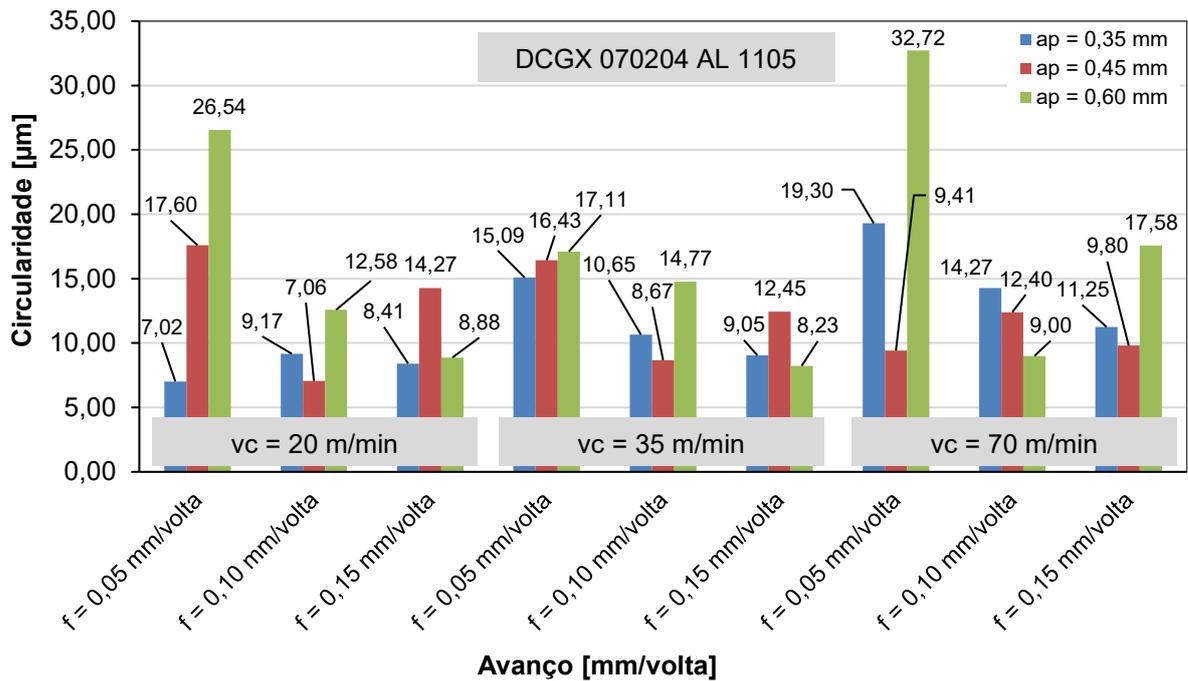


Figura 4.13 – Circularidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).

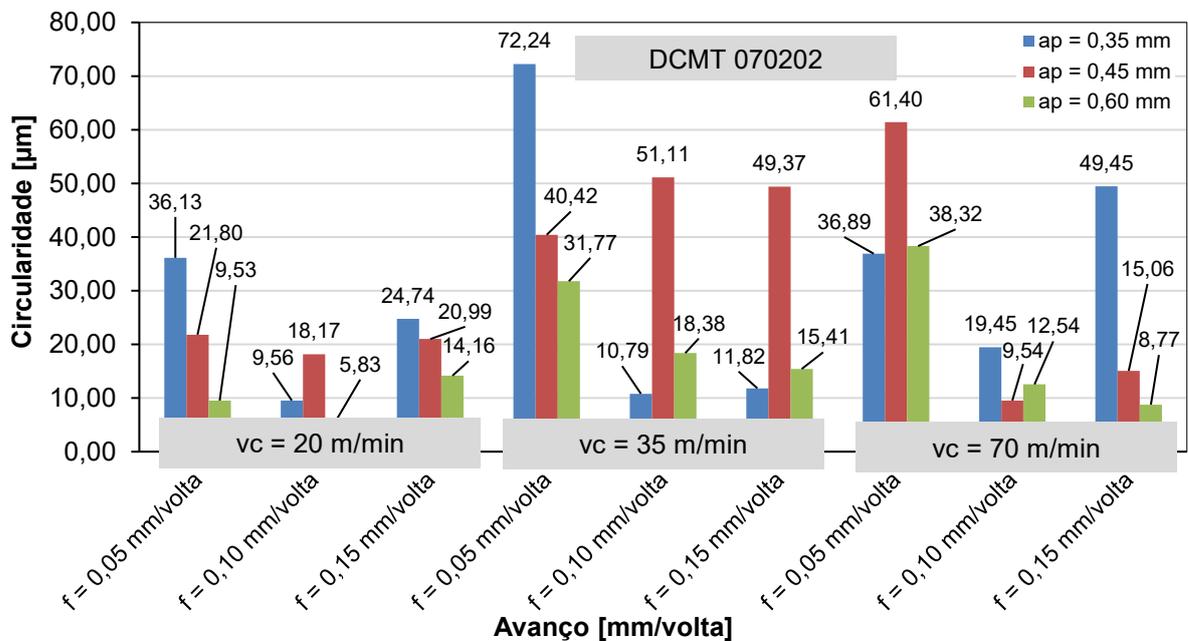


Figura 4.14 – Circularidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , e revestimento AlTiN+TiN).

Os gráficos de valores de cilindridade após a MS foram obtidos conforme apresentado pelas Figuras 4.15 e 1.16. Os parâmetros de corte estudados para o caso da cilindridade de acordo com a análise dos gráficos apresentaram tendências similares quando comparados entre as mesmas condições de corte para ferramentas diferentes. Assim como nos resultados da circularidade, a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 apresentou desempenho superior quando comparada à DCMT 070202 devido ao fato do melhor escoamento do cavaco na superfície de saída e, por consequência, menor geração de calor na usinagem e adesão de PLA na superfície da peça.

O aumento do avanço levou a diminuição dos valores de cilindridade para os CPs usinados com a ferramenta DCGX 070204 AL 1105, porém este efeito não é percebido no avanço de 0,10 mm/volta para a $v_c = 20$ m/min no qual há uma queda mais acentuada dos valores encontrados. Este efeito não foi verificado para o caso dos CPs usinados pela DCMT 070202. O parâmetro a_p não apresentou padrão de influência no comportamento no resultado de cilindridade para ambas as ferramentas.

O gráfico mostrado na Figura 4.16 apresentou duas condições de corte ($v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm e $v_c = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm) nas quais os valores foram superiores aos medidos nos CPs antes da etapa de MS. Estes valores estão associados à aderência de material mais severa ao final do comprimento de usinagem. Este efeito foi apontado por Davim *et al.* (2009), onde, devido aos processos térmicos provenientes da usinagem, há material termoplástico aderido oriundo da fusão e solidificação do mesmo.

Este tipo de comportamento do material termoplástico submetido a usinagem, bem como a aderência de material implicou diretamente no resultado de cilindridade já que o processo de medição realizado varreu toda a extensão da peça. Um exemplo dessa situação de aderência, foi verificado na condição de usinagem $v_c = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm.

Dentre todos os ensaios os melhores resultados obtidos, assim como na circularidade, foram para $v_c = 20$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta para as duas ferramentas, sendo o $a_p = 0,45$ mm para a DCGX 070204 AL 1105 e $a_p = 0,60$ mm para a DCMT 070202. Estes parâmetros se mostraram mais apropriados na redução dos desvios de forma e podem ser objeto de estudo em futuros ensaios.

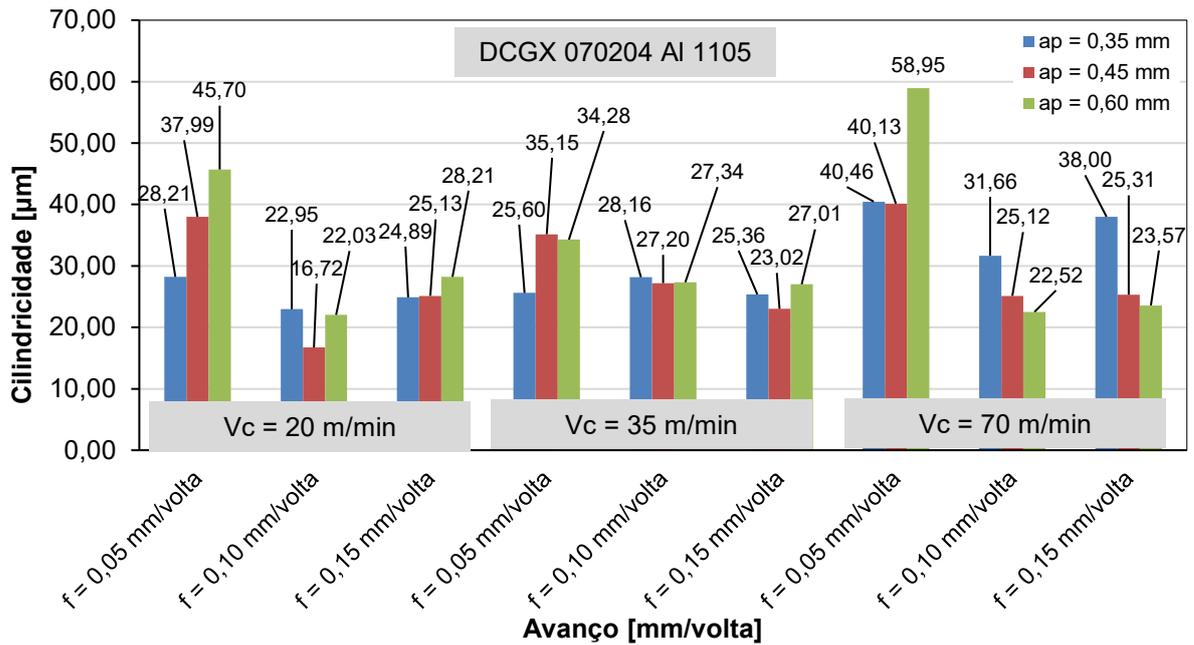


Figura 4.15 – Cilindricidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).

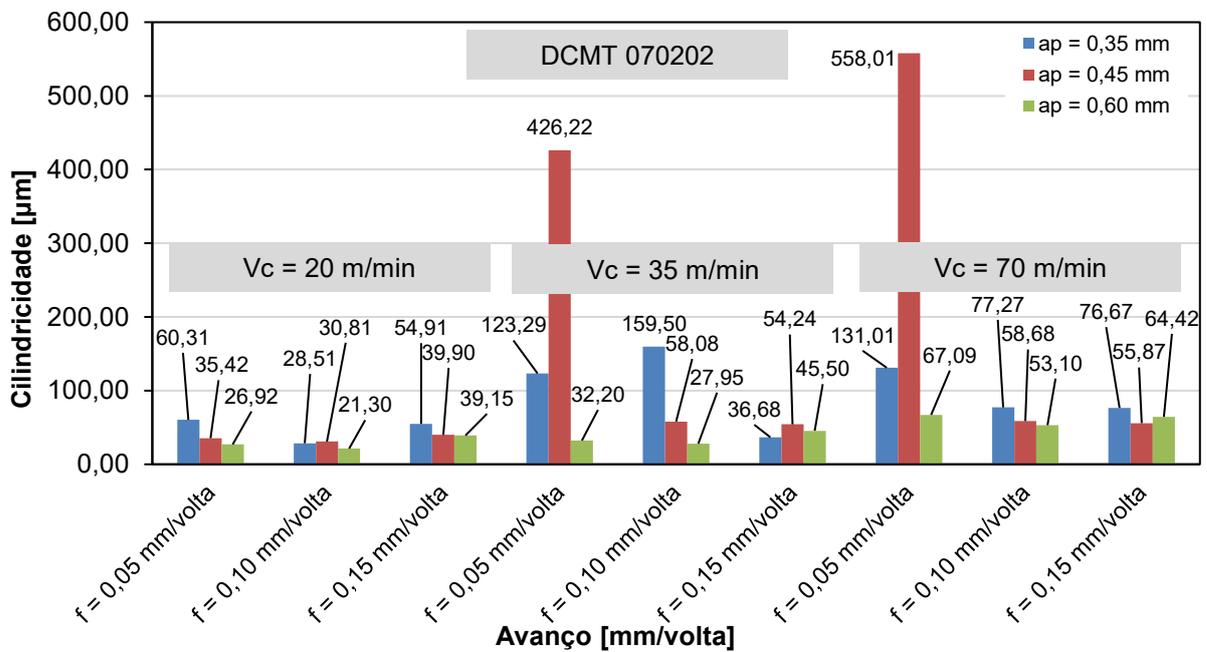


Figura 4.16 – Cilindricidade (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN+TiN).

4.2.2.3 Rugosidade e perfilometria

A caracterização da superfície usinada pelas imagens geradas nas medições de perfilometria. Fenômenos como a adesão de material, por exemplo, podem ser confirmados em corpos de prova que perderam as suas características de marcas de avanço do torneamento e evidenciaram a presença de picos muito acentuados no perfil de rugosidade extraído.

As peças de referência, utilizadas como padrão inicial de comparação anterior à MS, tiveram seus perfis de topografia com ondulações próprias do processo FFF de MA conforme mostrado na Figura 4.17a e puderem ser confirmados através da comparação do resultado da microscopia óptica do mesmo CP como mostrado na Figura 4.17b. Além disso, a dimensão das camadas depositadas (0,19 mm) pode ser verificada na área de 1 mm² já que neste espaço apresentado na imagem compreende pouco mais de cinco camadas completas.

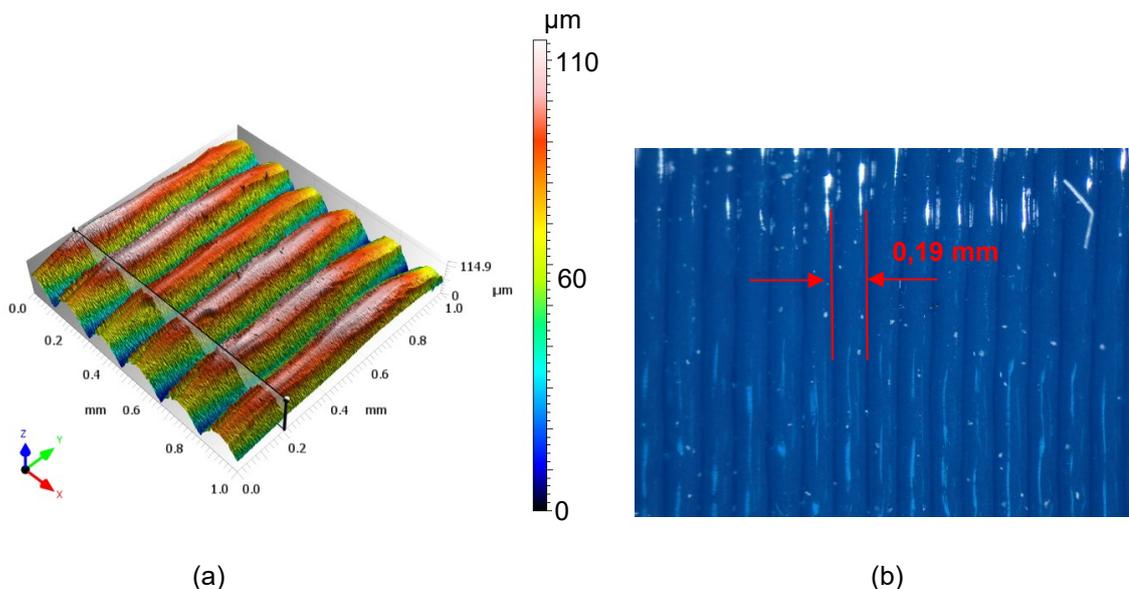


Figura 4.17 – (a) Topografia de referência de uma área de 1 mm² e (b) microscopia óptica do corpo de prova impresso com PLA azul, temperatura de extrusão 185 °C, temperatura da mesa 50 °C, número de camadas externas 3, quantidade de camadas de base e topo 2, padrão de preenchimento hexagonal, porcentagem de preenchimento 30 % e altura da camada 0,19 mm.

Os resultados de dois ensaios realizados nas condições de parâmetros de corte $v_c = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm cada qual para uma ferramenta de corte são apresentados nas Figuras 4.19 e 4.20.

As marcas de avanço do processo de usinagem em condições nas quais não houve aderência de material na superfície conseguem ser identificadas, como mostrado na Figura 4.18. Nas condições de aderência de material foi possível identificar apenas a descaracterização das marcas de avanço esperadas do processo de MS.

Além disso, a condição de usinagem $vc = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm foi justamente a que apresentou o segundo pior resultado na cilindricidade para a ferramenta DCMT 070202, sendo um dos casos nos quais a aderência prejudicou a qualidade da superfície.

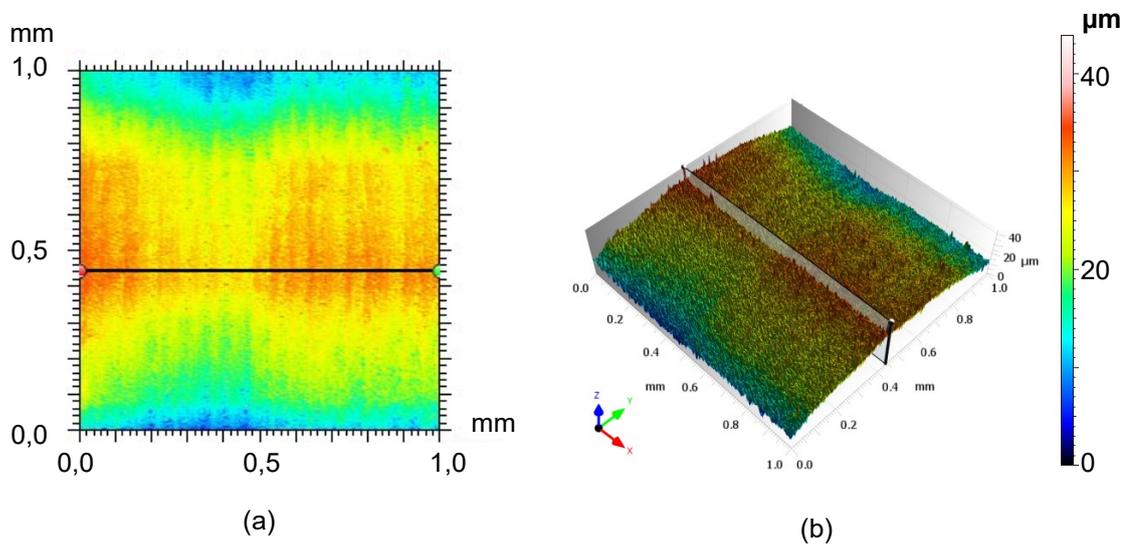


Figura 4.18 – Topografia do corpo de prova para torneamento usinado com parâmetros $vc = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm pela ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de $0,4$ mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN) na (a) vista superior e (b) em 3D).

Foram plotados nas Figuras 4.19 e 4.20 os valores de rugosidade Ra encontrados para cada uma das ferramentas utilizadas e todas as condições de corte testadas. Comparadas aos valores de referência houve uma redução de cerca de 89 % e 77 % para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 e ferramenta DCMT 070202, respectivamente.

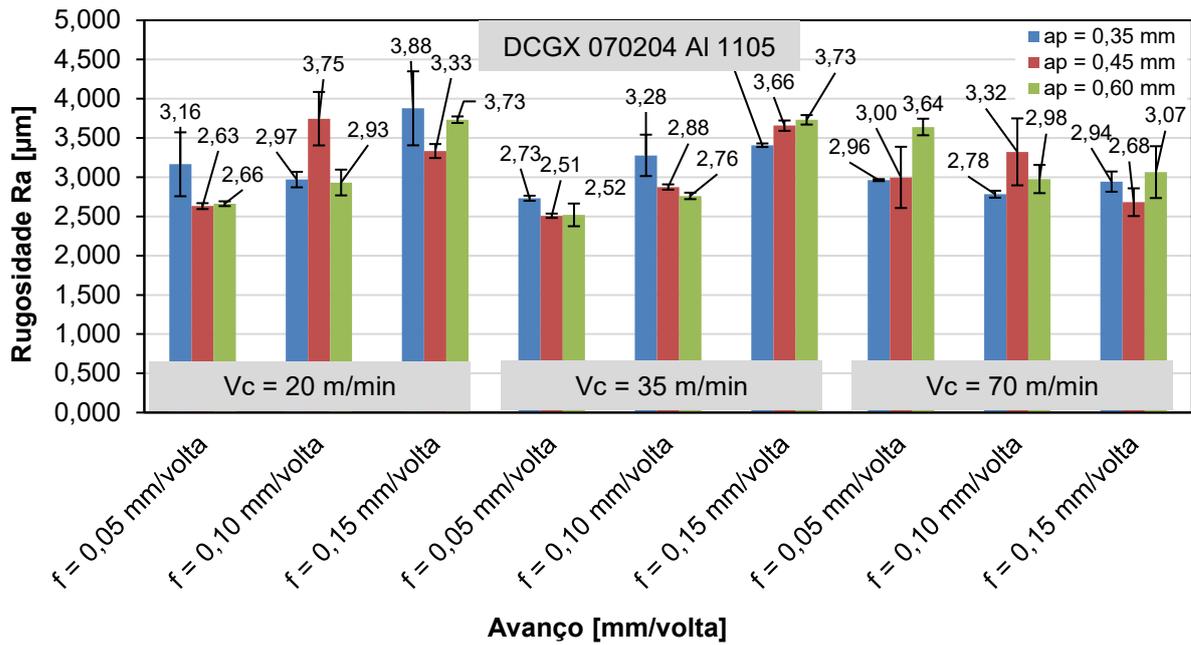


Figura 4.19 – Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).

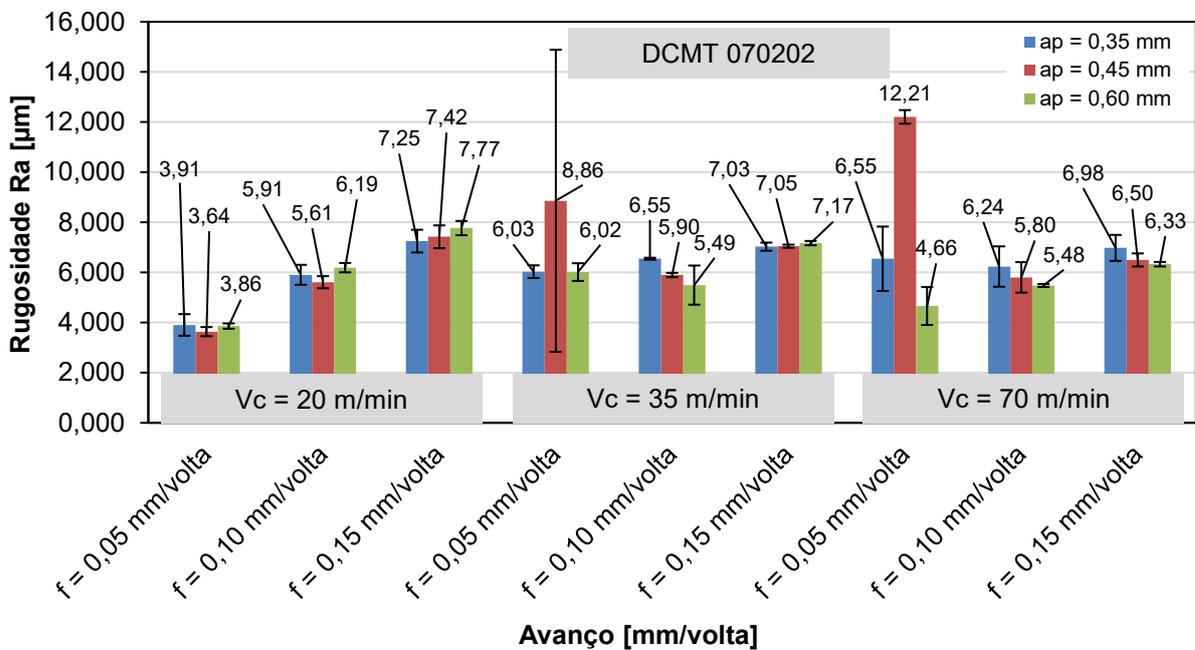


Figura 4.20 – Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° e revestimento AlTiN+TiN).

Dentre os parâmetros estudados, o f apresentou a maior influência nos resultados de rugosidade R_a à medida que seus níveis foram elevados ocorreu o incremento da rugosidade. Este tipo de comportamento também foi verificado por alguns autores na literatura, tais como Hamlaoui *et al.* (2017), Cabrera *et al.* (2011) e Eriksen (1999) no torneamento de materiais termoplásticos.

Os resultados de R_a para as duas ferramentas utilizadas apontaram que para a DCGX 070204 AL 1105 obteve melhor desempenho o que pode ser explicado pelo fato desta apresentar maior ângulo de saída. No estudo conduzido por Davim *et al.* (2009) menores valores de rugosidade foram associados à ângulos de saída maiores.

A influência do ângulo de saída se mostrou mais dominante do que a diferença em raios de ponta de cada inserto. Considerando apenas o raio de ponta e o cálculo da rugosidade R_a teórica, os valores de rugosidade deveriam diminuir à medida que há incrementos no valor do raio de ponta, para um mesmo valor de avanço, conforme sugerido por Jagtap *et al.* (2016), Tushar e Hemant (2015). Entretanto, conforme os resultados encontrados nos ensaios sugerem, houve o efeito inverso. A mudança no ângulo de saída dos incertos sendo 20° e 0,4 mm para a DCGX 070204 AL 1105 e 8° e 0,2 mm para a DCMT 070202 pode estar associada a mudança gerada nos resultados.

As condições que apresentaram os valores mais elevados de R_a foram $vc = 20$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $ap = 0,35$ mm para ferramenta DCGX 070204 AL 1105, com $R_a = 3,878$ μm e $vc = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm para a ferramenta DCMT 070202 com $R_a = 12,207$ μm . É interessante observar que o menor valor de R_a obtido pela ferramenta DCMT 070202, de $R_a = 3,637$ μm , foi muito próximo ao pior resultado da ferramenta DCGX, evidenciando sua superioridade na obtenção de menores valores de rugosidade R_a .

Algumas medições de rugosidade apresentaram um desvio padrão justificado pela adesão de material.

Foi observado para valores similares de R_a entre CPs usinados por ferramentas diferentes que a superfície apresentava diferentes resultados, conforme mostrado na Figura 4.21. As análises apenas pelo parâmetro de rugosidade R_a podem levar a uma avaliação errônea já que este valor é representado a partir de uma média aritmética, sendo apenas um parâmetro de verificação inicial.

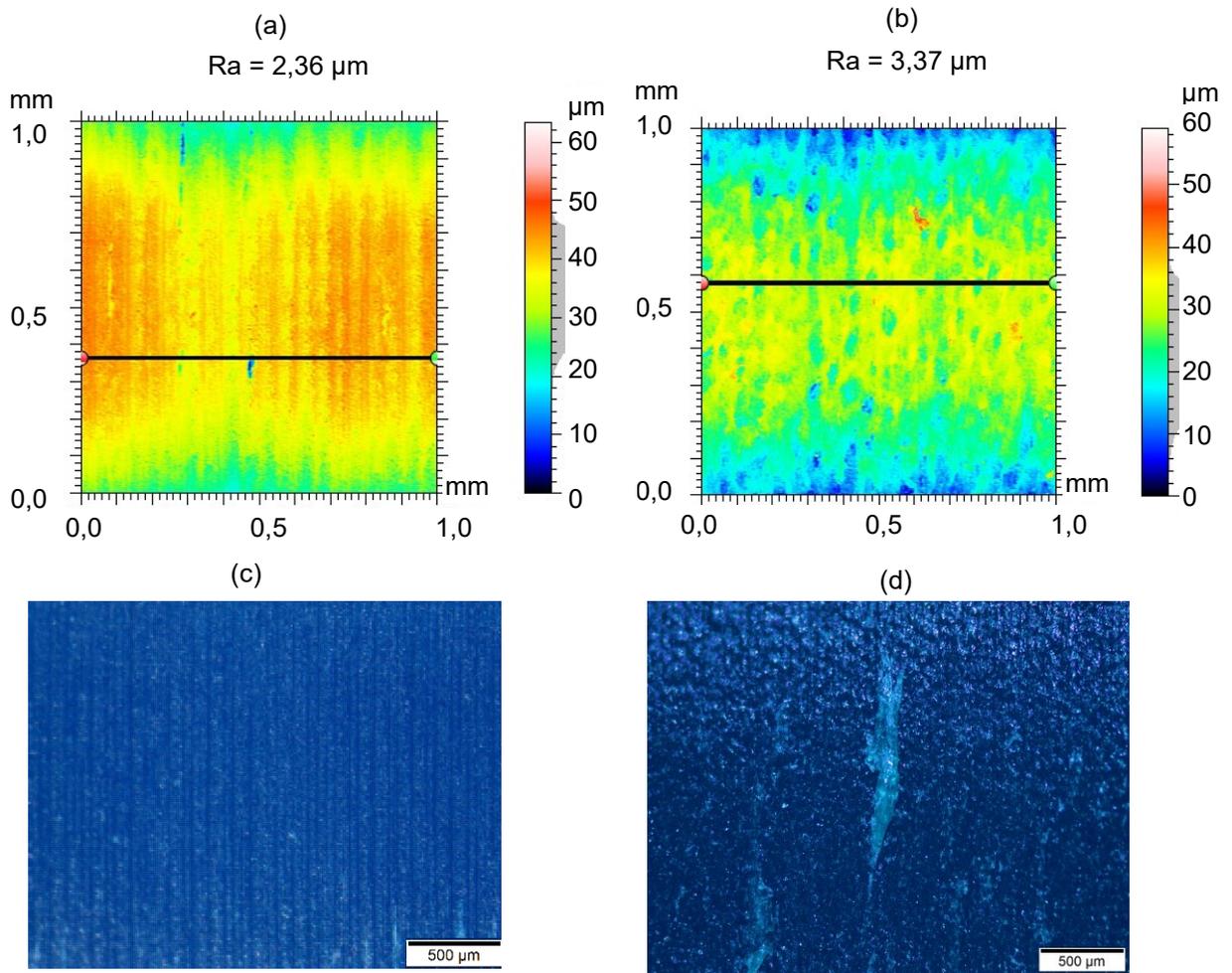


Figura 4.21 – Topografia e microscopia óptica do corpo de prova para torneamento usinado com parâmetros $v_c = 20$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $a_p = 0,45$ mm pela ferramenta (a) e (c) DCMT 070202 (ângulo de saída de 8° , raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento AlTiN+TiN) e (b) e (d) DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° , revestimento TiAlN).

Para a verificação estatística dos resultados de rugosidade, testes de normalidade e de igualdade entre variâncias foram previamente realizados para todos os resultados obtidos. Entretanto, apenas os resultados de rugosidade R_a para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 atenderam aos requisitos exigidos para a realização da ANOVA. Sendo assim, foram conduzidas as análises estatísticas acerca de R_a apenas.

Para um nível de significância de 5 %, apenas o avanço e a combinação de velocidade de corte e avanço foram considerados fatores que influenciam nos resultados de rugosidade R_a das peças usinadas já que o Valor-P delas foi inferior ao nível de significância escolhido.

Na Tabela 4.3 foram representados os resultados da ANOVA e os e os itens destacados como significantes são dos parâmetros influentes. Estes resultados estão de acordo com o que foi apresentado anteriormente nos gráficos e também está de acordo com o que é apresentado no estudo conduzido por Ferreira *et al.* (2020).

Tabela 4.3 – Análise de Variância da Rugosidade Ra (μm) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20° , raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90° , metal duro, ângulo de folga de 7° , ângulo de ponta de 55° e revestimento TiAlN).

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	Observação
Velocidade de corte	2	0,19705	0,098524	1,10	0,377	Não significativa
Avanço	2	1,19853	0,599267	6,71	0,019	Significante
Profundidade de corte	2	0,00796	0,003981	0,04	0,957	Não significativa
Velocidade de corte*Avanço	4	1,53662	0,384156	4,30	0,038	Significante
Velocidade de corte*Profundidade de corte	4	0,27603	0,069008	0,77	0,572	Não significativa
Avanço*Profundidade de corte	4	0,51523	0,128807	1,44	0,305	Não significativa
Erro	8	0,71445	0,089306			
Total	26	4,44588				

O modelo gerado para descrever o comportamento de Ra apresentou valor R^2 de 83 %. Porém, não se pode fazer inferências com posse apenas dos dados oriundos deste estudo devido ao valor de R^2 de predição ser de 0 %. Desta forma os resultados obtidos não podem ser extrapolados além do espaço amostral já avaliado.

O comportamento da rugosidade Rq e Rz apresentou características similares aos encontrados para Ra apresentando resultados de evolução da rugosidade ao longo dos ensaios também condizente com as encontradas na literatura no torneamento de materiais termoplásticos.

Os resultados de Rt, por sua vez, seguiram as mesmas tendências apontadas anteriormente, mas alguns de seus resultados entraram em destaque dentre os demais, principalmente pela aderência de material ao longo dos CPs nas condições de corte em que estas estiveram presentes. Por se tratar de um parâmetro que representa a altura total do perfil de rugosidade extraído, defeitos pontuais entraram em evidência nas medições, confirmando as análises de microscopia óptica mostradas nos itens anteriores.

4.2.2.4 Cavacos

A avaliação dos cavacos gerados durante a MS foi limitada a análise morfológica ao final do ensaio de cada CP. A ferramenta DCGX 070204 AL 1105, por apresentar maior ângulo de saída diminuiu o grau de recalque e o cavaco encontrou menor restrição, escoando melhor sobre a superfície de saída. Por permitir que os cavacos sofressem menor deformação ao longo do processo de usinagem, o uso desta ferramenta acabou levando à uma possível diminuição do calor gerado e, conseqüentemente, sem aderência na peça, entre eles ou na ferramenta.

A variação no raio de ponta entre as ferramentas, mesmo que considerada um fator que deveria implicar diretamente na rugosidade do processo e assim na formação dos cavacos, foi menos decisiva nos resultados de morfologia do cavaco, mesmo com maior área de contato, a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 com raio de ponta maior não influenciou significativamente nos resultados obtidos.

A partir da Figura 4.22 é possível avaliar alguns cavacos coletados ao final da MS dos CPs que apresentaram os melhores resultados de Ra (Figura 4.22a e Figura 4.24b) e os piores resultados de Ra (Figura 4.22c e Figura 4.22d), e seus respectivos parâmetros de torneamento. Nota-se que o formato dos cavacos usinados pela ferramenta DCGX 070204 AL 1105, Figura 4.22a e Figura 4.22b, foi de fita. Os obtidos pela ferramenta DCMT 070202, 4.22c e Figura 4.22 d, foram também no formato de fita, porém ficaram parcialmente fundidos devido à maior temperatura dos cavacos. Este comportamento se repetiu ao longo dos outros ensaios variando apenas seu grau de intensidade.

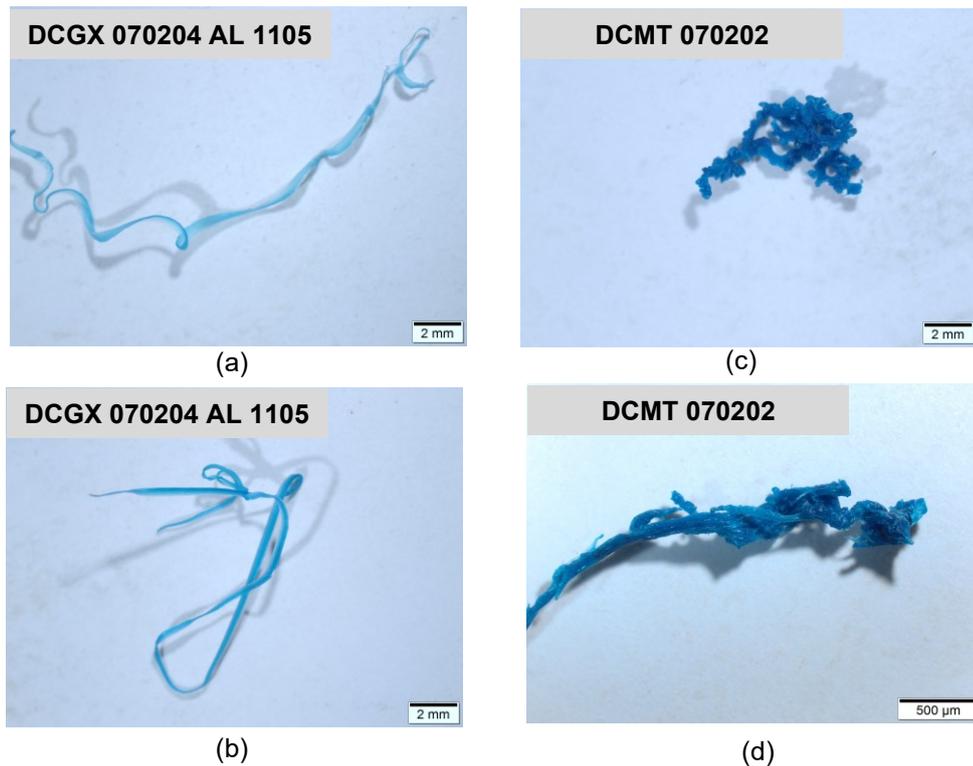


Figura 4.22 – Cavacos gerados na usinagem pela ferramenta DCGX 070204 AL 1105 e DCMT 070202 nas condições de (a) $vc = 35$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta , $ap = 0,45$ mm, (b) $vc = 20$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm, (c) $vc = 20$ m/ min, $f = 0,15$ mm/volta, $ap = 0,05$ mm, (d) $vc = 70$ m/min, $f = 0,05$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm.

4.2.2.5 Força de corte

Os gráficos seguem a mesma tendência de comportamento, porém com amplitudes de força de corte diferentes, conforme mostrado nas Figuras 4.23 e Figura 4.24. As amplitudes de forças diferentes estão associadas às diferenças de ângulos de saída, bem como de raio de ponta dos insertos utilizados nesta pesquisa.

Conforme apontado por Alauddin *et al.* (1995), no torneamento de materiais termoplásticos, os valores de força terão maiores amplitudes à medida que se diminui o ângulo de saída da ferramenta, para as mesmas condições de corte. Este efeito foi confirmado de acordo com os resultados encontrados.

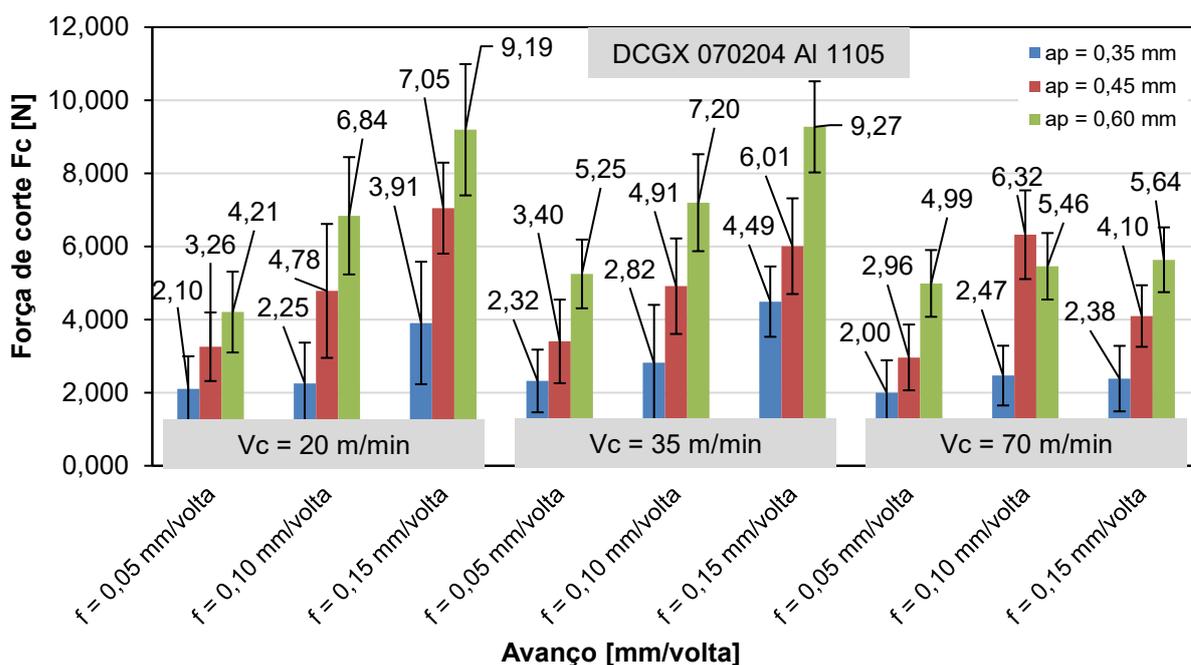


Figura 4.23 – Gráfico de forças de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).

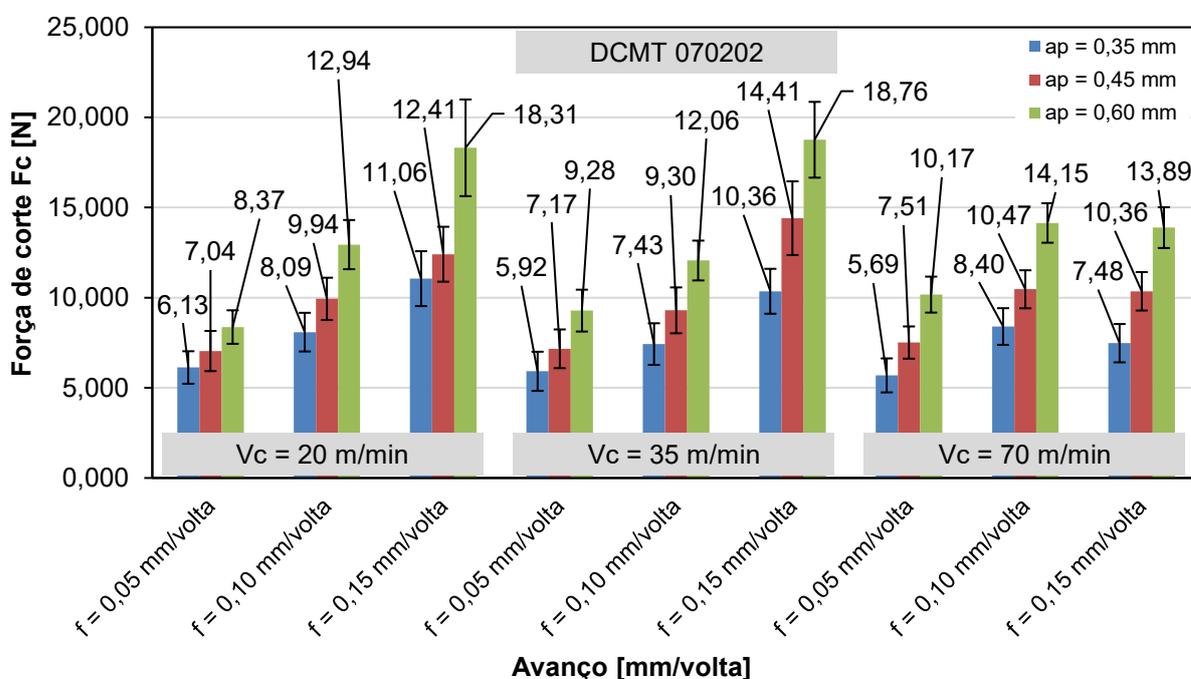


Figura 4.24 – Gráfico de forças de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN +TiN).

A influência dos parâmetros de usinagem na força de corte demonstrou que o aumento do avanço e da profundidade de corte proporcionaram incrementos nas forças coletadas pelo dinamômetro. Este tipo de comportamento se assemelha ao encontrado por Chabbi *et al.* (2017) que também trabalharam no torneamento de material termoplástico. Além disso, outro efeito também percebido nos resultados destes autores, foi a tendência de diminuição das forças de corte para condições nas quais a velocidade de corte era superior. Para metais este efeito é similar. O aumento da velocidade de corte diminui as forças de corte durante a usinagem.

Uma possível causa para este tipo de comportamento pode ser o fato de haver a elevação da temperatura no processo e por consequência a diminuição da resistência mecânica do polímero, reduzindo assim as forças resultantes. Este comportamento em especial foi também verificado por Kaddeche, Chaoui e Yallese (2012) que estudaram o processo de torneamento cilíndrico para dois polímeros da classe de polietileno.

Resultados similares com relação ao aumento da força de corte, à medida que se elevou o avanço, foram observados por Davim *et al.* (2009). Entretanto, este comportamento só ocorreu em um tipo específico de ferramenta na usinagem do termoplástico poliamida 66 (PA66).

As maiores forças de corte observadas, neste estudo foram obtidas para os parâmetros $vc = 35$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $ap = 0,60$ mm em ambas as ferramentas, seguindo o que foi encontrado na literatura acerca de torneamento de termoplásticos e a maior relevância encontrada para o avanço no aumento da força de corte.

Houve, entre as condições de corte testadas na $vc = 70$ m/min, um resultado considerado atípico, para o $f = 0,10$ mm/volta e $ap = 0,45$ mm, onde o aumento da força não seguiu as tendências encontradas para as outras condições durante a usinagem com a ferramenta DCGX 070204 AL 1105. Não foram encontradas justificativas que explicassem a causa deste resultado diferente aos já observados.

A avaliação estatística da força de corte por meio da ANOVA foi realizada e os resultados são apresentados pelas Tabela 4.5 e Tabela 4.6.

Tabela 4.4 – Análise de Variância da Força de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	Observação
Velocidade de corte	2	5,361	2,6806	6,72	0,019	Significativo
Avanço	2	26,033	13,0164	32,65	0,000	Significativo
Profundidade de corte	2	61,721	30,8603	77,41	0,000	Significativo
Velocidade de corte*Avanço	4	8,865	2,2162	5,56	0,019	Significativo
Velocidade de corte*Profundidade de corte	4	2,101	0,5253	1,32	0,342	Não significativo
Avanço*Profundidade de corte	4	3,931	0,9828	2,47	0,129	Não significativo
Erro	8	3,189	0,3987			
Total	26	111,201				

Tabela 4.5 – Análise de Variância da Força de corte (N) em função dos parâmetros de torneamento velocidade de corte (m/min), avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm) para a ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN).

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	Observação
Velocidade de corte	2	3,026	1,5129	3,46	0,083	Não significativo
Avanço	2	137,521	68,7606	157,14	0,000	Significativo
Profundidade de corte	2	127,155	63,5775	145,29	0,000	Significativo
Velocidade de corte*Avanço	4	27,597	6,8992	15,77	0,001	Significativo
Velocidade de corte*Profundidade de corte	4	1,021	0,2554	0,58	0,684	Não significativo
Avanço*Profundidade de corte	4	12,361	3,0901	7,06	0,010	Significativo
Erro	8	3,501	0,4376			
Total	26	312,181				

Para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105 para um nível de significância de 5 %, apenas a combinação entre vc e ap, bem como f e ap não foram estatisticamente significantes no ensaio. Dentre os parâmetros considerados significantes, a profundidade de corte se mostrou mais significativa seguido do avanço.

A vc , bem como a combinação dela com f , também considerados significantes, apresentaram menor influência nos resultados. Entretanto a ordem de influência dos fatores e níveis testados podem ser limitados ao conjunto de ensaios realizados. Quaisquer considerações além destes limites de níveis testados podem ser feitas apenas com a inclusão de novos experimentos.

Para a ferramenta DCMT 70202 apenas vc e a combinação entre ela e f não foram considerados estatisticamente influentes nos resultados. Dentre os parâmetros considerados significantes, f se mostrou mais significativa seguido a ap . Essa relação de influência também se mostrou condizente com o que foi encontrado na literatura acerca da usinagem de materiais termoplásticos.

O modelo obtido a partir dos dados dos ensaios para a força de corte apresentam valores elevados de R^2 , permitindo, dentro do espaço amostral de parâmetros testados, a predição de algum outro comportamento da força de corte na usinagem de PLA impresso, conforme mostrado nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

Tabela 4.6 – Tabela de resumo do modelo gerado para a força de corte para DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN).

S	R^2	R^2 (aj)	R^2 (pred)
0,631411	97,13 %	90,68 %	67,33 %

Tabela 4.7 – Tabela de resumo do modelo gerado para a força de corte para DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN).

S	R^2	R^2 (aj)	R^2 (pred)
0,661495	98,88 %	96,36 %	87,23 %

4.2.2.6 Desgaste da ferramenta

As imagens de MEV sugerem que ao longo dos ensaios foi encontrada apenas arredondamento de aresta de corte. Não houve adesão de material sobre a superfície de saída das ferramentas. É possível perceber pelas Figura 4.25 e Figura 4.26, após os 27 ensaios, o desgaste da ferramenta praticamente inexistente nas condições de corte e volume de material removido neste trabalho. Entretanto, por não se tratar de um desgaste acentuado,

foi então considerado desprezível nas análises. O material PLA por se tratar de um material dúctil não promoveu maiores desgastes na ferramenta.

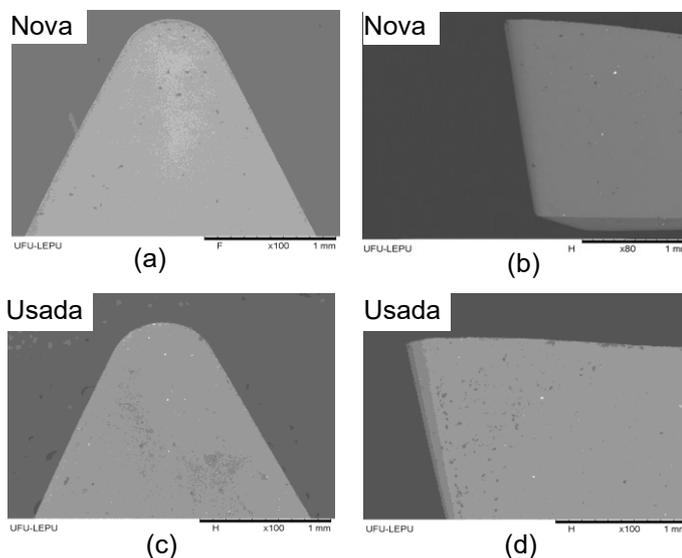


Figura 4.25 – MEV das superfícies, (a) e (c), de saída e , (b) e (d), principal de folga da ferramenta DCGX 070204 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN) antes e depois da usinagem.

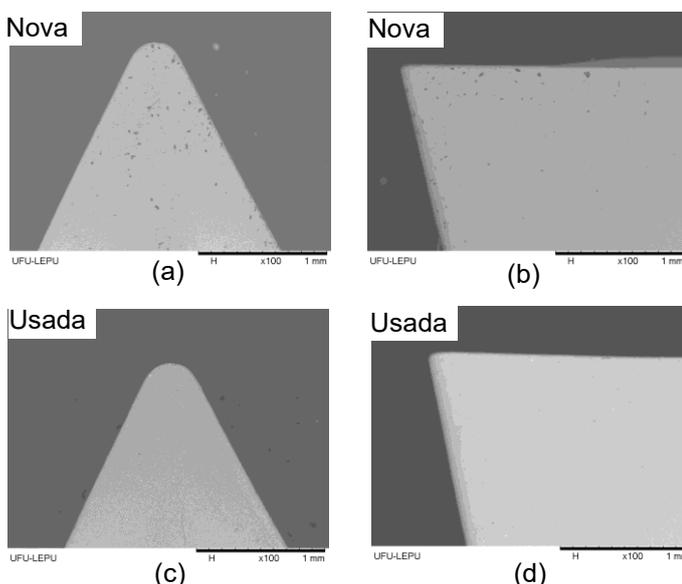


Figura 4.26 – MEV das superfícies, (a) e (c), de saída e , (b) e (d), principal de folga da ferramenta DCMT 070202 (ângulo de saída de 8°, raio de ponta de 0,2 mm, ângulo de posição de 90°, metal duro, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento AlTiN+TiN) antes e depois da usinagem.

A usinagem de materiais termoplásticos e seu efeito desprezível no desgaste de ferramentas de metal duro também foi verificada por alguns autores em seus estudos. Davim *et al.* (2009) trabalharam na usinagem de termoplásticos (Poliamida 66) com e sem reforço e desconsideraram o desgaste nas análises. Ferreira *et al.* (2020), por sua vez, estudaram a usinabilidade de material polimérico (Poliamida 12) com e sem reforço de fibra de carbono, no caso fabricados a partir da técnica FFF, e a presença deste tipo de reforço levou ao desgaste abrasivo das ferramentas utilizadas. Entretanto, o desgaste foi apenas associado à presença de partículas do reforço e o material em sua forma natural não demonstrou efeitos que levassem ao desgaste da ferramenta durante os ensaios, reforçando os resultados obtidos nesta dissertação.

4.3 Manufatura Híbrida

Dentre os objetivos deste trabalho, a avaliação da manufatura aditiva e subtrativa em um sistema híbrido foi considerada ao final das análises dimensionais, macro e microgeométricas oriundas do torneamento cilíndrico externo de corpos de prova feitos de PLA. A associação da MA com MS teve como objetivo obter o melhor aproveitamento das vantagens das duas técnicas de manufatura.

A usinagem de PLA extrudado ainda é pouco explorada na literatura, bem como a combinação de processos de forma híbrida, associados ao uso de torneamento. Entretanto, o estudo pode ser considerado um passo importante para o desenvolvimento de sistemas híbridos de manufatura, assim como mostrado por Ferreira *et al.* (2020) que estudaram o fresamento de polímeros produzidos por FFF.

Por se tratar de uma abordagem incipiente, no aspecto de hibridismo, a metodologia adotada neste estudo utilizou os dois processos de MA e MS separadamente, em duas estações de trabalho diferentes. Alguns estudos na literatura propõem como processo de manufatura híbrida aquele que tem a união controlada e simultânea de dois sistemas de manufatura completamente acoplados, conforme proposto por Sealy *et al.* (2018) e Lauwers *et al.* (2014). Desta forma o modelo considerado híbrido ainda não foi realizado de acordo com estas definições.

Os resultados alcançados nesta pesquisa se demonstraram condizentes aos de manufatura híbrida encontrados na literatura em relação a redução percentual de rugosidade. A redução percentual média dos valores de rugosidade após a usinagem foi apresentada na Tabela 4.9, bem como os resultados encontrados na literatura. É importante ressaltar que os dados oriundos dos outros trabalhos usados como comparação foram obtidos a partir de condições e combinações de parâmetros de usinagem diferentes.

Tabela 4.8 – Tabela comparativa da redução percentual média de valores de rugosidade entre os ensaios deste trabalho com a literatura.

Trabalho	Ra	Rq	Rt	Rz	Material usinado	Processo de manufatura
DCGX 070204 AL 1105	89,59 %	88,44 %	74,10 %	78,35%	PLA	Torneamento
DCMT 070202	78,60 %	76,66 %	57,77 %	64,95 %	PLA	Torneamento
Tomal, Saleh e Khan (2018)	91,3 %	-	87,2 %	-	PLA	Fresamento
Ferreira <i>et al</i> , (2020)	95,57 %	-	-	80,18 %	PA 12	Torneamento

Os resultados de tolerâncias dimensionais máximos de 0,3 mm para os ensaios conduzidos pela ferramenta DCMT 070202 encontrados neste trabalho também apresentaram valores similares ao estudo conduzido por Lee Wei e Chung (2014) no contexto de manufatura híbrida. O processo de usinagem utilizado pelos autores foi o fresamento combinado à FFF de ABS em um equipamento híbrido.

A união do processo FFF e torneamento cilíndrico externo foi realizada para permitir que as tolerâncias geométricas e dimensionais pudessem ser alcançadas de forma a permitir que uma quantidade mínima de material fosse adicionada na MA à parte externa como sobrematerial a ser removido por MS. Este tipo de abordagem foi observado pelos autores Lee, Wei e Chung, 2014, permitindo um melhor resultado associado ao menor consumo de material durante a combinação dos processos de manufatura.

Além disso, os parâmetros de impressão utilizados nesta pesquisa foram baseados nos resultados obtidos por Rosa (2019) levando em consideração as condições que proporcionaram o melhor desempenho no quesito de resistência mecânica. Assim, há a possibilidade de alcançar tolerâncias dimensionais diferentes no processo híbrido, visto que, a mudança de parâmetros de impressão pode proporcionar melhora no acabamento inicial das peças.

Os resultados no âmbito de manufatura híbrida podem variar de acordo com a interação entre os parâmetros de MA e MS. Além disso, deve-se estabelecer qual tipo de aplicação será dada ao material a ser usinado para que possa melhorar o desenvolvimento do processo e melhorar a rugosidade das peças a serem produzidas, de acordo com as necessidades.

As análises de forças de corte na usinagem de forma experimental se mostram úteis para um futuro desenvolvimento de um equipamento que combine estas duas técnicas em apenas uma estação de trabalho.

Os desafios encontrados para a realização do trabalho tangem em sua maioria na falta de padronização de testes e ensaios associados diretamente aos processos de MA. Por se tratar de um trabalho ainda incipiente, houve dificuldade de elencar tópicos associados à

hibridização de MA e MS já que os processos de torneamento e FFF ainda não são objeto de estudo da literatura para MH.

A demanda pelo alcance de tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas representa uma justificativa para a utilização dos processos de MA e MS combinados. Desta forma a associação dos processos permite evidenciar as melhores características de cada um e tornar o resultado ainda mais preciso na fabricação de micropeças.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou a avaliação de um conjunto de parâmetros referentes ao processo de manufatura subtrativa (torneamento cilíndrico externo) combinada com manufatura aditiva (processo FFF), visando garantir tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas. O processo de usinagem permitiu explorar aspectos como: dimensão, rugosidade, perfilometria, circularidade e cilindridade de corpos de prova de Ácido Polilático (PLA).

O processo de usinagem uniformizou a variação dimensional do restante das peças, padronizando a incerteza de medição em um intervalo de valores compreendido entre 0,02 mm e 0,03 mm.

Para os desvios de circularidade e de cilindridade os resultados foram superiores para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105, com menor adesão de material. A ferramenta DCMT 070202 levou a melhora dos desvios de forma dos CPs.

Para a rugosidade Ra dos CPs, os fatores que mais influenciaram foram avanço e a combinação de avanço e velocidade de corte para a ferramenta DCGX 070204 AL 1105, apresentando valores máximos quando em condições de menor velocidade de corte (20 m/min) e maior avanço (0,15 mm/volta). Para a ferramenta DCMT 070202 avanço e velocidade de corte foram os mais influentes. O valor de rugosidade se mostrou mais elevado em condições similares a primeira ferramenta.

Quanto aos outros parâmetros de rugosidade medidos, Rq, Rt e Rz, foi observado um comportamento similar à rugosidade Ra para ambas as ferramentas.

A avaliação morfológica dos cavacos permitiu observar que, para maiores velocidades de corte, houve a ocorrência de aderência nos CPs e entre si, sendo mais recorrente na usinagem com a ferramenta DCMT 070202 devido a seu menor ângulo de saída.

Os valores de força de corte foram máximos utilizado o nível mais elevado de avanço e de profundidade de corte. Para a ferramenta DCMT 070202 o comportamento foi similar com a ressalva de que as forças, neste caso, apresentaram ordem de grandeza mais elevadas, devido ao ângulo de saída da ferramenta.

Quanto ao desgaste das ferramentas ao longo dos ensaios, foram identificadas evidências apenas de arredondamento da aresta de corte ao final dos ensaios.

Foi possível observar que o processo de torneamento cilíndrico externo se mostrou uma opção promissora a ser estudada no que tange a união deste processo com a técnica FFF, visto que, promoveu resultados compatíveis de melhora de aspectos macro e microgeométricos, conforme relatado na literatura.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para que trabalhos futuros que possam aprofundar no estudo e complementar os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se citar:

- Avaliar a influência de diferentes ferramentas;
- Medir a temperatura de corte durante do PLA extrudado, visto que, pode influenciar na formação do cavaco e na aderência de material;
- Elaborar modelos de predição dos resultados de usinagem para PLA extrudado;
- Estudar diferentes tipos de materiais impressos quanto a sua usinabilidade;
- Avaliar a influência da variação de parâmetros de impressão na usinagem;
- Propor um modelo de máquina ferramenta híbrida para combinação dos dois processos aditivo e subtrativo;
- Desenvolver softwares para MA e MS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFROSE, M. F., MASOOD. S. H., IOVENITTI, P., NIKZAD, M., SBARSKI, I., *Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material*, **Prog Addit Manuf** v. 1, pg. 21–28, 2016. DOI 10.1007/s40964-015-0002-3
- AKULA, S.; KARUNAKARAN, K. PG., *Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process*. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 22, pg.113–123, 2006. doi: 10.1016/j.rcim.2005.02.006
- ALAUDDIN, M., CHOUDHURY, I. A., EL BARADIE, M.A., HASHMI, M. S. J., *Plastics and their machining: a review*. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 54, pg. 40-46, 1995. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01917-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01917-0)
- ALSOUFI, M., ELSAYED, A. E., *How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ is Influenced by Measuring Direction*, **American Journal of Mechanical Engineering**, v. 5, pg. 211-222, 2017. DOI:10.12691/ajme-5-5-4
- ALSOUFI, M., ELSAYED, A. E., *Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy-A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer*, **Materials Sciences and Applications**, v. 9, pg. 11-40, 2018. DOI: 10.4236/msa.2018.91002
- AMANULLAH, A. N. M., MURSHIDUZZAMAN, SALEH, T., KHANA, R., *Design and Development of a Hybrid Machine combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation*. **Procedia Engineering**, v. 184, pg. 163-170, 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.081
- ASHBY, M. F., JONES, D. R. H., *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. 3. ed. *Department of Engineering*, Cambridge University, UK: **Elsevier**, 2006. ISBN-13: 978-0-7506-6381-6
- ASTM F2792-10, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org. 10.1520/F2792-10

ATTARAN, M., The rise of 3-D printing: *The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. **Business Horizons**, 2017, v. 60, pg. 677-688, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>

BALANI, S. B., CHABERTA, F., NASSIETA, V., CANTAREL, A., *Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid*, **Additive Manufacturing**, v. 25, pg. 112-121, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.012>

BALLETTI, C., BALLARIN, M., GUERRA, F., *3D printing: State of the art and future perspectives*. **Journal of Cultural Heritage**, v. 26, pg. 172-182, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>

BAUMERS, M., DICKENS, P., TUCK, C., HAGUE, R., *The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push*. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 102, pg. 193-201, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015>

BAKAR, N. S. A., ALKAHARI, M. R., BOEJANG, H., *Analysis on fused deposition modelling performance*, **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)**, v. 11, pg. 972-977, 2010. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1001365>

BOSCHETO, A.; BOTTINI, L., VENIALI, F., *Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining*. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 41, pg. 92-101, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004>

BOURELL, D., KRUTH, J. P., LEU, M., LEVY, G., ROSEN, D., BEESE, A. M., CLARE, A. *Materials for additive manufacturing*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.66, pg. 659-681, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>

CABRAL, G. F., da COSTA, O. N., TELLES, F., SOUZA, A. J., *Estimação da rugosidade média da superfície torneada em polioximetileno a partir da otimização dos parâmetros de corte*, **23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, 12 f., 2018.

CABRERA, F. M., BEAMUD. E., HANAFI, I., KHAMLICH, A., JABBOURI, A., *Fuzzy Logic-Based Modeling of Surface Roughness Parameters for CNC Turning of PEEK CF30 by TiN-*

Coated Cutting Tools, **Journal of THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS**, v. 24, 2011.
DOI: 10.1177/0892705710391562

CARR, J. W., FEGER, C. *Ultraprecision machining of polymers*, **Precision Engineering**, v. 15, pg. 221-237, 1993. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(93\)90105-J](https://doi.org/10.1016/0141-6359(93)90105-J)

CHABBI, A., YALLESE, M. A., MEDDOUR, I., NOUIOUA, M., MABROUKI, T., GIRARDIN, F., *Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function*, **Measurement** v. 95, pg. 99-115, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.043>

CHACÓN, J. M., CAMINERO, M. A., PLAZA, E. G., NUNEZ, P. J., *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. **Materials and Design**, v. 124, pg. 143-157, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>

CORTINA, M., ARRIZUBIETA, J. K., RUIZ, J. E., UKAR, E., LAMIKIZ, A., *Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations*, **Materials**, v. 11, pg. 1-27, 2018. doi:10.3390/ma11122583

CUIFFO M. A., SNYDER, J., ELLIOTT A. M., ROMERO, N., KANNAN S., HALADA, G. P., *Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure*, **Applied Sciences**. v. 7, pg. 1-14, 2017. doi:10.3390/app7060579

DAVIM, J. P., SILVA, L. R., FESTAS, A., ABRÃO, A. M., *Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing*. **Materials and Design**, v. 30, pg. 228-234, 2009. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.05.003

DIZON, J. R. C., ESPERA JR, A. H., CHEN, Q., ADVINCULA, R. C., *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. **Additive Manufacturing**, v. 20, pg. 44-67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>

DOBES J., LEAL, J. E. S., PROFETA, J., DE SOUSA, M. M., LÉPORE, F. P., ANTONIO PIRATELLI, A., ARENCIBIA, R. V., *Effect of mechanical vibration on Ra, Rq, Rz, and Rt roughness parameters*, **Int J Adv Manuf Technol**, v. 92, pg. 393-406, 2017. DOI :10.1007/s00170-017-0137-0

DOTCHEV, K., YOSOFF, W., *Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process*, **Rapid Prototyping Journal**, v.15/3, pg. 192-203, 2009. DOI 10.1108/13552540910960299

DU, W., BAI, Q., ZHANG, B., *A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts*, **Procedia Manufacturing**, v. 5, pg. 1018-1030, 2016. doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.067

DURAN, C., SUBBIAN, V., GIOVANETTI, M. T., R. SIMKINS, J. R., BEYETTE, F. R., *Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol*, **Rapid Prototyping Journal**, v. 21/5, pg., 528-534, 2015. DOI 10.1108/RPJ-09-2014-0117 24178

ERENKOV, O. Y., ZAKHARYCHEV, S.P., GAVRILOVA, A. V., OTMAKHOV, D. V., *Influence of the Machining Conditions on the Surface Hardness of Polymer Parts*. **Russian Engineering Research**, v. 28, pg. 234-236, 2008. DOI: 10.3103/S1068798X08030088

ERENKOV, O. YU, KALITA E. G., MAZIN, R. S., *Turning of polymer materials using billet pretreatment*. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 47, pg. 7-8, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10556-011-9500-4>

ERIKSEN, E., *Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic*, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 39, pg. 1611-1618, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00017-6)

EYERS, D., POTTER, A., *Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective*. **Computers in Industry**, v. 92-93, pg. 208–218, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2017.08.002>

FARAH, S., ANDERSON, D. G., LANGER, R., *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review*, **Advanced Drug Delivery Reviews**, v.107, pg. 367-392, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>

FERREIRA, I., MADUREIRA, R., VILLA, S., DE JESUS, A., MACHADO, M., ALVES, J. L., *Machinability of PA12 and short fibre–reinforced PA12 materials produced by fused filament*

fabrication, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.107, pg. 885–903, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04839-z>

GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS, C. B., WANG, C. C. L., SHIN, Y. C., SONG ZHANG, S., ZAVATTIERI, P. D., *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-aided Design*, v. 69, pg. 65-89, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>

GNANASEKARAN, K., HEIJMANS, T., BENNEKOM, S. V., WOLDHUIS, H., WIJNIA, S., DE WITH, G., FRIEDRICH, H., *3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling, Applied Materials Today*, v. 9, pg. 21-28, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2017.04.003>

GRASSO, M., AZZOUZ, L., HINCAPIE, P. R., ZARRELLI, M., REN, G., *Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens, Rapid Prototyping Journal*, v. 24, pg.1-10, 2018. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0055>

GUO, N., LEU, M.C. *Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Front. Mech. Eng.* v. 8, pg. 215-243, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>

GUTOWSKI T. G., BRANHAM, M. S., DAHMUS, J. B., JONES, A. J., THIRIEZ, A., SEKULIC, D. P., *Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes. Environ. Sci. Technol.*, v. 43(5), pg. 1584-1590, 2009. <https://doi.org/10.1021/es8016655>

HAMLAOUI, N., AZZOUZ, S., CHAOUI, K., AZARI, Z., YALLESE, M. A., *Machining of tough polyethylene pipe material: surface roughness and cutting temperature optimization, Int J Adv Manuf Technol*, v. 92, pg. 2231-2245, 2017. DOI 10.1007/s00170-017-0275-4

HARUN, N. H., KASIM, M. S., ABIDIN, M. Z. Z., IZAMSHAH, R., ATTAN, H., GANESAN, H. N., *A study on surface roughness during fused deposition modelling: a review, JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, v. 12, pg. 26-37, 2018. <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/3922/2922>

HENTON, D. E., GRUBER, P., LUNT, J., RANDALL, J., *Polylactic Acid Technology, Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Editora Taylor e Francis pg. 527- 578, 2005. http://www.jimluntllc.com/pdfs/polylactic_acid_technology.pdf

HOOREWEDER, B. V.; KRUTH, J. P., *High cycle fatigue properties of selective laser sintered parts in polyamide 12*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, pg. 241-244, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.060>

HUNDLEY, J. M., ECKEL Z. C., SCHUELLER, E., CANTE, K., BIESBOER, S. M., YAHATA, B. D., SCHAEGLER, T. A., *Geometric characterization of additively manufactured polymer derived ceramics*, **Additive Manufacturing**, v. 18, pg. 95-102, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.009>

HUR, J., LEE, K., ZHU-HU, KIM, J., *Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition*. **Computer-Aided Design**, v. 34, pg. 741-754, 2002.
DOI:10.1016/S00104485(01)00203-2

ISCAR BRASIL, Ferramentas para Usinagem de Metais. Catalogo eletrônico disponível em:
<<https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5566991&fnum=868&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>> Acesso em : fevereiro de 2020.

ISO 4287 — Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002.

ISO 4288 — *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*, 1996.

ISO 286-1 — *Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*, 2010

JAGTAP, K. A., WAGHULDE, A. G., KULKARNI, S. A., MULEY, S. P., KOCHURE, P. G., *Some Studies on Machined Surface Integrity in Precision Turning of Nylon*, **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, e-ISSN No.:2349-9745, 2016.
https://www.ijmter.com/published_special_issues/28-04-2016/some-studies-on-machined-surface-integrity-in-precision-turning-of-nylon.pdf

JAMSHIDIAN, M., TEHRANY, E. A., IMRAN, M., JACQUOT, M., DESOBRY, S., *Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies*, **Comprehensive**

Reviews in Food Science and Food Safety, v.9, pg. 552-571, 2010. doi 10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x

KADDECHE, M., CHAOUI, K., YALLESE, M. A., *Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins*, ***Mechanics & Industry***, v. 13, pg. 307-316, 2012. DOI: 10.1051/meca/2012029

LASPRILLA, A. J. R., MARTINEZ, G. A. R., LUNELLI, B. H., JARDINI, A. L., FILHO, R. M., *Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices — A review*, ***Biotechnology Advances***, v. 30, pg. 321-328, 2012. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.06.019

LAUWERS, B., KLOCKE, F., KLINK, A., TEKKAYA, A. E., NEUGEBAUER, R., MCINTOSH, D., *Hybrid processes in manufacturing*, ***CIRP Annals - Manufacturing Technology***, v. 63, pg. 561-583, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>

LEE, J., TAN, W. S., AN, J., CHUA, C. K., TANG, C. Y., FANE, A. G., CHONG, T.H., *The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology*. ***Journal of Membrane Science***, v. 499, pg. 480-490, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008>

LEE, C. H., LIU, C. H., *The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication*, ***Additive Manufacturing***, v.25, pg. 196-203, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.012>

LEE, W., WEI, C., CHUNG, S., *Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining*. ***Journal of Materials Processing Technology***, v. 214, pg. 2366-2374, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004>

LEACHER, T., WAYTASHEK, M., *Material property testing of 3d-printed specimen in pla on an entry-level 3d printer*, ***Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition***, Moutreal- Canadá, 8 f., 2014. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39379>

LIANG, J. Z., NESS, J. N., *Effect of Die Angle on Flow Behaviour for High Impact Polystyrene Melt*, ***Polymer testing***, v. 16, pg., 403-412, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(97\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(97)00001-9)

LI, L., HAGHIGHI, A., YANG, Y., *A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies*. **Journal of Manufacturing Processes**, v.33, pg.150-160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.008>

LIENEKE, T., ADAM, G. A. O., LEUDERS, S., KNOOP, F., JOSUPEIT, S., DELFS, P., FUNKE, N., ZIMMER, D., *Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions*. **Twenty-Sixth Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference**, Texas, 14 f., 2015. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-30-Lieneke.pdf>

LOCKETTI, H., DING, J., WILLIAMS, S., MARTINA, F., *Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection*, **Journal of engineering design**, pg. 568-598, 2017. <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>

LOPES, M. S., JARDINI, A. L., FILHO, R. M., *Poly (lactic acid) production for tissue engineering applications*, **Procedia Engineering**, v. 42, pg. 1402-1413, 2012. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.534

MACHADO, A. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo, Sp: **Blucher**, 372 pg, 2009.

MANOGHARAN, G., WYSK, R. A., HARRYSSON, O. L. A., *Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis*, **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 29, pg. 473-488, 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067920>

MATWEB, Online Materials Information Resource, 2019. Disponível em: www.matweb.com. Acesso em: maio de 2020.

MOETAZEDIAN A., GLEADALL A., HAN, X., SILBERSCHMIDT, V. V., *Effect of environment on mechanical properties of 3D printed polylactide for biomedical applications*, **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 102, pg. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103510>

MORONI, G., PETRÒ, S., SHAO, H., *On Standardization Efforts for Additive Manufacturing, Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, pg. 156-172, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46212-3_11

NASSEHI, A., Newman, S., DHOKIA, V., ZHU, Z., ASRAI, R. Z., Using formal methods to model hybrid manufacturing processes, **4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011)**, Montreal, Canada, pg. 52- 56 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4_8

PATEL, Y., *The Machining of Polymers*, TESE – Imperial College, 2008. <https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/4435/1/Patel-Y-2009-PhD-Thesis.pdf>

PITAYACHAVAL, P., MASNOK, K., *Feed Rate and Volume of Material Effects in Fused Deposition Modeling Nozzle Wear, 2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, Nagoya, 6 f., 2017. DOI: 10.1109/IEA.2017.7939175

POPESCU, D., ZAPCIU, A., AMZA, C. BACIU, F., MARINESCU, R., *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. Polymer Testing*, v. 69, pg. 157-166, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>

PRAKASHA, K. S.; NANCHARAIH, T.; RAO, V.V. S., *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. Materials Today: Proceedings 2018*, v. 5, pg. 3873-3882, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>

RAMANATH, H. S., CHUA, C. K., LEONG, K. F., SHAH, K.D., *Melt flow behaviour of poly-e-caprolactone in fused deposition modelling, J Mater Sci: Mater Med*, v.19, pg. 2541-2550, 2008. DOI 10.1007/s10856-007-3203-6

ROSA, I. C. C, Estudo experimental e teórico das influências dos parâmetros de controle da manufatura aditiva nas propriedades mecânicas de flexão do PLA extrudado, 76 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2019.

ROSA, I.C.C.; DE OLIVEIRA, G.B.; FIOCCHI, A.A., *Method for considering the real area moment of inertia in bending tests of extruded pla parts with different infill percentages, 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlândia, 6 f., 2019. DOI://10.26678/ABCM.COBEM 2019.COB 2019-1950

SALLES, J. L. C., GONÇALVES, M. T. T., *Effects of Machining Parameters on Surface Quality of the Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)*. **Revista Matéria**, v. 8, pg. 1-10, 2003. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10119/10119.pdf>

SANDVIK COROMANT, Ferramentas para torneamento, pg. 1 - 656, 2017

SEALY, M. P., MADIREDDY, G., WILLIAMS, R. E., RAO, P., TOURSANGSARAKI, M., *Hybrid Processes in Additive Manufacturing*, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 140, 2018. DOI: 10.1115/1.4038644

SILVA, N. S., SILVA, M. V. G., SILVA, M. B, FIOCCHI, A. A., Projeto adaptativo do minitorno mecânico à tecnologia de manufatura cnc — sistema mecânico, **XXI Colóquio de Usinagem**, Ouro preto- MG, 5 f., 2017.

SONG, Y., LI, Y., SONG, W., YEE, K., LEE, K-Y., TAGARIELLI, V. L., *Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA*. **Materials and Design**, v.123, pg.154 - 164, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>

SPOERK, M., GUTIERREZ, J. G., SAPKOTA, J., SCHUSCHNIGG, S., HOLZER, C., *Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication*, **Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering**, v. 47, pg. 17-24, 2018. <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1399531>

STANSBURY, J. W., IDACAVAGE M. J. *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. **Dental materials**, v. 32, pg. 54–64, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>

SUKINDAR, N. A., ARIFFIN, M. K. A. M, *An Analysis on Finding the Optimum Die Angle of Polylactic Acid in Fused Deposition Modelling*, **Applied Mechanics and Materials**, v. 835, pg. 254-259, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.254

SUKINDAR, N. A., ARIFFIN, M. K. A., BAHARUDIN, B. T. H. T., JAAFAR, C. N. A., ISMAIL, M. I. S., *Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3d printing*, **Jurnal Teknologi**, v. 78, pg. 7-15, 2016. DOI:10.11113/JT.V78.6265

THOMAS, D. S., GILBERT, S. W. *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion. National Institute of Standards and Technology Special Publication*, v.1176, pg. 1-89, 2014. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>

THOMPSON, M. K., MORONI, G., VANEKER, T., FADEL, G., CAMPBELL, R. I., GIBSON, I., BERNARD, A., SCHULZ, J., GRAF, P., AHUJA, B., MARTINA, F., Design for Additive Manufacturing: *Trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 65, pg. 737-760, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>

TUSHAR U. J., HEMANT, A. M., *Machining of Plastics: A Review, International Journal of Engineering Research and General Science*, v.3, pg. 577-58, 2015. <http://pnrsolution.org/Datacenter/Vol3/Issue2/286.pdf>

TUMBLESTON J. R., SHIRVANYANTS, D., ERMOSHKIN, N., JANUSZIEWICZ, R., JOHNSON, A. R., KELLY, D., CHEN, K., PINSCHMIDT, R., ROLLAND, J. P., ERMOSHKIN, A., SAMULSKI, E. T., DESIMONE, J. M., *Continuous liquid interface production of 3D objects. Science*, v. 347, pg.1349-1351, 2015. [10.1126/science.aaa2397](https://doi.org/10.1126/science.aaa2397)

TURNER, B. N., STRONG, R, GOLD, S. A., *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, Rapid Prototyping Journal*, v. 20, pg. 192-204, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>

TYMRAK, B. M., KREIGER, M., PEARCE, J. M., *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, Materials and Design* v. 58, pg. 242-246, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>

VANAT, K J; BRAGHINI, A., O uso de ferramentas de metal duro no torneamento do nylon. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, v. 11, pg. 50-57, 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2014.007>

VOLPATO, N., Munhoz, A. L. J., Costa, C. A., Ahrens, C. H., de Carvalho, J., Santos, J. R. J., Silva, J. V. L, Foggatto, J. A., Lima, M, S. F., MANUFATURA ADITIVA: Tecnologias e aplicações da impressão 3D, **Editora Blucher**, São Paulo- SP 400 f., 2017

VYAVAHARE, S., TERAIYA, S., PANGHAL, D., KUMAR, S., *Fused deposition modelling: a review*, **Rapid Prototyping Journal**, v. 26, pg. 176-201, 2020. DOI: 10.1108/RPJ-04-2019-0106

WANG, R., WANG, L., ZHAO, L. LIU, Z., *Influence of process parameters on part shrinkage in SLS*, **Int J Adv Manuf Technol**, v. 33, pg. 498-504, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0490-x>

WANG, X., JIANG, M., ZHOU, Z., GOU, J., HUI, D., *3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*, **Composites Part B**, v. 110, pg. 442-458, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>

WU, C., YI, R., LIU, Y. J., HE, Y., WANG, C. C. L., *Delta DLP 3D Printing with Large Size*, **2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)** Daejeon, Korea, 6 f., 2016. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759338

WU, W., GENG, P., LI, G., ZHAO, D., ZHANG, H., ZHAO, J., *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS*, **Materials** v.8, pg. 5834-5846, 2015. DOI:10.3390/ma8095271

WU, W. Z., GENG, P., ZHAO, Y., ZHANG, Y., ROSEN, D. W., ZHANG, H. B., *Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing*, **Materials Research Innovations**, v. 18, pg. 12-16, 2014. DOI :10.1179/1432891714Z.000000000898

VITOLO, F., MARTORELLI, M., GERBINO, S., PATALANO, S., LANZOTTI, A. *Controlling form errors in 3D printed models associated to size and position on the working plane*, **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 12, pg. 969-977, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0441-9>

WITTBRODT, B. e PEARCE, J. M., *The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components*. **Additive Manufacturing**, v. 8, pg. 110-116, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>

XIAO, K. Q.; ZHANG, L.C., *The role of viscous deformation in the machining of polymers. International Journal of Mechanical Sciences*, v. 44, pg. 2317-2336, 2002. DOI:10.1016/S0020-7403(02)00178-9

YAMAZAKI, T., *Development of A Hybrid Multi-Tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining, 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, v.42, pg. 81-86, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193

ZHU, Z., DHOKIA, V. G., NASSEHI, A., NEWMAN, S. T., *A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives, International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pg. 1-20, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>

ANEXO 1 – TABELA DE FATOR DE ABRANGÊNCIA PARA O CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Graus de liberdade ν	Fração em porcentagem					
	68,27 ^(a)	90	95	95,45 ^(a)	99	99,73 ^(a)
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,35
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,03	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,00	2,576	3,000

ANEXO 2 – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0031

Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."
Endereço : Avenida João Naves de Avila, 2121 - Uberlândia - MG.

Ordem de serviço: 068.189

1 - Objeto Calibrado

PAQUÍMETRO DIGITAL

Fabricante: Mitutoyo

Código: 500-196-20B

Nº. de Série: 10901281

Faixa nominal : 150 mm

Resolução : 0,01 mm

Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Blocos padrão	Número: 00112
Certificado N.º 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 01/2014

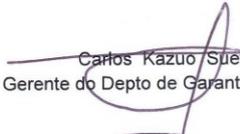
Relógio apalpador	Número: LCF233
Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 08/2013

Padrão escalonado para paquímetro	Número : 010259
Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 12/2013

3 - Procedimento de Medição: PML - 0013 Versão 5

Os valores de Indicação do paquímetro foram verificados comparativamente com padrão escalonado e Blocos-padrão e a leitura da indicação tomada no paquímetro.

Data da calibração: 23 de Julho de 2013
Data da emissão: 23 de Julho de 2013


Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
*Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Ralfo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT
NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

Pag.: 2 / 2

4 - Resultado da calibração: O resultado é a média das calibrações.

Medida Externa

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
1,1	1,10	0,02
1,5	1,50	
1,9	1,90	
4,0	4,00	
8,0	8,00	
16,0	16,00	
20,0	20,00	
50,0	50,00	
75,0	75,00	
100,0	99,99	
150,0	150,00	

Fator de abrangência (k)	2,00
Graus de liberdade (V _{eff})	infinito

Medida Interna

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
20,0	20,00	0,02
50,0	50,00	
100,0	100,01	
150,0	150,02	

Fator de abrangência (k)	2,03
Graus de liberdade (V _{eff})	96

Outros Itens

Item	Resultado (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
Ponto zero	0,00	0,01	2,00	infinito
Ressalto	0,00	0,01	2,00	infinito
Profundidade	0,01	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Orelha	0,00	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Boca	0,00	0,01	2,00	infinito

5 - Incerteza de Medição:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

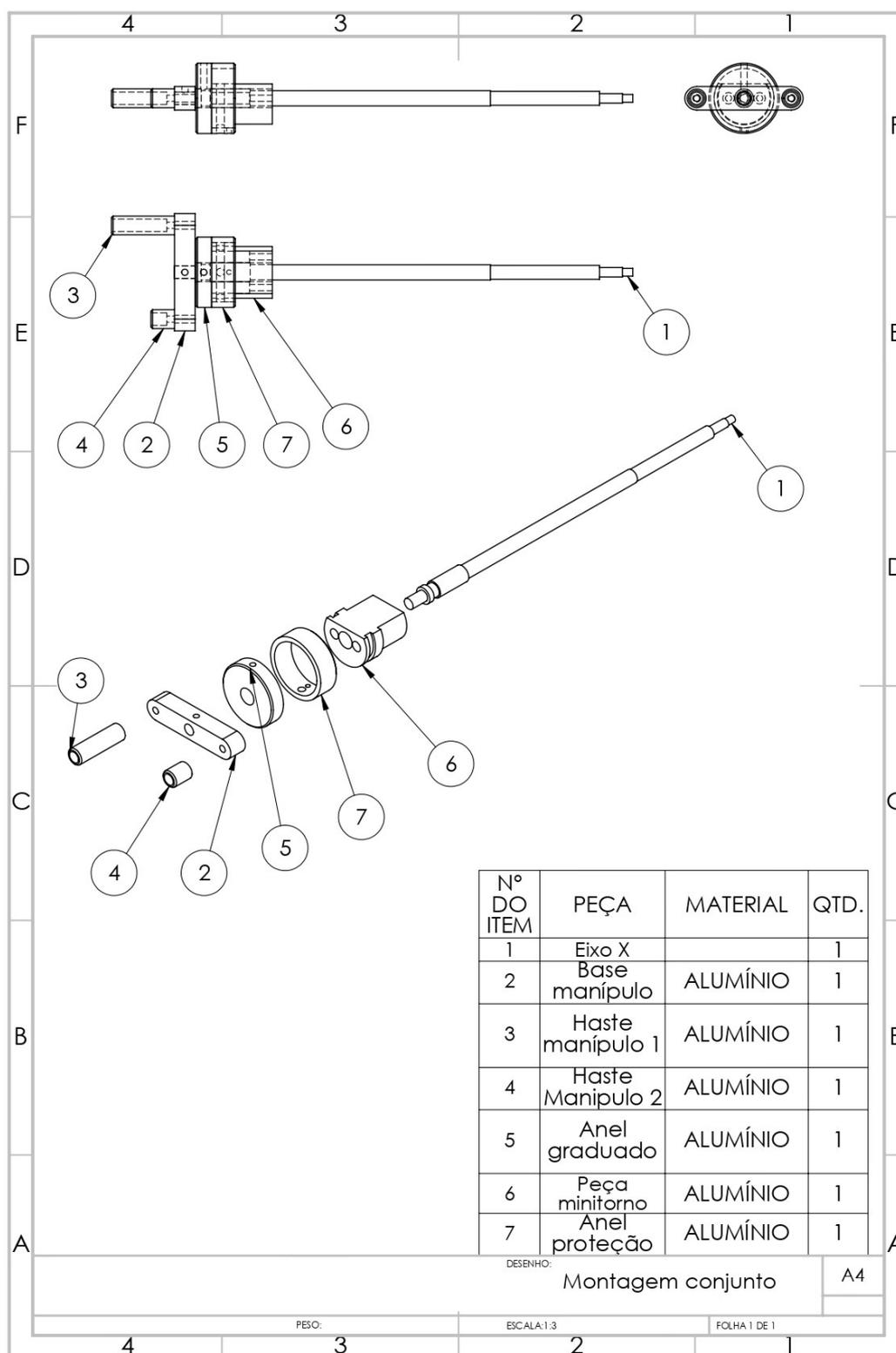
A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota : Temperatura ambiente: $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

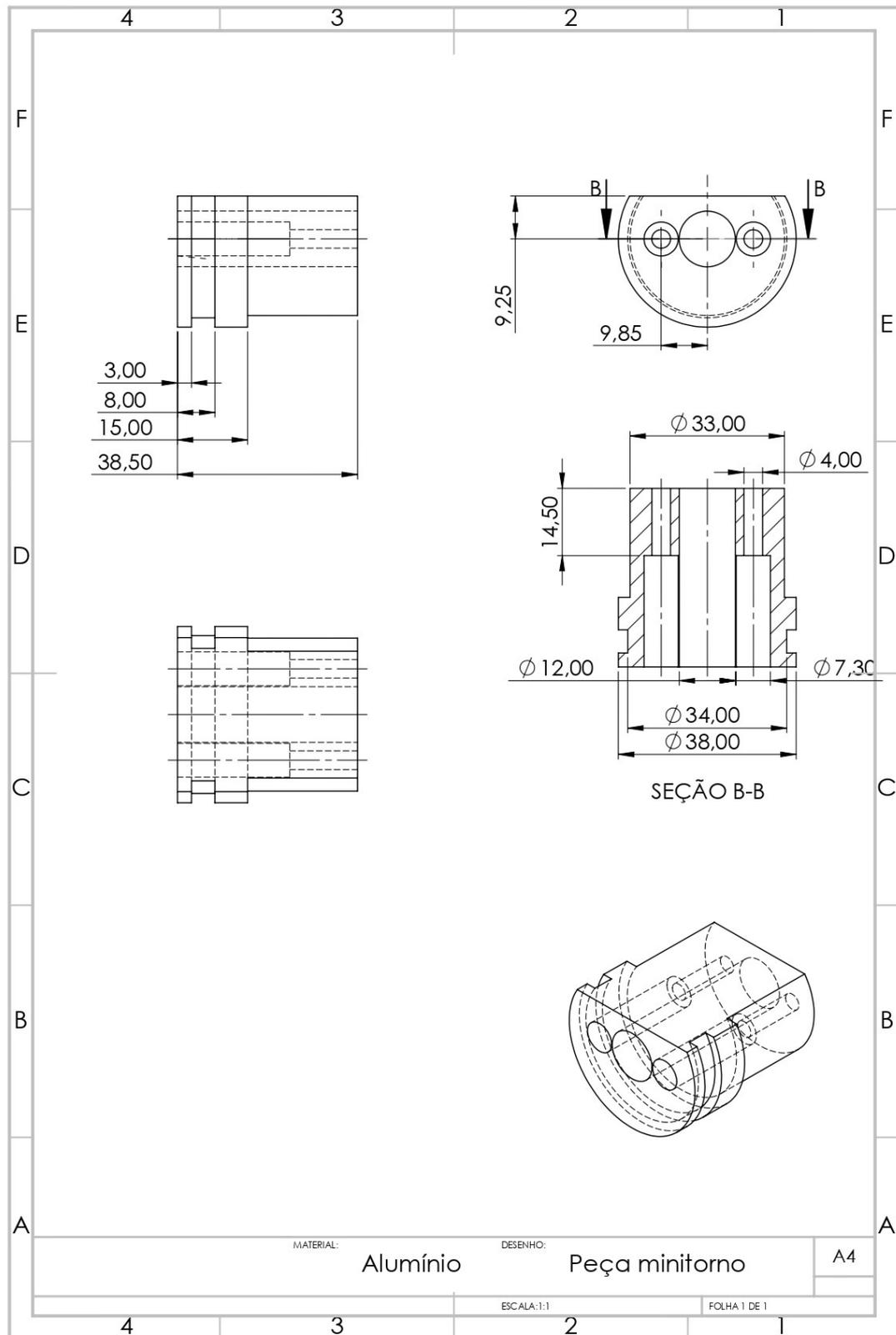
ANEXO 3 – TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIAS ISO 286-1 (2010)

Nominal size mm		Standard tolerance grades																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Above	Up to and including	Standard tolerance values																			
		µm											mm								
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1 000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1 000	1 250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1 250	1 600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1 600	2 000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2 000	2 500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1 100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2 500	3 150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1 350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

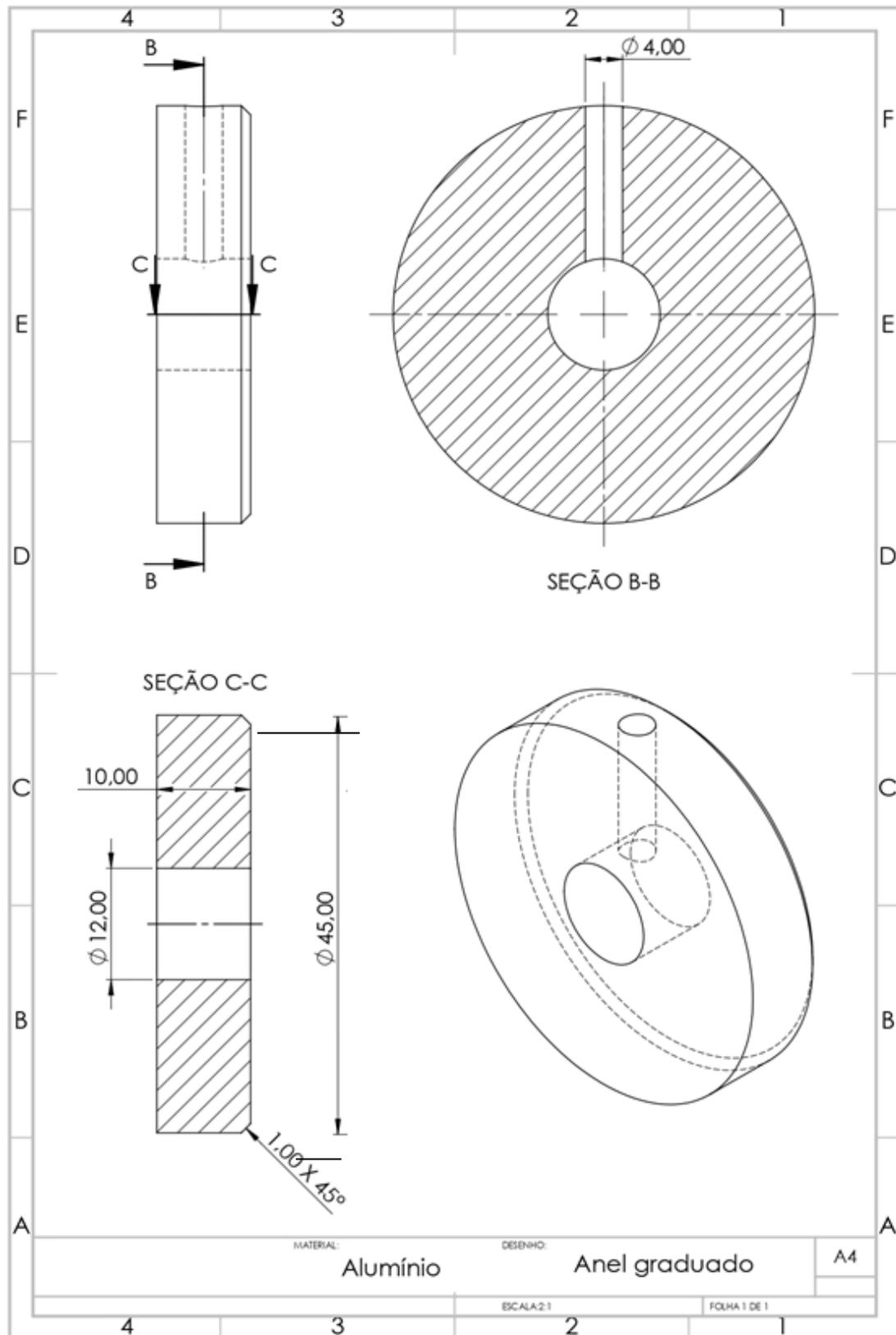
APÊNDICE 1 – MONTAGEM DO SISTEMA DE MANÍPULO ATUALIZADO

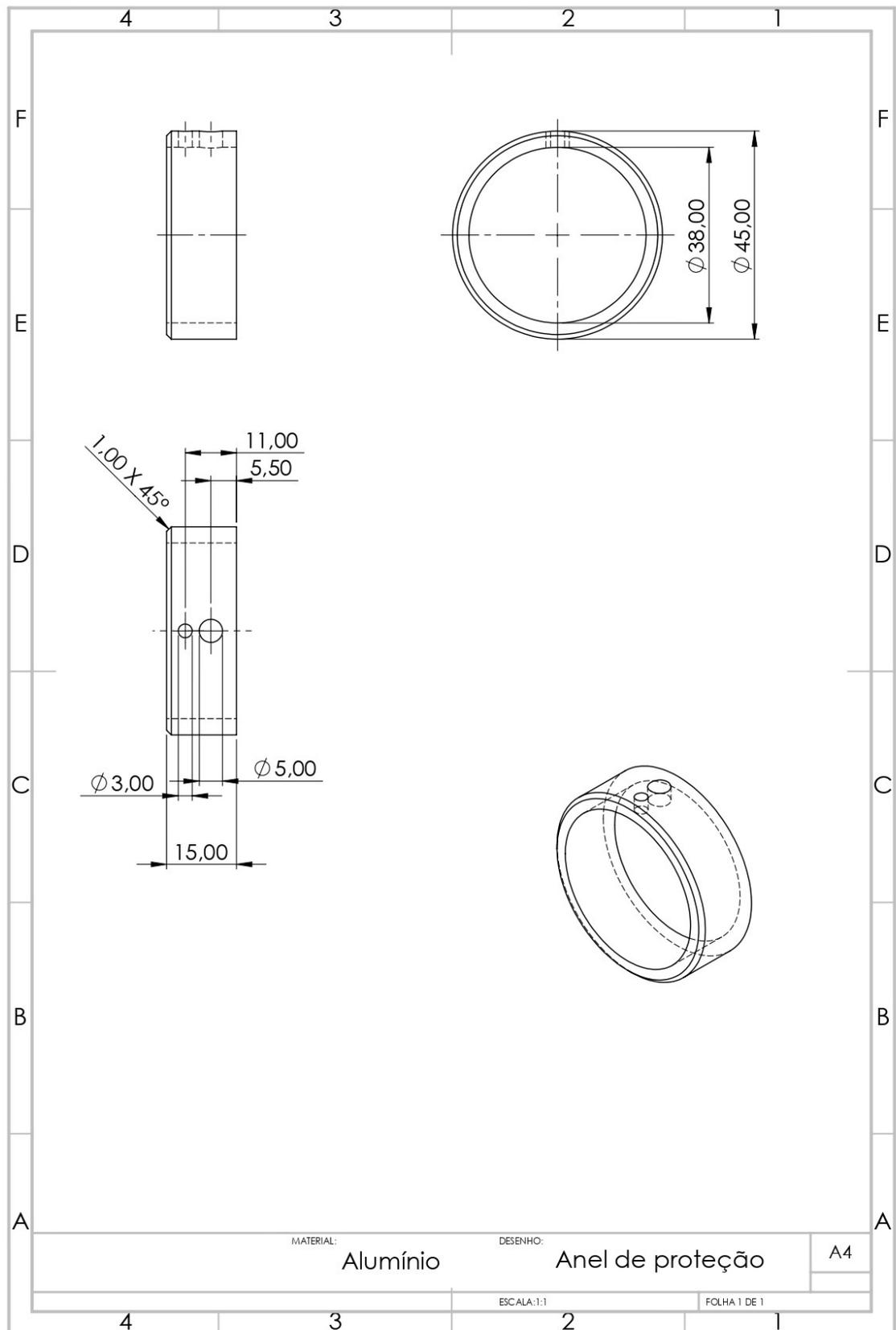


APÊNDICE 2 – PEÇA MINITORNO

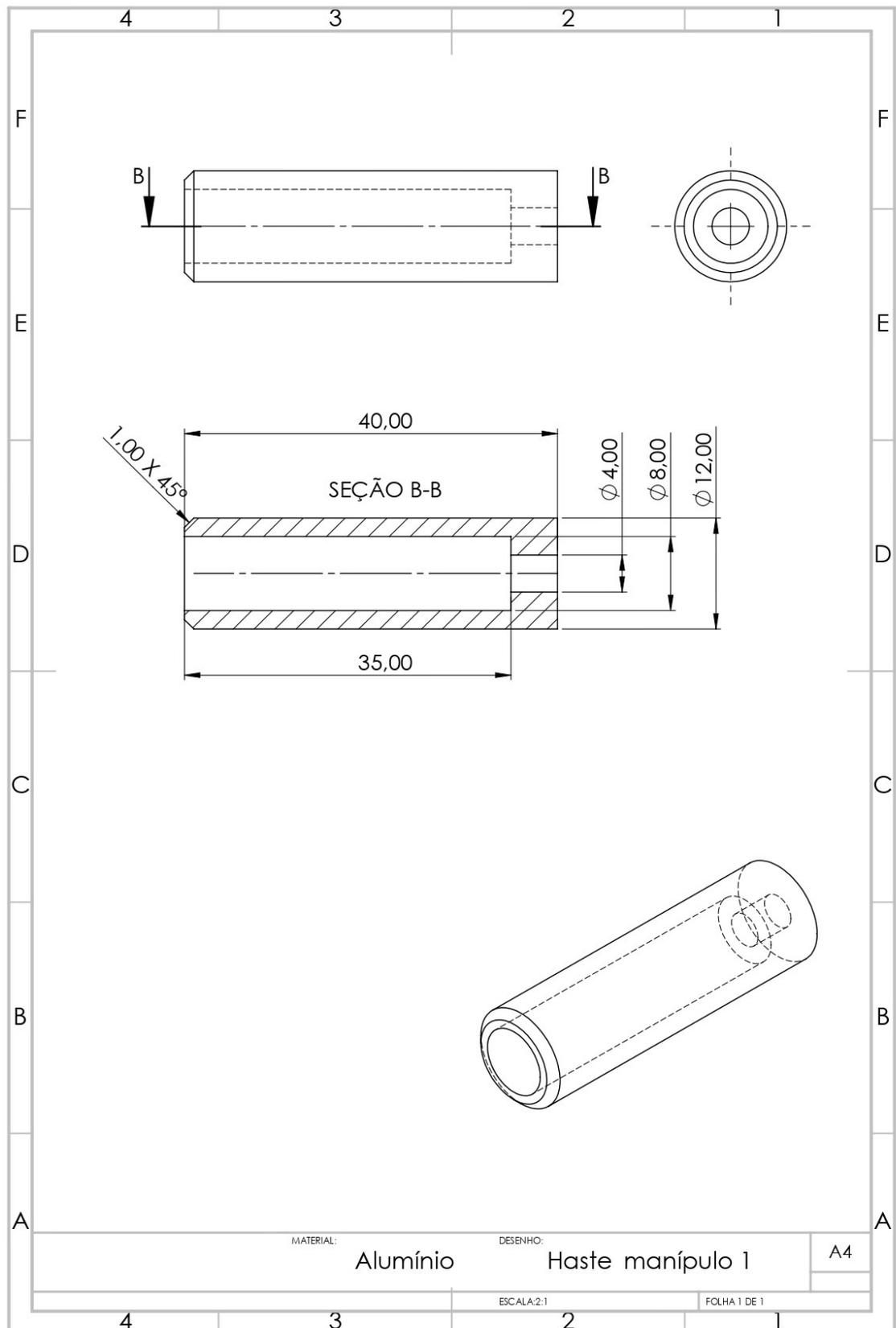


APÊNDICE 3 – ANEL GRADUADO

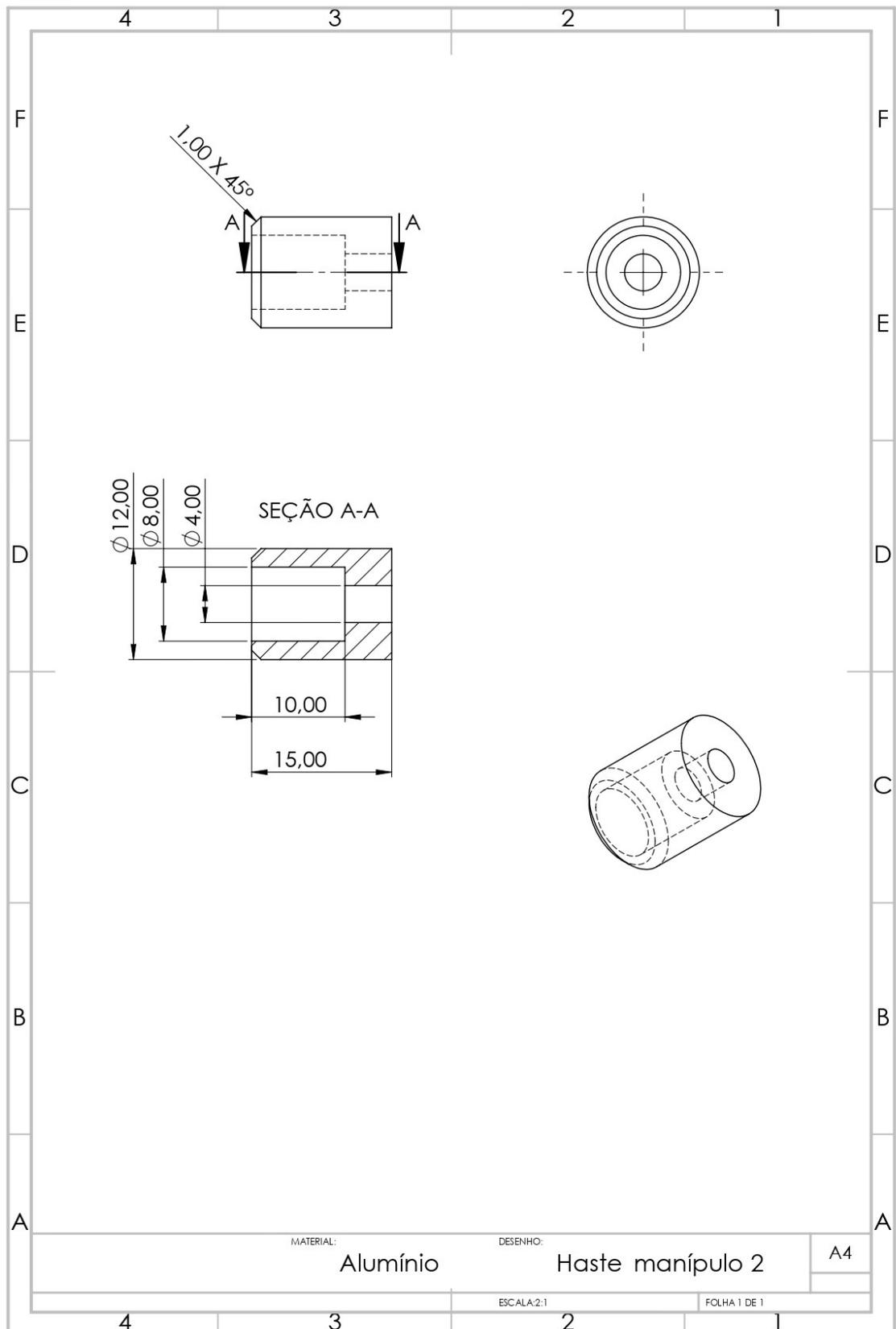


APÊNDICE 4 – ANEL DE PROTEÇÃO DO SENSOR

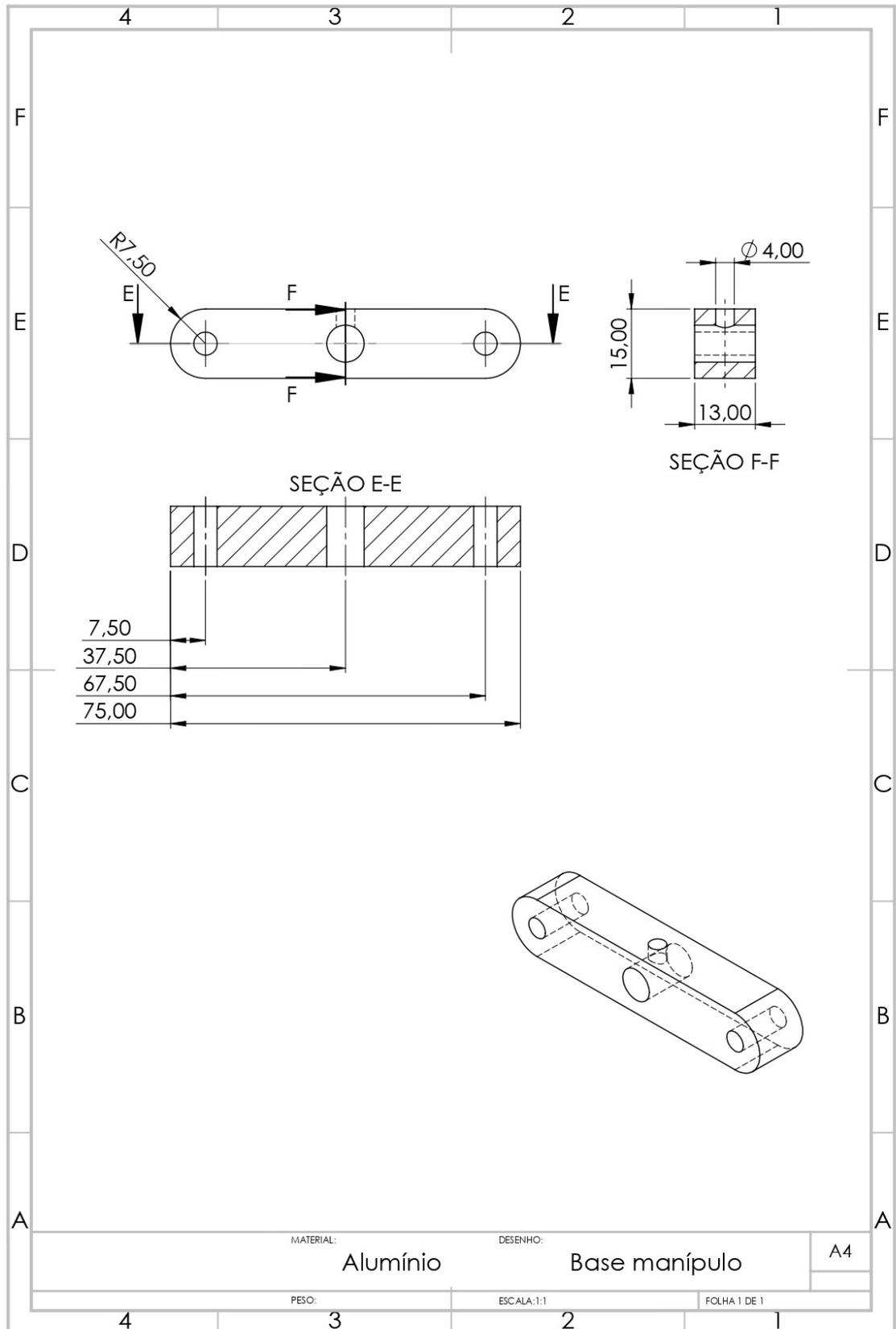
APÊNDICE 5 – HASTE DO MANIPULO



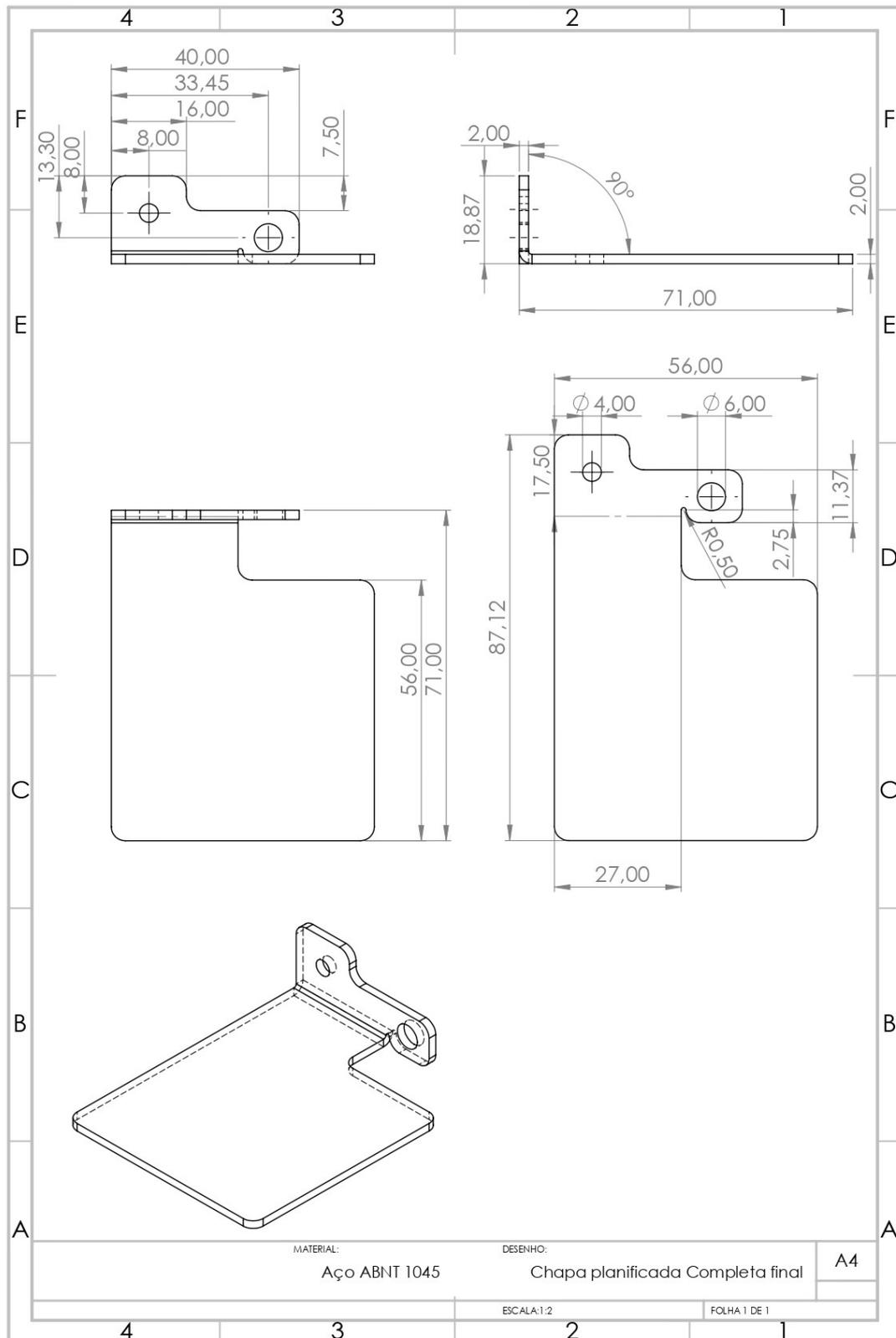
APÊNDICE 6 – HASTE DO MANÍPULO 2



APÊNDICE 7 – BASE DO MANÍPULO



APÊNDICE 8 – CHAPA DE FIXAÇÃO DO SENSOR DE MOVIMENTO NA DIREÇÃO Z



APÊNDICE 9 – SUPORTE DE FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DE FORÇA

